Atti di Convegno

SAFAP 2023

SICUREZZA E AFFIDABILITÀ DELLE ATTREZZATURE A PRESSIONE E DEGLI IMPIANTI DI PROCESSO

Brescia - 22, 23 e 24 novembre 2023

INAIL

2023



Atti di Convegno

SAFAP 2023

SICUREZZA E AFFIDABILITÀ DELLE ATTREZZATURE A PRESSIONE E DEGLI IMPIANTI DI PROCESSO

22, 23 e 24 novembre 2023

Edizione 2023

Pubblicazione realizzata da

INAIL
Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti,
prodotti e insediamenti antropici (Dit)

Editing
Francesca Ceruti
Daniela Gaetana Cogliani

per informazioni
INAIL - Dipartimento innovazioni tecnologiche
e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici
via Roberto Ferruzzi, 38/40 - 00143 Roma
dit@inail.it
www.inail.it

© 2023 INAIL
isbn 9788874848287

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nella pubblicazione, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.
Le pubblicazioni vengono distribuite gratuitamente e ne è quindi vietata la vendita nonché la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

INDICE

Sessione Progettazione e costruzione

G. Giannelli, N. Altamura, V. Galasso, A.Mele, M.F.S. De Musso
Approfondimento sulla costruzione ed esercizio in sicurezza di impianto di acqua surriscaldata alimentato dal calore dei pannelli solari, tra innovazioni tecnologiche e criticità normative..... *pag. 1*

F. Giacobbe, E.M. Carducci, F. Buti, L. Pugliese
Raccolta dei dati ed analisi statistica dei rilievi emersi nell'ambito della valutazione di conformità di attrezzature e insiemi a pressione..... *pag. 15*

L. Scano, L. Santi
Progettazione e certificazione PED di un impianto con reattore di carbonatazione operante in regime di creep-fatica..... *pag. 28*

R. Acerboni, N. Altamura, E. Bemporad, G. Gorrino, G. Vaccaro
Dalla costruzione all'esercizio in sicurezza dei recipienti criogenici fissi isolati sottovuoto. Casi studio..... *pag. 43*

F. Giacobbe, E. Bemporad
Nuovo approccio all'operatività degli organismi di valutazione della conformità alla PED alla luce dell'evoluzione delle modalità di accreditamento per scopi di notifica..... *pag. 59*

C. Puccini, L. Schoepflin, C. Ferri, S. Bonvicini, O. Borgia
Valutazione ingegneristica di alcuni aspetti del ciclo di vita degli impianti per il trasporto, lo stoccaggio e l'utilizzo di idrogeno..... *pag. 70*

V. Prete, G. Gorrino, M. Bortelli, G. Clerici, E. Portigliatti
Gruppi frigo ad ammoniaca: evoluzione della tipologia e dei criteri di progettazione dei sistemi di sicurezza in caso di rilascio..... *pag. 86*

G. Vaccaro, F. Moncini
Correlazione tra progettazione di attrezzature a pressione e normativa sugli spazi confinati..... *pag. 98*

Sessione Pericolo di incidenti rilevanti 1

G. Ancione, V. Bartolozzi, P. Bragatto, M. F. Milazzo
Esercizio sicuro di attrezzature critiche nella raffinazione di petroli ad elevato contenuto di zolfo: un approccio innovativo..... *pag. 109*

G. Ancione, P. Bragatto, R. Saitta, G. Fiumara
L'utilizzo della Realtà Aumentata per la gestione dell'invecchiamento delle apparecchiature critiche attraverso un Sensore Virtuale..... *pag. 122*

D. Di Fonzo, V. Bartolozzi, G. Augugliaro, G. Vaccaro, R. Lena
Monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento dei liner anticor in PEAD rinforzati con fibre aramidiche, utilizzati nelle applicazioni di relining delle sea lines..... *pag. 134*

M.R. Vallerotonda, A. Andolina, E. Artenio, E. Bemporad, M. Borino, D. Di Fonzo, V. Galasso, M.F. Milazzo, F. Moncini, F. Palombo, A. Pirone, T. Vairo, F. Vazzana, C. Delle Site
Piano di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento di apparecchiature e impianti negli stabilimenti Seveso..... *pag. 146*

R. Setola, A. Chittaro, A. Cestari
Security di una infrastruttura gas..... *pag. 159*

M. Del Gaudio, C. Piccolo, A. De Cristofaro, A.M. Ammendola, F. Vitobello
Attrezzature a pressione a servizio di un simulatore di ageing su collettori solari..... *pag. 170*

C. Simeoni, A. Nebbioso, A. Di Francesco, P. Iacono
Analisi congiunta dei settori "Seveso" e "Attrezzature a pressione": esame e approfondimento statistico dei dati istituzionali..... *pag. 181*

E. Tassinario, G. Franchino, M. Scelza, V. Prete, A. Urso, A. De Palma, A. Cicaterri, L. Gallerano
Caso studio per l'applicazione della metodologia RBI nell'industria chimica, in uno stabilimento con pericolo di incidente rilevante..... *pag. 193*

Sessione Analisi dei rischi

R. Setola, B. Fabiano, S. Ansaldi
Analisi dei rischi emergenti connessi con la trasformazione digitale: il progetto DRIVERS..... *pag. 203*

F. Cucè, M. Cantone, R. Nicosia, R. Acerboni, F. Boella, A. De Palma, F. Rocchi
Implementazione di un piano di gestione dei giunti flangiati imbullonati con interposta guarnizione negli impianti chimici e petrolchimici. Un approccio di "flange management" per la riduzione dei rischi..... *pag. 215*

G. Romano, A. Romano, A. Mormile
Analisi di rischio per LNG carrier in area portuale con il supporto di metodologie avanzate: approccio combinato fluidodinamica computazionale (CFD) e analisi termostrutturale (FEM)..... *pag. 227*

R. Lauri, E. Incocciati, F. Valentino, B. Pietrangeli
Applicazione di una metodologia di analisi dei rischi ad un modello di economia circolare finalizzato alla produzione di poliidrossialcanoati..... *pag. 241*

F. Pera, A. Pireddu, G. L. Amicucci, E. Del Prete
Concentrazione di idrogeno in ambiente chiuso..... *pag. 253*

D. Sallustio, F. P. Nigri
Applicazione del metodo HazOp e della tecnica LOPA per l'accettabilità del rischio di processo..... *pag. 263*

G. De Gennaro, D. Sallustio, F. Mele, A. Cocchiaro
Studio di un sistema di «manutenzione predittiva» dei componenti di caldaia di una centrale elettrica alimentata da biomassa combustibile..... *pag. 275*

C. Piccolo, M.M. La Veglia, N.N. Pagano, M. Affinita, J. Pardi, D. Salzano
Gestione del rischio nell'ambito portuale..... *pag. 289*

Sessione Pericolo di incidenti rilevanti 2

C. Delle Site, E. Artenio, I. Mazzarelli
Valutazione di analisi post incidentali in occasione di ispezioni del Sistema di Gestione della Sicurezza..... *pag. 306*

F.M. Fabiani, S.M. Ansaldi
Interferenza fra attrezzature per lavori in quota e impianti di processo negli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante..... *pag. 320*

M. R. Vallerotonda, A. Pirone
Incidenti e quasi incidenti originati da guasti elettrici negli stabilimenti Seveso..... *pag. 334*

F. Simone, P. Agnello, S. M. Ansaldi, G. Di Gravio, R. Patriarca, M. Tronci
Analisi della completezza dei report di quasi-incidente nella direttiva Seveso..... *pag. 346*

S. Carra, P. Agnello, L. Monica, C. Di Girolamo
Il ruolo dell'errore umano in incidenti e quasi-incidenti nei siti di stoccaggio di GPL: indagine ad ampio raggio tramite analisi di database incidentali..... *pag. 358*

F. Delli Quadri
Esplosione CVE ed incendio di vapori infiammabili durante svuotamento di serbatoio atmosferico – criticità delle operazioni di cambio/travaso di liquidi altamente infiammabili da serbatoio a serbatoio..... *pag. 367*

B. Conestabile della Staffa, A. Lambertini, R. Cerritelli, G. A. Zuccarello, L. Magnani
Principali elementi gestionali critici individuati nelle ispezioni dei SGS-PIR negli stabilimenti RIR ubicati nella provincia di Bologna..... *pag. 382*

A.J. Nakhal Akel, F. Simone, V. Franzoni, A. Alvino, S.M. Ansaldi, M.R. Vallerotonda, M.F. Milazzo, R. Patriarca
Un approccio sistemico per rappresentare la Direttiva Seveso III..... *pag. 396*

V. Prete, G. Gorrino, S. Manna, A. Urso, I. Briasco, P. Anesa, A. Brossa, N. Proietti, G. Odino
Studio finalizzato ad una diversificazione energetica integrata all'interno di uno stabilimento a rischio rilevante..... *pag. 409*

N. Mordà, C. De Simone
Curve di danneggiamento di SSC in ambito RIR: applicazione della teoria della dinamica aleatoria..... *pag. 418*

V. Nastasi, A. Muratore, M. Bellissimo, G. Giannelli, G. Grillone
Valutazione degli scenari di rischio a seguito di rilascio GPL negli stabilimenti con pericolo di incidenti rilevanti. Caso Studio..... *pag. 434*

Sessione Tecnologie di sicurezza

R. Marrazzo, G. Pinna, M. R. Vallerotonda, P. Bragatto
Le ispezioni di integrità attraverso la transizione digitale..... *pag. 446*

L. Di Donato, A. Ferraro, D. Freda, M. Pirozzi, L. Ricciardi, M. Venafro
De-energizzazione smart negli impianti di processo: l'esempio Eni..... *pag. 459*

L. Comel, R. Grassetti
Sistemi di rivestimento per l'ottimizzazione della durabilità e dell'efficientamento energetico di scambiatori di calore ..... *pag. 470*

G. Giannelli, G. Grillone, N. Altamura, V. Nastasi, A. Muratore
La Conduzione dei generatori di vapore: tra realtà e realtà aumentata..... *pag. 480*

F. Giannini, K. Lupinetti, M. Monti, L. Mantelli, A. Traverso, G. Augugliaro, S. Anastasi, L. Monica
Una piattaforma immersiva per il training di certificatori e conduttori di generatori di vapore..... *pag. 491*

R. Marrazzo, F. Vazzana
Misure di riorganizzazione e continuità gestionale durante la pandemia: casi studio dalle ispezioni Seveso sull'industria di processo..... *pag. 502*

A. Romanelli, A. Serra, F. Praolini, M. Geneletti
Descrizione di un ciclo energetico totalmente green alla luce delle ultime evoluzioni tecnologiche..... *pag. 511*

L. Fiorentini, F. Dattilo, F. Vazzana
La gestione del rischio nello stoccaggio energetico mediante batterie agli ioni di litio: i rischi emergenti connessi con gli impianti BESS..... *pag. 523*

D. Sallustio, F. P. Nigri
Stima della probabilità di guasto su richiesta (PFD) con le relazioni semplificate dell'IEC 61508..... *pag. 533*

F. Giacobbe, C. Mennuti, E. Pichini, G. Rondinella, G. Pinna, F. Castorina, S. Geppetti, R. Calcagni
UNI/TS 11325-13 - Sistema di monitoraggio dei dati di esercizio di attrezzature a pressione..... *pag. 545*

G. Grillone, A. Muratore, R. Sunseri, S. Festa, V. Nastasi
Accumulatori idraulici installati negli aerogeneratori: misure di sicurezza per il controllo della pressione di esercizio..... *pag. 553*

Sessione Attrezzature e insiemi a pressione

C. De Toro, G. Battista, R. Luciano, F. Viola, F. Terzo
La gestione tecnica delle apparecchiature a pressione a servizio degli aerogeneratori eolici ed assoggettate al controllo obbligatorio di verifica e dichiarazione di messa in servizio (Artt. 4 e 6 del d.m. 329/2004)..... *pag. 565*

P. Addonizio, N. Pedicini, C. Barbarossa, A. Ferraro, N. Magnelli
Azienda – Istituzione è possibile collaborare? Un caso di successo nell'ambito delle attrezzature ed impianti in pressione..... *pag. 573*

E. Pichini, I. Mazzarelli, A. Tonti, E. Artenio, L. Tonarelli
Contenitori a pressione di gas con membrature miste di materiale isolante e di materiale metallico, contenenti parti attive di apparecchiature elettriche: le disposizioni nazionali (d.m. 1.12.1980) e l'evoluzione delle norme europee..... *pag. 583*

P. Bragatto, G. Ancione, M. F. Milazzo, E. Proverbio
Gestione dell'integrità dei serbatoi di stoccaggio atmosferico: alcuni risultati recenti..... *pag. 598*

E. Di Ponzio, A. Alvino, N. Altamura, A Mele, F. Dibello
Strategie SW e tecniche HW di prevenzione dei danni metallurgici per surriscaldamento locale, di tubi catalitici in forni per steam reforming, correlato con le fasi di avvio e spegnimento del forno..... *pag. 610*

M. Giacobbo, R. Bordignon, F. Sudiro
La procedura di Lockout-Tagout (LOTO) applicata agli impianti di processo: una metodologia sicura per l'isolamento delle energie durante le fasi di manutenzione, riparazione, ispezione..... *pag. 626*

J. Ferino, I. Mazzarelli, A. Meleddu, E. Pichini
Caratterizzazione e accettazione di materiali in composito per attrezzature a pressione: setup della procedura sperimentale e primi risultati..... *pag. 638*

E. M. Ognibeni, L. Iori, P. Beber, A. Turri, M. Oss, G. Pilzer
Serbatoi GNL orizzontali, problematiche e soluzioni ..... *pag. 650*

A. Rotondaro, A. F. Cosentini
Recipienti a pressione per stoccaggio gpl. Analisi mediante approccio statistico sui malfunzionamenti rilevati nelle installazioni e considerazioni sulla valutazione di conformità nei serbatoi soggetti a modifica..... *pag. 662*

Sessione Meccanismi di danno e interventi di riparazione

A. Falla, A. Blanco, G. Mugnieco, C. Percolla
La riparazione di attrezzature a pressione con materiali compositi a distanza di undici anni dall'emanazione del Decreto-Legge 22 giugno 2012, n. 83, "Misure urgenti per la crescita del Paese". Aspetti tecnici e normativi alla luce delle riparazioni eseguite e dei risultati ottenuti..... *pag. 675*

F. Rossetti, N. Palumbo, A. Serra, P. Tria
Riparazione e rimessa in esercizio del generatore di vapore a tubi d'acqua Macchi appartenente al Gruppo 3 della Centrale A2A Lamarmora di Brescia..... *pag. 687*

A. Antonini, A. Alvino, A. Tonti, S. Matera, O. Tassa
Evoluzione microstrutturale degli acciai grado 91 e 92. Lo studio dei precipitati come strumento per valutarne l'invecchiamento e la resistenza allo scorrimento viscoso..... *pag. 697*

A. Blanco, A. Falla, A. Lillo, A. Russo, R. Acerboni, F. Boella, A. De Palma, G. Saputi, E. Artenio
La riparazione di tetti di serbatoi utilizzando materiali compositi: aspetti tecnici e di sicurezza..... *pag. 713*

E. Pichini, I. Mazzarelli, M. Panciatichi, M.M. Radici, C. Bolgiani
Analisi di difetti su generatori di vapore: rilievi di cricche trasversali, esame delle cause, provvedimenti adottati per l'esercizio in sicurezza..... *pag. 722*

F. Piccini, L. Scano
Valutazione dell'integrità strutturale di tubazioni in pressione: il caso di una condotta forzata realizzata nel 1940..... *pag. 735*

M. Giuffrida, C. Grazioli, M. Platania
Forni reforming catalitico: fenomeni di degrado su tubazioni in acciaio hp grade.... *pag. 747*

P. Traini, N. Palumbo, F. Rossetti
L'approccio analitico per la sostituzione, mediante riparazione, di una tubazione munita di liner interno di protezione, facente parte di un sistema di desurriscaldamento vapore: l'esperienza di un Generatore di Vapore a Recupero di un Ciclo Combinato..... *pag. 760*

Sessione Rischio NaTech

F. Geri, S. Pantanella, C. Raimondo, E. Sampino, S. Tafaro
Importanza della "preparedness" nella gestione degli eventi Natech nell'ambito degli stabilimenti PIR..... *pag. 774*

S. Campana, R. Iovene, R. Vasile
Valutazione del rischio NaTech di tipo idrogeologico per le condotte di trasporto di sostanze pericolose..... *pag. 788*

M. Salimbeni, M. De Angelis, V. Vezzari, M. Ciucci
Valutazione e gestione del rischio NaTech da sisma per serbatoi atmosferici a tetto galleggiante in stabilimenti industriali con Pericolo di Incidente Rilevante..... *pag. 798*

A. Marino, G. J. O'Reilly, P. Dubini, F. Dacarro, S. Mascetti
Navigazione Risk-Aware in impianti industriali PIR a rischio di incidenti NaTech..... *pag. 810*

G. Romano, S. Colombo, F. Chillè, D. Ardovino
Analisi NaTech Sisma per impianti a rischio di incidente rilevante: applicazioni operative con il supporto della tecnologia "Scan3D to FEM"..... *pag. 822*

A. Marino, G. Berardo, A.C. Lio, Mariano Ciucci
Valutazione e gestione del rischio NaTech da Eventi Idrogeologici..... *pag. 833*

A. Muratore, V. Nastasi, C. Delle Site, G. Grillone, G. Giannelli
Metodo ad indice per la stima del rischio alluvioni per le attrezzature a pressione.... *pag. 845*

Sessione Diagnostica

D. Bogomolov, E. Burda, S. Mariani, M. G. Gaeta, N. Testoni, C. Mennuti, G. Augugliaro, A. Marzani
Approccio basato sull'entropia del segnale per la stima dei tempi di arrivo delle emissioni acustiche nel monitoraggio delle apparecchiature a pressione..... *pag. 858*

M. Reggiani
La nuova UNI EN ISO 9712:2022 – Prove non distruttive – Cosa è cambiato?..... *pag. 861*

G. Augugliaro, F. Brini, L. Bruzzo, C. Mennuti, P. Quaresima
Detezione di difetti artificiali in tubazioni in polietilene ad alta densità..... *pag. 876*

L. Ricciardi, R. Marchetto, E. Schiesaro
Tecnologia a raggi cosmici per la ricerca di perdite di idrocarburi da condotte interrate..... *pag. 885*

D. Sallustio, E. Mazzi, S. Larghi
Economizzatore a bassa temperatura (LLTE), una soluzione flessibile nella transizione nergetica..... *pag. 895*

C. Di Girolamo, S. Carra, L. Monica, A. Tonti
Criteri di applicabilità di metodologie alternative o complementari alla prova idraulica su attrezzature a pressione..... *pag. 905*

A. Fiodo, A. Alvino, E. Di Ponzio, D. Lega, A. Antonini
Le principali forme di danno nei forni di steam reforming: caratterizzazione e metodologie diagnostiche..... *pag. 916*

A. Mura, A. Rubinato, M. De Martin, M. Bonetto, D. Realdon
Utilizzo di dispositivi mobili per l'attività di monitoraggio dello stato degli impianti.... *pag. 931*

C. Andenna, D. Lega, C. Mennuti
Metodi di stima della vita residua di tubazioni in polietilene: una review ..... *pag. 942*

F. Rossetti, N. Palumbo, A. Serra, D. Airoldi
Verifica d'integrità decennale di un generatore di vapore a tubi d'acqua al servizio della linea 1 del Termoutilizzatore A2A di Brescia..... *pag. 953*

N. Pedicini, M. Faiella, C. Liccardo, L. Tassan Pagnochit, A. Cocchiaro
Analisi dei meccanismi di corrosione di un surriscaldatore di vapore all'interno del termovalorizzatore di Acerra..... *pag. 963*

R. Cozza
Fattore di danno da creep secondo le metodologie di riferimento API 581..... *pag. 971*

Sessione Strumenti per la sicurezza

F. Ceruti, D.G. Cogliani, C. Delle Site, A. Nebbioso
Repository Safap: il database degli articoli..... *pag. 983*

F. Pastoret, G. Gorrino, S. Manna, A. Urso, S. Spinoso
Centrale di teleriscaldamento alimentata a combustibile solido. Caso studio..... *pag. 995*

M.P. Gatto, C. De Toro, I. Campitelli, R. Di Leo, G. Selvestrini
Incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose: rilevazione ed identificazione chimica *on site*..... *pag. 1004*

G. Vaccaro, M. Torres, F. Moncini, D. Di Fonzo, F.P. Sofia
Installazione ed esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 13 m^3..... *pag. 1017*

M.N. Tini, M.A. Palazzi, A. Dubbini, P. Grilli, G. Cristiano, E. Manna
L'integrazione dell'analisi dei rischi derivanti da attacchi informatici nel Sistema di Gestione della Sicurezza degli Stabilimenti RIR ..... *pag. 1029*

F. Petrosino, G. Marino, I. Campitelli, O. Di Donato
Criticità operative nella gestione degli impianti di aria compressa del Centro Italiano Ricerche Aerospaziali..... *pag. 1046*

R. Mercurio, A. Mercurio, G. Paglione, A. Turi, G. Piva
Analisi e individuazione delle cause che hanno prodotto lo scoppio di un generatore di vapore a tubi da fumo a fondo bagnato..... *pag. 1054*

N. Palumbo, E. Bemporad, G. Gurnari
Background delle formule per il calcolo della deformazione di membrature di attrezzature a pressione..... *pag. 1067*

P. Addonizio, E. Opromolla, N. Pedicini, L. Tassan Pagnochit, A. Baccichet, A. Cocchiaro
Analisi descrittiva e verifica sperimentale delle catene di sicurezza (safety loops) a protezione di un generatore di vapore del termovalorizzatore di Acerra..... *pag. 1083*

L. Carta, M. Maurino
Innovazione tecnologica negli impianti di riscaldamento ad Acqua Calda: Telegestione degli impianti con sistemi di espansione a vaso prepressurizzato e Sistemi di sicurezza integrativi telegestiti..... *pag. 1096*

R. Modestino, M. P. Gatto, G. Aversa, D. Strollo, G. Floridia
Aria compressa nell'azienda vitivinicola, usi innovativi per le produzioni di alta qualità..... *pag. 1108*

R. Iovene, R. Vasile, A. Morettini
Rischio Legionella in impianti per la produzione di acqua calda ad uso sanitario..... *pag. 1117*

M. del Gaudio, R. Modestino, C. Festa, J. Pardi
Sicurezza nell'utilizzo di serbatoi GPL..... *pag. 1130*

S. Anastasi, F. Ceruti, P. De Cillis, C. La Gioia, R. Modestino, V. Mordanini, A. Nebbioso, L. Ricciardi
Il Technical Repository: modello di gestione digitale di flussi documentali relativi alle attrezzature a pressione..... *pag. 1144*

M. Babbo, P. Morucchio, R. Acerboni, J. Longo, G. Saputi
Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro d.lgs. 81/08 art. 71 e del d.m. 11 aprile 2011. Panoramica relativa alle denunce delle attrezzature/insiemi a pressione. Operatività nelle attività di riqualificazione periodica, formazione e informazione delle figure della sicurezza..... *pag. 1156*

D. Sallustio, G. De Gennaro, G. Ianziti, M. Guerrieri
Analisi di stabilità dei sistemi di sicurezza: confronto tra le normative EU ed extra EU..... *pag. 1162*

C. Grazioli, P. Sergi
Esercizio di generatori di vapore con almeno 45 anni di vita: considerazioni su casi studio..... *pag. 1174*

R. Iovene, R. Vasile, C. Pagano, M. Di Giacomo
Centrale Termoelettrica di Gissi (CH) – HP Interstage DSH..... *pag. 1186*

A. Carro, M. Quadalti
Intervento di riparazione di un debenzinatore per olio alimentare.....*pag. 1198*

F. Ciancetta, S. Mari, G. D'Ovidio, R. Iovene, R. Vasile
Progettazione preliminare e analisi dei rischi associati alla diffusione delle tecnologie a celle a combustibile nel settore dei trasporti, finalizzati allo sviluppo di una Hydrogen Valley..... *pag. 1206*

V. Prete, A. Urso, A. De Palma, S. Manna, A. Colautto, L. Viarengo, M. Fischetti, G. Odino
Revamping di un impianto di compostaggio con produzione di biogas ed adozione di un sistema di Upgrading per minimizzare gli autoconsumi elettrici e massimizzare il tasso di recupero del metano..... *pag. 1219*

A. Carro, M. Quadalti
Interventi di riparazione in generatori di vapore con fumi particolarmente aggressivi (termovalorizzatori, biocombustibili)..... *pag. 1228*

P. Amodeo, G. Argento, F.P. Sofia, G. Sunseri
I sistemi di protezione dalle scariche atmosferiche negli edifici e costruzioni contenenti depositi di sostanze esplosive o nei quali si lavorano o si manipolano sostanze esplosive..... *pag. 1236*

La gestione tecnica delle apparecchiature a pressione a servizio degli aerogeneratori eolici ed assoggettate al controllo obbligatorio di verifica e dichiarazione di messa in servizio (Artt. 4 e 6 del d.m. 329/2004)

C. De Toro[1], G. Battista[1], R. Luciano[1], F. Viola[1], F. Terzo[2]

[1] Inail - Uot di Avellino
[2] IVPC

1. Premessa

Il comparto eolico può ancora considerarsi un'industria "nuova" se si considera che, rispetto ai comparti classici metalmeccanici dell'automotive o siderurgico, presenta degli ambienti che per caratteristiche intrinseche delle macchine installate e le relative ubicazioni e modalità di utilizzo sono poco conosciuti. Ciò implica spesso interpretazioni non sempre univoche in relazione alla gestione di tali apparecchiature, sia in termini documentali che di attività di verifica da parte dei Soggetti Coinvolti; tale problematica riguarda ad esempio gli aerogeneratori di grande taglia, che presentano tra i loro componenti anche dei contenitori in pressione (accumulatori idraulici) che lavorano sugli impianti idraulici per assorbire e rilasciare liquidi sotto pressione.
In relazione quindi alle attività di verifica previste dal DM 329/2004 per tali attrezzature, il lavoro intende valutare il sistema delle misure di sicurezza, protezione e controllo adottato negli impianti eolici, in relazione alle condizioni di installazione e di esercizio e tenendo conto di tutte le possibili situazioni di rischio, incluso il rischio di incendio.

Keywords: aerogeneratore, accumulatore, verifiche.

2. Introduzione

Il principio di base per lo sfruttamento dell'energia eolica è apparentemente semplice: la forza del vento mette in movimento le pale opportunamente sagomate e calettate ad un perno centrale (mozzo) che le costringe a compiere un moto rotatorio attorno all'asse del perno stesso; al mozzo sono collegati vari dispositivi (freni, moltiplicatori, ecc.) che trasmettono il moto ad un generatore elettrico. La corrente elettrica così generata viene trattata in una serie di ulteriori dispositivi (gruppi di rifasamento, banchi di condensatori, trasformatori elevatori, ecc.) che la rendono compatibile con la rete di trasporto a cui, mediante un apposito cavidotto, è collegato l'aerogeneratore.

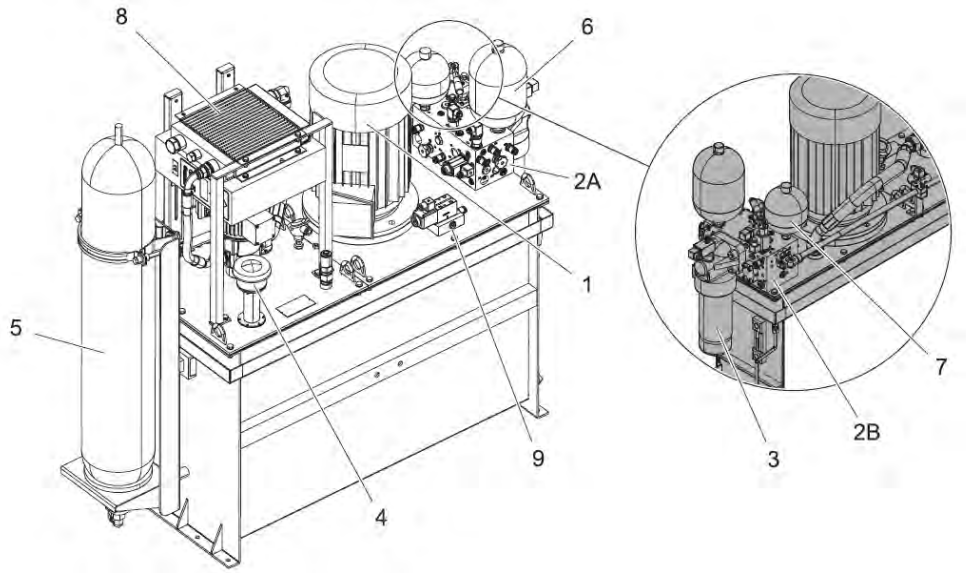
3. Elementi costitutivi di un aereogeneratore

- **Navicella**: la parte principale della macchina, che contiene il generatore, i moltiplicatori di giri, i freni, gli attuatori del "pitch control" e del "yaw control"
- **Rotore**: l'insieme che comprende il gruppo pale, il mozzo, l'albero lento e il meccanismo del "pitch control"
- **Torre di sostegno**: oltre a tenere in posizione la macchina, ha il compito di assorbire le vibrazioni provenienti dalla navicella, evitando che le stesse vadano a scaricarsi eccessivamente sul basamento e sulle fondazioni
- **Sistemi di misura**: i dispositivi (anemometri e indicatori di direzione del vento), generalmente montati sulla sommità della navicella, che servono a configurare correttamente la macchina a seconda della direzione e dell'intensità del vento
- **Sistemi di controllo**: i dispositivi che, monitorando continuamente una serie di parametri della macchina, sovrintendono al corretto funzionamento e permettono una rapida messa in sicurezza in caso di avaria
- **Sistemi accessori**: sistemi opzionali che permettono un uso migliore della macchina (sistemi di telecontrollo, montacarichi e ascensori per il personale di manutenzione, ecc.).

Come accennato in premessa, gli aerogeneratori eolici di grande taglia presentano tra i loro componenti anche degli accumulatori a sacca che fungono da contenitori in pressione (accumulatori idraulici) con carica di azoto separata dal fluido utilizzato mediante appunto una sacca. Sono studiati per essere impiegati sugli impianti idraulici e realizzati esclusivamente per assorbire e rilasciare liquidi sotto pressione, motivo per cui negli aerogeneratori eolici sono installati sul sistema idraulico con due principali scopi:

- lancio delle pale attorno al loro asse longitudinale (variazione dell'angolo di inclinazione);
- azionamento del freno a disco sull'albero in caso di over-speed.

Il sistema è costituito da un serbatoio di olio da cui pesca una pompa ad ingranaggi, condivisa dal Sistema di inclinazione e dal Sistema di frenaggio. Il flusso della pompa oscilla intorno al valore di 48 l/min a seconda del carico corrente e della temperatura dell'olio.
L'avvio della pompa è controllato da un segnale proveniente dal trasmettitore di pressione; quando la pompa è spenta, il sistema è tenuto sotto pressione dagli accumulatori montati sul gruppo pompa idraulica e montati nel mozzo.
La figura 1 illustra l'ubicazione dei componenti descritti in precedenza.



1	Motore
2A	Blocco del sistema di orientamento
2B	Blocco del freno del rotore e del sistema di cambio di passo
3	Filtro dell'olio
4	Filtro dell'aria
5	Accumulatore di pressione del gruppo idraulico
6	Accumulatore di pressione del sistema di orientamento
7	Accumulatore di pressione del freno
8	Sistema di raffreddamento
9	Elettrovalvola di messa in carica

Figura 1

Gli accumulatori sono precaricati con azoto a 143 bar. Quando il controller VMP rileva che la pressione scende al di sotto di 180 bar, la pompa si avvia, per fermarsi di nuovo al raggiungimento dei 200 bar.
L'olio passa dalla pompa all'accumulatore attraverso il filtro ad alta pressione; sul circuito è presente una valvola di ritegno che impedisce il flusso inverso dell'olio quando la pompa si arresta.
La valvola di sicurezza scarica il sistema nel caso in cui la pompa non si arresti a 200 bar ma continui a pompare olio nel sistema. In caso di incendio o altro riscaldamento esterno degli accumulatori, la valvola impedisce l'aumento della pressione del gas e dell'olio.
La valvola a spillo viene utilizzata per scaricare l'olio dagli accumulatori al momento del controllo di pressione di precarica o in caso di riparazione sul sistema.
Il serbatoio è dotato di un interruttore di livello combinato e un sensore; l'interruttore di livello riduce la fuoriuscita e garantisce che la pompa non funzioni senza olio in caso di perdite, il sensore controlla la temperatura dell'olio nel serbatoio. L'allarme si attiva se la temperatura dell'olio supera i 65 °C (limite massimo di temperatura) per evitare che una temperatura troppo elevata possa

ridurre la durata di vita dell'olio e delle guarnizioni e aumentare l'usura della pompa.

4. Unità rotante

Il sistema di inclinazione viene alimentato dalla pompa idraulica tramite un raccordo rotante situato dietro il cambio, attraverso i tubi nel cambio e l'albero principale al sistema di passo nel mozzo.
L'unione rotante è di tipo a doppio canale con una linea di pressione e una linea di ritorno.
Il giunto rotante è dotato di cuscinetti idrostatici, che richiedono una pressione costante di almeno 5 bar in entrambi i canali per fornire una quantità sufficiente di olio per i cuscinetti.
La valvola di ritegno a molla assicura che la pressione nella linea di ritorno non sia inferiore al livello minimo di 5 bar.

5. Sistema di Pitch (Regolazione del passo delle pale)

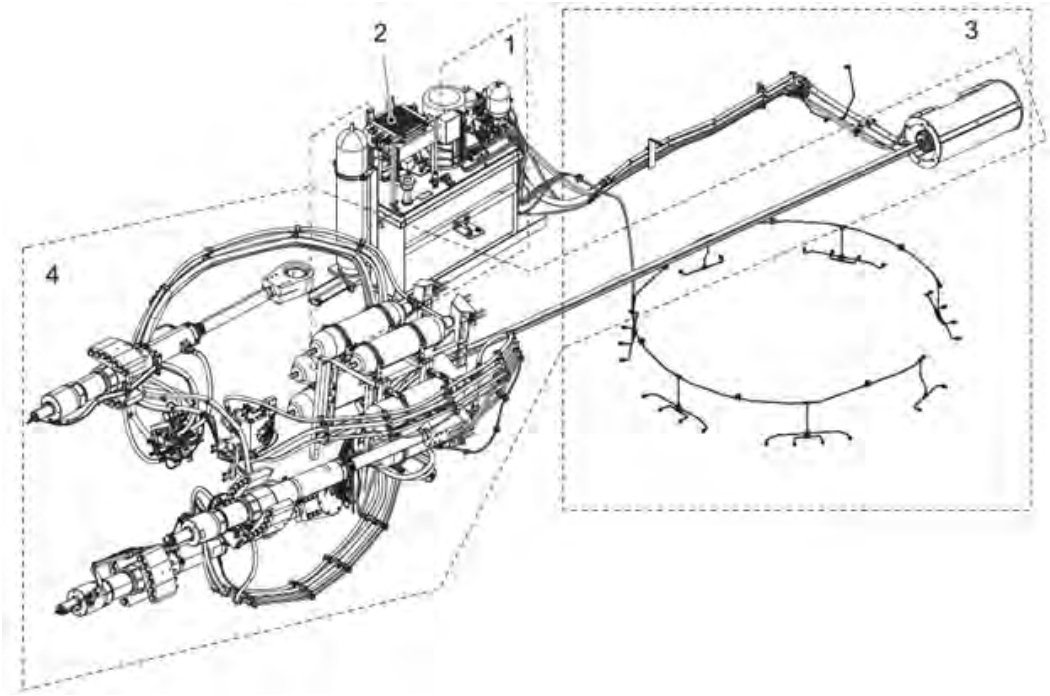
La turbina è dotata di un sistema di inclinazione per ogni pala e un corrispondente distributore tor- block che facilita la fornitura di olio ai sistemi di beccheggio.
I sistemi di inclinazione e il blocco distributore si trovano nel mozzo. Il blocco distributore è dotato di filtro con valvola di by-pass e contametri visivi ed elettrici. La supervisione della caduta della pressione del filtro è attiva solo per temperature del serbatoio dell'olio superiori a 30 °C.
Il blocco distributore è collegato al raccordo rotante sul retro del cambio tramite due tubi flessibili e ulteriori due tubi (linea di pressione e linea di ritorno) nella cavità dell'albero principale.
Ogni sistema di inclinazione è costituito da un cilindro collegato al mozzo e con l'asta del pistone collegata a un perno di manovella sulla radice della lama. Le valvole che facilitano il funzionamento del cilindro del passo sono bloccate su un blocco distributore, imbullonato direttamente sul cilindro.
Ogni sistema di inclinazione è in grado di inclinare la lama corrispondente in qualsiasi posizione nell'intervallo compreso tra 5 e 90 gradi.
In caso di ARRESTO DI EMERGENZA, la pompa si spegne immediatamente e il piumaggio d'emergenza viene eseguito solo dall'olio dell'accumulatore. L'olio disponibile nell'accumulatore è sufficiente per un colpo pieno.
Ciascuna pala è collegata individualmente a un accumulatore a passo di emergenza, che è montato nell'hub.
L'accumulatore del passo di emergenza è un contenitore in acciaio con una membrana di gomma montata all'interno, precaricato con azoto a una determinata pressione. Quando l'olio viene pompato nell'accumulatore, la membrana di gomma è compressa. Se la membrana di gomma viene perforata, il gas fuoriesce, quindi l'accumulatore non soddisfa più i suoi requisiti. Per motivi di sicurezza, la turbina eolica esegue i test sui tre accumulatori.

Dopo un certo periodo di tempo, la turbina eolica eseguirà un test degli accumulatori per accertare che siano soddisfatti determinati requisiti.

6. Sistema frenante

L'impianto frenante viene alimentato dall'impianto di pompaggio attraverso la valvola di riduzione della pressione
L'accumulatore assicura che la frenata possa essere eseguita senza pressione.
L'elettrovalvola impedisce all'olio di rifluire nel serbatoio dell'olio quando è attivo.
Il pressostato viene utilizzato per controllare la pressione nell'accumulatore del freno.
Il pressostato controlla la pressione del freno, anche se il freno viene rilasciato.
La valvola di massima pressione protegge il sistema frenante da una pressione troppo elevata in caso di guasto.
Quando le elettrovalvole sono messe in funzione, l'elettrovalvola impedisce il flusso di olio e rilascia olio dalle pinze dei freni al serbatoio dell'olio, liberando quindi il freno.
La pressione viene mantenuta dall'accumulatore e dalla valvola di riduzione della pressione.

7. Schemi e disegni del sistema idraulico



1	Gruppo idraulico
2	Sistema di condizionamento termico
3	Circuito idraulico
4	Sistema di cambio di passo

Figura 2

Dispositivi di sicurezza

La pressione massima di funzionamento del circuito dell'olio è sempre limitata a 220 bar, al raggiungimento di tale valore, infatti, le pompe di pressurizzazione si fermano. Nel remoto caso di mancato arresto delle pompe di circolazione, la presenza di una valvola di sfioro tarata a 245 bar garantisce che la pressione all'interno del circuito rimanga sempre molto al di sotto della pressione di bollo delle attrezzature a pressione (la valvola di sfioro non è certificata quale dispositivo di sicurezza).

Alla luce di quanto sopra, così come previsto:

- dall'art. 17 del 21/05/74
- dal capitolo 5.1 della norma EN 764-7, armonizzata PED
- dal capitolo 6.1.3 della norma 764-7, armonizzata PED
- dalla direttiva PED al punto 2.10
- dall'articolo 9 del DM 329/04,

si può omettere di installare la valvola di sicurezza a protezione dell'apparecchio in quanto la pressione non potrà mai eccedere quella massima di progetto.

Per quanto riguarda il rischio di superamento dei limiti massimi di pressione dovuti ad incendio, considerando che l'olio contenuto nel circuito oleodinamico ha una temperatura massima di funzionamento pari a 65 °C (mentre la sua temperatura di accensione è 320 °C), che inneschi di fiamma sono altamente improbabili e che sostanze facilmente infiammabili non sono presenti nelle vicinanze delle attrezzature a pressione, si può ritenere che l'incendio sia un evento ragionevolmente non prevedibile.

Manutenzioni

Di seguito le ispezioni e/o manutenzioni previste:

- **FREQUENZA ANNUALE**
  - Controllo dei livelli dell'olio
  - Cambio dell'olio in funzione dell'analisi annuale dell'olio
  - Sostituzione del filtro dell'aria sull'unità di potenza idraulica
  - Sostituzione cartuccia del filtro antiparticolato dell'aria
  - Sostituzione del filtro in gel di silice nel filtro dell'aria
  - Controllo perdite nell'albero principale
  - Controllo perdite in navicella
  - Controllo della pressione del manometro digitale sul pannello di servizio (deviazione massima 5 bar)
  - Verifica della pompa (Pressione di avvio 180 BAR, Pressione di arresto 200 bar)
  - Controllo della valvola di sicurezza (Temperatura minima dell'olio 40 °C) 250 +0/-10 bar
  - Pressione di precarica nell'accumulatore sulla centralina idraulica 143 (+0/-5) bar a 20 °C

- Pressione di precarica nell'accumulatore dei freni da 1,4 litri (Turbina 50 Hz: 28 ±1 bar a 20 °C. – Turbina 60 Hz: 22 ±1 bar a 20 °C).

- **FREQUENZA SEMESTRALE**
  - Controllo perdite nell'albero principale
  - Controllo perdite in navicella

- **FREQUENZA BIENNALE**
  - Cambio del filtro di pressione in linea

8. Conclusioni

La costruzione degli accumulatori a sacca utilizzati nel funzionamento delle pale eoliche ricade nella Direttiva PED e l'Utente deve provvedere alla denuncia di messa in servizio secondo quanto previsto dall'art.1 del D.M. 329 del 01.12.2004.
L'art. 71 del Decreto Legislativo 81/08 e s.m.i., prevede gli obblighi che il Datore di Lavoro deve rispettare allo scopo di garantire la messa in sicurezza delle attrezzature di lavoro fornite ai propri lavoratori.
Ogni attrezzatura, durante il proprio ciclo funzionale, è soggetta dunque ad una serie di verifiche e controlli mirati ad accertarne la sicurezza di funzionamento ed il corretto utilizzo; la prima di queste verifiche è di competenza dell'INAIL (che eventualmente può delegarla al Soggetto Abilitato indicato dall'Utente); successivamente restano assoggettate al regime delle verifiche periodiche successive.
Assume dunque grande importanza la verifica in loco del Tecnico INAIL su questo tipo di impianto.
Dal confronto tra i Tecnici di varie Unità Operative Territoriali INAIL e i Tecnici dell'azienda interessata, si è cercato di individuare una interpretazione normativa univoca da adottare in occasione della verbalizzazione di tali attrezzature.
Si tratta, come descritto in precedenza, di accumulatori "autoprotetti", aventi pressione massima di progetto 330 bar, superiore ai valori massimi di esercizio della pompa di alimentazione del circuito oleodinamico pari a 310 bar (con picco max. 320 bar), valori desumibili dalla documentazione con le caratteristiche e le curve di funzionamento della pompa.
È stata condotta un'accurata valutazione dei rischi che esclude la possibilità di sovrappressione all'interno dell'attrezzatura, sia per carico della pompa che per incendio esterno.
Da ciò consegue che è possibile omettere l'installazione della valvola di sicurezza a protezione dell'apparecchio in quanto la pressione non potrà mai eccedere quella massima di progetto.
La verifica in sede del Tecnico porterebbe ad una valutazione complessiva accurata dell'impianto, in grado di avallare tale ipotesi; molto spesso, infatti, a valle delle pompe idrauliche è presente una valvola di sicurezza a protezione del circuito

idraulico il cui funzionamento può essere verificato da quadro in sede di controllo, facendo partire le pompe con interdizione del pressostato e rilevando la pressione di apertura della valvola di protezione.

Bibliografia

[1] Direttiva 97/23/CE;

[2] Direttiva 2014/68/UE;

[3] dm 93 del 25/2/2000;

[4] dm 329 del 01/12/2004;

[5] dl 81 del 09/04/2008.

Azienda – Istituzione è possibile collaborare? Un caso di successo nell'ambito delle attrezzature ed impianti in pressione

P. Addonizio[1], N. Pedicini[1], C. Barbarossa [1], A. Ferraro[2], N. Magnelli[3]

[1]Inail - Uot di Napoli
[2]TUV Austria Italia S.r.l
[3]SAIPEX S.r.l.

Abstract

L'articolo si propone di illustrare un caso di studio relativo alla collaborazione tra un importante azienda metalmeccanica e l'UOT INAIL di Napoli che hanno messo in campo un significativo sforzo per il raggiungimento e la certificazione della compliance normativa dell'impianto per il trattamento termico in autoclave di componenti polimerici.
L'impianto, oggetto di un importante ampliamento, è costituito da una stazione di generazione di azoto, serbatoi di stoccaggio del gas e due autoclavi per il trattamento termico. Per traguardare in modo rapida ed efficiente il raggiungimento della compliance del nuovo impianto sono state messe in servizio nuovamente le attrezzature nuove e preesistenti e per alcune è stata effettuata contestualmente la verifica di integrità. Quest'ultimo step è stato conseguito grazie all'adozione della tecnica delle Emissioni Acustiche (EA) associata alle prove in pressione.
Sin da subito si è cercato di sviluppare un approccio integrato tra la realtà pubblica e quella privata, che, grazie alla condivisione delle informazioni e alla pianificazione delle attività, permettesse di raggiungere l'obiettivo nel migliore dei modi nel minor tempo possibile.
L'obiettivo finale è stato pertanto traguardato grazie all'unione dei seguenti fattori:
• La grande disponibilità e competenza degli enti di controllo coinvolti nelle verifiche che hanno saputo affiancare i tecnici garantendo il loro appoggio in ogni fase del progetto.
• Il forte commitment da parte dei referenti aziendali e della manutenzione di stabilimento.
• La metodologia adottata per lo svolgimento dei collaudi previsti dalle verifiche.

Keywords: emissioni acustiche, verifiche di legge, autoclavi, messa in servizio.

1. Introduzione al progetto

All'interno degli stabilimenti produttivi le attrezzature in pressione rappresentano uno tra asset piu' importanti dal punto di vista gestionale e tecnico.
Esse, infatti, introducono un fattore di rischio non trascurabile all'interno degli stabilimenti e necessitano pertanto di un robusto sistema di gestione che sfrutti le competenze specifiche da parte degli operatori ed un ben strutturato sistema informativo per la conduzione ed il controllo in continuo degli impianti.
Per molte realta' industriali le attrezzature in pressione rappresentano un asset strategico di grande valore economico fondamentale per garantire la business continuity aziendale.
Il mantenimento ed il rispetto della conformita' normativa di tali attrezzature coinvolge, all'interno del loro ciclo di vita, numerosi attori economici, pubblici e privati, che garantiscono il rispetto degli obblighi legislativi e l'eservizio in sicurezza delle stesse.
Questi attori sono operatori, tecnici, funzionari, ecc. facenti parte di organizzazioni diverse (INAIL, ASL, ecc) e prendono parte al ciclo di vita di tale tipologia di attrezzature di lavoro in diverse fasi e momenti, in alcuni casi interagendo e/o influenzando gli altri soggetti che hanno a che fare con l'asset stesso. Si utilizzano e si generano dati ed informazioni, si prendono decisioni operative/tecniche, si mettono in campo azioni, professionalità, analisi, ecc.
Siamo di fronte, quindi, ad una vera e propria rete caratterizzata da flussi informativi, decisioni condivise, azioni con conseguenze operative, tattiche e strategiche che rendono gli impianti e le attrezzature in pressione dei veri e propri *asset* industriali che richiedono un sistema di gestione in accordo a tale visione.

2. Il contesto operativo

La realtà metalmeccanica con cui l'UOT INAIL di Napoli ha collaborato per la regolarizzazione dell'attrezzatore opera nei settori tecnologici avanzati come l'Aerospazio, la Difesa e la Sicurezza.
Data la vastità delle tecnologie utilizzate nei vari siti produttivi, è da considerarsi un utilizzatore intensivo di impianti in pressione in quanto per esigenze di processo vi sono applicazioni in cui sono necessari impianti con caratteristiche rilevanti di volumi, pressioni e portate. Tali attrezzature, oltre a rappresentare un rischio per la sicurezza all'interno degli impianti, rappresentano strumenti chiave per il processo produttivo; a tal fine è necessario il corretto esercizio in ottemperanza alle normative e gli obblighi di legge.
In particolare, lo stabilimento presso il quale sono installate le attrezzature analizzate produce parti strutturali dei velivoli (fusoliera, impennaggi, etc.).
Questo tipo di attività implica complesse lavorazioni meccaniche, la fabbricazione di pannelli di grosse dimensioni e complessi assemblaggi strutturali.

Uno dei passaggi fondamentali della produzione di componenti per Aerostrutture è il trattamento termico di componenti che è effettuato all'interno di autoclavi di grandi dimensioni.
All'interno delle autoclavi sono inseriti i componenti per la polimerizzazione di adesivi e resine termoindurenti, che sono processati sotto il contemporaneo effetto di temperature e pressioni.
In particolare, l'autoclave opera attraverso cicli termici di durata variabile che sottopongono i componenti a temperature di circa +190 °C e pressioni variabili fino ad un massimo di 5 barg.
All'interno delle autoclavi sono presenti termocoppie per la rilevazione della temperatura che monitorano l'andamento del processo.



Figura 1. Esempio di autoclavi di processo

L'impianto di trattamento materiali polimerici dello stabilimento è stato oggetto di un importante revamping per l'introduzione di una nuova autoclave e di un nuovo impianto di generazione Azoto per ampliare la capacità produttiva e garantendo la possibilità di effettuare cicli con azoto anziché sfruttare solo aria.
Con l'aggiunta di una nuova fonte di alimentazione, costituita dall'impianto di generazione azoto, per l'autoclave esistente si è configurata la necessità di eseguire una revisione dell'analisi dei rischi relativa alle nuove attrezzature ed a quelle attrezzature esistenti che sono state mantenute all'interno del ciclo produttivo.
È stato quindi necessario affrontare il raggiungimento della conformità normativa per n°30 attrezzature che per semplicità possiamo suddividere in attrezzature "nuove" ed "esistenti".

Il dettaglio è presente nella seguente Tabella:

Tipo di attrezzatura	# Attrezzature Esistenti	# Attrezzature Nuove
Autoclave di Trattamento	1	1
Serbatoi di stoccaggio pre-trattamento	3	-
Attrezzature impianto di generazione aria compressa	3	-
Attrezzature Impianto di generazione N_2	-	5
Tubazioni	16	1
TOTALI	**23**	**7**

Tabella 1. Tipo numerosità attrezzature coinvolte

Nell'esecuzione dell'attività vi è stata quindi la necessità di programmare:

- N° 29 di Dichiarazioni e Verifiche di messa in Servizio (d.m. 329/04 Art 4 e 6).
- N°20 Verifiche di integrità (d.m. 329/04 Art 12).
- N°1 Dichiarazione di messa in servizio (d.m. 329/04 Art 5 e 6).

L'obiettivo è stato pertanto quello di conciliare le necessità della produzione con l'esecuzione in sicurezza delle numerose verifiche ispettive e delle prove di integrità sulle attrezzature.

Le attività non hanno potuto inoltre trascurare il fattore relativo alla criticità dimensionale di alcune attrezzature in quanto la verifica di integrità è stata condotta su:

- N°3 Serbatoi di stoccaggio verticali da 78.000 litri con uno sviluppo in altezza superiore ai 10 m;
- N°1 Autoclave da 273.000 litri con diametro di oltre 5m e lunghezza oltre 20m;

In aggiunta, per l'inserimento della nuova autoclave, si è reso necessario procedere alla modifica di una tubazione e quindi a procedere con la ricertificazione della stessa, con conseguente coinvolgimento di un organismo notificato, e all'esecuzione di nuova messa in servizio.

3. Tecnologia utilizzata: metodo NDT dell'Emissione Acustica EA

Fondamentale è stata poi la metodologia adottata per lo svolgimento dei collaudi previsti dalle verifiche di integrità dei principali sistemi in pressione dello stabilimento oggetto di collaudo. L'adozione della tecnica delle emissioni acustiche EA, associata alle prove in pressione, ha permesso infatti sia di svolgere i collaudi in pressione garantendo elevati standard di sicurezza grazie all'approccio diagnostico ad elevato valore aggiunto che di analizzare il 100 % della superfice metallica dell'oggetto sottoposto al collaudo (saldature e bocchelli compresi).

Le ispezioni previste dall'art 12 del D.M. 329/04 in occasione dell'integrità decennale sulle attrezzature in pressione, cosiddette tradizionali, consistono in:

• Esame visivo interno ed esterno;

• Esame spessimetrico delle membrature;

- Eventuali ulteriori controlli si rendessero necessari a fronte di situazioni evidenti di danno;
- In caso di non ispezionabilità interna od esterna, integrazione del suddetto piano con prova idraulica a 1.125 volte la pressione di progetto o prova pneumatica a 1.10 volte la pressione di progetto (previa predisposizione di necessarie misure di sicurezza).

Pertanto, come chiaramente indicato nella normativa, qualora l'attrezzatura non risulti completamente ispezionabile, anche nei riguardi della sicurezza (cfr. rischio dell'ispezione visiva interna in ambienti confinati e con carenza di ossigeno) e/o possieda rivestimenti interni o esterni inamovibili o che la cui rimozione possa comportare rischi per l'integrità delle membrature (autoclavi con paratia interna, oppure serbatoio tumulato/interrato o provvisto di rivestimento in materiale fire-proofing), l'utilizzatore/proprietario può integrare i controlli previsti e precedentemente riportati con una prova di pressione idraulica o pneumatica. La prova di pressione pneumatica è effettuabile previa predisposizione da parte dell'utilizzatore/proprietario di opportuni e complessi ma doverosi provvedimenti di cautela ai sensi del D.Lgs 81/08.

Considerando quanto prescritto dall'art. 12 del D.M. n° 329 del 01/12/2004) e analizzando le caratteristiche strutturali delle attrezzature in gioco (autoclave e serbatoi verticali), è risultato impossibile eseguire l'esame visivo interno.

In sostituzione della visita interna è stato impraticabile anche eseguire una prova idraulica (1,125 x Pprogetto) per ragioni dovute al peso dell'acqua e la necessità della completa asciugatura per procedere con la rimessa in esercizio delle attrezzature.

E' risultato inoltre difficile anche la valutazione dell'esecuzione di una semplice prova pneumatica non monitorata (1,1 x Pprogetto) in quanto bisognava necessariamente pensare all'implementazione di misure di sicurezza molto onerose per mitigare i rischi connessi (POF:e probability of failure e COF: conseguenze of failure) con le pressurizzazioni non monitorate.

Allo stesso modo, considerando sempre quanto prescritto dall'art. 12 del D.M. n° 329 del 01/12/2004) e analizzando le caratteristiche strutturali dei serbatoi di stoccaggio aria/azoto, è risultato complicato considerare di eseguire un esame visivo interno in quanto si sarebbe dovuto realizzare un ponteggio operando in spazi confinati, operazioni molto complicate dal punto di vista operativo.

TÜV AUSTRIA ITALIA, in forza dei numerosi test EA nonché dell'esperienza acquisita nel mondo nello svolgimento dei collaudi di integrità sulle attrezzature in pressione con metodologia EA, propone di integrare il suddetto piano di controlli con una prova di pressione pneumatica monitorata con Emissione Acustica fino al raggiungimento una pressione massima pari a 1,1 volte la pressione di progetto.

Il controllo con Emissione Acustica (EA), associato alla prova pneumatica, è un metodo di valutazione e monitoraggio non invasivo che permette di individuare e localizzare in anticipo i punti deboli in macchine, recipienti a pressione e atmosferici.

Il metodo dell'Emissione Acustica si basa sull'acquisizione, analisi e valutazione dei segnali proveniente dalla membratura della struttura metallica testata durante una fase di pressurizzazione controllata tale da garantire una sollecitazione lenta e continuativa, nonché un tempo di reazione dell'operatore adeguato all'attività registrata sulla struttura analizzata. I sensori EA, scelti in base alle caratteristiche della struttura da analizzare (diametro, lunghezza e tipologia di rivestimento) vengono applicati sulla superficie a distanze prefissate, sulla base del profilo di attenuazione del segnale. Il controllo con Emissione Acustica fornisce un'analisi istantanea completa sulla struttura e sull'integrità dell'oggetto testato. Per l'individuazione e la localizzazione di eventuali danneggiamenti, il controllo con Emissione Acustica ricorre a un principio fisico classico (onde elastiche generate dal materiale sottoposto a sollecitazione) che consiste nell'acquisizione ed elaborazione dei dati attraverso un sofisticato modello tecnologico.



Figura 2. Progettazione del test con metodo dell'emissione acustica EA eseguito su un'autoclave

4. Avvio del Progetto

Per permettere il raggiungimento dell'obiettivo finale è stato necessario coinvolgere in prima persona i Responsabili di Stabilimento di Produzione e Manutenzione, il Direttore e gli Ingegneri dell'UOT INAIL di Napoli ed i tecnici specialisti coinvolti nelle fasi operative, di analisi e redazione documentale.
Inizialmente è stato effettuato un Kick Off Meeting di coordinamento con tutti i soggetti sopracitati al fine di concordare e definire i seguenti punti:

1. L'approccio da adottare per la nuova messa in servizio delle attrezzature esistenti (in quanto il vecchio impianto risultava certificato come insieme).
2. Le attività da condurre su ogni attrezzatura oggetto di verifica di integrità ed in particolare sull'autoclave ed i serbatoi di stoccaggio verticali.
3. Una condivisione di massima della pianificazione.
4. L'identificazione dei responsabili di ciascuna attività.

5. La definizione dei metodi di comunicazione e aggiornamento tra gli attori coinvolti.

5. Pianificazione

L'insieme dei punti sopra elencati ha portato a definire la pianificazione delle attività cosi' come riportato in Tabella 2.

Giorno	Attività	CND
1	Predisposizione Serbatoio di Stoccaggio-1 78m^3	EVE, UT
2	Esami EA e Prova pneumatica Serbatoio di Stoccaggio-1	EA
3	Riconsegna Serbatoio di Stoccaggio-1 Predisposizione Autoclave 248 m^3	-
4	Predisposizione Autoclave 248 m^3	EVE, UT
5	Predisposizione Autoclave 248 m^3	EVE, UT
6	Esami EA e Prova Pn. Autoclave	EA
7	Riconsegna Autoclave alla produzione	-
8	Predisposizione Serbatoio di Stoccaggio-2 78m^3	EVE, UT
9	Esami EA e Prova pneumatica Stoccaggio-2	EA
10	Riconsegna Serbatoio di Stoccaggio-2 Predisposizione Serbatoio di Stoccaggio-3 78m^3	EVE, UT
11	Esami EA e Prova pneumatica Serbatoio di Stoccaggio-3	EA
12	Riconsegna Serbatoio di Stoccaggio-3	-
13	Verifiche attrezzature impianto aria	EVI, EVE, UT
14	Verifiche attrezzature impianto aria	EVI, EVE, UT
15	Verifiche attrezzature impianto aria	EVI, EVE, UT
16	Verifiche tubazioni	, EVE, UT
17	Verifiche tubazioni	, EVE, UT
18	Back up	
19	Back up	
20	Chiusura Attività	

EVE: Esame visivo Esterno, **EVI** Esame Visivo Interno, **UTs**: Esame spessimetirco ad ultrasuoni, **EA** Emissioni Acustiche,

Tabella 2. Pianificazione delle attività

La quantità delle attrezzature in pressione, i tempi e la complessità tecnica hanno richiesto la creazione di un team di lavoro composto dalle seguenti figure professionali:

- UOT INAIL Napoli:
  - o Responsabile amministrativo apparecchi a pressione.
  - o N°2 Tecnici di riferimento per attrezzature/tubazioni in pressione.
- Azienda:
  - o N°1 responsabili manutenzione meccanica.

- N°2 tecnici specializzati nell'esecuzione delle prove CND degli apparecchi in pressione (fornitore esterno).
- N°2 tecnici specializzati nell'esercizio degli apparecchi in pressione (fornitore esterno).

6. Risultati ottenuti

La calendarizzazione condivisa nel paragrafo precedente mette in evidenza come siano state eseguite tutte le attività in soli 20 gg con una perdita di produzione minima (le attività di collaudo vere e proprie sono state concentrate nei weekend in modo tale da sfruttare al massimo il fermo impianto programmato per i fine settimana e, di conseguenza, non interferire sulla produttività dell'impianto stesso). Si riporta qui di seguito il dettaglio delle verifiche effettuate su ciascuna attrezzatura, dal quale se evince con facilita' quali attrezzature sono state soggette a verifica di integrita' e quali alla sola messa in servizio.

Attrezzatura	PS [barg]	V [l]	EVE	EVI	UTs	EA	Pr.Pn
Autoclave	12	273.000	X	-	X	X	X
Serb di Stoccaggio 1	36	78.000	X	-	X	X	X
Serb di Stoccaggio 2	36	78.000	X	-	X	X	X
Serb di Stoccaggio 3	36	78.000	X	-	X	X	X
Serb Aria Compressa	11.5	2.000	X	X	X	-	X
Disoleatore 1	16	30	X	X	X	-	X
Disoleatore 2	16	30	X	X	X	-	X
Insieme Nuova Autoclave	12	382.000	X	-	-	-	-
Serb Aria per Azoto	11.5	3.000	X	-	-	-	-
Serb Azoto	11.5	4.000	X	-	-	-	-
Accumulo Azoto	11.5	3.000	X	-	-	-	-
Disoleatore 3	16	75	X	-	-	-	-
Disoleatore 4	16	75	X	-	-	-	-
Gen Azoto 1	11	940	X	-	-	-	-
Gen Azoto 2	11	940	X	-	-	-	-
Tubazioni HP #9	36	200 (DN)	X	X	X	-	X
Tubazioni LP #6	12	300 (DN)	X	X	X	-	X
EVE: Esame visivo Esterno, **EVI** Esame Visivo Interno, **Uts**: Esame spessimetirco ad ultrasuoni, **EA** Emissioni Acustiche, **Pr.Pn**: Prova Pneumatica							

Tabella 3. Principali dati delle prove sulle attrezzature

I tecnici EA, con livello AT3 e AT2 (in accordo alla norma UNI EN ISO 9712), hanno analizzato istante per istante l'andamento della prova EA e hanno effettuato un'attenta analisi delle indicazioni rilevate: follow-up Inspection on-site - follow-up Inspection off-line.

L'esecuzione del Test EA è stata presieduta anche dal Tecnico INAIL al fine dell'ottenimento del verbale di verifica periodica. Quest'ultimo ha garantito l'esatto svolgimento del collaudo nel pieno rispetto della norma UNI EN 14584:2013 e ai sensi del D.M. 329/04; di concerto con il tecnico EA - sia prima dell'inizio della pressurizzazione che durante l'esecuzione della stessa - si è altresì accertato dell'esistenza e della funzionalità di tutti i dispositivi di controllo e sicurezza a corredo dello specifico impianto (manometro, valvole di sicurezza ecc.) e, a fine ispezione, ha emesso i relativi verbali di verifica di integrità e di funzionamento della specifica attrezzatura in pressione.
La pressione massima raggiunta durante il test EA (pressione di fine Test EA) è risultata strettamente correlata sia alla pressione di progetto che alla temperatura di progetto della struttura in pressione analizzata. I risultati dei collaudi EA realizzati sono stati molto soddisfacenti e l'analisi dei segnali registrati durante lo svolgimento di tali prove non ha evidenziato nessuna significativa indicazione di difetto tale da inficiare l'esercizio delle attrezzature oggetto di analisi.

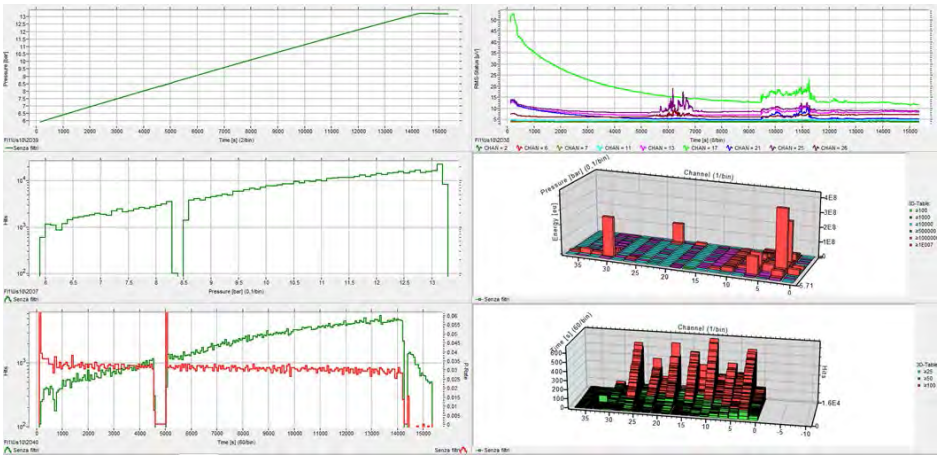


Figura 3. Parametri caratteristici rilevati durante il test EA eseguito sull'autoclave

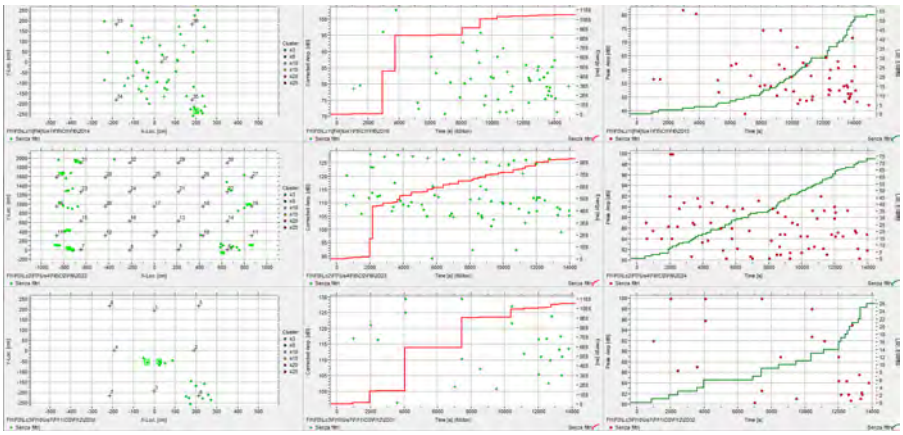


Figura 4. Localizzazione di segnali rilevati durante il test EA eseguito sull'autoclave

7. Conclusioni, opportunità e sviluppi futuri

L'attività descritta presenta un successo nel raggiungimento della conformità delle attrezzature dato dalla collaborazione di più attori in un'azione corale e coordinata.
Inoltre, si sottolinea come la metodologia di verifica adottata, Emissioni Acustiche, hanno permesso di analizzare le attrezzature di maggiori dimensioni, quindi quelle con un indice di rischio più elevato, in completa sicurezza. Tale metodologia ha permesso di monitorare in continuo con estrema precisione l'evoluzione della prova in pressione pneumatica e assolvere quindi a quanto richiesto dall'art 12 del DM 329/04.
Le Emissioni Acustiche si affermano pertanto come una metodologia valida e rigorosa nell'affrontare quelle attrezzature che, per ragioni dimensionali e di criticità di esercizio, presentino difficoltà nell'adozione delle tecniche "standard" delle verifiche di integrità e in cui verifiche interne e prove idrauliche o pneumatiche non monitorate rappresentano un ostacolo all'analisi strutturale.

8. Bibliografia

[1] D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81 (Testo coordinato con il D.Lgs. 3 agosto 2009, n. 106) - Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro: Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.

[2] D.M. 1° dicembre 2004, n. 329 - Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.

[3] D.M. 11 aprile 2011 - Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché' i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo.

[4] Decreto Legislativo 25 febbraio 2000, n. 93 – In attuazione dell Direttiva Europea 97/23/Ce in materia di attrezzature in pressione.

[5] Linee guida ISPESL: L'esame visivo sulle attrezzature in pressione ai fini delle verifiche in costruzione ed esercizio. Edizione 2006.

[6] INAIL: Esame visivo e spessimetria - Procedura sperimentale di verifica delle attrezzature a pressione. Disegno di linee guida e strumenti operativi. Edizione 2012.

[7] N. Altamura, A. Nuzzo, D. Manca, C. Policastro, C. Barbarossa - Emissione Acustica: Soluzione altamente tecnologica ad impatto zero, Convegno SAFAP 2018, Bologna 27-29 nov. 2018.

Contenitori a pressione di gas con membrature miste di materiale isolante e di materiale metallico, contenenti parti attive di apparecchiature elettriche: le disposizioni nazionali (d.m. 1.12.1980) e l'evoluzione delle norme europee

E. Pichini[1], I. Mazzarelli[2], A. Tonti[1], E. Artenio[1], L. Tonarelli[3]

[1] Inail - Dit
[2] Inail - Uot di Milano
[3] ISCD GmbH

Abstract

La progettazione e la costruzione di alloggiamenti per apparecchiature ad alta tensione sono escluse dalla Direttiva PED. Mentre in Europa i fabbricanti di interruttori per media e alta tensione si orientano prevalentemente su standard europei IEC-CEN-CENELEC, in Italia il riferimento normativo per la fabbricazione di contenitori a pressione di gas con membrature miste di materiale isolante e metallico, contenenti parti attive di apparecchiature elettriche, rimane "ancorato" al d.m. 1.12.1980 e alle specifiche tecniche riportate nella Raccolta ISPESL rev. 1995 regola VSR.8.
Il progresso tecnologico, la crescente sensibilità per le problematiche ambientali che orienta verso l'utilizzo di gas meno inquinanti, l'esperienza maturata negli anni da fornitori e costruttori, ha permesso di ottimizzare e standardizzare i processi produttivi. La sfida per il futuro è quella di implementare criteri di progettazione e costruzione sempre più evoluti e attuali, per superare politiche conservative dell'Italia che ancora chiede, per la verifica della stabilità delle membrature alle pressioni di progetto, coefficienti di sicurezza più alti di quelli previsti dagli standard europei.
La memoria si propone di illustrare le principali differenze tra gli standard europei e le disposizioni nazionali relativamente ai criteri previsti per la verifica della stabilità di comparti e membrature a pressione per interruttori per alta e media tensione, in particolare riguardo la scelta di "idonei" coefficienti di sicurezza, anche al fine di riconoscere ed evidenziare i punti di forza e di debolezza dei diversi approcci, nonché delineare prospettive e percorsi che permettano all'attuale regolamentazione italiana di evolversi al passo con l'innovazione tecnologica e con le regole del mercato unico. Il lavoro è sinergico con il percorso che alcuni autori conducono da qualche anno in progetti di ricerca applicata sui criteri di accettazione dei materiali compositi impiegati nella costruzione di questo particolare tipo di attrezzature a pressione.

Keywords: interruttori per media e alta tensione, verifiche di stabilità, prove di scoppio, coefficienti di sicurezza.

1. Introduzione

I contenitori a pressione per parti attive di interruttori ad alta tensione sono esclusi dalla PED[1]; in Italia la loro progettazione e costruzione è regolamentata dal d.m. 1.12.1980 modificato con successivo d.m. 10.09.1981 e il loro esercizio non è soggetto a regime di verifiche obbligatorie, fermo restando la dotazione di idonei dispositivi di protezione.
Si tratta di recipienti caratterizzati da volumi, pressioni e temperature di progetto e di impiego sempre piuttosto contenute. Tuttavia, essendo frequentemente installati in impianti e reti di distribuzione di energia elettrica di rilevanza strategica, essi rappresentano una tipologia di attrezzature a pressione che merita attenzione soprattutto riguardo ai materiali con cui vengono realizzati comparti e membrature.
Per le sue ottime caratteristiche isolanti, il gas maggiormente utilizzato nel sezionamento di correnti ad alta tensione è l'esafluoruro di zolfo (SF_6), a valori di pressione variabili a seconda della tensione elettrica d'esercizio ma comunque quasi mai oltre i 10 bar; tuttavia l'SF_6 è un gas serra, con effetti sull'ambiente migliaia di volte più negativi dell'anidride carbonica, e una permanenza in atmosfera di più di 3000 anni. Per questo motivo l'Europa ha previsto forti limitazioni al suo impiego e sta spingendo i costruttori verso l'utilizzo di gas o miscele meno inquinanti che tuttavia, per garantire caratteristiche dielettriche equivalenti a quelle dell'SF_6, richiedono di essere compressi a valori di pressione sensibilmente maggiori.
La necessità di costruire contenitori di parti attive di apparecchiature ad alta tensione progettati per pressioni di gas maggiori rispetto agli attuali design ha avviato la revisione della normativa europea di riferimento e un confronto serrato tra i tecnici del settore elettrico con quelli del settore attrezzature a pressione. I principali obiettivi sono mirati a valutare prospettive di convergenza tra le strutture normative nazionale ed europea facendo tuttavia tesoro dei pregi della regolamentazione italiana.

2. Tipologie di apparecchi

In base alla funzione dell'apparecchio - interrompere, distribuire, trasformare, misurare correnti ad alta tensione - e dunque dei componenti attivi e passivi che costituiscono il circuito elettrico, si determinano in conseguenza differenti caratteristiche geometriche dei contenitori e delle membrature a pressione (Fig.1): si va dall' 'armadio in acciaio' di modesta capacità, al 'blindato in lega di alluminio' di centinaia di litri; da apparecchi con un solo tubo isolatore in fibra di vetro installato verticalmente, ad apparecchi 'multipolo' con isolatori – cilindrici o troncoconici - di diametri e lunghezze diversi montati con assi obliqui o orizzontali; da elementi la cui stabilità alla pressione di progetto può essere facilmente verificata mediante calcolo, ad altri che per materiale e/o geometria possono solo essere verificati mediante prova di scoppio. Sovente, all'interno degli apparecchi e per isolare comparti, sono inseriti elementi realizzati con polimeri pressofusi – per lo più resine

[1] Direttiva 2014/68/UE – Articolo 1 "Ambito di applicazione" Punto 2. Sono esclusi dall'ambito di applicazione della presente direttiva: [omissis] lettera l) gli alloggiamenti per apparecchiature ad alta tensione come interruttori, dispositivi di comando, trasformatori e macchine rotanti.

epossidiche – secondo forme variabili a seconda delle esigenze specifiche e dotati di inserti metallici che permettono i necessari collegamenti elettrici o accoppiamenti meccanici.



Figura 1. Apparecchi contenenti parti elettriche attive

Attualmente la maggior parte delle apparecchiature viene riempita - per pressioni che variano dai pochi bar a circa una decina - di esafluoruro di zolfo[2] (SF_6), gas di sintesi che grazie alla sua notevole elettronegatività riesce a catturare elettroni liberi. L'SF_6 è dunque caratterizzato da elevata rigidità dielettrica (circa 3 volte quella dell'aria a pressione atmosferica) e altrettanto elevata capacità di estinzione (quenching) degli archi elettrici che scoccano, o potrebbero scoccare, tra punti ad alta differenza di potenziale dielettrico (Fig.2).

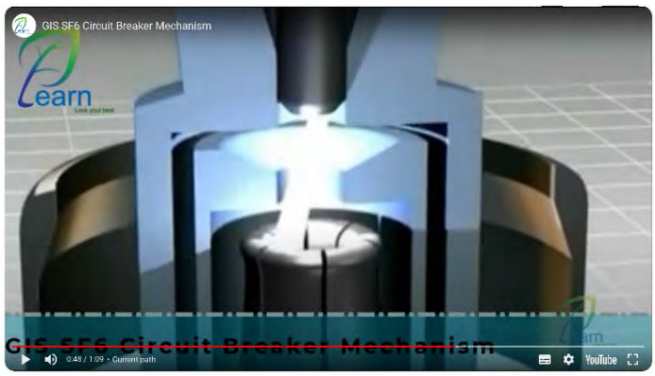


Figura 2. Arco elettrico

[2] Per approfondimenti sull'SF_6 consultare per esempio la pagina:
https://echa.europa.eu/it/registration-dossier/-/registered-dossier/13559

Dopo eventuali scariche l'SF_6, in condizioni ideali, recupera le sue caratteristiche dielettriche, è inodore, trasparente, non tossico, non infiammabile, non ossida né corrode i metalli, ed è stabile fino a temperature ben oltre i 400 °C. Esso dunque rappresenta una soluzione ad alte prestazioni, sicura e a suo modo economica per l'isolamento elettrico e l'interruzione di corrente. Tuttavia, sebbene relativamente raro nell'atmosfera, l'SF_6 ha un GWP[3] di 23.500 ed è il gas serra più potente che si conosca.
Dal punto di vista impiantistico, si tratta per lo più di apparecchi precaricati, protetti da dispositivi quali valvole di sicurezza o dischi di rottura, tarati a pressioni in genere comprese tra 1,1 e 1,6 volte la pressione di progetto: in tal modo si evita che i dispositivi di sicurezza si aprano e il gas fuoriesca durante la fase di carica dell'apparecchio, e che durante l'esercizio la pressione del gas contenuto nell'apparecchio possa aumentare – per riscaldamento dovuto a un guasto da arco elettrico - fino a valori tali da compromettere la stabilità dei recipienti (in ogni caso verificata fino a pressioni almeno pari a 1,5 volte la pressione di taratura del dispositivo di sicurezza).
Dal punto di vista elettrico, si distinguono in apparecchi per media tensione (tensioni nominali superiori a 1 kV e fino a 52 kV compresi) e per alta tensione (tensioni nominali oltre i 52 kV).
Dal momento che la capacità dielettrica del gas di riempimento è tanto maggiore quanto più il gas è compresso, a parità di altre dimensioni la pressione di progetto di un apparecchio è tanto maggiore quanto più è alta la tensione elettrica che deve gestire: in genere, la pressione di progetto di apparecchi per media tensione è ben al di sotto dei 5 bar, mentre quella degli apparecchi per alta tensione è oltre i 6 bar ma raramente oltre i 10 bar.
Per quanto riguarda le temperature di esercizio, in genere si tratta di quelle ambientali: raramente ipotizzate al di sotto dei -25 °C; solo in previsione di condizioni o per funzioni particolari, ipotizzate attorno ai +70 °C.
Ai fini PED, l'SF_6 è classificato come fluido del gruppo 2; pertanto se si dovesse applicare la PED, in base alla tabella 2 dell'allegato III:

- gli apparecchi per media tensione (pressioni di progetto fino a 5 bar) rientrerebbero nella categoria di rischio I per volumi entro gli 80 litri, nella II per volumi oltre i 80 litri e fino ai 400 litri, nella III per volumi oltre i 400 litri, nella IV praticamente mai;
- di contro molti apparecchi per alta tensione già per pressioni di progetto attorno agli 8 bar e volumi oltre i 375 litri rientrerebbero in IV categoria.

Sempre se si dovesse applicare la PED, le resine utilizzate per la fabbricazione di componenti quali diaframmi, boccole, morsettiere, così come i compositi di resina rinforzata con fibra di vetro utilizzati per la fabbricazione di tubi isolatori, nonché tutti gli accoppiamenti (inserti, incollaggi) tra resine e metalli, dovrebbero essere sottoposti ad approvazione particolare, in quanto non esistono a oggi norme armonizzate di impiego.

[3] Global Warming Potential: il potenziale di riscaldamento globale di un gas serra esprime il suo contributo all'effetto serra rispetto all'effetto della CO_2 il cui potenziale - preso come riferimento - è pari a 1

3. Il d.m. 1.12.80 e la genesi della VSR.8.B.2

Esclusi dall'ambito di applicazione della PED, in Italia la costruzione e l'impiego di contenitori a pressione di gas con membrature miste di materiale isolante e di materiale metallico, contenenti parti attive di apparecchiature elettriche trovano riferimento normativo nel d.m. 1.12.80 - modificato con successivo d.m. 10.09.81 – e nella specifica tecnica 'Adempimenti per la costruzione e il rilascio del certificato del prototipo dei contenitori di cui al d.m. 1° dicembre 1980', pubblicati rispettivamente come Punto 1 e Punto 2 del Capitolo 8.B della VSR.

Alcune considerazioni sulla regola tecnica VSR.8.B sono già state presentate al Safap del 2021 [1]. Riteniamo qui interessante ripercorrerne la genesi poiché in essa trovano ragione quelle scelte che oggi l'Europa ci chiede di confrontare con suoi differenti orientamenti.

3.1. Materiali autorizzati all'impiego

Negli anni '70 alcuni settori industriali (medicale ed elettrico), iniziarono a fare uso di materiali isolanti, diversi dall'acciaio. Già l'edizione del 1978 della Raccolta M dedica il fascicolo M.13.A alle resine polimetilmetacriliche utilizzate nella costruzione di camere iperbariche: affinché ne sia autorizzato l'impiego, una resina deve dare prova di resistere a rottura a pressioni pari almeno a 10 volte quelle d'esercizio, con un minimo di 22 bar.

A seguito della pubblicazione della VSR.8, nell'Addenda alla Raccolta M del gennaio 1981 il Capitolo M.13.D riporta le 'Disposizioni per l'ammissione all'impiego della porcellana nella costruzione di involucri isolanti di apparecchiature elettriche a pressione di gas': sono richieste prove volte a verificare i valori dichiarati dal fabbricante relativi a peso specifico, porosità, durezza, resistenza a trazione, flessione, compressione, urtoflessione. Inoltre, l'involucro deve superare una selezione alle brusche variazioni di temperatura e, in fase di omologazione del prototipo, una prova a pressione spinta fino a rottura dove il valore della pressione minima di scoppio è determinato secondo la regola al punto 2.b) della VSR.8.B.2.

La raccolta PRFV dedicata alle plastiche rinforzate con fibre di vetro utilizzabili per fabbricare membrature a pressione fino a 5 bar, e dove per altro i coefficienti di sicurezza richiesti per le prove di scoppio erano altissimi ($X \geq 7{,}5$), viene pubblicata solo nel dicembre 1982.

Dunque negli anni immediatamente successivi alla pubblicazione del d.m. 1.12.1980, la regola al punto 2.b) della VSR.8.B.2. per 'membratura in materiale isolante' intendeva membrature in 'porcellana' o 'resina', ma certo non in 'materiale composito' quale le resine rinforzate con fibre di vetro con cui vengono oggi diffusamente realizzati i cilindri isolatori.

3.2. Prove a pressione spinte fino a rottura per la certificazione del prototipo

Quella stessa regola trova una 'illustre precedente' nel fascicolo della VSR dedicato alle 'Prove sperimentali per recipienti a pressione costruiti per materiali metallici', Capitolo VSR.6.A 'Prove a pressione spinte fino a rottura'.

La prova a pressione spinta fino a rottura è ammessa solamente per quelle membrature o soluzioni costruttive per le quali non sono previste o alle quali non sono applicabili le

disposizioni per la verifica di stabilità contenute nella VSR (forme geometriche non calcolabili).
La pressione minima P_r da raggiungere nella prova deve soddisfare la seguente regola:

(1) $$P_r \geq \frac{R}{f} \cdot \frac{s_2}{s_1} \cdot \frac{K}{Z} \cdot P$$ [cfr. VSR.6.A.2.]

essendo

R il carico unitario di rottura del materiale con cui è fabbricata la membratura in prova,
f la sollecitazione massima ammissibile riferita alle condizioni di progetto,
s_2 lo spessore nominale della membratura in prova incrementato della tolleranza positiva, oppure lo spessore effettivo rilevato sperimentalmente nella membratura in prova,
s_1 lo spessore risultante dal disegno di progetto, diminuito della tolleranza di fabbricazione e degli eventuali sovraspessori imposti da esigenze di impiego e di lavorazione,
K un fattore di qualità, posto pari a 1,2 per materiali in getti, a 1 per altri materiali,
Z il modulo di efficienza dei giunti saldati eventualmente presenti nella membratura in prova,
P la pressione massima di esercizio dichiarato in progetto.

Nella verifica alle condizioni di progetto, la sollecitazione massima ammissibile f viene determinata applicando adeguati coefficienti di sicurezza X ai valori minimi delle caratteristiche meccaniche del materiale utilizzato [cfr. d.m. 21.11.72 art. 4 e art. 5]. Pertanto, se riferita al valore minimo tabellare R_m della resistenza a trazione a temperatura ambiente del materiale con cui è fabbricata la membratura, la si può scrivere come

$$f = \frac{R_m}{X}$$

Conseguentemente la (1) diventa

(2) $$P_r \geq X \cdot \frac{R}{R_m} \cdot \frac{s_2}{s_1} \cdot \frac{K}{Z} \cdot P$$

con la richiesta che qualora il prodotto $X \frac{R}{R_m}$ risulti minore di 5, sia posto pari a 5.
La memoria storica del progresso tecnologico e della conoscenza di processi e affidabilità dei prodotti purtroppo si è persa. Sembra tuttavia evidente che per i tecnici dell'ANCC (Associazione Nazione per il Controllo della Combustione) una membratura la cui stabilità non fosse verificabile mediante calcolo, potesse ritenersi sicura solo se, sottoposta a prova di pressione spinta fino a rottura, avesse resistito fino a una pressione almeno pari a 5 volte la pressione massima di esercizio dichiarato in progetto.
La pressione minima di scoppio viene ancora aumentata in misura della minore affidabilità attribuibile a membrature realizzate mediante getto ($K = 1{,}2$) o con presenza di saldature non controllate al 100%.
Il rapporto tra s_2 e s_1 normalizza lo spessore della membratura in prova allo spessore minimo consentito in progetto per le membrature di cui la membratura in prova è campione.

Il rapporto tra R e R_m normalizza la resistenza a trazione della colata di materiale con cui è realizzata la specifica membratura in prova al valore minimo consentito per le colate di materiale con cui sono realizzate le membrature di cui la membratura in prova è campione.
Proprio i fattori s_2/s_1 e R/R_m del campione in prova garantiscono che l'esito positivo della prova a pressione spinta fino a rottura possa essere esteso per similitudine a tutte le membrature di produzione, incrementando il valore della pressione minima di scoppio in misura proporzionale rispetto a quanto la membratura in prova è più resistente di eventuali altre con spessore o resistenza meccanica pari ai minimi ammissibili.

3.3. Il d.m. 1.12.80 e le regole per la determinazione della pressione minima di scoppio

Il d.m. 1.12.80 richiede che:

- ciascun tipo di membratura in materiale isolante del prototipo [...] venga sottoposto separatamente a prova idraulica spinta fino a rottura; la pressione di rottura dovrà risultare non inferiore a 4,25 volte la pressione dichiarata in progetto [art. 3.3.];
- ciascun tipo di membratura in materiale metallico del prototipo per la quale non sia prevista una specifica disposizione per la verifica della stabilita [...] venga sottoposta [...] a prova di pressione spinta a rottura che dovrà essere non inferiore a 4,25 volte la pressione dichiarata in progetto [art. 3.3.1.].

Per determinare il valore della pressione minima di scoppio in modo tale che risultasse non inferiore a 4,25 volte la pressione di progetto e che il suo esito – sperabilmente positivo – potesse essere esteso a tutte le membrature rappresentate dall'unita in prova, i tecnici dell'ISPESL (Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro) ripresero la regola della VSR.6.A così come scritta in (2) e la tradussero nelle regole:

(3) $$P_r \geq 4{,}25 \cdot \frac{R}{R_m} \cdot P$$ [cfr. VSR.8.B.2.2.b)]

(4) $$P_r \geq 4{,}25 \cdot \frac{R}{R_m} \cdot \frac{s_2}{s_1} \cdot P$$ [cfr. VSR.8.B.2.2.c)]

Si tenga presente che nel 1980 gli unici materiali isolanti contemplati nella Raccolta M (aggiornamenti del 1982 all'edizione del 1978) erano le porcellane. In considerazione della particolare natura del materiale e del processo tecnologico di fabbricazione, già la Raccolta M obbligava il fabbricante a effettuare su tutti gli esemplari prove di selezione alle brusche variazioni di temperatura volte a eliminare quegli involucri che nascondessero all'interno del loro spessore delle difettosità. Inoltre, gli involucri isolanti in porcellana erano privi di saldature. Pertanto nella (3) dedicata a membrature realizzate in materiale isolante, il fattore *K* e il modulo di efficienza dei giunti *Z* non avrebbero avuto significato.
Viceversa nella (4) dedicata a membrature in materiale metallico, rinunciarono a incrementare il valore della pressione minima di scoppio in misura della minore affidabilità attribuibile a membrature realizzate mediante getto o con presenza di saldature non controllate al 100%, limitandosi a inserire i fattori che normalizzano la resistenza meccanica e lo spessore della membratura in prova rispetto ai valori minimi consentiti.

3.4. Prove di routine

Ottenuta la certificazione del prototipo il d.m. 1.12.80 impegna il costruttore a certificare per la produzione l'esecuzione di:

- una prova idraulica spinta fino a rottura su una membratura in materiale isolante per ogni lotto omogeneo costituito da un massimo di 100 esemplari, con esito positivo se la pressione di rottura risulta non inferiore a 4,25 volte la pressione di progetto;
- una prova idraulica su ciascuna membratura, a pressione pari a 3 volte la pressione di progetto per le membrature in materiale isolante e a 1,5 volte la pressione di progetto per quelle in materiale metallico;
- una prova pneumatica su ciascun contenitore assiemato, a pressione pari a 1,1 volte quella di progetto.

4. Il quadro normativo europeo

Con l'entrata in vigore della PED, mentre in Italia il d.m. 1.12.80 rimane riferimento di Legge per la costruzione e l'omologazione di recipienti a pressione di gas contenenti parti attive di apparecchiature elettriche, negli altri Stati membri regolamenti omologhi – seppure esistenti – vengono superati a favore di standard europei specifici del settore elettrico dove la classificazione principale tra i diversi contenitori avviene in base alle tensione elettrica di alimentazione delle parti attive che racchiudono.

Così, mentre il d.m. 1.12.80 tratta allo stesso modo tutti i contenitori a pressione di gas (con volume maggiore di 25 litri e pressione maggiore di 0,5 bar), gli standard europei richiedono differenti requisiti distinguendoli, in base alla tensione nominale, in media tensione (superiore a 1 kV e fino a 52 kV compresi) e alta tensione (oltre i 52 kV).

4.1. Lo standard europeo per la media tensione

Nel 1996 il Comitato Europeo di Normazione Elettrotecnica pubblica lo standard EN 50187 [2] dedicato ai comparti a pressione di gas per quadri di regolazione e controllo di corrente alternata con tensione di alimentazione da 1 kV fino a 52 kV. Tale standard era privo di distinzioni riguardo ai materiali utilizzati per la fabbricazione dei comparti, ulteriori limiti del suo campo di applicazione sono: pressioni di progetto fino a 3 bar e prodotto $P \times V$ non oltre i 2000 bar litro. Nel 2022 lo standard è stato aggiornato eliminando il limite massimo del prodotto $P \times V$ ed elevando la pressione di progetto massima a 5 bar.

4.1.1. Progettazione - Per la progettazione a pressione dei comparti, e qualunque sia il materiale con cui sono realizzati, lo standard prevede che si possano utilizzare anche strumenti diversi dal calcolo analitico per valutare tensioni e deformazioni, e pone la sollecitazione massima ammissibile pari a:

$$f_a = \frac{R_m}{3}$$

essendo R_m il valore minimo tabellare della resistenza a trazione alla temperatura di progetto del materiale, e 3 il coefficiente di sicurezza.

4.1.2. Prove su prototipo - Lo standard richiede inoltre che ogni comparto a pressione sia sottoposto a prove di tipo e di routine.

Le prove di tipo prevedono che il prototipo del comparto sia sottoposto a prova di pressione e – se dotato di dispositivo di sicurezza – che resista senza rompersi fino a pressione pari a 1,5 volte la pressione di taratura del dispositivo di sicurezza. Si ricordi che in genere questo tipo di apparecchi è protetto da dispositivi quali valvole di sicurezza o dischi di rottura, tarati a pressioni comprese tra 1,1 e 1,6 volte la pressione di progetto.
Viceversa, se il comparto non è dotato di dispositivo di sicurezza, il suo prototipo dovrà resistere senza rompersi fino a pressione pari a 3 volte la pressione di progetto.

4.1.3. Prove di routine - Nelle prove di routine ogni comparto dotato di dispositivo di sicurezza deve superare senza alcun segno di danneggiamento una prova a pressione pari a 1,3 volte la pressione di progetto; per comparti privi di dispositivi di sicurezza, il valore della pressione di prova è pari a 2 volte la pressione di progetto.

4.2. Gli standard europei per l'alta tensione

Se l'apparecchio lavora con tensioni elettriche superiori ai 52 kV o se la pressione di progetto dei contenitori è maggiore di 5 bar, l'Europa fa riferimento a standard diversi a seconda del materiale con cui sono realizzate le membrature:

EN 50052 – involucri realizzati in getti di leghe di alluminio [3],
EN 50064 – involucri realizzati in leghe di alluminio lavorate alle macchine utensili [4],
EN 50068 – involucri realizzati in acciaio [5],
EN 50069 – involucri realizzati saldando getti di leghe di alluminio e pezzi in leghe di alluminio lavorati alle macchine utensili [6],
EN 50089 – comparti di contenitori metallici realizzati in materiali isolanti [7].

Si tratta di cinque standard redatti tra il 1986 e il 1992, e tutti oggetto di recenti aggiornamenti.

4.2.1. Involucri metallici - I primi quattro presentano una struttura estremamente simile, indicano tutti anche la VSR tra i codici di calcolo utilizzabili là dove è possibile il 'design by formula', definendo ciascuno la sollecitazione massima ammissibile come riportato nel prospetto seguente. Ove la geometria del comparto non permette di eseguire il 'design by formula' tutti gli standard citati prevedono l'esecuzione di una prova di pressione spinta fino a rottura (burst test) su un prototipo, oltre a prevedere - di routine - l'esecuzione di prove di pressione su tutti i comparti, a prescindere dal metodo con il quale se ne sia verificata la stabilità alla pressione di progetto.
Apportando solo semplificazioni trascurabili alle formule che gli standard EN 50064 e EN 50068 propongono per la determinazione della pressione minima di scoppio, si ottiene il prospetto:

STANDARD	DESIGN STRESS	BURST TEST	PROVE DI PRESSIONE DI ROUTINE
EN 50052	$f_d = \frac{R_m}{2{,}5} \cdot CF$	$B = 3{,}5 \cdot \frac{P}{CF \cdot TF}$	a $2 \cdot P$ per 1 minuto senza rottura né deformazioni
EN 50064	$f_d = \frac{R_e}{1{,}5} \cdot \nu$	$B = 2{,}3 \cdot \frac{P}{\nu}$	a $1{,}3 \cdot P$ per 1 minuto senza rottura né deformazioni
EN 50068	$f_d = \frac{R_e}{1{,}5} \cdot \nu$	$B = 2{,}3 \cdot \frac{P}{\nu}$	a $1{,}3 \cdot P$ per 1 minuto senza rottura né deformazioni
EN 50069	$f_d = \frac{R_e}{2{,}21} \cdot \nu$	$B = 3{,}5 \cdot \frac{P}{CF \cdot TF}$	a $2 \cdot P$ per 1 minuto senza rottura né deformazioni

essendo

R_m : il valore minimo tabellare della resistenza a trazione a temperatura ambiente della lega

CF : il fattore di qualità dei getti di lega di alluminio, pari a 0,8

TF : il fattore di affidabilità del test, pari a 0,875

R_e : il valore minimo tabellare della tensione di snervamento a temperatura ambiente della lega

ν : il coefficiente di saldatura: 1 se sono previsti CND, 0,75 se sono previsti solo esami visivi

4.2.2. Partizioni in materiale isolante - Lo standard EN 50089 dedicato alle partizioni di involucri metallici realizzate in materiale isolante merita alcune considerazioni specifiche: infatti, data la forma e il tipo di materiali con cui sono realizzate le partizioni, non prevede la progettazione mediante calcolo ma solo la verifica della stabilità delle membrature mediante prova a pressione su prototipo spinta fino a rottura; e pone il valore della pressione minima di scoppio pari a $B = 3 \cdot P$. Inoltre, prescrive una prova a pressione di routine a $2 \cdot P$ da eseguirsi su tutte le membrature in produzione.

STANDARD	DESIGN STRESS	BURST TEST	PROVE DI PRESSIONE DI ROUTINE
EN 50089	---	$B = 3 \cdot P$	a $2 \cdot P$ per 1 minuto senza rottura né deformazioni

5. Riferimenti normativi a confronto

È possibile ora effettuare un confronto – limitatamente alle prove di pressione spinta fino a rottura per la verifica della stabilità delle membrature non calcolabili e alle prove di routine – tra gli standard europei e le regole della VSR.8.B.2.

5.1. Comparti di apparecchi per media tensione (i.e. da 1 kV a 52 kV) e con pressioni di progetto minori di 5 bar

	PROVA DI SCOPPIO SU PROTOTIPO		PROVE DI PRESSIONE DI ROUTINE
VSR.8.B.2.	$P_r \geq 4{,}25 \cdot \frac{R}{R_m} \cdot P$	membrature in materiale isolante	a $2 \cdot P$
	$P_r \geq 4{,}25 \cdot \frac{R}{R_m} \cdot \frac{s_2}{s_1} \cdot P$	membrature in materiale metallico	a $1{,}5 \cdot P$
EN 50187	$B = 1{,}5 \cdot P_{taratura}$	Comparti dotati di dispositivi di sicurezza	a $1{,}3 \cdot P$ per 1 minuto senza rottura né deformazioni
	$B = 3 \cdot P$	Comparti privi di dispositivi di sicurezza	a $1{,}3 \cdot P$ per 1 minuto senza rottura né deformazioni
			a $2 \cdot P$ per 1 minuto senza rottura né deformazioni se realizzati in ceramica o resina epossidica o getti di leghe di alluminio

Il d.m. 1.12.80 e la VSR.8.B.2. distinguono le membrature solo in base al materiale con cui sono fabbricate: se pure progettate per pressioni massime di esercizio modeste, come in genere le membrature degli apparecchi per media tensione, la 'severità' con cui le regole (3) e (4) le verificano è sempre la stessa. Si pensi per esempio agli armadi per media tensione di forma squadrata, fabbricati con acciai standard e rinforzi saldati, contenenti boccole in resina epossidica, progettati per pressioni di neanche 1 bar: capita spesso che apparecchi di questo tipo non superino la prova di scoppio eseguita in conformità alla (4) non perché le lamiere d'acciaio cedano o le boccole si rompano, ma perché aumentando la pressione le forme squadrate si distorcono e gli o-ring di tenuta fuoriescono dalle loro sedi. In vista della sostituzione dell'SF_6 con gas meno dannosi per l'ambiente ma che richiederanno pressioni di riempimento maggiori, le pressioni minime di rottura che si dovranno raggiungere nella prova di scoppio aumenteranno ancora, finendo col risultare davvero troppo alte, soprattutto in considerazione dell'affidabilità che alcuni materiali e alcuni processi tecnologici hanno ormai raggiunto.
La EN 50187 invece prescrive prove – sia di tipo sia di routine – diverse in considerazione della presenza o meno di dispositivi a protezione dei comparti. I coefficienti di sicurezza che indica per le prove di scoppio sono comunque minori di quello della VSR.8.B.2. e non vi è alcun fattore di normalizzazione alle caratteristiche meccaniche minime consentite per il materiale che permetta di estendere l'esito positivo della prova a comparti eventualmente meno resistenti. In particolare, se per comparti in materiale metallico i coefficienti di sicurezza definiti dalla EN 50187 non destano preoccupazioni, non ci si sente di esprimere lo stesso giudizio nel caso di comparti in materiale isolante: membrature in resina epossidica da installarsi in apparecchi dotati di dispositivi di sicurezza tarati, per esempio, a $P_{taratura} = 1{,}4 \cdot P$ sarebbero soggette a prova di scoppio con $B = 1{,}5 \cdot P_{taratura} = 2{,}1 \cdot P$ su prototipo, e a prove di routine a $1{,}3 \cdot P$. Prove di pressione spinta fino a rottura su membrature prototipo di resina in cui basti superare di poco il doppio della pressione di progetto non sembrano offrire margini di sicurezza sufficienti. Senza considerare poi che col trascorrere del tempo i materiali plastici subiscono modifiche strutturali significative.
Infine, la rimozione del limite del prodotto $P \times V$ per il campo di applicazione della EN 50187 sembra non considerare come 'pericolo' l'energia immagazzinata nei contenitori. Se fossero in PED, con pressioni di progetto entro i 3 bar, ricadrebbero sempre al massimo in III categoria di rischio; viceversa, avendo portato il limite per la pressione di progetto a 5 bar, per volumi maggiori di 600 litri i contenitori ricadrebbero in IV categoria di rischio.

5.2. Partizioni in materiale isolante per apparecchi per alta tensione (i.e oltre i 52 kV) o con pressioni di progetto maggiori di 5 bar

	PROVA DI SCOPPIO SU PROTOTIPO	PROVE DI PRESSIONE DI ROUTINE
VSR.8.B.2	$P_r \geq 4{,}25 \cdot \frac{R}{D} \cdot P$	a $3 \cdot P$
EN 50089	$B = 3 \cdot P$	a $2 \cdot P$ per 1 minuto senza rottura né deformazioni

Analoghe considerazioni valgono riguardo alle partizioni in materiale isolante installate in apparecchi per alta tensione o con pressioni di progetto maggiori di 5 bar. Anche in questo

caso il coefficiente di sicurezza per le prove di scoppio indicato dalla EN 50089 è minore del coefficiente di sicurezza indicato dalla VSR.8.B.2, e non vi è alcun fattore di normalizzazione alle caratteristiche meccaniche minime consentite per il materiale che permetta di estendere l'esito positivo della prova a partizioni eventualmente meno resistenti. I coefficienti di sicurezza più bassi indicati dalla EN 50089 preoccupano poi soprattutto in considerazione dell'invecchiamento cui sono soggetti i materiali plastici.

5.3. Comparti in materiale metallico per apparecchi per alta tensione o con pressioni di progetto maggiori di 5 bar

	PROVA DI SCOPPIO SU PROTOTIPO	PROVE DI PRESSIONE DI ROUTINE
VSR.8.B.2	$P_r \geq 4{,}25 \cdot \frac{R}{R} \cdot \frac{s_2}{s} \cdot P$	a $1{,}5 \cdot P$
EN 50052	$B = 5 \cdot P$	a $2 \cdot P$ per 1 minuto senza rottura né deformazioni
EN 50064	$B = 3{,}07 \cdot P$	a $1{,}3 \cdot P$ per 1 minuto senza rottura né deformazioni
EN 50068	$B = 3{,}07 \cdot P$	a $1{,}3 \cdot P$ per 1 minuto senza rottura né deformazioni
EN 50069	$B = 5 \cdot P$	a $2 \cdot P$ per 1 minuto senza rottura né deformazioni

Viceversa, i coefficienti di sicurezza indicati dagli standard europei per le prove a pressione di tipo e di routine da eseguirsi su comparti in materiale metallico di apparecchi per alta tensione o con pressioni di progetto maggiori di 5 bar, seppure inferiori rispetto a quelli indicati dalla VSR.8.B.2, non preoccupano. Né preoccupa l'assenza di fattori di normalizzazione alle caratteristiche meccaniche minime consentite per il materiale che permetta di estendere l'esito positivo della prova di tipo a comparti eventualmente meno resistenti: per i getti di leghe di alluminio la variabilità delle caratteristiche meccaniche dei materiali è già considerata nel coefficiente di sicurezza pari a 5; nel caso di acciai o leghe di alluminio lavorati, si tratta comunque di materiali standardizzati, con variabilità delle caratteristiche meccaniche estremamente contenuta e tali che il rapporto tra la resistenza a trazione nominale e il valore minimo tabellare del materiale arriva a 1,2.

6. Membrature in materiale composito

Trattazione a sé meritano gli isolatori in materiale composito: si tratta in genere di tubi – cilindrici o troncoconici - in vetroresina fabbricati mediante 'filament winding' e utilizzati come contenitori a pressione di parti attive di apparecchiature elettriche per alta tensione. Richiedono flange per l'assemblaggio realizzate per lo più in leghe di alluminio collegate permanentemente al tubo in vetroresina mediante incollaggio. Vengono poi rivestiti con uno spessore di silicone alettato che non ha valenza strutturale.
La regola della VSR.8.B.2. per le prove di scoppio su membrature in materiale isolante, nata pensando alle porcellane e (forse) alle plastiche, è di difficile applicazione: qui si tratta di membrature ottenute dall'assemblaggio di materiali diversi, metallici (le flange) e isolanti fortemente ortotropici (i cilindri in vetroresina) - e dunque caratterizzati da comportamento tutt'altro che lineare - mediante incollaggi che sono delle vere e proprie ricette proprietarie dei fabbricanti di cui davvero poco se non nulla è dato sapere.
Di contro nessuno degli standard europei che abbiamo esaminato sembra applicabile:

- non la EN 50187 poiché raramente utilizzati in apparecchiature per media tensione e comunque caratterizzati da pressioni di progetto maggiori di 5 bar;
- non la EN 50089 poiché non sono partizioni isolanti inserite all'interno di contenitori, ma membrature a pressione vere e proprie.

Esiste invece uno standard internazionale per la loro produzione, l'IEC 61462 [8], cui fa riferimento la totalità dei fabbricanti europei; esso prevede varie prove del prototipo volte a caratterizzare i materiali – e in particolare i tubi in composito – sia dal punto di vista elettrico che meccanico, quali ad esempio:

- prova di bending: consiste nel sollecitare a flessione l'isolatore, misurando mediante estensimetri le deformazioni elastiche e plastiche;
- prove di pressione:
  - ✓ 1a fase - aumentata da zero a $2 \cdot P$, mantenuta per 5 minuti, riportata a zero – esito positivo se nell'isolatore non si rilevano deformazioni permanenti oltre il 5%;
  - ✓ 2a fase – aumentata da zero a $4 \cdot P$, mantenuta per 5 minuti, riportata a zero – esito positivo se nell'isolatore non si rilevano danneggiamenti visibili pur in presenza di deformazioni permanenti oltre il 5%.

Prevede inoltre:

- a campione: verifica dimensionale, prove meccaniche (di bending e di pressione a $2 \cdot P$), controllo non distruttivo degli incollaggi mediante liquidi penetranti,
- di routine: esame visivo, prova di pressione a $2 \cdot P$, prova di tenuta (con SF_6 o elio a pressione pari a *P*).

	PROVA SU PROTOTIPO	PROVE DI PRESSIONE DI ROUTINE
IEC 61462	$P_{prova} = 4 \cdot P$	a $2 \cdot P$ per 5 minuti senza deformazioni significative
VSR.8.B.2.	$P_r \geq 5{,}1 \cdot P$ (*)	a $3 \cdot P$
EN 50052	$B = 5 \cdot P$ (**)	a $2 \cdot P$ per 1 minuto senza rottura né deformazioni

(*) ponendo $\frac{R}{R_m} \cong 1{,}2$ nella VSR.8.B.2.2.b) in base ai valori che si riscontrano in genere nei certificati dei materiali

(**) prova di tipo per le flange, in genere realizzate in getto di leghe di alluminio, collegate permanentemente ai tubi in vetroresina: impossibile provare le une senza gli altri

Prove di pressione di tipo in cui il prototipo debba resistere a pressione $P = 4 \cdot P$ senza che si producano danneggiamenti visibili offrono margini di sicurezza ampi relativamente alla stabilità delle membrature alla pressione di progetto: si tratta di raggiungere valori delle pressioni minime di rottura solo di poco minori rispetto a quelli determinabili sia applicando la regola della VSR.8.B.2., sia applicando la EN 50052 in considerazione della presenza delle flange generalmente realizzate in fusioni di leghe di alluminio e incollate permanentemente ai tubi in composito.

7. Considerazioni finali e prospettive

Anche lo standard IEC 61462 è stato oggetto di recentissimi aggiornamenti, a conferma del fermento che vive il settore della normazione per apparecchiature elettriche in media e alta tensione, anche in vista della necessità di sostituire l'SF_6 con miscele di gas meno

dannose dal punto di vista ambientale e che tuttavia che dovranno essere compresse a pressioni sensibilmente maggiori per ottenere i medesimi poteri di interruzione a parità di dimensioni delle apparecchiature.
Da qui l'interesse di valutare punti di convergenza tra la normativa nazionale (d.m..1.12.80 e la VSR.8.B.2) e gli standard europei. Riconsiderare i coefficienti di sicurezza nazionali utilizzati nelle prove di rottura anche in base all'evoluzione delle specifiche dei materiali è certamente possibile; si è coscienti tuttavia che tale rivisitazione debba basarsi su dati oggettivi e opportune sperimentazioni (già in corso) volte ad assicurare che le basi scientifiche ben si adattino agli impulsi dettati dalle regole del mercato europeo ed internazionale. Parere di chi scrive è che molto si possa fare: i materiali metallici sono 'generosi' e, se standardizzati, sono ottenuti con processi tecnologici e caratteristiche che li rendono affidabili; pertanto l'adozione di coefficienti di sicurezza minori non preoccupa particolarmente. I materiali compositi presentano valori di resistenza a trazione paragonabili a quelli di acciai ad alta resistenza meccanica; inoltre anche i processi tecnologici con cui i tubi in vetroresina vengono fabbricati e incollati alle flange si stanno standardizzando, e gli isolatori presentano dispersioni sempre minori delle loro caratteristiche meccaniche.
Destano invece preoccupazione i coefficienti di sicurezza bassi previsti per i materiali plastici (soggetti a rottura fragile come e più delle leghe di alluminio, oltre che a invecchiamento) soprattutto in considerazione del fatto che le produzioni di membrature, comparti, componenti in resina sono tutt'altro che standardizzate e le caratteristiche meccaniche dei prodotti presentano dispersioni elevate.
Gli studi di caratterizzazione delle specifiche meccaniche già in corso sui materiali compositi confermano la necessità di sopperire alla sommaria conoscenza dei processi produttivi (spesso per comprensibili strategie di protezione industriale dei produttori) valutando attentamente il valore dell'esperienza da cui sono maturate le regole della VSR8.B.2., in particolare riguardo alla necessità di mantenere quel fattore di normalizzazione alle caratteristiche meccaniche minime consentite per il materiale che permette di estendere l'esito positivo dell'unica prova eseguita sul prototipo a tutte le membrature - eventualmente meno resistenti – della stessa produzione.

8. Bibliografia

[1] J. Ferino, I. Mazzarelli, A. Meleddu, E. Pichini. Progettazione e fabbricazione di attrezzature a pressione in composito: proposte per la caratterizzazione e l'accettazione dei materiali. Safap. 2021; pp. 17-27 – isbn 978-88-7484-709

[2] EN 50187:2022 - Gas-filled compartments for a.c. switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV

[3] EN 50052:2016 – High-voltage switchgear and controlgear - Gas-filled cast aluminium alloy enclosures

[4] EN 50064:2018 – High-voltage switchgear and controlgear. Gas-filled wrought aluminium and aluminium alloy enclosures

[5] EN 50068:2018 – High-Voltage Switchgear and Controlgear - Gas-filled wrought steel enclosures

[6] EN 50069:2018 – High-voltage switchgear and controlgear - Gas-filled welded composite enclosures of cast and wrought aluminium alloys

[7] EN 50089:2022 – High-Voltage switchgear and controlgear - Insulating pressurised partitions for gas filled metal enclosures

[8] IEC 61462:2023 - Composite hollow insulators – Pressurized and unpressurized insulators for use in electrical equipment with rated voltage greater than 1 000 V – Definitions, test methods, acceptance criteria and design recommendations

Gestione dell'integrità dei serbatoi di stoccaggio atmosferico: alcuni risultati recenti.

P. Bragatto[1], G. Ancione[2], M. F. Milazzo[2], E. Proverbio[2]

[1] Dipartimento di Ingegneria, Università Campus Bio-Medico
[2] Dipartimento di Ingegneria, Università di Messina

Abstract

I serbatoi di stoccaggio atmosferico fuori terra sono elementi importanti in molti stabilimenti "Seveso" e in passato non sono mancati, in Italia e in Europa, incidenti anche gravi. Dimensioni, pericolosità delle sostanze, meccanismi di deterioramento, invecchiamento e difficoltà di ispezione richiedono un approccio alla gestione dell'integrità simile a quella dei sistemi in pressione. La parte più critica è costituita dal fondo, che è difficile da controllare e soggetto a corrosione localizzata, con possibili perdite all'esterno e conseguenti danni per uomo e ambiente. Negli ultimi anni, sono state sviluppate soluzioni innovative per un controllo più efficace dei fondi. Scopo del lavoro è illustrare lo stato dell'arte della ricerca in questo ambito, con particolare riferimento ai risultati ottenuti da una collaborazione fra Università di Messina e Inail, svoltasi nell'ambito del programma BRIC/2018. In particolare, sfruttando la statistica degli estremi di Gumbel ed il teorema di Bayes, è stato sviluppato un sistema predittivo che è in grado di definire la vita utile residua (RUL) e fornire i dati per la pianificazione delle ispezioni. Il modello è stato validato facendo riferimento ai dati di 23 grandi serbatoi, presenti negli stabilimenti petroliferi italiani. In totale sono state considerate le spessimetrie eseguite su oltre 2500 lastre. In fase di validazione lo scostamento fra risultati del modello e misure reali è risultato entro i limiti del 1%. Strumento essenziale per aiutare gestori di stabilimenti Seveso, consulenti ed ispettori a trasferire nell'esercizio i risultati è il "quaderno di ricerca INAIL n.20", prodotto a coronamento dell'attività di sviluppo.

Keywords: serbatoi atmosferici, statistica degli estremi, teorema di Bayes, monitoraggio integrità, vita utile residua.

1 Contesto e obiettivi

1.1 Criticità nella gestione dei serbatoi atmosferici negli stabilimenti Seveso

Nel settore petrolifero i grandi serbatoi verticali per lo stoccaggio fuori terra a pressione atmosferica sono strutture essenziali per terminali marittimi, depositi e raffinerie. Per le dimensioni, i quantitativi e la pericolosità di materie prime e prodotti contenuti, i serbatoi atmosferici sono spesso elementi critici ai fini del D.Lgs. 105/2015 sulla prevenzione degli incidenti rilevanti. Per gli stessi motivi, anche nel

settore chimico, tali attrezzature rientrano fra quelle da controllare con maggiore attenzione per prevenire incidenti. I serbatoi, costruiti di solito con lastre saldate di acciaio al carbonio, sono soggetti, nel tempo, a varie forme di deterioramento. Sulle pareti interne il deterioramento è dovuto alla natura corrosiva di alcuni prodotti, all'accumulo indesiderato di acqua sul fondo e, in alcuni casi, alla presenza di popolazioni batteriche negli idrocarburi. Mantello e tetto, all'esterno sono soggette alla corrosione e all'erosione per gli agenti atmosferici; mentre la parte esterna del fondo è soggetta all'azione corrosiva del suolo. Per prevenire e controllare i fenomeni corrosivi si adottano varie misure, compresi trattamenti superficiali specifici interni ed esterni, protezione catodica per le parti a contatto del suolo, nonché periodiche verifiche di integrità, incluse misure spessimetriche. I serbatoi restano in esercizio senza problemi per almeno cinquanta anni e, quando necessario, possono essere riparati con la sostituzione delle parti più deteriorate (e.g. fondo, prima virola).

1.2 Esperienza operativa

Nell'esperienza dell'industria di processo, i serbatoi contribuiscono per almeno un terzo agli incidenti dovuti all'invecchiamento, come confermato da alcuni studi su larga scala dell'OECD e dell'EU. In Europa, fra gli incidenti chimici più gravi, quelli per i quali è obbligatorio trasmettere le informazioni alla banca dati e-mars, si contano una dozzina di eventi legati a forature sul fondo interno. Sui serbatoi atmosferici vi sono vari tipi di incidenti, inclusi incendi ed esplosioni, innescati da malfunzionamenti di parti mobili, incluso il tetto galleggiante oppure risultate da catene incidentali originate da altri incidenti o fenomeni naturali. Lo scenario più frequente, sul quale è concentrata l'attenzione della presente memoria, è però quello della perdita dal fondo con inquinamento del suolo e della falda sottostante, con eventuali inquinamenti di fiumi, laghi, spiagge ecc. Anche nell'esperienza operativa italiana eventi di minori conseguenze dovuti a corrosione con fori passanti sono registrati non solo sui fondi, ma anche sul trincarino e sulla prima virola del mantello. I fori passanti sono l'ultimo stadio di forme di corrosione localizzate, che partono da piccole cavità distribuite in modo casuale, e che evolvono in una forma di pitting (vaiolatura). I fondi del serbatoio poggiano su piattaforme di cemento impermeabilizzate e le perdite dal fondo dovrebbero finire nel bacino di contenimento; tuttavia, se anche la parte in cemento è danneggiata le conseguenze sull'ambiente esterno sono inevitabili [1;2].

1.3 Inquadramento tecnico normativi

A differenza delle attrezzature in pressione, la costruzione, l'esercizio e le verifiche di integrità e funzionalità dei serbatoi atmosferici non sono soggetti ad una legislazione specifica. Per la costruzione e l'esercizio di serbatoi in pressione si fa rifermento alle norme tecniche dell'American Petroleum Institute API. Per le verifiche di integrità e funzionalità esistono obblighi cogenti solo in casi particolari, fra cui i serbatoi all'interno di stabilimenti soggetti ad autorizzazione integrata ambientale ex D.Lgs 152/2006 (e.g. raffinerie, impianti petrolchimici) e i depositi costieri, per i quali si

applica la legislazione navale R.D. 30 marzo 1942, n. 327 e s.m.i., che prevede verifiche su base triennale. Il D.Lgs. 105/2015 non fa rifermento a nessuna tipologia impiantistica specifica, ma in depositi, raffinerie e petrolchimici, i serbatoi sono sicuramente da considerare attrezzature critiche, essendo una loro rottura sufficiente ad innescare un incidente rilevante. Le attrezzature critiche all'interno del sistema di gestione devono essere oggetto di un piano di controlli e verifiche adeguato ad assicurare nel tempo l'integrità e funzionalità. Nella pratica corrente le verifiche di integrità per le parti interne prevedono misure di spessore eseguite con tecniche ultrasuoni UT, in particolare su tutte le lastre del fondo e del trincarino. La maggior parte dei fenomeni corrosivi sono di tipo localizzati e si cerca di individuare i punti che possano portare ad un eventuale foratura. Le misure vengono eseguite, per ogni lastra, su almeno cinque punti. Un'alternativa recente alla misura ad ultrasuoni è la misura a perdita di flusso magnetico MFL, che copre in modo integrale la lastra, e rileva in corrispondenza di una perdita di materiale ferroso una perdita di flusso magnetico. Lo strumento è molto più ingombrante dello spessimetro UT, tuttavia, dove non ci siano problemi di accessibilità, la tecnica MFL è preferita perché aumenta considerevolmente la probabilità di trovare un eventuale difetto [3]. Queste misure vengono svolte in modo sistematico solo con il serbatoio fuori servizio, previo svuotamento, pulizia e bonifica. Le indicazioni delle norme di buona tecnica suggeriscono una frequenza decennale di ispezione, anche se questa periodicità può essere estesa o ridotta come discusso nel seguito. Nel caso in cui, durante un'ispezione si trovi una o più lastra ammalorata si provvede a sostituirla, in modo da ridurre il rischio di perforazione.

1.4 Sviluppi tecnici recenti

Fra due ispezioni successive, nell'ultimo decennio è diventato pratica corrente fare ricorso a misure indirette come quella delle emissioni acustiche AE. La misura è analoga a quella utilizzata sui recipienti in pressione. Il principio di misura è quello di ricostruire, da una serie di sensori acustici posti alla base del mantello, la posizione e l'estensione dei difetti attivi presenti sul fondo. Questo tipo di misura, eseguito su base triennale, è riconosciuta valida ai fini della legislazione AIA e della legislazione navale. Si tratta di una misura soggetta a molte difficoltà operative ed interferenze. L'esperienza delle AE sui serbatoi atmosferici è molto varia nei diversi contesti. Mentre in alcuni lavori si è dimostrata una consistenza fra i difetti rilevati a serbatoio pieno con le AE e difetti rilevati con tecniche dirette (UT o MFL) sui serbatoi fuori servzio; nella pratica corrente le misure AE risultano attendibile solo per preselezionare i danneggiamenti maggiori [4;5].

Negli ultimi anni vi è stata una certa attenzione allo sviluppo di metodi matematici più sofisticati per studiare meglio l'evoluzione dei danneggiamenti rilevati in fase di ispezioni e sviluppare un sistema previsionale attendibile sull'evoluzione della corrosione sul fondo del serbatoio, con particolare riferimento ai difetti che possono dare origine ai temuti fori passanti. In particolare, nella presente memoria è descritto sinteticamente un metodo che consente, partendo dalle condizioni iniziali verificate

sulle lastre, di prevedere nel tempo la distribuzione delle profondità dei difetti. Il metodo è stato sviluppato nell'ambito del progetto BRIC/MAC4PRO (2019-2022) e ha lo scopo di fornire valutazioni attendibili da poter applicare con tranquillità nelle decisioni sull'estensione della vita utile residua dei serbatoi, programmare le fermate e sfruttare al meglio le informazioni derivanti da misure indirette. La sezione 2 è tutta dedicata al metodo. Molti dettagli sono stati sacrificati alla necessaria brevità di trattazione, e si rimanda alle pubblicazioni specifiche BRIC e in particolare al quaderno di ricerca INAIL per un approfondimento sui vari passaggi matematici e sui dati utilizzati per sviluppare e validare il metodo [6]. La sezione 3 è dedicata alla discussione delle altre tecniche emergenti in ambito sensoristico e prognostico e alle loro potenzialità per una gestione più efficace dei fondi dei serbatoi, in particolare nei contesti con pericolo di incidente rilevante. Infine, l'ultima sessione fornisce qualche indicazione concreta a beneficio dei gestori e degli ispettori Seveso.

2. Metodo prognostico applicato all'integrità dei fondi

Il metodo parte da una particolare attenzione alla distribuzione delle dimensioni dei difetti, in particolare della profondità. Le misure UT sono per natura puntuali e sono eseguite su un numero limitato di posizioni. Le misure MFL attraverso l'elaborazione del dato permettono una mappa di misura più fitta, ma soggetta comunque ad una incertezza sull'esatta posizione e profondità del punto di assottigliamento maggiore. È proprio da uno dei punti di maggiore profondità che si arriverà al foro passante. Anche se questo punto "estremo" può sfuggire alla misura, si può ottenere la distribuzione dei punti più profondi da cui arguire qual è il limite del massimo difetto presente al momento dell'ispezione. È un tipico problema di statistica degli estremi, nella quale tutto l'interesse è sul massimo della distribuzione, in questo caso la maggiore profondità (ovvero il minimo spessore) possibile. Si tenga presente che i fondi di serbatoio in uso nell'industria petrolifera sono costituite da numero di lastre saldate che tipicamente va da 100 a 300 e più e per ogni lastra il numero minimo di punti è 5 per le misure UT e molti di più nel caso di misure MFL. Nei casi UT, tipicamente si hanno fino a un migliaio di punti misurati per ogni serbatoio, nel caso MFL, almeno un ordine di grandezza in più.

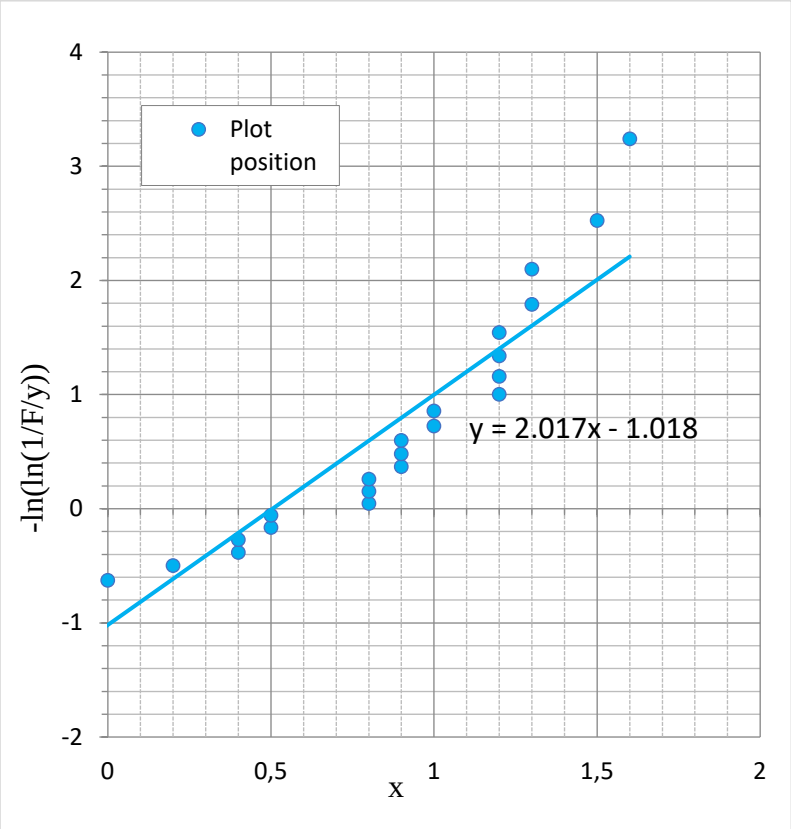


Figura 1. Esempio illustrativo di grafico plot positions

2.1 Distribuzione dei punti descritta con la distribuzione di Gumbel

Lo studio della distribuzione è un passo essenziale, perché permette di individuare il massimo danno possibile. La distribuzione doppio esponenziale di Gumbel [7] è considerata la migliore funzione per lo studio degli estremi statistici ed è ampiamente usata in molti settori ed è stata applicata da vari autori anche a problemi di pitting [8]. La formula più semplice e nota della funzione di Gumbel è la seguente:

$$F_I(x) = \exp\left[-\exp\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right] \quad (1)$$

dove: x = massima profondità di corrosione per ogni lastra costituente la pavimentazione del fondo del serbatoio (differenza tra spessore nominale e spessore misurato); F(x) = funzione probabilità cumulata; α e β = parametri della distribuzione (rispettivamente parametro di scala, di posizione). I due parametri α e β che caratterizzano la curva di Gumbel permettono descrivere in modo completo la distribuzione. Il grafico può essere linearizzato introducendo una variabile ridotta (y), che consente di riscrivere l'equazione (1) nella forma (3):

$$y = \frac{x-\beta}{\alpha} \quad (2)$$

$$y = -\ln\left[\ln\left(1/F(y)\right)\right] \quad (3)$$

La probabilità cumulata può essere calcolata semplicemente mediante l'equazione:

$$F(y) = \frac{i}{N+1} \quad (4)$$

dove: N = numero totale di misure di profondità di corrosione; i = rango della misura.

Tracciando y in funzione di x, si ottiene una linea retta (plot position), la cui pendenza e intercetta sono 1/α e – (β/α). Il parametro di posizione β è la moda della distribuzione, ovvero il valore di corrosione più frequente, mentre il valore di α rappresenta la dispersione dei pit. La rappresentazione attraverso la plot position, anche se meno intuitiva, è molto potente. In particolare, estrapolando la retta y si può trovare l'intercetta con il valore di x massimo accettabile, corrispondente allo spessore minimo accettabile [9]. Il valore suggerito nelle norme di buona tecnica è di 2,5 mm. Nella figura 1 viene presentata la plot position relativa alle misure dei punti condotte a tempi differenti per due serbatoio rappresentativo; nella tabella 1 i corrispondenti valori di α e β e le probabilità di pit critico.

2.2 Previsione dell'evoluzione temporale con il teorema di Bayes

La linearizzazione della distribuzione dei pit ha una grande potenzialità. Può essere infatti utilizzata anche per applicare il teorema di Bayes [10]. Partendo da una distribuzione a priori di α si può fare una previsione a posteriori della distribuzione stessa ad un certo tempo t successivo. Lo stesso si può fare con la distribuzione di β. Le formule per l'applicazione dell'inferenza Bayesiana sono le seguenti:

$$\chi''(\alpha \mid x) = \frac{\chi'(\alpha) \cdot f(x \mid \alpha)}{\int \chi'(\alpha) \cdot f(x \mid \alpha) \cdot d\alpha} \quad (5)$$

$$\lambda''(\beta \mid x) = \frac{\lambda'(\beta) \cdot f(x \mid \beta)}{\int \lambda'(\beta) \cdot f(x \mid \beta) \cdot d\beta} \quad (6)$$

dove: $\chi'(\alpha)$ e $\chi''(\alpha|x)$ = distribuzioni di probabilità a priori e a posteriori di α al tempo t; $\lambda'(\beta)$ e $\lambda''(\beta|x)$ = distribuzioni di probabilità a priori e a posteriori di β dl tempo t; $f(x|\alpha)$ e $f(x|\beta)$ = funzioni di verosimiglianza; x = massima profondità di corrosione.

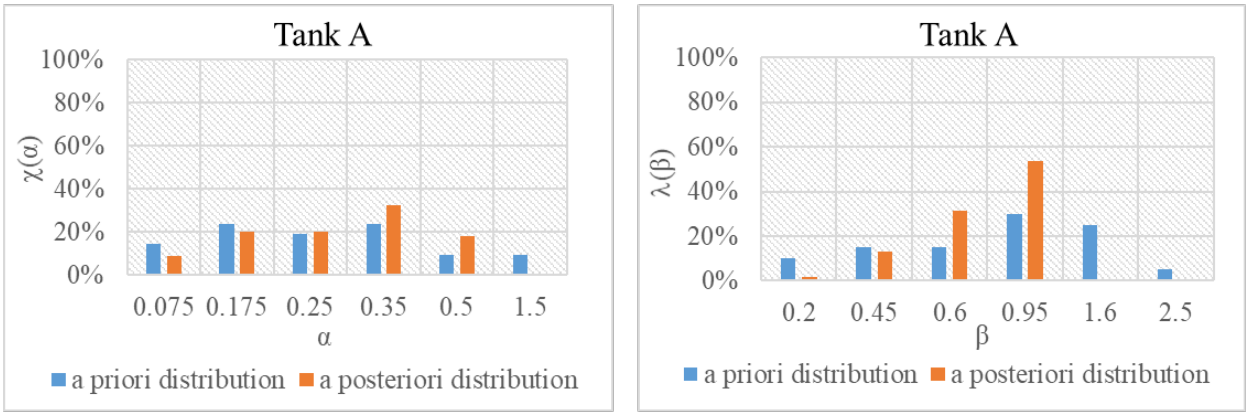


Figura 2. Distribuzioni a priori e posteriori dei parametri di scala e posizione

L'utilizzo della formula di Bayes consente, a partire dalla distribuzione presente dei pit, di valutare la probabilità del danno massimo atteso (ovvero la perforazione del fondo del serbatoio) a distanza di un tempo Δt e da questo stimare di vita utile residuo RUL, definito come il tempo entro il quale il serbatoi può essere esercito con una probabilità di rottura al di sotto dei limiti massimo accettato. Utilizzando ispezioni passate relative a gruppi di serbatoi con caratteristiche simili, è stato possibile determinare la distribuzione dei parametri a un dato tempo (distribuzione di probabilità a priori). Per applicare le equazioni (5) e (6) è necessario disporre delle distribuzioni a priori dei valori di α e di β attesi dopo gli ulteriori anni di utilizzo del serbatoio. Questa è forse la fase più importante del lavoro, perché, se non si dispone di altri dati che le misure eseguite al tempo T1, l'unica possibilità è ricorrere alle distribuzioni di α e di β che possono essere reperiti dalle fonti di letteratura tecnica e scientifica [11;12;13]. Migliori risultati si possono avere se la distribuzione a priori viene da dati misurati a tempi diversi su attrezzature simili. Il quaderno INAIL [6], in particolare, utilizza le misure eseguite nel tempo su una popolazione di oltre 2500 lastre che costituiscono il fondo di 23 serbatoi, rappresentativi delle tipologie più comuni nell'industria petrolifera italiana.

2.3 Stima della vita utile residua

L'ultimo passaggio è la stima della vita utile residua, detto comunemente RUL (residual useful life), che è dato dall'intervallo di tempo, che intercorre dall'ultima ispezione, per il quale, con un dato valore di probabilità P(xs > xlimite), potrebbe essere raggiunto un perdita di spessore superiore al limite che compromette la sicurezza del sistema. La soglia limite accettabile per lo spessore residuo dovrà essere fissata tenendo conto dello spessore iniziale e mantenendo comunque un ragionevole criterio prudenziale. L'indicazione di uno spessore residuo pari a 2,5 mm per lastre di spessore di 8 mm è coerente con le buone pratiche riconosciute. La stima del tempo di vita può essere effettuata per valori di probabilità cumulata pari a 95% e 99%, tenendo comunque presente del margine di sicurezza introdotto nella scelta dello spessore minimo. Dalle distribuzioni dei pit per il calcolo del RUL vanno anche

tolti eventuali punti presenti su lastre ammalorate, sostituite con lastre nuove, per le quali le condizioni iniziali si presuppongono ottime.

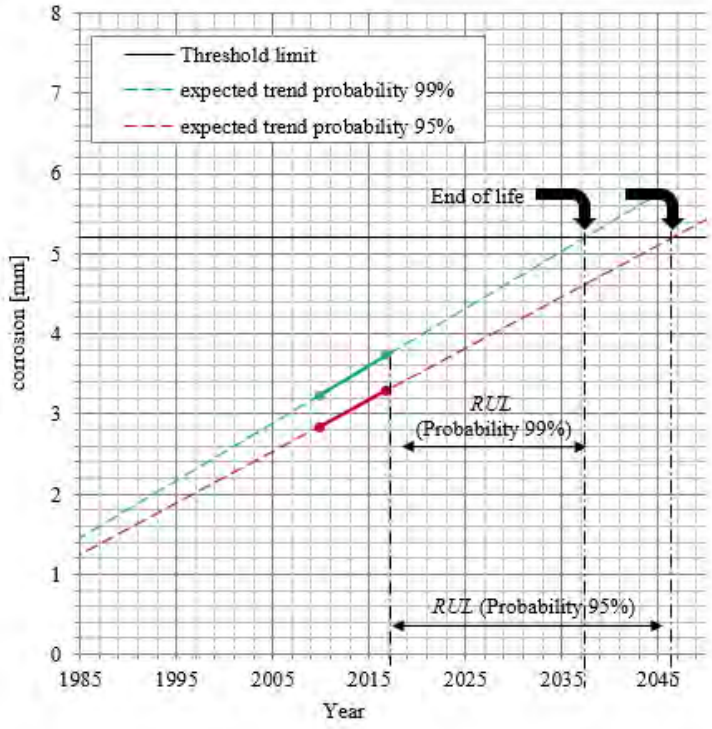


Figura 3. Esempio di uso della curva plot position per determinare la RUL.

2.4 Validità e applicabilità del metodo

Il metodo qui delineato è stato validato sulle due principali tipologie di serbatoi, a tetto fisso e a tetto variabile. Le previsioni sulle distribuzioni di α e β su lungo periodo sono state confrontate con le misure realmente eseguite. In entrambi i casi è risultata una certa sovrastima del danno atteso. La differenza fra spessori previsti e spessori misurati, nei casi studio considerati, resta al di sotto dei 50 μm, corrispondente ad un valore non viene rilevato durante le ispezioni con gli UTM e MFL [14]. Il fatto di poter disporre di una funzione di distribuzione a priori credibile è molto importante. Le distribuzioni in letteratura, incluse quelle del citato quaderno possono essere un buon punto di partenza, ma i gestori che hanno in carico un certo numero di serbatoi simili, possono creare una distribuzione di α e di β tutta basata sui dati proprietari, raccolti nel tempo; anzi il confronto fra le previsioni fatte e le misure successive possono costituire un ulteriore elemento di affinamento delle misure.

3 Tecniche emergenti

Nel settore dei serbatoi atmosferici, capire come sono le condizioni del fondo fra una ispezione e l'altra è una continua sfida alla ricerca tecnologica. Estendere in sicurezza l'intervallo fra due fermate complete aumenterebbe la disponibilità della attrezzatura, ridurrebbe i costi di gestione e ridurrebbe anche i rischi occupazionali legati alle complesse operazioni di bonifica e all'accesso all'interno.

3.1 Nuove tecnologie di misura

Le misurazioni con il serbatoio in servizio, fatte con la tecnica delle emissioni acustiche AE, sono molto utili per trovare conferme sulle condizioni dei fondi. La qualità di tali informazioni è condizionata ad una esecuzione particolarmente accurata delle misurazioni [15]. Dalle misure AE è possibile trarre informazioni sulla posizione dei difetti che hanno la caratteristica di propagare, più difficilmente sulla loro dimensione. In questo ambito, l'obiettivo di superare i limiti e avere, in esercizio, dati confrontabili con quelli ottenuti durante le fermate spinge la ricerca verso tecnologie innovative. Al momento sono stati sperimentati robot con capacità di movimento autonomo che possono essere calati all'interno del serbatoio peno, fornendo misure di spessore puntuali con tecniche di tipo UT, paragonabili in qualità con le misure convenzionali. La tecnologia è già disponibile, anche se le applicazioni sono ancora pionieristiche [16;17]. Un'altra possibilità interessante è quella delle misure con la tecnica delle onde guidate GW. Si tratta di una tecnica abbastanza nota e applicata da anni per individuare a distanza difetti nelle tubazioni. L'idea base è che i difetti ritornano un segnale asimmetrico a differenza delle saldature che hanno una simmetria assiale. L'estensione ad oggetti come i fondi di serbatoi che, a differenza dei tubi, non hanno simmetria assiale presenta difficoltà da un punto di vista del software di elaborazione. Anche nel caso delle lastre, tuttavia, abbiamo saldature disposte in modo regolare e continuo a differenza dei difetti che sono sparsi casualmente all'interno delle lastre. Anche questo metodo ha superato la fase dimostrativa, ma è ancora limitato ad applicazioni pionieristiche [18;19].

3.2 Numerosità dei dati e Prognostica

Attraverso i metodi prognostici più avanzati, come quello descritto alla sezione 2, è possibile fare delle previsioni sull'evoluzione dei fenomeni tanto più attendibili quanti più dati si dispongano sul singolo serbatoio e sui serbatoi simili. Le misure di tipo MFL, che rappresentano al momento le migliori tecniche per ispezionare i fondi dei serbatoi vuoti, forniscono una numerosità adeguata di dati, ma è anche importante disporre delle misure fatti nelle fermate precedenti per avere dati storici utili per una migliore applicazione del metodo. Disponendo, in particolare, di dati storici a tempi diversi si possono trasformare le distribuzioni a posteriori calcolate ad un certo anno T in distribuzioni a priori da usare per l'applicazione di Bayes dopo un certo numero di anni [14]. Nel tempo la raccolta sistematica di tutti le misure di spessore dei serbatoi, fondo, fasciame e tetto, è comunque premiante perché, al di là del particolare metodo scelto, permettono di ricostruire l'intera vita dei serbatoi sviluppando le conoscenze e le capacità necessarie per una gestione ottimale.

3.3 Gemelli digitali e Realtà Aumentata

Le disponibilità a breve di tecnologie commerciali più efficaci per la misura in servizio, unitamente a tecniche prognostiche più credibili e robuste, apre prospettive nuove alla gestione delle attrezzature. In base alle misure fatte con il serbatoio fuori servizio

le tecniche prognostiche potranno supportare la decisione di accorciare o estendere il tempo fra un'ispezione e l'altra. In caso di estensione significativa rispetto alla convenzionale indicazione di ispezione decennale, si potranno integrare misure qualitative di tipo AE con misure più accurate (robot o GW) che ad un intervallo fissato diano conferma o meno delle indicazioni prognostiche. Un modo efficace per utilizzare assieme la numerosità dei dati fornite dalle misurazioni fuori servizio ed in servizio e le potenzialità dei nuovi modelli prognostici è la creazione di un modello digitale del serbatoio, che opportunamente alimentato consente di valutare e decidere facendo riferimento ad immagini di sintesi del serbatoio, del fondo e delle altre parti critiche. Le immagini del gemello digitale possono essere viste su qualsiasi dispositivo (computer o smartphone); ma sono particolarmente efficaci se presentati con le tecniche di realtà aumentata AR, come discusso in alcuni lavori recenti [20].

4. Conclusioni

Le procedure per la gestione dei serbatoi devono prevedere una fermata periodica con svuotamento e bonifica e successiva misura degli spessori dei fondi, eseguita con tecnica MFL ove gli spazi consentano l'accesso della strumentazione, integrata con misure UTM ove l'accesso non sia possibile. Le misure eseguite nel tempo vanno registrate e conservate in modo da avere uno storico delle distribuzioni di difetti. Sulla base della distribuzione di "pit" ai tempi successivi è possibile fare delle previsioni accurate e attendibili sul tempo di vita atteso fino a che la probabilità che lo spessore minimo, in corrispondenza del pit più profondo, resti al di sotto di un minimo accettabile. Spessore critico accettabile e probabilità massima accettabile andranno decisi all'interno del sistema di gestione, ma valori rispettivamente di 2,5 mm per lo spessore e 1% per la probabilità sembrano del tutto ragionevoli. L'indicazione di una fermata decennale del serbatoio è ragionevole, ma ove le condizioni rilevate durante la fermata fossero buone, il calcolo del RUL eseguito con il metodo descritto, può supportare una ragionevole estensione dell'intervallo, integrandole, se non già richieste esplicitamente dagli obblighi di legge, con misure di emissioni acustiche ad intervalli triennali. Al contrario se le condizioni non sono incoraggianti il calcolo del RUL deve essere fatto comunque per calcolare il momento a cui anticipare la successiva fermata con ispezione. Quanto sopra descritto si applica ai serbatoi a fondo singolo. I serbatoi a doppio fondo sono una novità e, anche se hanno ormai una certa diffusione, sono tutti abbastanza nuovi e i problemi di invecchiamento sembrano lontani. Tuttavia, una buona gestione comincia dall'inizio del ciclo di vita. Il doppio fondo non risolve, infatti, ogni problema e anche se gli intervalli di ispezione raccomandati sono doppi è bene tenere uno storico delle misure e potere di volta in volta aggiornare il calcolo del RUL e seguire il successivo invecchiamento.
Le tecnologie di misura sono in forte sviluppo e così pure i metodi prognostici. Si può immaginare che a breve queste entrino anche nella pratica corrente aumentando le possibilità di gestione in sicurezza dei serbatoi di stoccaggio atmosferico fuori terra. Per applicare le opportunità emergenti i gestori e gli ispettori Seveso possono trovare

un buon aiuto nel citato quaderno di ricerca INAIL, che fornisce numerosi suggerimenti pratici sull'argomento.

Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato da INAIL all'interno del progetto BRIC 2018, ID 11 "MAC4PRO". Gli autori ringraziano Donatella Giacopetti e Maria Virginia Coccia di "unem" (unione energie per la mobilità) per il prezioso supporto.

Bibliografia

[1] EUR, report no. 26331 (2013) Corrosion Related Accidents in Petroleum Refineries. Wood, M. H., Arellano, A. V., & Van Wijk, L. EU Commission Joint Research Centre

[2] OECD, 2017, Environment, Health and Safety Publications, Series on Chemical Accidents, No. 29, Ageing of hazardous installations, ENV/JM/MONO/2017/9, Paris, F

[3] Kasai, N. Sekine,K. Maruyama,H. (2004). Influence of Corrosion Products on Magnetic Flux Leakage Signals in Inspection of Farside Metal-loss Defects in Oil Storage Tank Bottom Floors. Journal of the Japan Petroleum Institute 47 19-26

[4] Papasalouros, D., Bollas, K., Kourousis, D., & Anastasopoulos, A. (2014). Acoustic emission tank floor testing: A study on the database of tests and follow-up inspections. Proceedings of the 31st European Working Group on Acoustic Emission, Dresden, D.

[5] Sakamoto, H., Sekine, K., Maeda, M., Suzuki, H., 2013. Development of improved AE evaluation technique for corrosion damage in bottom plates of above-ground oil tanks in service. Journal of the Japan Petroleum Institute 56 (5), 298-303.

[6] Giusi Ancione, Paolo Bragatto, Canio Mennuti, Maria Francesca Milazzo, Edoardo Proverbio; 2023 Tecniche avanzate per la gestione dei serbatoi di stoccaggio atmosferico INAIL Quaderno Di Ricerca N.20 ISBN 978-88-7484-784-6

[7] Gumbel E.J., 1958, Statistics of Extremes, Columbia University Press, New York.

[8] Shibata T., 1991, Evaluation of corrosion failure by extreme value statistics, ISIJ International 31(2), 115-121.

[9] Milazzo, M.F., Ancione, G., Bragatto, P., Mennuti, C. (2021) Assessment of the perforation risk for atmospheric storage tanks containing solvents Chemical Engineering Transactions, 86, pp. 259-264.

[10] Kasai N., Mori S., Tamura K., Sekine K., Tsuchida T., Serizawa Y., 2016, Predicting maximum depth of corrosion using extreme value analysis and Bayesian inference, International Journal of Pressure Vessels and Piping 146, 129-134.

[11] American Petroleum Institute API, RP 581 (2016) Risk-Based Inspection Methodology 3rd edition Washington USA

[12] EEMUA - The Engineering Equipment and Materials Users Association, 2014, Users' guide to the inspection, maintenance and repair of aboveground vertical cylindrical steel storage tanks, P159 4th ed. EEMUA London, UK.

[13] Health & Safety Excutive (HSE), 2002, Guidelines for use of statistics for analysis of sample inspection of corrosion. Research report n. 016.
[14] Milazzo, M.F., Ancione, G., Bragatto, P., Proverbio, E. (2022) A probabilistic approach for the estimation of the residual useful lifetime of atmospheric storage tanks in oil industry Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 77, art. no. 104781,
[15] Yuyama, S., Yamada, M., Sekine, K., & Kitsukawa, S. (2007). High pressure institute of japan recommended practice for acoustic emission testing for corrosion in the bottom plate of aboveground tanks. Materials evaluation, 65(9), 888-892.
[16] Anvo, R. Sattar, T. Gan, T.H. Pinson, I. (2018). Non-destructive Testing Robots (NDTBOTs) for In-Service Storage Tank Inspection. Journal of Mechanics Engineering and Automation. 8. 103-109
[17] Feng, Y., Yang, Y., & Huang, B. (2019). Corrosion analysis and remaining useful life prediction for storage tank bottom. Int.Journal of Advanced Robotic Systems, 16(5)
[18] Cailly, W., Walaszek, H., Brzuchacz, S., Zhang, F., & Lasaygues, P. (2021). Assessment of Long-Range Guided-Wave Active Testing of Storage Tanks. Journal of Physics: Conference Series 1761 (1) 012008.
[19] Zhao, Y., Wu, Z., Li, D., Zhang, Y., & Guan, G. (2020). Intelligent computing methods used in acoustic emission and magnetic flux leakage detection of tank bottom. IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)
[20] Ancione, G.; Saitta, R.; Bragatto, P.; Fiumara, G.; Milazzo, M.F. The Use of Augmented Reality for the Management of Equipment Ageing with a Virtual Sensor. Appl. Sci. 2023, 13, 7843.

Strategie SW e tecniche HW di prevenzione dei danni metallurgici per surriscaldamento locale, di tubi catalitici in forni per steam reforming, correlato con le fasi di avvio e spegnimento del forno

E. Di Ponzio[1], A. Alvino[2], N. Altamura[3], A Mele[1], F. Dibello[4]

[1]Inail - Uot di Taranto
[2]Inail - Dit
[3]Inail - Uot di Bari
[4]ENI Raffineria di Taranto

Abstract

L'attività proposta con il presente lavoro ha lo scopo di valorizzare e portare a condivisione i risultati dell'applicazione sperimentale - su un forno di steam reforming per produzione di idrogeno - di migliorie apportate all'impianto sia mediante design innovativo dei componenti, sia mediante un controllo software più evoluto e accurato della conduzione della combustione, in un contesto di asset integrity.
La strategia che si intende verificare nella sua efficacia è relativa al bilanciamento delle fasi di accensione/spegnimento dei bruciatori, basato su algoritmi di predizione ed ottimizzazione (utilizzando dati di processo e immagini termografiche) con regolazione prima-durante-dopo le fasi di esercizio suddette.
La tutela dello stato di conservazione delle membrature esposte a fiamma, con minimizzazione/eliminazione dei fenomeni di danno da surriscaldamento localizzato, rappresenta uno degli obiettivi principali di prevenzione dell'invecchiamento e rimane quindi di fondamentale interesse la messa a punto di tecniche di ottimizzazione delle variabili del processo di combustione, una volta fissata la geometria costruttiva.

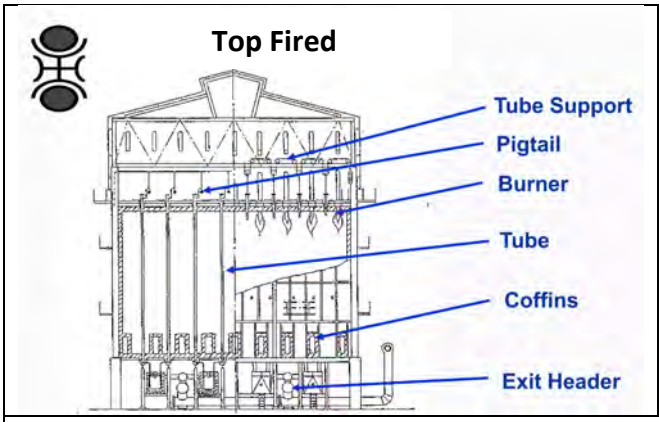
Keywords: asset integrity, steam reforming, affidabilità e sicurezza in esercizio, life cycle assessment.

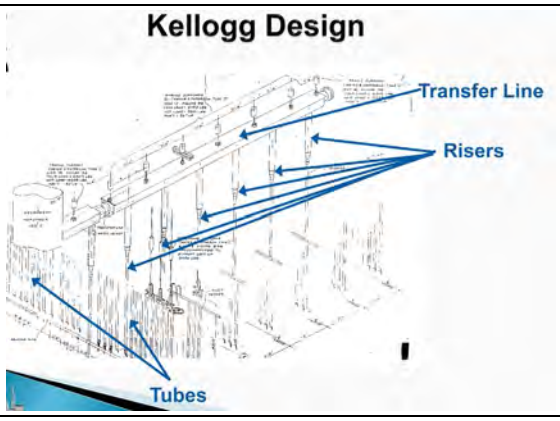
1. Introduzione

Lo steam reforming catalitico (SR) è un processo industriale utilizzato per la produzione di idrogeno a partire da idrocarburi leggeri della serie satura (metano, etano propano, butano) e vapore. Esso si basa su due step: il primo (denominato reforming primario) permette la trasformazione degli idrocarburi di partenza in idrogeno molecolare (H_2) e monossido di carbonio (CO), mediante una reazione con vapor d'acqua, in presenza di un catalizzatore al nichel; il secondo, detto reforming secondario, vede reagire il vapore acqueo con il monossido di carbonio prodotto

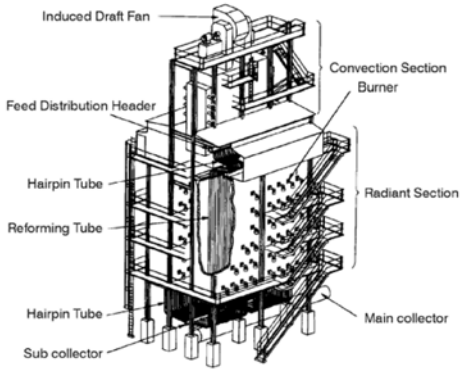
nello step precedente e una piccola percentuale residua di idrocarburi per dare altro idrogeno molecolare e anidride carbonica (CO_2). Poiché l'intero processo è endotermico, è necessario un notevole apporto di calore perché esso avvenga: le condizioni operative di un impianto di reforming, pertanto, non possono prescindere da un adeguato riscaldamento, mediante appositi bruciatori, dei componenti in cui si fa avvenire la reazione, ossia dei tubi catalitici. Proprio per questo motivo, una delle principali cause di danno negli impianti di reforming è il surriscaldamento dei componenti. Esso è infatti il principale promotore di fenomeni quali lo scorrimento viscoso, il dusting, la carburizzazione e l'invecchiamento dei materiali.
Nel bilancio energetico del processo, la reazione più delicata è quella di reforming primario, poiché si tratta di una reazione endotermica e perché richiede la presenza di un catalizzatore al nichel [2].
Si è potuto osservare, a seguito di danni strutturali emersi dopo pochi anni di funzionamento, che si rendono necessari sia miglioramenti delle tecniche di conduzione, nonostante la robusta esperienza pratica posseduta dal personale di controllo sia analisi dei dati e successiva messa a punto di modelli di predizione delle sequenze di apporto/sottrazione di calore ai tubi stessi.
La protezione da surriscaldamento di tubi catalitici nei forni per produzione di idrogeno mediante steam reforming, tipicamente costituiti da acciai ad elevato tenore di Ni e Cr (ASTM A 351/A608/A297, DIN GX10NiCrNb3220 per citarne alcuni), riguarda in particolare le fasi di avviamento e spegnimento del forno.
I danneggiamenti metallurgici riscontrabili durante l'esercizio possono essere prevenuti, se non del tutto eliminati, mediante elementi/tecniche di protezione organizzati in due macro-classi: *"locale" e "globale"* ulteriormente suddivisibili in sottocategorie.
Giova ricordare che nelle più recenti realizzazioni per portate di produzione di decine di migliaia di Nm3/h, la tipologia costruttiva della camera di combustione prevede una disposizione dei bruciatori ortogonale all'asse dei tubi catalitici. Di seguito si elencano le tipiche architetture dei forni per SR più diffusi:

- top fired
- foster wheeler terrace wall
- side wall fired
- altri tipi meno frequenti basati sugli stessi principi suindicati





Topsoe reformer with burners placed on side walls



Fonte: www.gbhenterprises.com

Figura 1

2. Descrizione impianto e contesto operativo

Il forno dell'impianto di produzione dell'idrogeno della Raffineria di Taranto - F4401 del tipo SIDE WALL fig. 01 - è preposto alla produzione di idrogeno ad elevata purezza per alimentare la rete comune a servizio delle altre Unità utilizzatrici. Il forno può essere alimentato con gas naturale o con GPL, oppure una miscela dei due. È suddiviso in 4 sezioni principali: desolforazione, reforming, conversione CO e separazione dell'H_2.
Lo schema della sezione di reforming dell'impianto è riportato nella fig. 02.

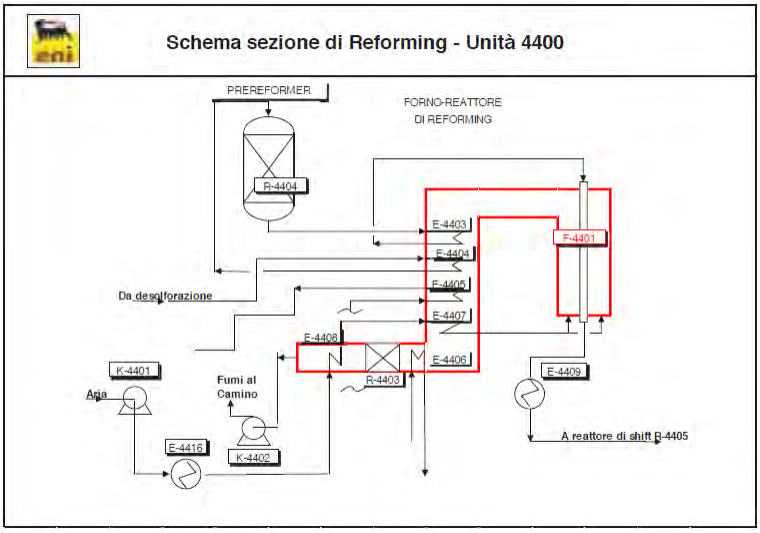


Figura 2. Schema sezione di reforming impianto di produzione idrogeno – U4400

Durante il Safap 2018 [5] è stata presentata una memoria che trattava e valutava il ciclo di vita del suddetto impianto, le criticità riscontrate sui materiali nonché le strategie di manutenzione ridefinite a valle dell'analisi.
Ai fini del presente lavoro, sono stati presi in esame ulteriori aspetti gestionali e impiantistici, del contesto operativo locale, ritenuti strategici per la salvaguardia dell'integrità strutturale dell'item "FORNO" che si possono sintetizzare come segue:

- Aggiornamento/adeguamento ed ottimizzazione, delle procedure in uso per la conduzione del forno (accensione e spegnimento), agendo sulle variabili: *pressione del combustibile ai bruciatori (P fuel gas); composizione chimica variabile del combustibile fuel gas (soprattutto nei transitori di avvio ordinario e post fermata di manutenzione (M.T.A. maintenance turnaround).*
- Introduzione di nuove tecnologie software e algoritmi per il controllo in esercizio e in caso di blackout.
- Valorizzazione dei dati di funzionamento relativi alla rilevazione termografica in continuo dei tubi contenenti il catalizzatore.

I suddetti aspetti hanno candidato l'U4400 alla sperimentazione innovativa da parte di ENI e TOPSOE, fabbricante del forno, ritenuta dagli autori meritevole di trattazione nel presente lavoro, in considerazione della particolarità dello stabilimento, classificato di soglia superiore ai sensi del D.Lgs. 105/15 (recepimento della direttiva SEVESO III) e pertanto dotato di SGS-PIR, per il quale particolare rilievo rivestono le procedure di gestione dell'invecchiamento nonché i piani di miglioramento continuo, ai quali possiamo ricondurre il tema qui trattato. I sistemi tecnologici, pur rientrando tra quelli definiti di allarme e blocco, non agiscono su parametri critici connessi a scenari incidentali e pertanto non si fa riferimento al momento ad eventuali impatti sulle analisi di affidabilità e sicurezza dell'unità critica F4401.

2.1 Elementi tecnico-gestionali considerati

Dopo aver subito i meccanismi di danno dei tubi catalitici [1][6][7], con il gestore sono state analizzate le criticità di esercizio e di conduzione che, condivisi con il costruttore del forno, hanno portato all'individuazione delle variabili del processo ottimizzabili quali:

- la variabilità della *pressione del carburante* (fuel gas) ai bruciatori
- *la composizione chimica del combustibile* "fuel gas" prodotto in stabilimento e suscettibile di miscelazione non costante, con conseguente variazione del suo potere calorifico
- *le accensioni* (a freddo e a caldo – hot restart) e gli *spegnimenti* per esigenze di fermata (controllati) o per blackout improvviso (non critico)
- la geometria e la *configurazione di accensione* dei bruciatori (sequenza)
- l'esperienza del *personale addetto alla conduzione* (cambio generazionale).

Le proposte di miglioramento del ciclo hanno avuto tutte come obbiettivo comune la minimizzazione dell'errore di valutazione dei gradienti termici di parete dei tubi.

2.2 Modello di interpretazione

I punti di lavoro dei bruciatori del forno, si possono considerare distribuiti in uno spazio (fig. 03), in cui la variabile dipendente - portata aria comburente (Vac) – risulterà ampiamente variabile a causa della dispersione delle grandezze del piano orizzontale, l'analisi chimica (A.C.) del fuel gas e la sua pressione (Pfg) del combustibile, variabili in modo quasi casuale.

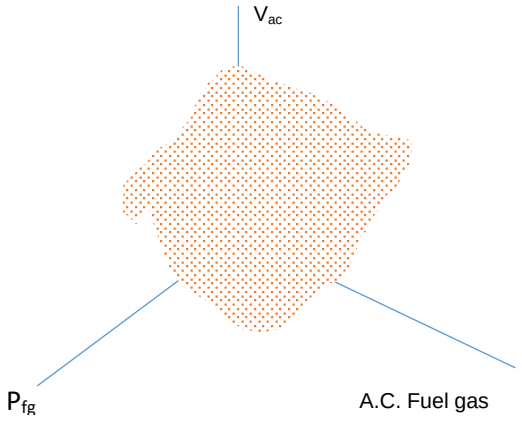


Figura 3. Variabili del processo di combustione – punti di lavoro

La conduzione manuale precedente non permetteva di ottimizzare la combustione, ma soprattutto la distribuzione stabile del calore alle pareti dei tubi, in fase di accensione dei bruciatori.

L'esito dell'analisi dei dati di combustione si è in prima istanza concretizzato con l'eliminazione dei cosiddetti HOT RESTART, tipici dei riavvii dopo arresti improvvisi,

che non prevedevano ne permettevano il totale raffreddamento, a temperatura ambiente, e la ripartenza cosiddetta a “freddo”.
È stato adottato quindi un sistema di controllo automatico, sia di rilevazione continua delle variabili A.C e P_{fg}, sia di calcolo in tempo reale della portata volumetrica dell’aria comburente alle sezioni dei bruciatori.
In fig. 04 si riporta l’architettura del sistema di misura, regolazione e controllo integrato a DCS.



Figura 4. Architettura del sistema di controllo generale OFP-TFM

Un output atteso è stato il modello della configurazione geometrica della sequenza di accensione dei bruciatori (fig. 05) che operano trasversalmente all’asse dei tubi e su più file a quota differente (si rimanda allo schema costruttivo per la loro disposizione sulle pareti della camera di combustione).



Figura 5. Esempio di mappa del “Burner status” (in giallo bruciatori accesi, verde accensioni successive, rosso sconsigliata accensione)

Il costruttore ha proposto una soluzione basata su due sistemi di controllo integrati denominati TFM (Topsoe Furnace Manager) e (OFP) Over-Firing Protection.
Il TFM è da considerarsi un livello aggiuntivo del sistema di protezione da surriscaldamento del forno, necessario per riportare nel DCS (Distributed Control System) di stabilimento. Esso in sostanza diventa il sistema di supporto alle decisioni

per il conduttore dell'impianto per assicurare il migliore apporto termico, ai tubi catalitici durante i transitori e la marcia del forno stesso.

2.2.1 Over Firing Protection

L'OFP è definito nello schema seguente (fig. 06).

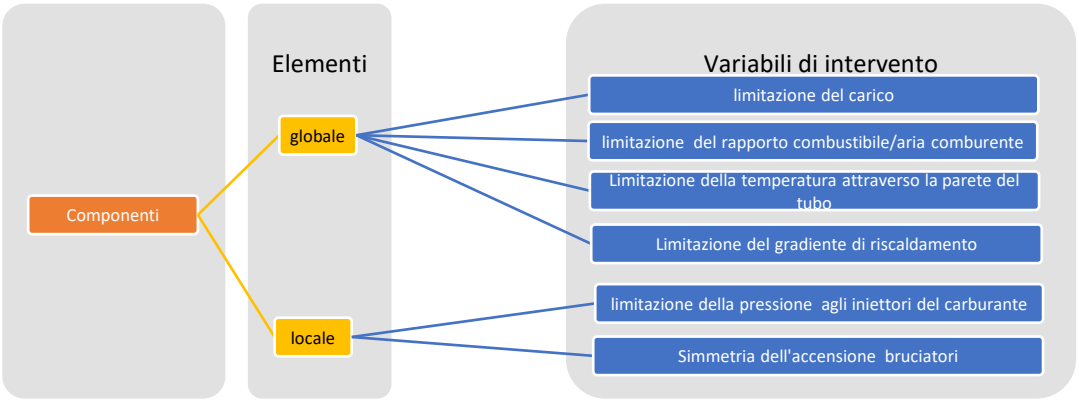


Figura 6. Panoramica dei componenti del sistema OFP

Di seguito si riporta una descrizione degli elementi rilevanti di OFP, evidenziando i potenziali ambiti di miglioramento dell'esperienza operativa, conseguibili e misurabili, grazie ad un approccio rigoroso di raccolta, analisi e interpretazione dei dati.
L'OFP è progettato per proteggere i tubi catalitici di reforming primario dal surriscaldamento durante l'avvio, i cambi di carica, lo spegnimento e in generale i transitori di funzionamento. I suoi componenti si suddividono in 2 sezioni operanti a livello locale e globale nel forno.

2.2.1.1 Elementi di livello globale

Variabili di intervento globale.

a) Limitazione del carico

La mancata corrispondenza tra l'apporto di calore al reformer primario e l'assorbimento di calore sia come calore di reazione che, come calore sensibile, può causare il surriscaldamento dei tubi del catalizzatore del reformer primario. Pertanto, è importante non fornire più calore del necessario.
I calcoli necessari per la limitazione del carico tengono conto delle seguenti relazioni tra i parametri del processo:

$$QMAX = (QREF + QFURN) \cdot 1.6 \cdot FAC \quad (1)$$

Dove

$QREF$ - calore trasferito al gas di processo, kcal/h.

$QFURN$ - calore contenuto nei fumi, kcal/h
1.6 - Fattore di conversione in equivalenti gas di scarico PSA
FAC - parametro adimensionale di regolazione del carico, che può essere regolato se $Qmax$ non è appropriato a causa della deviazione nella perdita di calore o di altre incertezze.
Il predefinito valore di FAC è 1.0 e può essere regolato solo con l'approvazione del supervisore di turno.
Si omette la struttura dei calcoli che conduce alle variabili della relazione (1)

b) Limitazione del rapporto combustibile/aria comburente

I bruciatori devono essere sempre alimentati con aria sufficiente per garantire una combustione completa al fine di prevenire la combustione incontrollata nella sezione radiante del reformer.
Durante l'avviamento grandi quantità di aria vengono inviate al reformer attraverso i bruciatori, che non hanno ancora lo stato di acceso. Ciò significa che il flusso d'aria di combustione e il contenuto di ossigeno, nel condotto al camino di scarico, non sono indicatori affidabili della fornitura di aria ai bruciatori accesi e quindi non possono essere utilizzati per garantire una combustione completa.
La pressione dell'aria di combustione, richiesta per i bruciatori, può essere calcolata in base alla pressione del combustibile e la temperatura dell'aria comburente. Tuttavia, la pressione dell'aria di combustione deve essere almeno pari a 40 mmH_G.

c) Limitazione della temperatura attraverso la parete del tubo

L'impatto dell'entità del surriscaldamento si avvale di due misurazioni della temperatura: temperatura attraverso la parete (BWT) e temperatura del gas di processo all'uscita del reformer.
Tra queste due temperature, la seconda ha un ritardo e quindi la risposta più veloce, in caso di riscaldamento eccessivo, può essere ottenuta monitorando il BWT. Oltre alla limitazione del carico, la limitazione del BWT fornisce anche una protezione "globale" dal riscaldamento eccessivo dei tubi del reformer primario. Si riporta di seguito il BWT ritenendolo parametro fondamentale per la conoscenza dei potenziali danni ai tubi.

$$BWT_{\mathrm{SP}} = \min\left[BWT_{100\%}, \begin{cases} 600°C & if\ Cap \le 3\% \\ \dfrac{(A\cdot 30 + B - 600°C)}{30}\cdot Cap + 600°C & if\ 3\% < Cap < 30\% \\ A\cdot Cap + B & if\ Cap \ge 30\% \end{cases}\right] \quad (2)$$

dove A= 3.23°C; B= 765°C

$$Cap = capacity\ (\%) = \left(\frac{M_{PG}}{16868}\right)\cdot 100 \quad (3)$$

MPG (kg/h) portata di gas di processo al punto di miscelazione con vapore

d) Limitazione del gradiente di riscaldamento

Durante il riscaldamento del reformer dallo stato freddo fino alla normale temperatura di esercizio, il gradiente massimo di aumento della temperatura è di 50°C/h, attraverso la parete del tubo (BWT), avendo a riferimento la temperatura di processo del gas in uscita ($Tout$) e la temperatura nel reformer. Questa limitazione serve a proteggere il refrattario del reformer e il collettore freddo per consentire la dilatazione termica delle tubazioni calde.
Nella fase iniziale del riscaldamento del reformer, la temperatura aumenterà subito dopo l'accensione di un bruciatore con gradiente superiore a 50°C/h per alcuni minuti. Pertanto, l'aumento della temperatura deve essere basato su l'aumento della temperatura media oraria.

$$\frac{d(BWT)}{dt} \leq 50°\text{C/h} \quad AND \quad \frac{d(T_{out})}{dt} \leq 50°\text{C/h} \tag{4}$$

2.2.1.2 Elementi di livello locale

a) Limitazione della pressione agli iniettori

Per garantire un'efficiente distribuzione del calore, senza surriscaldamento durante l'avviamento, è fondamentale mantenere la pressione del carburante più bassa possibile accendendo il maggior numero possibile di bruciatori. Ciò si ottiene forzando la pressione del collettore del carburante a un valore corrispondente alla fiamma stabile, con minimo rilascio di calore del bruciatore (ovvero 2,0 mbar g), fino al 50% dei bruciatori accesi.
Il numero di bruciatori utilizzati per questa limitazione e la pressione del bruciatore dovrebbero essere definiti durante la messa in servizio (fig, 07).

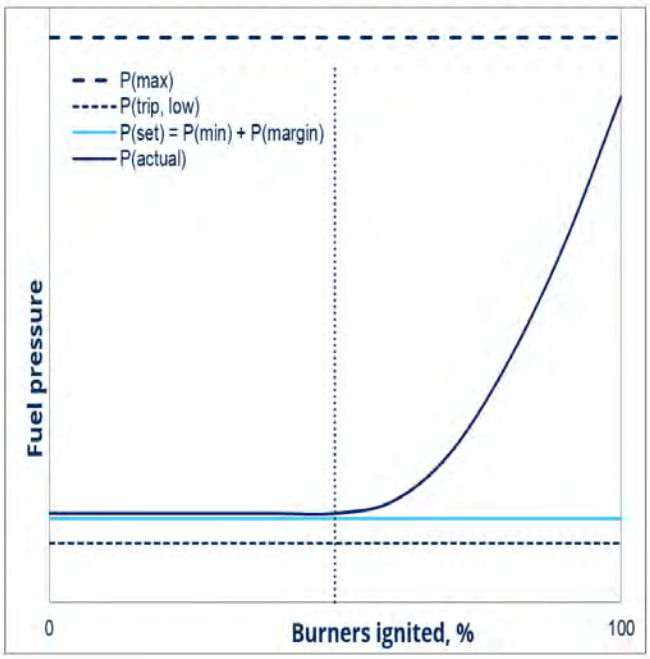


Figura 7. Esempio di set-up della pressione del carburante, leggermente superiore al valore di stabilità della fiamma.

b) Simmetria della configurazione di accensione dei bruciatori

Durante l'avviamento, è importante accendere i bruciatori secondo uno schema particolare per garantire che la distribuzione del calore sia il più uniforme possibile e che non vi sia un riscaldamento locale concentrato.
In fig. 08 si riporta un esempio di schema di accensione:

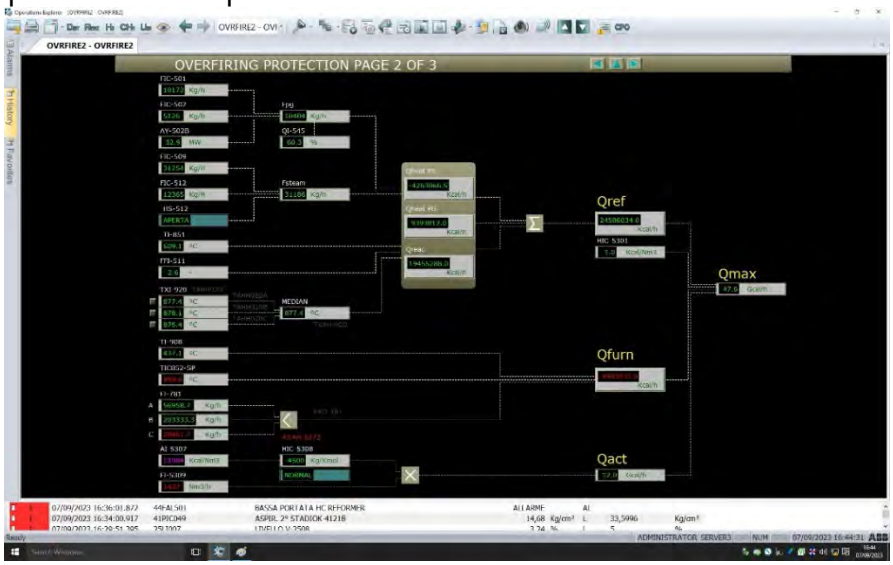


Figura 8. Dati di ingresso ai bruciatori per la protezione globale

Ciò può essere ottenuto seguendo una particolare sequenza di accensione del bruciatore. OFP lo fa in modo proattivo *consigliando all'operatore* di seguire la sequenza simmetrica di accensione del bruciatore come di seguito.
1. Accendere ogni terzo bruciatore nella seconda fila (dal basso)
2. Accendere ogni terzo bruciatore della quarta fila
3. Accendere ogni terzo bruciatore della terza fila
4. Accendere ogni terzo bruciatore della quinta fila

Inoltre, il sistema OFP controlla, durante l'avvio, il rispetto della sequenza di accensione dei bruciatori suggerita e blocca l'aumento del flusso di combustibile ai bruciatori, se non rispetta la simmetria di accensione suggerita.
Assicura poi:

- un simile schema di accensione dei bruciatori, sulle pareti opposte nella camera del forno.
- una differenza minima tra il numero di bruciatori accesi in corrispondenza di ogni colonna.
- di evitare l'accensione di bruciatori adiacenti a meno che non si ottenga una distribuzione adeguata del calore.
- la mancata accensione dei bruciatori della fila superiore e inferiore durante la prima accensione.

2.2.2 TOPSOE FURNACE MANAGER (TFM)

Il TFM opera in combinazione con l'OFP per fornire il massimo livello di protezione contro il surriscaldamento dei tubi catalitici del reformer primario (asset integrity). La

rilevazione in linea della fiamma, all'interno del forno, consente l'input automatico al modello di accensione del bruciatore (fig. 09) e, quindi, garantisce meno interazione umana.

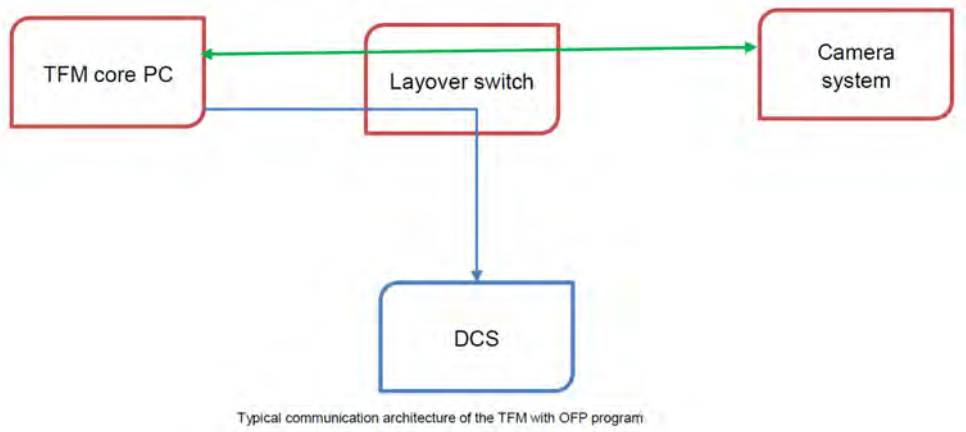


Figura 9. Schema di integrazione funzionale

Si riportano di seguito le cause di un'asimmetrica configurazione di accensione dei bruciatori, per meglio comprendere la strategia affidata all'OFP +TFM.

1. Se due (2) o più bruciatori sulla parete opposta non vengono accesi entro dieci (10) minuti.
2. Se un (1) bruciatore sulla parete opposta non viene acceso entro quindici (15) minuti.
3. Se si verificano due (2) o più delle seguenti condizioni:

A. i bruciatori adiacenti in una fila vengono accesi quando meno del 40% dei bruciatori in quella fila sono accesi
B. i bruciatori adiacenti in una colonna vengono accesi quando solo un (1) bruciatore è acceso in quella colonna
C. la differenza tra il numero di bruciatori in ciascuna colonna è superiore a uno (1)

Infatti, la sollecitazione termica dei tubi, contrapposti ai bruciatori disposti come in (fig. 10), è conseguenza della mappa geometrica degli stessi bruciatori che ha rappresentato il primo dato monitorato in esercizio, rispetto alla procedura stabilita in origine dal costruttore del forno.

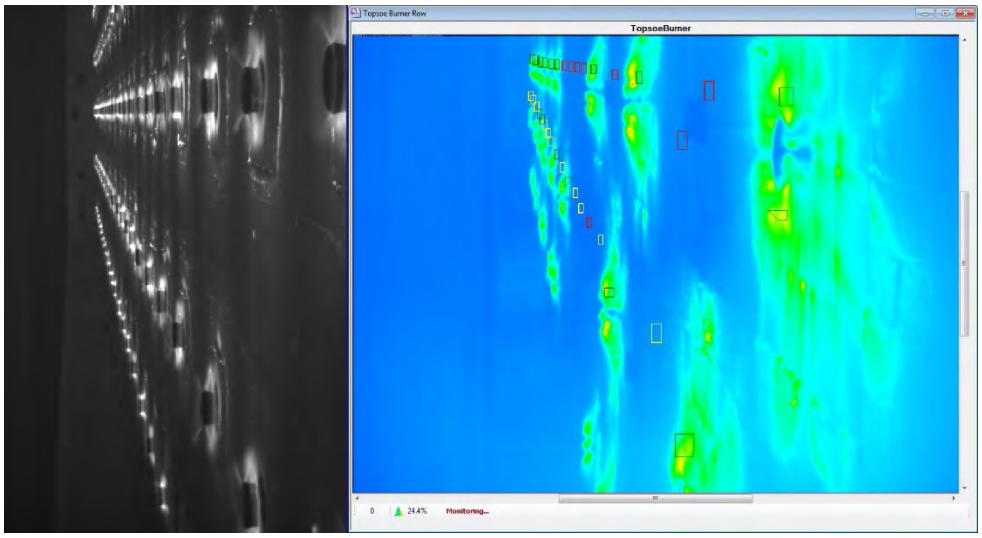


Figura 10. Vista della camera di combustione e mappe termiche di input all'algoritmo, come visibili all'operatore, con rettangoli colorati in riferimento allo stato del burner

E' stata quindi installata una serie di termoscanner allo scopo di rilevare, alle diverse quote corrispondenti alla posizione dei bruciatori e per tutta la camera di combustione, le mappe termografiche (fig. 10) delle pareti ove sono collocati i bruciatori, per la successiva determinazione/stima dei gradienti termici di profondità, verso il catalizzatore.
Il sistema meccanico di posizionamento delle termocamere è di tipo retrattile (fig. 11), in quanto in caso di anomalia (es. singola temperatura di raffreddamento) estrae la termocamera per preservarne l'integrità, ed è graficamente riportato di seguito.

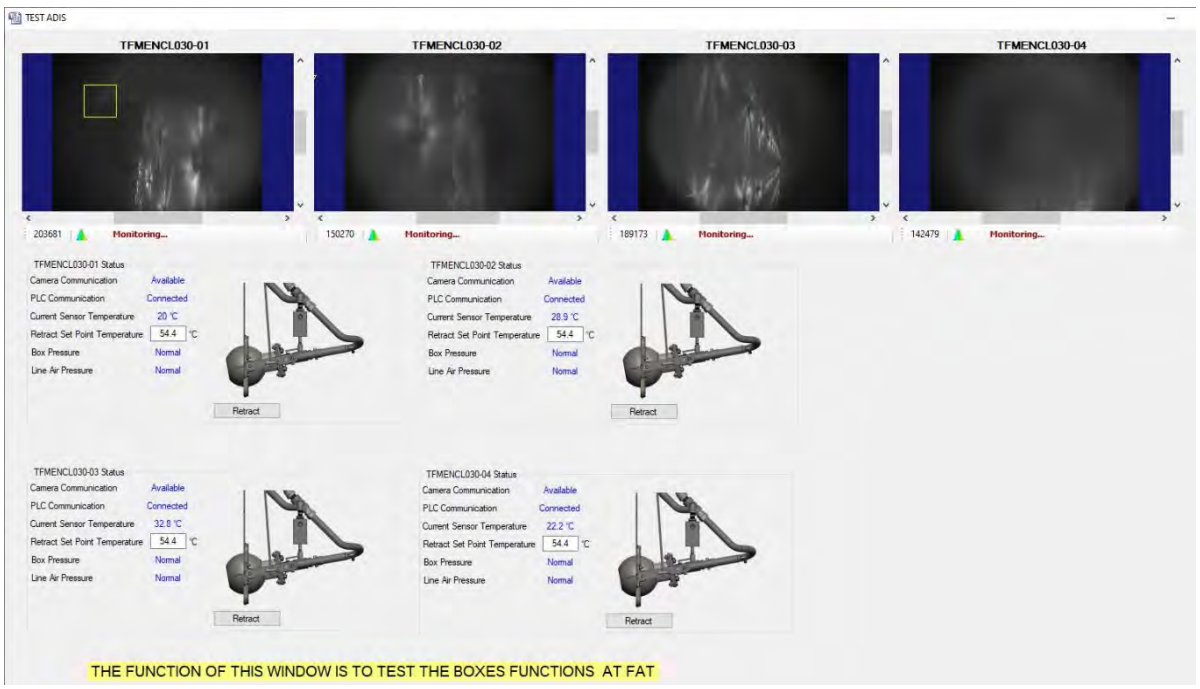


Figura 11. Esempio di stato della termocamera e del sistema retrattile di protezione (inserita o estratta)

Nel sistema DCS viene aggiunta una matrice dei bruciatori dove vengono registrati quelli accesi.

- **Manualmente**: quando un bruciatore viene acceso, l'operatore del pannello selezionerà l'accensione del bruciatore nel sistema DCS dopo la conferma da parte dell'operatore sul campo
- **Automaticamente**: L'accensione dei singoli bruciatori verrà registrata dal (TFM) mediante le termocamere montate sulle pareti terminali del reformer. Inoltre, le telecamere forniscono una panoramica visiva delle condizioni del forno.
  Sulla base della matrice dei bruciatori, il sistema DCS conterrà informazioni (numero e posizione) su quale bruciatore è acceso e terrà traccia di quanti bruciatori sono accesi. Il sistema TFM controllerà la simmetria e aiuterà l'operatore a stabilire quale bruciatore dovrà essere acceso successivamente.
  Se viene rilevata un'accensione asimmetrica, un segnale Acceso/Spento verrà inviato al controllore automatico, impedendone qualsiasi attivazione con aumento del riscaldamento, finché è presente una distribuzione asimmetrica del calore.

2.3 Risultati

Sono stati ottenuti dei pattern reali in cui si evidenzia una distribuzione più uniforme del flusso di calore sulle pareti dei tubi catalitici e l'assenza di danneggiamento delle membrature.

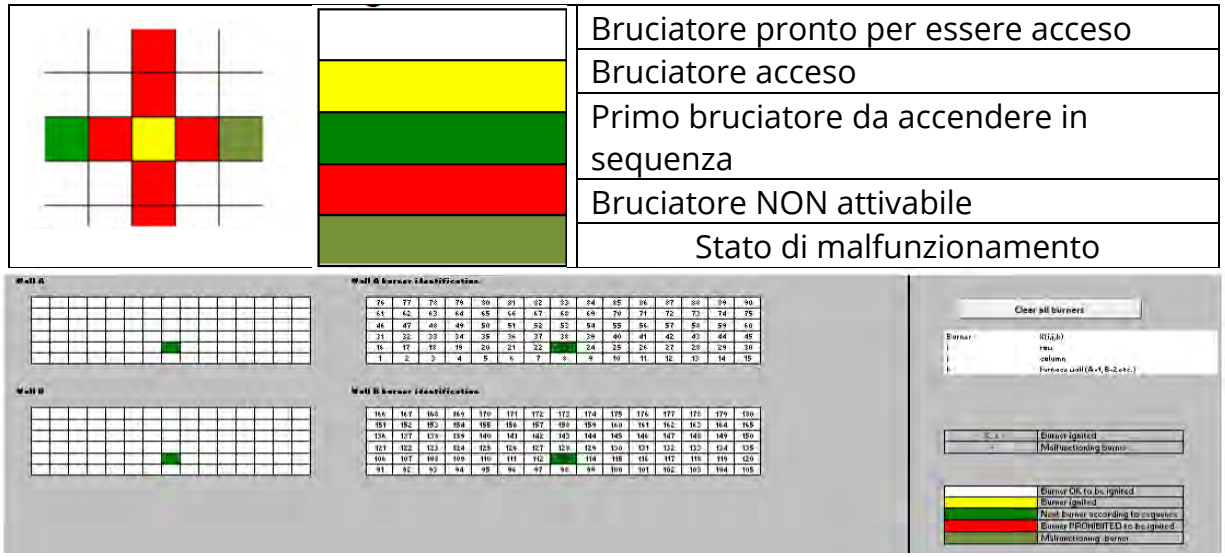


Figura 12. Esempio e legenda dello stato dei bruciatori

Con riferimento alla fig. 12 si può quindi comprendere come l'implementazione di questo tool, per la sequenza di accensione dei bruciatori, supporti decisioni quali:

- Suggerire uno schema simile di accensione dei bruciatori posti su pareti opposte all'interno di un forno (con un ritardo temporale minore)

- Ridurre al minimo la differenza tra il numero di bruciatori accesi in ciascuna colonna del forno.
- Suggerire di non accendere i bruciatori speculari o mal funzionanti e bruciatori in posizioni simili nella camera, finché non viene acceso almeno il 30% dei bruciatori totali del reformer.
- Suggerire di non accendere i bruciatori adiacenti in fila fino a quando non viene acceso il 40% dei bruciatori in quella fila.
- Suggerire di non accendere i bruciatori di colonne adiacenti, fino a quando non vengono accesi almeno 2 bruciatori in quella colonna.

Fa eccezione l'accensione dei bruciatori nella fila più in basso.

- Suggerire l'accensione dei bruciatori nelle due file più alte, solo dopo che il 30% dei bruciatori sono accesi nelle righe 2, 3 e 4.

Ciò potrebbe non essere fattibile durante il riavvio a caldo.
Pertanto, la sequenza iniziale di accensione del bruciatore proposta per l'avviamento a freddo è risultata la seguente:

SEQUENZA	RIGA BRUCIATORI	% di BRUCIATORI ATTIVI
1	2^	30%
2	4^	30%
3	3^	30%
4	5^	30%
5	1^	30%
6	6^	30%

Il controllo di simmetria è gestito con il supporto di uno strumento interattivo, integrato nel DCS, per la sequenza di accensione fig. 13.

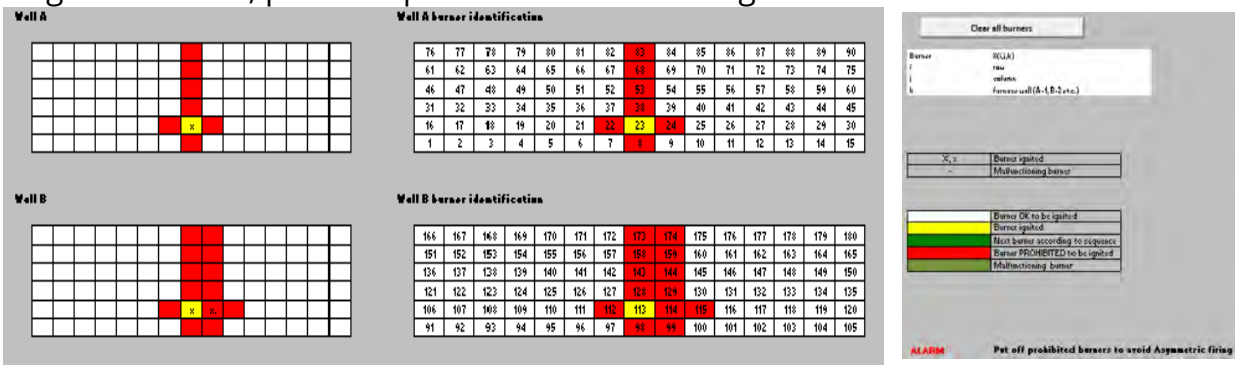


Figura 13. Disposizione dei bruciatori la cui accensione è bloccata

Lo strumento impedirà l'accensione dei bruciatori (indicati in colore rosso), in base alle regole della simmetria di controllo.
Nel caso in cui vengano accesi bruciatori vietati il sistema di allarme visualizzerà un relativo avviso.
Quando viene rilevato un modello asimmetrico, verrà emesso un allarme inviato al sistema di controllo (DCS), impedendo ulteriore aumento del riscaldamento prima che venga risolto il profilo di combustione asimmetrico.

Pertanto, l'operatore deve intervenire sulla causa di accensione asimmetrica e agire per prevenirla, ad esempio verificando cosa è successo con l'ultimo bruciatore acceso.

3. Conclusioni

La maturità delle soluzioni metallurgiche impiegate dai fabbricanti di forni per la produzione di idrogeno, mediante processo di steam reforming, e la storia delle forme di danno, rilevate nei materiali dei tubi catalitici presenti in camera di combustione [8,9,10], hanno stimolato la ricerca in sicurezza e affidabilità del forno (asset integrity), perseguendo l'ottimizzazione sotto il profilo tecnologico-strumentale. La collaborazione fabbricante-utilizzatore ha individuato un interessante e promettente programma di miglioramento delle cause di surriscaldamento locale, che si prefigge i seguenti obiettivi:

1. prevenire l'errore umano e l'inesperienza del conduttore riducendo le incertezze di gestione con maggiore controllo software (strutturazione e ripetibilità);
2. ottimizzare le variabili di processo (pressione, temperatura, portata aria comburente, ecc.), rendendole più affidabili e precise;
3. evidenziare le condizioni di allarme per surriscaldamento locale dei materiali, riferibili ad asimmetriche mappe dei bruciatori;
4. ridurre e se possibile eliminare i fenomeni di "coking del catalizzatore" all'interno dei tubi di reforming, con conseguente incremento del tempo di vita utile dei tubi e avvicinamento ai controlli periodici di legge delle 100000 ore di esercizio, senza meccanismi di danno inaccettabili sotto il profilo strutturale.

Il periodo di osservazione in esercizio del sistema di supporto alle decisioni presentato - "OFP+TFM"- ha permesso ad oggi di constatare un primo risultato promettente, consistente nella regolarità di marcia (assenza di spegnimento prolungato dei/ll bruciatore). In particolare, rispetto alla precedente rilevazione dello stato di spento del bruciatore, eseguita andando fisicamente sull'impianto durante il normale orario di lavoro del personale in turno, quindi con potenziali intervalli di tempo "IN STATO SPENTO" dell'ordine di ore (max 3h), attualmente la rilevazione avviene in tempo reale, con ripristino di accensione pressoché immediati.
Un ulteriore ed importante contributo, a supporto dell'affidabilità e sicurezza in esercizio del forno, sicuramente sarà dato dai risultati dei controlli [5] che si eseguiranno in concomitanza dell'eventuale applicazione della circolare Ispesl n. 48/2003 (scorrimento viscoso). La comparazione potrà dare delle risposte in merito alla stretta correlazione fra le innovazioni tecnologiche e il miglioramento dell'asset integrity IOW (API RP 584) delle stesse. In ultimo non si dovranno trascurare anche i miglioramenti eventualmente richiesti per la sicurezza funzionale del sistema di controllo strumentale, in conformità allo standard IEC 61508. Infatti, l'affidabilità degli strumenti utilizzati, come termoscanner e sistemi "bus di comunicazione e decisione" richiedono l'applicazione di un elevato livello SIL (Safety Integrity Level) di ogni componente, per generare un adeguato livello SIL complessivo del sistema.

4. Collaborazioni

Il presente lavoro ha beneficiato significativamente del contributo tecnico-professionale dei colleghi dell'Ingegneria di Manutenzione della Raffineria di Taranto, nella persona di Marco Adamo, e del sig. Gentile Luigi (RTO dell'Unità 4400 di cui fa parte il forno idrogeno U4401 trattato). Ad essi va il ringraziamento degli autori.

Bibliografia

[1] Alvino, A.; Mazzocchi, V.; Delle Site, C.; Giacobbe, F.; "Influenza delle condizioni di esercizio sul degrado di tubi in acciaio per impieghi ad alte temperature nell'industria petrolchimica". Giornate Nazionali sulla corrosione e Protezione, Udine 24-26 giugno 2009.

[2] Larsen J.; Radtke K.; Ruthardt K. "Hydrogen Trends" Hydrocarbon Engineering, November 2005, pp. 41-46.

[3] Gerard B. Hawkins, Reformer Tube Metallurgy: Design Consideration; Failure Mechanisms; Inspection methods.

[4] Techint, eni S.p.A. Manuale Operativo Impianto Produzione Idrogeno HMU UNIT 4400

[5] E. Di Ponzio, V. Galasso, A. Mele, N. Altamura, A. Scialpi, V. Camodeca; "CASE HISTORY: Life Cycle Assessment di un Forno dell'Unità Steam Reforming della Raffineria Eni S.p.A. di Taranto", Atti SAFAP, Bologna 28 novembre 2018

[6] Alvino, A.; Lega, D.; Giacobbe, F.; Mazzocchi, V.; Rinaldi, A. "Damage characterization in two reformer heater tubes after nearly 10 years of service at different operative and maintenance conditions" Eng. Fail. An. 2010, vol. 17, p. 1526-1541.

[7] Alvino, A.; Ramires, D.; Tonti, A.; Lega, D. "Influence of chemical composition on microstructure and phase evolution of two HP heat resistant stainless steels after long term plant-service aging" Mater. High Temp. 2014 31 2-11

[8] Guglielmino, E.; Pino, R.; Servetto, C.; Sili, A. "Damage investigation on welded tubes of a reforming furnace" La Metallurgia Italiana 2015 vol. gennaio, 53-58.

[9] Bonaccorsi, L.; Guglielmino, E.; Pino, R.; Servetto, C.; Sili, A. "Damage analysis in Fe-Cr-Ni centrifugally cast alloy tubes for reforming furnaces", Eng. Failure An. 2014, vol. 36, 65-74.

[10] Swaminathan, J.; Guguloth, K.; Gunjan, M.; Roy, P.; Ghosh, R. "Failure analysis and remaining life assessment of service exposed primary reformer heater tubes" Eng. Fail. An. 2008, vol. 15, p.311-331

[11] M. Adamo; N. Altamura; G. Batisti; E. Di Ponzio; V. Galasso; A. Mele; A. Sibilano." CASE HISTORY - Analisi critica della linea guida di valutazione gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso". Atti SAFAP, Roma 16-18 novembre 2021.

La procedura di Lockout-Tagout (LOTO) applicata agli impianti di processo: una metodologia sicura per l'isolamento delle energie durante le fasi di manutenzione, riparazione, ispezione

M. Giacobbo, R. Bordignon, F. Sudiro

NECSI s.r.l.

Abstract

Negli ultimi decenni l'attività di manutenzione ha subito un'importante evoluzione, in quanto si è trasformata da evento straordinario e puntuale svolto perlopiù in occasione di guasti o malfunzionamenti, ad attività ordinaria atta a prevenire tali situazioni indesiderate. Oggi si configura come un'attività complessa che viene programmata ed eseguita sistematicamente come un processo continuo.
La legislazione vigente in tema di salute e sicurezza sul lavoro prevede l'obbligo da parte del Datore di Lavoro di sottoporre a idonea manutenzione le proprie attrezzature, al fine di garantire nel tempo la permanenza dei requisiti di sicurezza assicurati originariamente dai fabbricanti. D'altra parte, le attività di manutenzione espongono a loro volta i manutentori a dei rischi, spesso subdoli poiché l'attrezzatura potrebbe trovarsi, magari proprio a causa di un guasto, in condizioni di sicurezza compromessa.
Una delle possibili cause di incidente in un impianto fermo è il riavvio di quest'ultimo da parte di un operatore non informato sulle attività in corso, con la conseguente riattivazione delle *fonti di energia*. Condizione essenziale per garantire la sicurezza nelle fasi manutentive è quindi l'*isolamento* e *dissipazione* di tutte le energie presenti, che negli impianti complessi può risultare tutt'altro che banale in quanto occorre considerarle nel senso più ampio del termine, contemplando anche inerzie, fluidi, sostanze, ecc. A tale riguardo, l'attuazione di procedure robuste e ben definite, come la LOTO (*Lockout - Tagout*), è in grado di garantire un elevato livello di sicurezza per tutti gli operatori coinvolti.
La memoria vuole presentare l'applicazione delle procedure LOTO agli impianti di processo come metodo per consentire di eseguire in sicurezza tutte le fasi operative ad impianto fermo, in particolare le manutenzioni, riparazioni ed ispezioni.

Keywords: verifiche, controlli, analisi dei rischi.

1. Introduzione

1.1 Richiami normativi

Un impianto di processo è tipicamente un sistema che manipola, trasporta o produce secondo un ciclo tecnologico perlopiù a flusso, in cui tipicamente sono presenti

diverse fonti di energia (elettrica, pneumatica, termica, ecc.), oltre che fluidi e sostanze, talvolta anche pericolosi (infiammabili, asfissianti, tossici, ecc.).
La sicurezza di tali impianti è tipicamente regolamentata dalle direttive europee applicabili, tra cui quelle principali sono la PED 2014/68/UE, applicabile ad attrezzature ed insiemi a pressione, la MD 2006/42/CE, relativa alle macchine, e l'ATEX 2014/34/UE. Tali direttive prevedono il rispetto di espliciti requisiti di sicurezza tali per cui le fonti di energia devono poter essere adeguatamente isolate e dissipate. Si pensi ad esempio all'alimentazione elettrica del motore di una pompa o un agitatore, oppure al gas che alimenta un bruciatore, o ancora alla pressione residua in un serbatoio, o a cariche elettrostatiche accumulate.
Riguardo alla sicurezza nei luoghi di lavoro, il D.Lgs. 81/08 (All. V, par. 11) definisce una serie di adempimenti per eseguire in modo sicuro interventi ad impianto fermo, ovvero in occasione di attività di manutenzione, ispezione, riparazione, ecc.
La gestione dell'isolamento delle energie può essere effettuata in modo efficace mediante l'attuazione di specifiche procedure. Tali disposizioni, di origine statunitense [1] ma nel tempo recepite all'interno dell'unione europea di fatto attraverso norme tecniche [2] oggi ufficialmente riconosciute, sono chiamate con l'acronimo LO-TO, ovvero, *Lockout-Tagout*.

1.2 Le procedure di Lockout-Tagout

Il LOTO è un metodo che permette di mettere fuori servizio in assoluta sicurezza macchine ed impianti, seguendo istruzioni scritte ad hoc.
Gli scopi principali dell'applicazione del LOTO si possono riassumere nei seguenti punti:

- proteggere i lavoratori dai rischi connessi alle fonti di energia legate alle attrezzature o agli impianti
- proteggere i lavoratori addetti da avviamenti improvvisi delle attrezzature/impianti causati da persone non informate sulle attività in corso (out-to-in)
- proteggere i lavoratori non informati da avviamenti improvvisi delle attrezzature/impianti attuati dagli addetti ai lavori in corso (in-to-out)
- evitare danni alle attrezzature/impianti

Il LOTO si sviluppa in tre fasi:

1. *Lockout*: consiste nell'isolamento delle energie tramite apposizione di dispositivi di blocco (tipicamente lucchetti)
2. *Tagout*: si tratta di una segnalazione dell'attività in corso tramite apposizione di cartelli di avvertimento
3. *Tryout*: è una fase necessaria per confermare l'efficacia dell'isolamento e la messa in sicurezza in generale, tramite controlli visivi oppure strumentali, e/o prove di avvio ove possibile.

Le fonti di energia che le procedure LOTO si prefiggono di gestire sono normalmente:

- energia elettrica
- idraulica (liquido all'interno di un circuito, per es. oleodinamico, raffreddamento…)
- pneumatica (gas all'interno di un circuito, per es. aria compressa, azoto…)
- termica (riscaldamento in generale tramite fluido, resistenze elettriche, focolare…)
- potenziale (masse in posizioni alte soggette a possibili cadute, per es. in una pressa verticale)

A tali energie in senso stretto si aggiungono, in particolar modo per gli impianti, fluidi e sostanze probabilmente presenti, che devono essere opportunamente intercettati e gestiti anche se il loro livello energetico è stato annullato.
Non solo, occorre considerare anche la presenza di eventuali inerzie, in quanto fattori di rischio che permangono latenti per un determinato tempo successivo all'isolamento.
Durante le fasi di manutenzione, senza un'adeguata gestione di tutti questi aspetti, alcune energie o alcuni fluidi potrebbero sfuggire al controllo degli addetti ed innescare condizioni di pericolo.

1.3 Gli strumenti del LOTO

Possiamo elencare e descrivere molto sinteticamente gli strumenti principali indispensabili per l'applicazione della procedura LOTO:

- Dispositivi di *Lockout*: si tratta essenzialmente di lucchetti. Devono essere sufficientemente resistenti da richiedere una certa forza per essere rimossi; devono indicare l'identità del lavoratore. Spesso si accompagnano a specifici device a seconda del dispositivo di sezionamento da bloccare, oppure per consentire l'applicazione di più lucchetti.



Figura 1. Lucchetto


Figura 2. Device per valvola a volantino


Figura 3. Device per valvola a sfera

- Dispositivi di *Tagout*: sono solamente dispositivi di informazione che devono essere sempre facilmente individuabili, leggibili e adatti per la scrittura su di essi (tipicamente del nominativo di chi li applica). Devono essere adeguati all'ambiente (per es. non deteriorarsi in ambienti umidi) ed essere fissati con sistemi aventi una certa resistenza alla rottura.



Figura 4. Targhetta identificativa

In base alle esigenze aziendali e per facilitare operazioni complesse, possono essere di aiuto ulteriori strumenti, come per esempio la *Lock-box* quando siano presenti molti addetti, o le *LOTO-Station* per la messa a disposizione in reparto dei vari device.



Figura 5. Lock Box



Figura 6. LOTO station

1.4 Aspetti gestionali per l'introduzione del LOTO in azienda

Per implementare le procedure LOTO in azienda è fondamentale seguire un procedimento ben definito ed organizzato.

Prima di tutto è indispensabile organizzare una serie di incontri informativi sul metodo LOTO per la preparazione di dirigenti, responsabili e preposti. La procedura può essere articolata e richiedere del tempo per l'approntamento, soprattutto se l'azienda non è già organizzata in tal senso.

Quindi, sarà necessario individuare per quali attrezzature e/o sezioni di impianti si intende applicare il LOTO. La procedura, infatti, manifesta particolare efficacia nelle situazioni di media-alta complessità, cioè quando sono presenti più fonti di energia, e non tutte le attrezzature si configurano in tale condizione. Alcune di esse potranno essere pertanto escluse dall'applicazione del LOTO. Si pensi per esempio ad una piccola macchina di officina alimentata solo elettricamente con combinazione presa/spina in prossimità di essa. Così come per alcuni items di impianto che non sono soggetti a manutenzioni o ispezioni programmate, ma solo a interventi straordinari, è possibile definire le procedure LOTO in un successivo momento o "al bisogno", mantenendo il focus sugli items prioritari.

Un ulteriore step è quello di prendere coscienza dei vari tipi di energie presenti nelle

attrezzature e negli impianti in uso, oltre che delle tipologie dei vari dispositivi di isolamento presenti e del numero delle persone coinvolte. Questo serve per stimare e successivamente approvvigionare un certo numero di lucchetti (preferibilmente colorati e numerati), di cartellini per il Tagout, oltre che un quantitativo minimo di device per ciascuna diversa tipologia, cioè adatti ai rispettivi dispositivi di cui occorre fare il Lockout.
Infine, deve essere redatta una procedura di gestione basata su uno standard riconosciuto (Reg. OSHA 1910.147 [1]) dove siano definiti come minimo le modalità di applicazione del LOTO (tramite lucchetti, cartellini, ecc.) e l'organigramma LOTO (tramite designazione di responsabili e coinvolti)
La procedura gestionale dovrebbe altresì prevedere dei paragrafi specifici per la gestione delle particolarità, ad esempio:

- gestione degli appaltatori (anch'essi devono avere lucchetti numerati) e relativi permessi di lavoro
- rimozione straordinaria di un lucchetto
- gestione delle transizioni (per es. per cambio turno o della squadra di manutenzione)
- attività in deroga all'uso della *Lockbox*, se in uso

Nella fase di analisi e messa a punto delle procedure (mappatura delle energie, definizione dei *LOTO points*, ecc.) per una determinata attrezzatura o un item, potrebbe emergere che un'energia o un fluido risulti non correttamente isolabile per mancanza dei relativi dispositivi di sezionamento. In tal caso si dovrà valutare ed eventualmente procedere con l'installazione di apposito hardware (per esempio un sezionatore elettrico aggiuntivo, o una valvola manuale lucchettabile, ecc.).

2. Caso studio: il LOTO applicato ad un impianto di produzione vapore

2.1 Descrizione dell'impianto

Il caso di studio presenta l'implementazione della procedura LOTO in una centrale termica di produzione vapore, tipico impianto termico industriale presente in diverse realtà produttive e, allo scopo, sufficientemente rappresentativo di impianti di processo più complessi.
La centrale (Figura 7) è composta dai seguenti elementi principali:

- due generatori di vapore alimentati a metano;
- due scambiatori per la produzione di vapore pulito, alimentati dal vapore prodotto dai rispettivi generatori;
- relative varie pompe di alimentazione acqua;
- serbatoio per il recupero delle condense;
- serbatoio di accumulo acqua di alimento con dosaggio additivi;
- tubazioni di collegamento e relativi collettori.

Il vapore "industriale" prodotto all'interno dei generatori viene inviato all'interno degli

scambiatori, i quali, tramite evaporazione di acqua purificata, producono vapore "pulito" per i reparti.

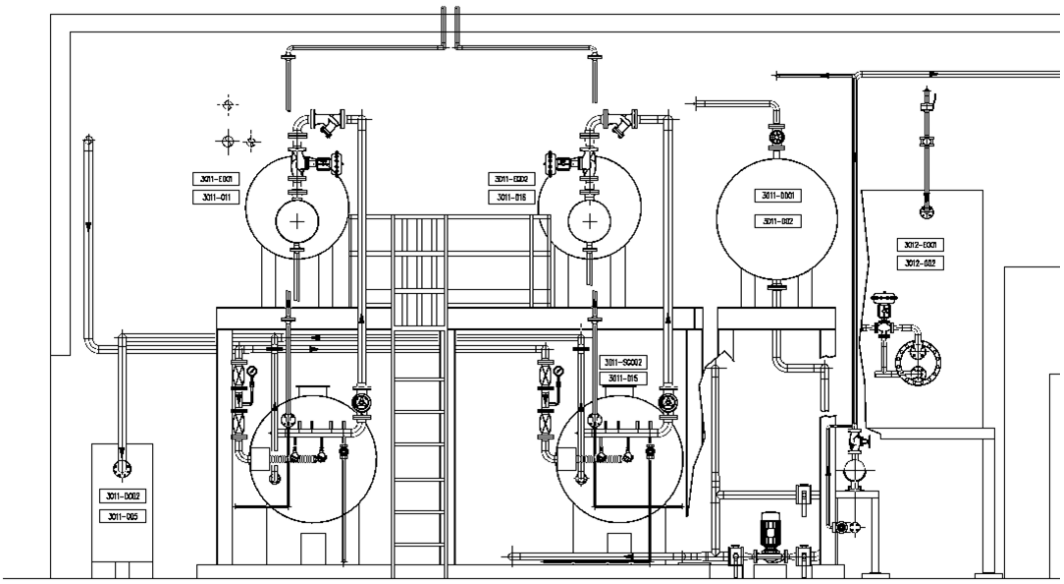


Figura 7. Vista prospettica della sala della centrale di produzione vapore

2.2 Mappatura delle energie

Come detto, il primo step fondamentale nell'applicazione del LOTO è la mappatura delle energie e, per un impianto, anche dei fluidi presenti.
Nel caso specifico dell'impianto vapore le energie identificate sono: elettrica, pneumatica, termica; mentre i fluidi e le sostanze presenti sono: acqua, vapore/condense, metano, chemicals (trattamento acqua), olio di lubrificazione (nelle pompe).
Per una più rapida identificazione, le varie energie ed i vari fluidi sono stati caratterizzati tramite diversi colori coerenti.

2.3 Mappatura degli items e dei dispositivi di isolamento

Il secondo step consiste nella mappatura degli elementi sui quali vengono effettuati interventi manutentivi che necessitano l'applicazione della procedura LOTO – che possono essere per esempio una semplice pompa, oppure gruppi funzionali più complessi – e nell'individuazione dei dispositivi di isolamento (sezionatori, valvole di intercettazione, ecc.). Di fondamentale utilità sono gli schemi P&ID, in quanto tipicamente identificano i vari items e componenti mediante un tag univoco.
Si è proceduto quindi selezionando gli items di interesse (in questo caso generatori, scambiatori e pompe) ed individuando per ciascuno i relativi dispositivi che consentono l'isolamento delle varie energie e dei fluidi presenti.

2.4 Correlazione energie/isolamenti: la "LOTO Matrix"

Una volta definiti le energie, gli items e i dispositivi di isolamento, è stata compilata una matrice, o "*LOTO Matrix*" (Figura 8), nella quale sono correlati per ogni item i punti

di sezionamento, suddivisi in base al tipo di energia e/o al fluido. Ogni punto di sezionamento, o "*LOTO point*", è associato ad un codice univoco. Quando per una determinata energia o fluido non è necessario o pertinente un isolamento vero e proprio (per es. inerzie termiche o fluidi da drenare), non è indicato un *LOTO point* ma un rischio residuo ("R"), da gestire tramite opportuni comportamenti ed azioni.
Una volta codificati i punti di sezionamento, a ciascun codice alfanumerico è stato associato un simbolo grafico, poi riportato sul layout d'impianto in modo da facilitarne la localizzazione durante l'applicazione della procedura (Figura 9). L'identificazione in campo è stata fatta in modo visual mediante un apposito cartellino con il relativo simbolo grafico (Figura 10).

ITEM	DESCRIZIONE	ENERGIE			FLUIDI				
		ELETTRICA	PNEUMATICA	TERMICA	ACQUA	CHEMICALS (dosaggio)	VAPORE / CONDENSE	METANO	OLIO (nelle pompe)
3011-006	POMPA (P_CNT) - G-002 RILANCIO DA D-001	E3			W1-W2				
3011-007	POMPA (P_MAG) - ALIMENTAZIONE CALDAIA SG-001	E1		R	W3				R
3011-008	POMPA (P_MAG) - ALIMENTAZIONE CALDAIA SG-001				W4				R
3011-010	CALDAIA (G_VAP) - SG-001 GEN. VAPORE INDUSTRIALE		R		W3-W4		S1-S3	G1	
3011-011	EVAPORATORE (G-VAP) - E-001 GEN. VAPORE PULITO				W23				
3011-017	POMPA (P_CNT) - ALIMENTAZIONE EVAP E-001				W5 - W21		S1		
3011-018	POMPA (P_CNT) - ALIMENTAZIONE EVAP E-001				W6 - W22				
3011-012	POMPA (P_MAG) - ALIMENTAZ SG-002 DA D-001	E2		R	W7				R
3011-013	POMPA (P_MAG) - ALIMENTAZ SG-002 DA D-001				W8				R
3011-015	CALDAIA (G_VAP) - SG-002 GEN. VAPORE INDUSTRIALE		R		W7-W8		S2-S4	G2	
3011-016	EVAPORATORE (G-VAP) - E-002 GEN. VAPORE PULITO				W24				
3011-019	POMPA (P_CNT) - ALIMENTAZIONE EVAP E-002				W9 - W19		S2		
3011-020	POMPA (P_CNT) - ALIMENTAZIONE EVAP E-002				W10 - W20				
3011-001	DOSATORE CHIMICO (DOSCH) - DO-004 ADDITTIVI 3011	E4							
3011-002	SERBATOIO (SERB) - RECUPERO CONDENSE 3011	E1-E2-E4-E5-E6	R	R	W11	CH2	S5-S6-S3-S4-S7		
3011-005	SERBATOIO (SERB) - D-002 TROPPO PIENO	E1-E2-E4-E5-E6		R	W11-W16		S5-S6-S3-S4-S7		

Figura 8. Esempio di "*LOTO Matrix*"

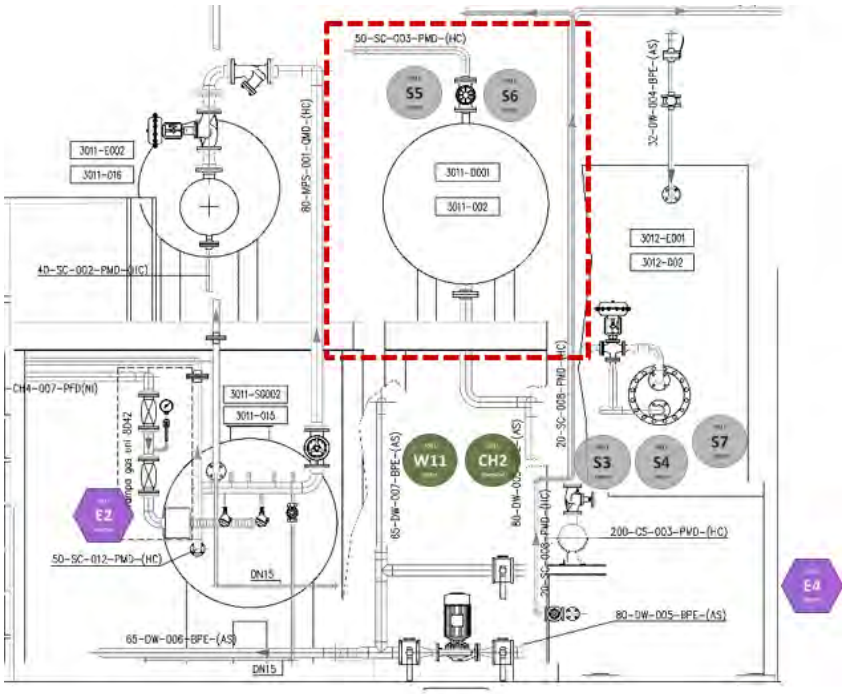


Figura 9. Layout con ubicazione dei LOTO points



Figura 10. Identificazione dei *LOTO points*

È stata quindi redatta una "Scheda LOTO" personalizzata per ogni item contenente:

- elenco delle energie presenti, relativi dispositivi, metodi di sezionamento e modalità di *Tryout*, cioè la verifica del corretto isolamento del flusso di energia (Figura 11)
- elenco dei *LOTO points*, con localizzazione dei dispositivi di isolamento e relativi device per il *Lockout* (Figura 12)

La Scheda LOTO è lo strumento operativo per l'applicazione del LOTO in campo.

ENERGIE E FLUIDI PERICOLOSI PRESENTI - modalità di sezionamento e/o isolamento					
ID	Energie - Fluidi	Dispositivo	Collocazione	Metodo	Check
E1	Elettrica	Interruttore / sezionatore elettrico	LOCALE G017 - Quadro Elettrico generatore SG001	Girare il dispositivo su "SPENTO/OFF/0" ed applicare il lucchetto (Lock-Out) ed il cartellino (Tag-Out)	Verificare strumentalmente l'assenza di tensione
G1	Gas Metano	Valvola di intercettazione / isolamento fluidi	LOCALE G017 - Sopra a Quadro Elettrico generatore SG001	Girare la valvola in posizione "CHIUSO", installare il device relativo ed applicare il lucchetto (Lock-Out) ed il cartellino (Tag-Out)	Verificare lo stato di "zero-pressione"

Figura 11. Elenco energie/fluidi e relativi dispositivi e modalità di isolamento

N°	ID	DISPOSITIVO	FOTO	DEVICE	FOTO DEVICE	NOTE
1	E1	Interruttore / sezionatore elettrico		Ganascia multiforo a 6 fori in metallo		
7	G1	Valvola di intercettazione / sezionatore pneumatico		Sistema chiusura valvole a sfera con leva		
15	W4	Valvola di intercettazione / sezionatore idraulico		Sistema chiusura valvole a sfera con leva		
29	S3	Valvola di intercettazione / isolamento fluidi		Blocco valvole a volantino ϕ >400mm		

Figura 12. Elenco dei *LOTO Points* e dei relativi *device*

2.5 Applicazione del LOTO in occasione di una visita interna

La procedura di LOTO sopra descritta è stata applicata al generatore di vapore in occasione della visita interna prevista dal DM 329/04. Il personale addetto alla manutenzione ha seguito i vari step previsti, appoggiandosi alla Scheda LOTO appositamente predisposta.

Sono stati quindi individuati i *LOTO points* pertinenti alle energie da isolare, nel caso specifico l'alimentazione elettrica, ed ai fluidi da intercettare, cioè il gas metano, l'acqua di alimento ed il vapore del secondo generatore, che può ritornare dal collettore principale.

Dopo aver dissipato la pressione residua e le inerzie termiche, si è potuto procedere con la verifica ispettiva, in totale sicurezza per le persone coinvolte.



Figura 13. *Lockout-Tagout* del sezionatore elettrico e della valvola gas metano

2.6 Ripristino e preparazione al riavvio dell'impianto

Una volta terminato l'intervento, la procedura inversa prevede che ogni persona rimuova il proprio lucchetto (lock) ed il rispettivo cartellino (tag), insieme con l'eventuale device aggiuntivo.

Solo dopo che tutti gli operatori coinvolti hanno rimosso i propri lucchetti è stato possibile il ripristino di tutte energie e fluidi, garantendo quindi le condizioni di sicurezza anche per il riavvio e la rimessa in funzione dell'impianto.

SEQUENZA DI RIPRISTINO

#	STEP	DESCRIZIONE
1	*Check Attrezzatura*	Controllare la macchina o l'attrezzatura e l'area circostante intorno alla macchina stessa per assicurarsi che elementi non essenziali come parti di macchina, ricambi e strumenti siano stati rimossi e che la macchina o i componenti dell'apparecchiatura siano funzionalmente intatti, compresa la sostituzione di protezioni, interblocchi, eliminazione di flange cieche, ecc.
2	*Check Area*	Controllare l'area di lavoro per assicurarsi che tutti i lavoratori si siano allontanati dall'area pericolosa o che comunque si trovino in una posizione sicura.
3	*Verifica Attrezzatura*	Verificare che tutti i controlli siano ripristinati.
4	*Rimozione LockOut*	Rimuovere i lucchetti, i tag e i dispositivi di blocco e riattivare l'attrezzatura. Invertire l'ordine di tutti i passaggi della procedura di LockOut-TagOut dal basso verso l'alto a partire dall'ultima pagina.
5	*Notifica*	Comunicare ai colleghi interessati (conduttori) che l'assistenza o la manutenzione è stata completata e che la macchina o l'attrezzatura è pronta per l'uso.

Figura 14. Istruzioni per il ripristino e il riavvio

3. Valutazione dei rischi e rischi residui

3.1 La ridondanza come misura contro i rischi elevati

Come risaputo, in una valutazione dei rischi il livello di rischio R dipende dalla gravità del danno D e dalla probabilità di accadimento P secondo la nota relazione R = D x P. La probabilità è legata al tempo: maggiore è la durata dell'intervento, maggiore è il rischio. Di conseguenza, a parità di altre condizioni gli interventi di manutenzione possono esporre il personale a livelli di rischio più elevati quando:

- il pericolo può causare gravi infortuni
- non si può garantire con una elevata affidabilità di un certo dispositivo di intercettazione e/o l'intervento si protrae per un tempo elevato

Nell'applicare le procedure LOTO, quindi, in un'ottica di rischio elevato potrebbe essere opportuno raddoppiare i dispositivi di isolamento delle energie, in quanto una

ridondanza garantisce maggior sicurezza in caso di guasto o inefficacia di un singolo dispositivo. Si pensi per esempio all'intercettazione di una derivazione di una soluzione altamente corrosiva contenuta in un serbatoio di stoccaggio: una doppia valvola di intercettazione o una flangia cieca in aggiunta ad una valvola di intercettazione sullo stacco è sicuramente una misura più affidabile a fronte di una perdita o di un trafilamento.
Applicando le procedure LOTO, diventa quindi fondamentale valutare se l'intervento manutentivo comporti condizioni rischio elevato e, di conseguenza, se ridondare o meno i dispositivi di isolamento (meglio se con utilizzo della diversità).

3.2 La gestione dei rischi residui nelle procedure LOTO

Nonostante l'applicazione del LOTO, la valutazione del rischio e conseguente utilizzo di ridondanza e diversità dei dispositivi, nello svolgimento di un'attività manutentiva potrebbero permanere dei rischi residui. Una volta isolate tutte le energie ed i fluidi pericolosi, all'interno dell'impianto potrebbero permanere delle energie non del tutto dissipate, come:

- alte o basse temperature (per es. le superfici calde del generatore di vapore)
- tensioni residue (per es. cariche nei condensatori negli inverter)
- pressione superiore a quella atmosferica nei serbatoi e nelle tubazioni
- residui di fluidi pericolosi da bonificare (per es. infiammabili)

È necessario, pertanto, che la scheda LOTO indichi anche le istruzioni per la gestione di tali rischi ancora presenti dopo l'isolamento delle energie e l'intercettazione dei fluidi. Devono essere indicati anche gli eventuali DPI da utilizzare per attività specifiche o in presenza di sostanze chimiche, ecc. Qualora si presentino le condizioni di accesso a spazi confinati, devono essere richiamate e seguite le specifiche procedure di sicurezza aziendali.

ENERGIE RESIDUE E FLUIDI PERICOLOSI PRESENTI dopo applicazione della LOTO		
Elettrica		Non presente.
Pneumatica		I circuiti pneumatici e idraulici possono immagazzinare energia. Controllare che tutti i manometri indichino "pressione zero" prima di procedere.
Oleodinamica		Non presente.
Gravitazionale		Non presente.
Elastica		Non presente.
Idraulica		Non presente.
Termica		Prima di effettuare interventi di manutenzione, attendere che il calore si sia dissipato e che l'attrezzatura sia fredda al tatto. Indossare i DPI adeguati prima di iniziare il lavoro.
Inerzie e accumuli		Non presente.
Sostanze chimiche		Potenziale presenza di sostanze chimiche pericolose. Indossare DPI adeguati e prestare attenzione per evitare il contatto con la pelle, gli occhi o la bocca.

Figura 15. Istruzioni per la gestione dei rischi residui nella scheda LOTO

Conclusioni

Con la presente memoria si è voluto illustrare i principi di base del LOTO (*Lockout-Tagout*), procedura riconosciuta a livello internazionale per gestire in modo sicuro le energie presenti in macchinari, attrezzature ed impianti.
In particolare, per gli impianti di processo, dove alle sorgenti di energia si aggiungono fluidi e sostanze spesso pericolose, l'applicazione del LOTO costituisce un metodo efficace nella prevenzione degli infortuni durante interventi che devono essere svolti a impianto fermo, come quelli di manutenzione, ispezione, ecc. Il LOTO di fatto impedisce in modo sistematico la riattivazione dell'impianto o di parti di esso finché tutti gli operatori coinvolti non abbiano concluso la propria attività.
È stato illustrato come la valutazione dei rischi sia anche nelle procedure LOTO lo strumento essenziale per attuare misure coerenti e commisurate al livello di rischio dell'attività da svolgere. È possibile, infatti, che sia necessario aumentare l'affidabilità delle contromisure, ridondando i dispositivi di isolamento, così come si debbano gestire eventuali rischi residui ancora presenti.
A titolo esemplificativo è stato presentato il caso di studio di un impianto di produzione di vapore: l'applicazione della procedura ha consentito nella fattispecie lo svolgimento in assoluta sicurezza della verifica periodica interna.
L'adozione delle procedure LOTO in un impianto di processo, specialmente se di una certa complessità, costituisce un metodo moderno, robusto ed affidabile di gestione delle energie, per evitarne il ripristino inatteso durante gli interventi a impianto fermo, garantendo così l'incolumità di tutto il personale coinvolto.

Bibliografia

[1] OSHA 1910.147 - The control of hazardous energy (lockout/tagout)

[2] UNI EN ISO 14118 - Sicurezza del macchinario - Prevenzione dell'avviamento inatteso

Caratterizzazione e accettazione di materiali in composito per attrezzature a pressione: setup della procedura sperimentale e primi risultati

J. Ferino[1], I. Mazzarelli[2], A. Meleddu[1], E. Pichini[3]

[1] Astarte Strategies Srl
[2] Inail - Uot di Milano
[3] Inail - Dit

Abstract

Da tempo i materiali compostiti rappresentano una valida alternativa alla porcellana nella costruzione di isolatori per interruttori High Voltage. Per queste applicazioni, è oramai comune l'impiego di materiali costituiti da fibre di vetro in matrici epossidiche, generalmente realizzati attraverso il processo di *filament winding*. Come anticipato nella memoria *"Progettazione e fabbricazione di attrezzature a pressione in composito: proposte per la caratterizzazione e l'accettazione dei materiali"* già discussa al SAFAP 2021 [1], la normativa italiana nel settore delle attrezzature a pressione fabbricate con materie plastiche rinforzate con fibre di vetro, ha come unico riferimento la "Raccolta PRFV" emanata con la circolare ISPESL 41060 del 2 dicembre 1982: redatta con l'obiettivo di fornire indicazioni per la progettazione e la costruzione di serbatoi in composito soggetti a pressione interna non superiore ai 5 bar, la PRFV non trova però applicazione effettiva in ambito isolatori per alta tensione. Allo stesso tempo, a livello internazionale la norma armonizzata EN13121 "*GRP tanks and vessels for use above ground*" pur includendo i materiali compositi, non fa riferimento all'applicazione di specifico interesse. Pertanto la regolamentazione italiana, che con il d.m. 1.12.1980 e la VSR.8.B, è ancora in vigore per la verifica dei contenitori di parti attive di apparecchiature elettriche, è tuttora priva di criteri specifici per l'accettazione di questo tipo di prodotti.
Nel 2021 è stato dunque avviato un progetto di ricerca mirato ad individuare un percorso di caratterizzazione dei tubi in vetroresina basato su test di laboratorio su provini di piccole dimensioni con il fine ultimo di sviluppare dei criteri standardizzati di accettazione dei lotti, evitando lunghe e costose attività di routine finalizzate alla caratterizzazione degli stessi. L'attività presentata mostra i risultati in termini di: selezione della tipologia e geometria di provino, definizione delle procedure di testing e prime evidenze sperimentali.

Keywords: materiali compositi, isolatori, alta tensione, test sperimentali, raccolta PRFV, Finite Element Analysis (FEA).

1. Introduzione e contesto normativo

I contenitori a pressione per parti attive di interruttori ad alta tensione sono caratterizzati da volumi, pressioni e temperature di progetto e operative piuttosto contenute. Tuttavia, essendo frequentemente installati in impianti e reti di distribuzione di energia elettrica di rilevanza strategica, essi rappresentano una tipologia di attrezzature a pressione che merita attenzione soprattutto riguardo ai materiali con cui vengono realizzati comparti e membrature.

A oggi, la normativa italiana nel settore delle attrezzature a pressione fabbricate con materie plastiche rinforzate con fibre di vetro, ha come unico riferimento alla "Raccolta PRFV" emanata con la circolare ISPESL n.41060 del 2 dicembre 1982, redatta con l'obiettivo di fornire indicazioni per la progettazione e la costruzione di serbatoi in composito soggetti a pressione interna non superiore ai 5 bar. La raccolta riguarda il dimensionamento di virole, fasciami e fondi curvi e intende per 'materiale composito' lo stato di lavorazione 'stratificato'. Ma poiché gli isolatori in vetroresina sono tubi (oltretutto prodotti per avvolgimento, *filament winding*), la PRFV non è mai stata considerata per la loro progettazione e costruzione. D'altro canto, il recepimento della PED [2] - che tuttavia non si applica ad alloggiamenti per apparecchiature ad alta tensione - ha di fatto impedito che la Raccolta M potesse essere aggiornata con sezioni dedicate a tubazioni in composito ottenute attraverso il processo del *filament winding*. Pertanto, la regolamentazione italiana è tuttora priva di criteri definiti specificamente per l'accettazione di questo tipo di prodotto.

In Europa i fabbricanti di interruttori per media e alta tensione si orientano prevalentemente su standard europei IEC-CEN-CENELEC. Nel caso specifico dell'Italia il riferimento per la fabbricazione di contenitori a pressione di gas con membrature miste di materiale isolante e metallico, contenenti parti attive di apparecchiature elettriche, resta il d.m. 1.12.1980 e le specifiche *tecniche 'Adempimenti per la costruzione e il rilascio del certificato del prototipo dei contenitori di cui al d.m. 1° dicembre 1980'* pubblicati rispettivamente come Punto 1 e Punto 2 del Capitolo 8.B della VSR.

La regola tecnica VSR.8.B è stata già discussa nella memoria [1] presentata al SAFAP 2021. Per gli scopi della presente attività, si ricorda che il percorso di approvazione di nuovi prototipi prevede test di scoppio su prototipi al fine di assicurare che tutti i componenti identici successivamente prodotti mostrino una pressione di scoppio minima pari almeno a 4,25 volte la pressione di progetto. Data l'intrinseca variabilità delle proprietà di resistenza meccanica dei materiali dovuta ai processi di fabbricazione, in conformità al d.m. 1.12.1980, fu proposta la regola VSR.8.B.2 con l'obiettivo di assicurare che anche il componente meno resistente resista almeno al 4,25 volte la pressione di progetto P. La pressione minima di scoppio si determina quindi come:

$$B_N = 4.25 \times P \times R_N/R_{min} \qquad (1)$$

in cui R_N è la resistenza meccanica del componente N-esimo ricavata mediante prove di caratterizzazione dei singoli lotti, R_{min} la resistenza meccanica minima ammissibile dichiarata dal fabbricante del materiale. Si comprende che il rapporto R_N/R_{min} è un indicatore della dispersione delle prestazioni meccaniche del materiale:

- minore è la dispersione nella produzione è più prossimo all'unità è il rapporto R_N/R_{min}
- maggiore la dispersione nella produzioneà maggiore è il rapporto R_N/R_{min} e, dunque, maggiore sarà il valore minimo della pressione di scoppio richiesta.

La regola italiana VSR.8.B.2 è una norma costruita per supportare prove di tipo su componenti costituiti da materiali metallici e plastici isotropi omogenei ottenuti con processi di fusione. Tuttavia, non si rivela direttamente applicabile a elementi costruiti con materiali compositi fortemente ortotropi e non lineari quali, ad esempio, gli isolatori in composito base vetro.

Questi sono ottenuti per *filament winding* ovvero per avvolgimento di fibre di vetro intrise di resina attorno a mandrino rotante. Gli isolatori sono successivamente tagliati a misura secondo la lunghezza richiesta. Secondo la norma di produzione europea IEC 61462:2007 [3] ciascun isolatore è sottoposto a test in pressione di routine a due volte la pressione di progetto e a test di tipo a quattro volte la pressione di progetto. Tuttavia, i produttori non sono tenuti a misurare la resistenza del materiale né in termini di R_{min}, né di R_N. Si noti che, mentre R_{min} dipende dai parametri di progetto (fibra, resina, angoli, ecc.), il secondo è strettamente legato alla specifica lavorazione. Pertanto, isolatori appartenenti a un lotto di isolatori apparentemente omogeneo, potrebbe mostrare differenti R_N in quanto prodotti attraverso differenti mandrinature.

Pertanto, per poter applicare la VSR.8.B.2, il tecnico si trova costretto a determinare i parametri di resistenza caratteristici del lotto mediante prove meccaniche di trazione su campioni estratti dagli isolatori stessi. Restano tuttavia aperti alcuni interrogativi circa la numerosità di provini da estrarre per ottenere una adeguata rappresentatività di R_N del particolare lotto di produzione, la tipologia e la geometra del provino, nonché la direzione di estrazione.

2. Prove sperimentali

Da quanto visto finora emerge chiaramente che la caratterizzazione della resistenza meccanica di ogni lotto di produzione è un punto fondamentale per la stima del minimo valore di pressione di scoppio. Nell'ambito del progetto di ricerca presentato preliminarmente in [1], INAIL e ASTARTE sono impegnati sin dal 2021 nello sviluppo di una procedura ottimizzata per stimare la distribuzione statistica dei parametri di resistenza basata sull'esecuzione di un ridotto numero di test di laboratorio eseguiti su provini estratti dagli stessi lotti di produzione. Il progetto è attualmente in corso e la presente memoria riporta un importante avanzamento dell'attività sperimentale

riguardante la scelta della procedura di test, il design di dettaglio del provino, la strumentazione e i risultati finora ottenuti.
In via preliminare, è stata eseguita un'analisi comparativa tra gli standard di laboratorio attualmente disponibili. Tra questi, la ASTM D2290 [4] o la analoga EN1394 [5], risultano particolarmente idonee, in quanto definiscono le specifiche geometriche dei campioni e i metodi di prova per caratterizzare la resistenza a trazione di tubi in resina termoindurente rinforzata, termoplastici estrusi e stampati, indipendentemente dal metodo di fabbricazione.
La metodologia di prova si applica ad anelli estratti dal componente tubolare. Questi sono sottoposti a un test di trazione in cui il carico è applicato attraverso un sistema, detto *split-disc*, costituito da due semi-dischi, Figura 1. Questi sono progressivamente allontanati fino a indurre la rottura del campione in una regione dotata di opportuno intaglio in cui è applicato un estensimetro, Figura 2. L'elaborazione dei dati acquisiti consente di estrarre la curva stress-deformazione del materiale fino a rottura e i relativi parametri caratteristici, tra cui il carico unitario di rottura e il modulo elastico in campo elastico.
Si osserva che la forma del campione di prova le modalità di applicazione del carico consentono di approssimare il test a una prova di pressurizzazione interna fino a rottura in maniera molto più adeguata rispetto a una semplice prova di trazione su provino di tipo bar estratto in direzione longitudinale. Per questa ragione si è stabilito di far riferimento alla ASTM D2290 come linea guida per le attività di caratterizzazione oggetto del presente progetto. Tuttavia, il processo costruttivo per *filament winding* e la conseguente anisotropia del materiale, richiede qualche riflessione circa la geometria e la dimensione dell'intaglio da adottare per la caratterizzazione degli isolatori. Pertanto, l'attività di testing sperimentale per la caratterizzazione meccanica dell'isolatore è stata preceduta da una necessaria attività di studio e progettazione del provino. Entrambe sono descritte nel seguito.



Figura 1. Sistema di split disc e intaglio.

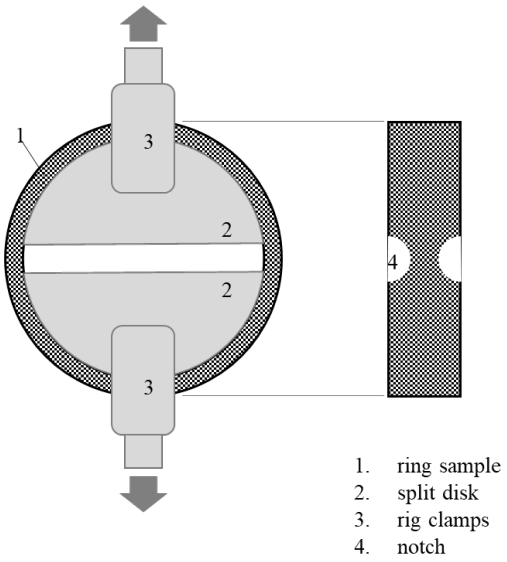


Figura 2. Schema di prova secondo ASTM D2290 e EN 1394.

3. Il materiale

Lo studio si è avvalso della collaborazione con HITACHI ENERGY che ha reso disponibili gli isolatori e i campioni necessari. Si tratta di un isolatore per interruttori alta tensione 145/170 kV, di diametro interno ed esterno Di154xDe166 mm. Il componente è prodotto per *filament winding* di fibra di vetro in resina epossidica, ma la stratificazione del materiale non è resa nota dal produttore. Per la sua determinazione ci si è basati su analisi fotografiche di campioni di tipo metallografico. Un campione estratto dal provino è stato inglobato all'interno di una resina la cui superficie laterale (spessore del provino) è stata lucidata, sulla quale si sono effettuate delle osservazioni al microscopio. In Figura 3 è riportata una immagine presa durante l'osservazione. Si è osservato che la sequenza di laminazione misurata varia a seconda della sezione considerata:

- 14 strati secondo [±30_2/±68_4/±30]
- 12 strati secondo [+30-30+30/∓68_3/-30+30-30]

Questo testimonia che il processo produttivo non è avvenuto in maniera continua a partire da una unica bobina di nastri di filato, cosicché si notano delle regioni con avvolgimento non completo che rendono difficile determinare il reale numero di strati. Si noti che l'angolo è misurato a partire dalla direzione circonferenziale; pertanto, la direzione degli strati orientati a ±30° è più prossima alla direzione circonferenziale rispetto a quella degli strati a ±68°.

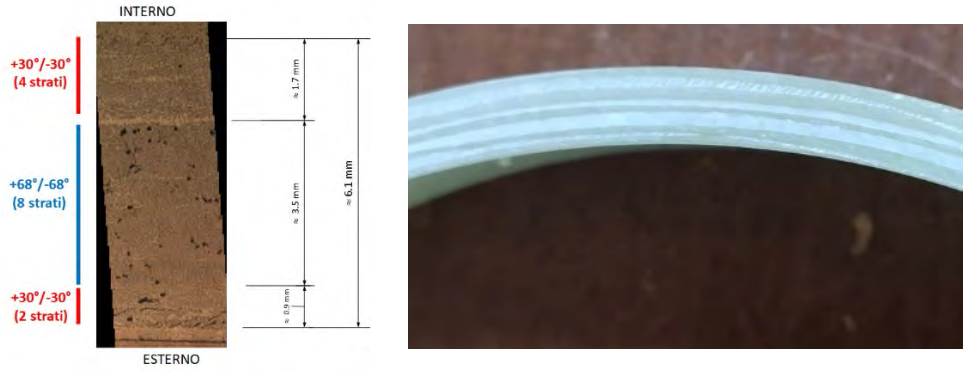


Figura 3. Stratificazione del composito.

4. Progettazione del provino

La corretta acquisizione dei dati di deformazione fino a rottura mediante estensimetro richiede che questo sia installato in una regione opportunamente sagomata in modo da promuovere la localizzazione dei fenomeni di rottura. Tuttavia, si sospetta che la presenza e la forma dell'intaglio circolare previsto dalla norma, possa introdurre delle discontinuità severe dello stato tensionale e alterare le proprietà meccaniche misurate. Pertanto, è stato eseguito uno studio comparativo tra 3 diverse tipologie di provini, che differiscono tra loro in termini di intaglio, ma tutti con larghezza nominale pari a 25mm ed estratti dal medesimo campione di tubo.

4.1 Piano prove e set-up di test

La figura 4 mostra le tipologie di intaglio selezionate

- Intaglio circolare: nel rispetto delle indicazioni dimensionali fornite dalle normative di riferimento [4,5] è stato realizzato un provino con intaglio circolare di diametro 15mm.
- Intaglio piatto: un set di 3 provini è stato lavorato per realizzare un intaglio di sezione regolare con una regione di transizione con raggio di curvatura 20mm, allo scopo di minimizzare gli stress indotti dalla discontinuità geometrica. Il disegno si ispira alla geometria indicata in ASTM E8/E8M [6] per prove di trazione su provini estratti da materiali metallici.
- Senza intaglio: un ultimo set di 3 provini è stato realizzato privo di intaglio con lo scopo di valutare il materiale in assenza di discontinuità geometriche.



intaglio circolare *intaglio piatto* *senza intaglio*

Figura 4. Tipologia di provini oggetto delle prove sperimentali.



Figura 5. Configurazione di prova.

I due semi-dischi per l'applicazione del carico (Figura 1) sono realizzati in acciaio, e la regione di separazione diametrale tra essi compresa ha distanza pari a 6mm. L'afferraggio è realizzato direttamente sui dischi tramite morse, in modo da evitare l'utilizzo di fori e perni per scongiurare la possibilità di deformazioni o rotture del perno stesso. Le prove sono state eseguite adottando una macchina di prova Instron 5585H con capacità di carico di 250 kN. Il carico è stato applicato imponendo una velocità costante alla morsa mobile di valore tale che il cedimento si verificasse tra 1 minuto e 3 minuti dall'applicazione iniziale del carico.
Come previsto dalle normative, il provino è stato posizionato in modo che tutta la zona dell'intaglio (ove presente) appoggi sulla superficie continua del semi-disco in modo che la rottura non sia influenzata dai bordi nella separazione tra i dischi. La misurazione delle deformazioni è affidata a un estensimetro con basi di misura pari a 20mm, posizionato nella zona centrale dell'intaglio. Nel caso dei provini privi di intaglio, non è possibile prevedere in quale posizione circonferenziale interverrà la rottura e dunque, l'applicazione dell'estensimetro ha il solo obiettivo di consentire di rilevare l'andamento del carico e delle deformazioni nelle fasi che precedono il cedimento del campione.
La tabella 1 riassume il piano prove, la numerosità e la geometria dei provini.

	Intaglio circolare	Intaglio piatto	Senza intaglio
D diametro est., mm	166	166	166
T spessore, mm	6.3	6.3	6.3
W larghezza, mm	25	25	25
W larghezza all'intaglio, mm	15	15	-
Numerosità	3	3	3

Tabella 1. Dimensioni dei provini messi a confronto.

5.2 Risultati e discussione

Le immagini rappresentative delle prove sperimentali sono mostrate in Figura 6. , in cui si mostra che la rottura dei campioni dotati di intaglio è avvenuta correttamente nella regione strumentata, mentre, nel caso del campione privo di intaglio questa è avvenuta esternamente.

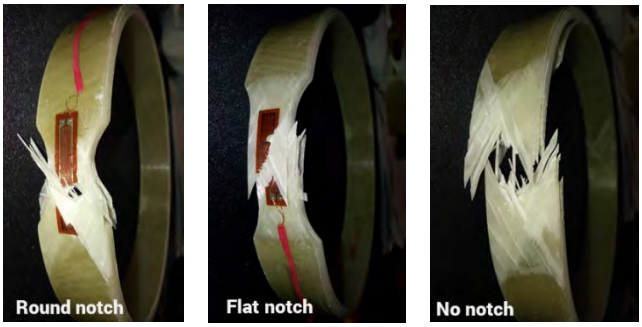
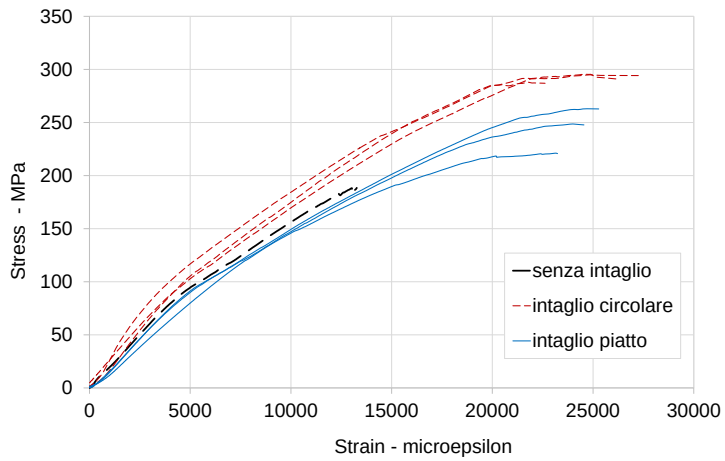


Figura 6. Morfologia della rottura per i tre tipi di intaglio.

A partire dai dati di carico e deformazione rilevati, sono state derivate le curve stress-deformazione, Figura 7. Le curve mostrano che il provino privo di intaglio presenta valori di stress a rottura ben inferiori rispetto a quelli che si osservano per i provini intagliati. Ciò è dovuto al fatto che nel primo caso il cedimento è innescato prematuramente dall'azione esercitata degli spigoli dei dischi sul provino nella regione di separazione dello split-disc. Tuttavia, sebbene il valore di carico unitario a rottura (202 MPa) non risulti attendibile e non caratterizzi l'effettiva resistenza del materiale, resta valido che l'andamento della curva che precede la rottura sia rappresentativo del comportamento del materiale.

Per quanto riguarda i provini dotati di intaglio, l'andamento delle curve stress-deformazione si dimostra sensibile alla forma dello stesso. L'intaglio circolare determina infatti una rigidezza e una resistenza apparente maggiore rispetto a quelli con intaglio piatto. Questo fatto è da mettersi in relazione all'effetto geometrico di irrigidimento dovuto alla forma dell'intaglio che aumenta localmente la triassialità degli sforzi. Al contrario, i provini con intaglio lungo mostrano un andamento molto simile a quello senza intaglio, senza tuttavia risentire dell'effetto di bordo dei semi dischi. In questi casi, la rottura avviene correttamente nella regione strumentata.



	intaglio		
	Piatto	Circol.	no
Def a rottura, valore medio	2.53%	2.53%	1.33%
Sf. a rottura, valore medio	244MPa	293MPa	202MPa

Figura 7. Risultati sperimentali: grafico sforzo–deformazione

Oltre alla già citata elevata triassialità prodotta dall'intaglio circolare che tipicamente causa un effetto di irrigidimento della curva sforzi deformazioni, si ipotizza anche un effetto di differente adesione fibre-matrice. Infatti, sebbene la larghezza all'intaglio sia uguale per entrambi i casi (15mm) le fibre, essendo oblique, hanno maggiore lunghezza di adesione alla matrice nel provino con intaglio circolare, Figura 8. L'adesione è fondamentale per favorire la collaborazione tra fibre adiacenti. Queste, infatti, presentano necessariamente delle interruzioni di continuità e la matrice fornisce il necessario supporto per il trasferimento del carico tra le fibre. In effetti, il fenomeno dello sfilamento delle fibre dalla matrice (pull-out) è stato osservato nella presente campagna sperimentale.

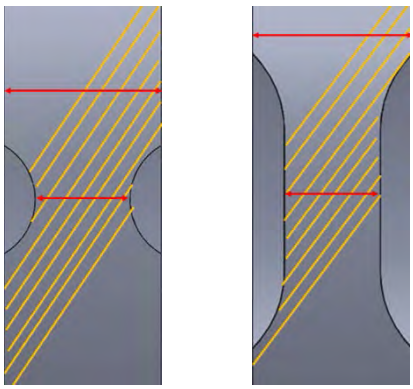


Figura 8. Immagine esemplificativa dell'azione di adesione fibra matrice.

In definitiva si conclude che il provino con intaglio piatto appare il più idoneo a misurare più accuratamente le proprietà meccaniche del materiale fino a rottura, e su questa tipologia si è impostata la campagna sperimentale definitiva. Il tipo senza intaglio, di più semplice realizzazione, appare comunque idoneo alla determinazione delle proprietà elastiche prima della rottura.

5. Caratterizzazione meccanica dell'isolatore

5.1 Piano prove e set-up di test

I provini per la caratterizzazione del materiale provengono dagli isolatori resi disponibili da HITACHY ENERGY e già descritti al capitolo 4. L'estrazione dei ring è avvenuta dal medesimo lotto di produzione e la lavorazione è stata eseguita lontano dalle estremità del mandrino dove l'inversione del processo di *filament winding* determina proprietà non conformi, Figura 9.

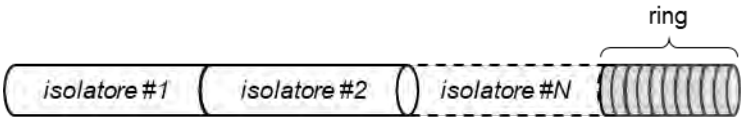


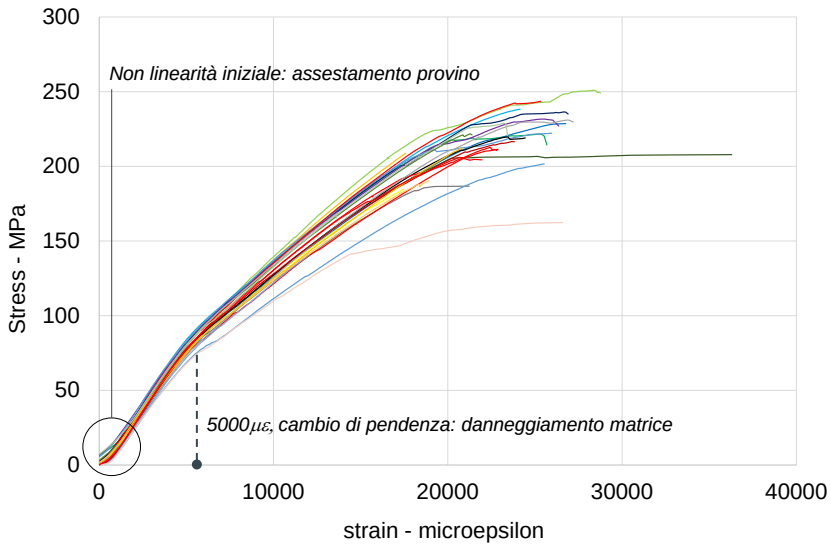
Figura 9. Estrazione dei provini.

A partire da questo materiale, è stato estratto un set di 26 ring dotati di intaglio piatto al fine di determinare le proprietà meccaniche. L'elevato numero di campioni è

necessario per consentire opportune valutazioni statistiche circa la dispersione dei risultati sperimentali. Il set-up di prova impiegato è il medesimo già impiegato per le attività di progettazione del provino e descritto nel capitolo 5.1.

5.2 Risultati

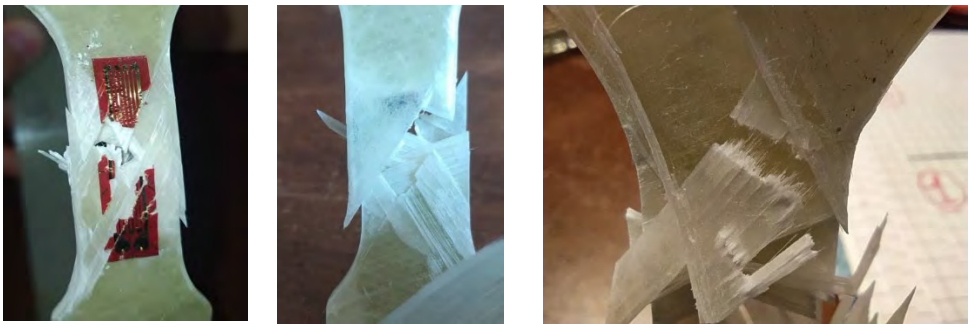
I risultati delle prove definitive sui provini con intaglio lungo, ai quali sono stati aggiunti anche le tre prove preliminari, sono mostrati graficamente in Figura 10 in termini di sforzi e deformazioni. È evidente una certa dispersione dei risultati, attesa per questo tipo di materiale. Data la disponibilità di dati, è stata eseguita una analisi statistica sul campione i cui risultati sono riportati in Figura 10 e da cui emerge un valor medio di rottura di 221.3MPa e un valore di deformazione massima pari a 2.43%.



	Stress rottura (MPa)	Strain max. (με)
Media	221.3	0.0243
Errore standard	4.1	0.0005
Mediana	221.7	0.0245
Moda	#N/D	#N/D
Dev. Std.	21.2	0.0024
Varianza	449.7	0.0000
Curtosi	0.4	-0.2136
Asimmetria	-0.4	-0.3870
Intervallo	93.5	0.0099
Minimo	168.2	0.0189
Massimo	261.6	0.0288
Coeff. variaz.	9.6%	9.8%

Figura 10. Risultati sperimentali su provino con intaglio piatto e statistiche di riferimento.

Le prove hanno mostrato che il cedimento interviene per la sovrapposizione di più modi di rottura, come riscontrabile in Figura 11: rottura di fibra, matrice, scollamento degli strati e sfilamento. Ciò è dovuto al fatto che la sequenza di laminazione comprende strati orientati secondo vari angoli: ±30°, ovvero in direzione prevalentemente circonferenziale, e ±68°, ovvero secondo orientamento prevalentemente assiale. Tutti i provini presentano la rottura all'interno dell'intaglio, e nessuno presenta rottura di fibre negli strati più interni a ±68°. La rottura interviene nelle fibre degli strati estremi, cioè al diametro esterno e al diametro interno. Il fenomeno di *pull-out* o sfilamento, è mostrato in Figura 11. c) e consiste nella fuoriuscita delle fibre rotte dalla loro sede nella matrice. Ciò dipende dalla modalità di trasferimento del carico dalla matrice alle fibre e dalla bontà di adesione tra fibra e matrice.



a) esterno *b) interno* *c) interno*

Figura 11. Morfologia della sezione di rottura

6. Discussione dei risultati

Tutte le curve sforzo-deformazione riportate in Figura 10 sono caratterizzate da alcuni tratti comuni.

Ai bassi carichi, si assiste a un assestamento del provino sullo *split-disc*, al recupero di alcune inevitabili ovalità e al raddrizzamento della porzione di provino in corrispondenza dello spazio tra i semi-dischi. Questo risulta in un andamento inizialmente non lineare tra sforzi e deformazioni.

Successivamente, tutte le curve presentano un andamento lineare fino a circa 5000με, oltre i quali si osserva un abbassamento della curva che successivamente procede con pendenza ridotta. La causa dall'abbassamento della rigidezza è stata investigata con uno studio sperimentale dedicato e non riportato nella presente memoria. L'esito dello studio ha dimostrato che questo comportamento non è da porsi in correlazione né con la presenza dell'intaglio, né con non linearità geometriche reversibili. Si è verificato che il fenomeno è dovuto al danneggiamento della matrice epossidica le cui prestazioni meccaniche risultano compromesse quando il materiale è sottoposto a deformazioni che superano 5000 με.

7. Conclusioni

A oggi gli standard normativi in materia di caratterizzazione dei materiali per isolatori per applicazioni in alta tensione ancora risentono della storica prevalenza di materiali omogenei e isotropi. L'introduzione di materiali compositi stimola un rapido aggiornamento delle linee guida al fine di poter adeguatamente tener conto dell'intrinseca variabilità dei materiali base impiegati (fibre e resine) e della stabilità del processo di fabbricazione. In questo contesto, nel 2021 INAIL ha promosso un progetto di ricerca mirato a individuare un percorso di caratterizzazione dei materiali basato su test di laboratorio su provini di piccole dimensioni al fine di sviluppare nuovi criteri di accettazione dei lotti, in grado di tener conto delle peculiarità dei nuovi materiali ed evitare lunghe e costose attività sperimentali.

Le attività sperimentali fin qui eseguite supportano la definizione di un processo di caratterizzazione basato sull'impiego di provini di tipo *ring* ispirato alle ASTM D2290 o EN 1394 e hanno consentito di disegnare, studiare e validare uno specifico disegno di provino rispondente alle specificità costitutive dei componenti tubolari prodotti con *filament winding*. La procedura è stata successivamente applicata a un isolatore per interruttori alta tensione 145/170 kV. Attraverso una campagna di testing è stato possibile caratterizzare le proprietà meccaniche e i relativi parametri statistici di dispersione, nonché studiare in dettaglio i meccanismi di danneggiamento/rottura.
I risultati promuovono la definizione di requisiti di accettazione da trasferire in specifici standard simili a quelli oggi esistenti per i materiali metallici e orientati non solo agli isolatori per alta tensione ma anche ad altre applicazioni come serbatoi in polimeri rinforzati con fibre di vetro.
La caratterizzazione dei materiali compositi è di fondamentale rilevanza nel processo più ampio di realizzazione di schede di accettazione degli stessi, che dovranno essere necessariamente orientate secondo specifiche puntuali relative alla produzione ed alle prove atte a determinarne le caratteristiche chimiche e meccaniche.

8. Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare HITACHI ENERGY per l'interesse verso il progetto e averne supportato le attività sperimentali con la fornitura di campioni di materiale.

9. Bibliografia

[1] Ferino et al. Progettazione e fabbricazione di attrezzature a pressione in composito: proposte per la caratterizzazione e l'accettazione dei materiali. Atti della Conferenza *Sicurezza e affidabilità delle attrezzature a pressione - SAFAP 2021. Roma, 16-18 novembre 2021.*

[2] Direttiva 2014/68/UE – Articolo 1 "Ambito di applicazione" Punto 2. Sono esclusi dall'ambito di applicazione della presente direttiva: [omissis] lettera l) gli alloggiamenti per apparecchiature ad alta tensione come interruttori, dispositivi di comando, trasformatori e macchine rotanti.

[3] IEC 61462:2007 EC. Composite hollow insulators - Pressurized and unpressurized insulators for use in electrical equipment with rated voltage greater than 1 000 V - Definitions, test methods, acceptance criteria and design recommendations. 2007.

[4] ASTM D2290-19a - Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe. Settembre 2019

[5] EN 1394 - BS EN 1394:1997 - Plastics piping systems. Glass-reinforced thermosetting plastics (GRP) pipes. Determination of the apparent initial circumferential tensile strength, 1997

[6] ASTM E8/E8M-22 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2022.

Serbatoi GNL orizzontali, problematiche e soluzioni

E. M. Ognibeni[1], L. Iori[1], P. Beber[2], A. Turri[2], M. Oss[3], G. Pilzer[4]

[1] Servizio Sicurezza Impianti e Macchine, UOPSAL, APSS Trento
[2] UOPSAL, APSS Trento
[3] Inail - Uot di Bolzano
[4] VVF Trento

Abstract

Le ditte distributrici di energia offrono agli utenti distanti dai sistemi di distribuzione del gas naturale a rete sistemi di fornitura con stoccaggio del gas naturale in fase liquida a bassa temperatura (GNL). Tale tipologia di fornitura e stoccaggio a bassa temperatura comporta delle specifiche tecnologie impiantistiche e di gestione. Sul territorio della Provincia Autonoma di Trento in particolare, per ragioni di tipo ambientale, i serbatoi di accumulo sono installati orizzontalmente, il che comporta l'adozione di particolari accorgimenti ai fini della sicurezza della gestione dell'impianto.
A seguito di un grave incidente l'organo ispettivo in materia di sicurezza sul lavoro ha analizzato le misure preventive utilizzate per la realizzazione del particolare insieme a pressione, costituito da: serbatoio di stoccaggio di GNL; attrezzature a pressione ad esso collegate; apparecchiature di sicurezza e controllo/misura installate. Inoltre, sono state analizzate le procedure operative applicate. Successivamente è stata messa in campo un'azione di miglioramento, con la modifica non sostanziale dell'impianto, la revisione dei parametri di gestione e delle procedure operative.
Vista la grande attenzione degli utenti non serviti della rete gas metano, questa esperienza di miglioramento contribuisce a ridurre la probabilità di incidenti aumentando l'affidabilità impiantistica.

Keywords: GNL, sicurezza, affidabilità.

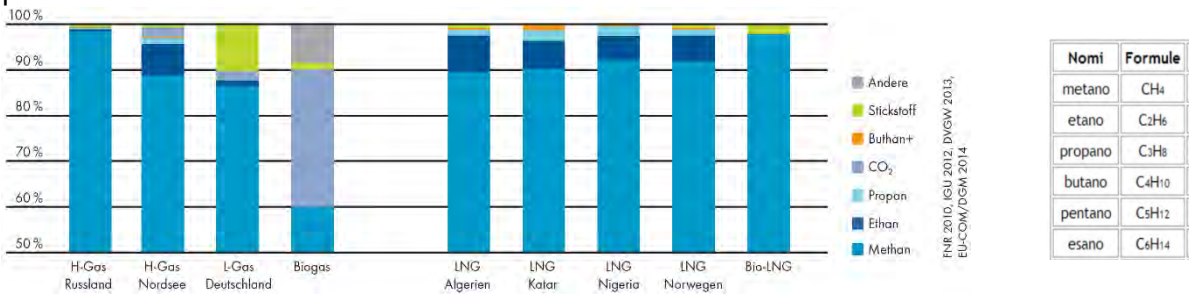
1. Introduzione

Il particolare momento storico in cui ci troviamo rivela come vi sia una maggiore attenzione all'impiego del GNL in quanto consente anche agli utenti privi della possibilità di accedere ad una rete di distribuzione, di poterne fruire. Inoltre, il GNL è un combustibile ecologico rispetto a quelli più tradizionali quali ad esempio gli olii combustibili, il gas di petrolio liquefatto, il gasolio ecc. Il GNL è ottenuto dalla liquefazione del gas naturale per raffreddamento e condensazione ed è composto da metano per oltre il 90%, ha una massa volumica compresa tra 430 e 470 kg/m^3, ha una temperatura di ebollizione compresa fra -166/-157 °C ed un potere calorifico inferiore di circa 48116 MJ/kg (11500 kcal/kg). Un aspetto interessante è

rappresentato dalla riduzione di volume ottenuta mediante la liquefazione, 570/590 m^3 di gas per m^3 di GNL, questo ne consente il trasporto con serbatoi criogenici, su apposite navi metaniere o mediante autocisterne stradali. Gli ambiti di utilizzo del GNL spaziano dall'industriale: utenze termiche, impianti ridondanti di back up, impianti di produzione multienergetici; alle utenze civili lontane dalla rete di distribuzione; all'autotrazione. È possibile quindi la realizzazione di distributori sia di GNL che di gas naturale in fase gassosa in siti non connessi alla rete di distribuzione.
Il presente documento, analizzando un evento indesiderato avvenuto relativamente ad un serbatoio di stoccaggio di GNL criogenico fisso orizzontale a servizio di un'utenza civile, riporta le cause e le soluzioni che sono state adottate e che possono fornire un utile riferimento per altri impianti con serbatoi di GNL installati orizzontalmente. Si è ritenuto utile affrontare questo particolare tema in quanto sul territorio della Provincia Autonoma di Trento, per ragioni paesistiche e di tutela del paesaggio, tutti gli impianti di stoccaggio di GNL installati (7) sono di tipo orizzontale.
Il mantenimento ad un valore costante della pressione nel serbatoio avviene senza intervento dell'operatore mentre le operazioni di rifornimento dei serbatoi, mediante travaso da autocisterna, necessitano dell'intervento manuale degli operatori. In questo caso le attività di tipo organizzativo – gestionale che devono essere opportunamente programmate e pianificate e regolate rappresentano l'oggetto della presente trattazione.

2. Le particolarità del GNL

Il gas naturale liquefatto GNL è ottenuto generalmente dal gas naturale GN estratto dal sottosuolo dopo trattamenti di pulizia, preparazione e di liquefazione. Dal GN estratto devono infatti prima essere tolti elementi corrosivi quali H_2S, CO_2 ed elementi quali, N_2, acqua, idrocarburi a catena lunga (C_{5+}), ecc. che abbassano il contenuto energetico del gas. Questo gas viene poi sottoposto ad un processo di liquefazione molto energivoro, in genere costituito da ripetute compressioni, raffreddamenti ed espansioni, per poi essere stoccato alla temperatura di circa -160°C (1 bar) in grandi serbatoi criogenici. Il GN non può essere liquefatto con il solo aumento della pressione a temperatura ambiente perché si otterrebbe un gas compresso ossia il GNC (gas naturale compresso a 200-300 bar circa).
A puro titolo di esempio si riporta la composizione del GN e GNL di diversa provenienza.



Nomi	Formule
metano	CH_4
etano	C_2H_6
propano	C_3H_8
butano	C_4H_{10}
pentano	C_5H_{12}
esano	C_6H_{14}

Figura 1. Composizione del GN e GNL proveniente da vari luoghi [A]

I serbatoi criogenici installati presso gli utilizzatori vengono quindi riforniti con GNL composto in prevalenza da metano (circa 98%), etano, propano, e tracce di composti a più di 4 atomi di carbonio e questa composizione varia a seconda del luogo di estrazione e di preparazione del gas naturale GN. Viene mantenuto a basse temperature (inferiori a -80°C; la temperatura critica del metano è -82,6 °C, sopra questa temperatura non è quindi più possibile avere il gas allo stato liquido.) e sotto pressione.
Le proprietà del GNL sono funzione della sua composizione. La densità del GNL è normalmente compresa tra 430 kg/m^3 e 470 kg/m^3 (in genere viene indicato il valore medio di 450) in casi particolari può raggiungere i 520 kg/m^3 e dipende anche dalla temperatura del liquido.
Mentre il metano è più leggero dell'aria (0,7 kg/m^3 – aria circa 1 kg/m^3), ed evapora rapidamente all'aria aperta, il GNL freddo sversato può rimanere sul terreno o in un locale chiuso per qualche tempo. Il GNL evapora rapidamente se riscaldato, in relazione alle condizioni ambientali, raffreddando l'aria e condensandone l'umidità contenuta. Se il GNL viene sversato sull'acqua galleggia fino alla completa evaporazione. La transizione di fase da liquido a gas è caratterizzata da un improvviso cambiamento di densità e quindi di volume (1/600).
Il GNL deve essere stoccato in serbatoi ben isolati termicamente al fine di contenere l'aumento della temperatura (-160°C) e quindi della pressione. Il calore proveniente dall'esterno infatti provoca l'evaporazione del liquido nel serbatoio. Questi vapori sono chiamati gas di evaporazione (boil-off gas BOG). Il BOG provoca l'aumento della pressione nel serbatoio e quindi deve essere rilasciato. Può essere inviato all'utilizzo ma, se non vi è questa possibilità, la pressione nel serbatoio può aumentare fino al limite della pressione di taratura delle valvole di sicurezza provocandone l'apertura ed il gas viene convogliato alla torcia fredda e disperso in ambiente.
Nel recente periodo trascorso purtroppo questo evento si è verificato in più occasioni a causa della chiusura forzata delle attività, dato il calo di consumi. Oltre ad una perdita economica per il GNL rilasciato in atmosfera, possono verificarsi problemi di sicurezza e di inquinamento ambientale. Infatti, il GNL è un gas con effetto serra 25 volte maggiore della CO_2.
Il GNL è un gas criogenico e dunque provoca ustioni da freddo per contatto e può provocare infragilimento dei materiali non resistenti alle basse temperature.
Nell'evaporazione del GNL si liberano prima i componenti a più alto punto di ebollizione (quelli cioè con + atomi di C) formando un gas molto infiammabile ed esplosivo. I limiti di esplosione per le miscele di metano/aria vanno da circa 4,4% al 17 %. La temperatura di fiamma del GNL o GN è elevata, brucia più velocemente e genera più calore rispetto ai combustibili liquidi.

3. Scenari incidentali

I possibili scenari incidentali sono legati ai seguenti eventi [B]:

3.1. Flash

Il GNL è stoccato nei serbatoi ad una data pressione (legata alla temperatura di stoccaggio). Una improvvisa perdita di pressione, ad esempio per rottura di una flangia del circuito in fase liquida, genera un'evaporazione istantanea del liquido detto "flash" con la liberazione di un'elevata energia tanto maggiore quanto maggiore è la differenza tra la temperatura di stoccaggio e la temperatura di ebollizione a pressione atmosferica.

3.2. Rilascio di GN in fase liquida

Il rilascio di GNL sotto forma di getto provoca l'evaporazione istantanea (flash) con simultanea espansione nella direzione del rilascio. Una parte del GNL è presente nella nube di gas sotto forma di aerosol in continua vaporizzazione e miscelazione con l'aria, mentre la rimanente parte si depositerà al suolo sotto forma liquida per poi dare origine ad un'intensa evaporazione con velocità decrescente per arrivare ad un valore costante, che dipende dalle caratteristiche termiche del suolo e della temperatura ambientale.
Il rapporto di espansione è di circa 1/600 cioè ogni litro di liquido produce 600 litri di gas. Inizialmente il gas evaporato è a temperatura vicina a quella del GNL, più denso dell'aria ambiente e tende a stratificarsi verso il basso, poi, quando la temperatura aumenta, la miscela gassosa diventa più leggera dell'aria. Se il rilascio liquido viene immediatamente innescato si origina un jet fire o un pool fire, in funzione della fase rilasciata e della frazione di liquido in grado di accumularsi sul terreno. Se non accadono tali eventi la dispersione del gas o l'evaporazione della pozza creano una nube infiammabile in grado di originare, in caso di innesco ritardato, un flash fire. Qualora tale nube raggiunga un'area confinata, in caso di innesco, è probabile un'esplosione.

3.3. Rilascio di GN in fase gassosa

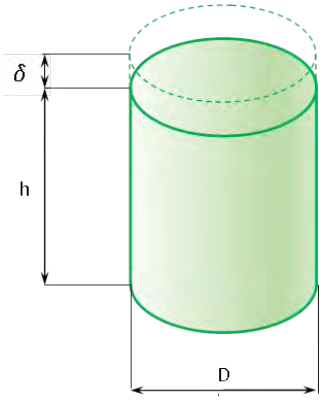
Il gas naturale in fase gassosa che fuoriesce, ad esempio da una valvola, ha inizialmente una temperatura più bassa dell'aria ambiente, è più denso e tende quindi ad accumularsi sul terreno. La condensazione dell'umidità atmosferica genera nebbie ben visibili. Il gas naturale successivamente si riscalda per scambio termico con il terreno e l'aria e diminuisce di densità fino a diventare più leggero dell'aria e quindi si disperde in atmosfera. Una fonte di innesco, ad esempio, provocherebbe una combustione che si propagherebbe a bassa velocità.
Al solo scopo di dare un riscontro visivo degli gli scenari incidentali sopradescritti si riportano due fotogrammi estratti da un video di un evento verificatosi nel 2012, che mostrano l'esplosione di un'autocisterna che trasportava GNL su un'autostrada della provincia di Hunan in Cina centrale. Nell'incidente hanno perso la vita cinque persone e l'esplosione ed è stata così potente che il giorno successivo l'evento la cisterna presentava ancora fiamme vive.




Foto 1 e 2. Esplosione di un'autocisterna che trasportava GNL, Hunan Cina centrale [C]

4. La geometria del serbatoio

Lo stoccaggio del GNL a temperature criogeniche comporta particolari difficoltà esecutive. La misura del grado di riempimento del serbatoio non può avvenire mediante normali sensori di livello ma deve essere ricostruita attraverso la misura del peso della colonna di GNL all'interno del serbatoio. Tale misura si ottiene in via indiretta, mediante misura della differenza delle pressioni fra il fondo e la sua sommità del serbatoio, differenza poi composta con la densità del GNL.



La geometria dei serbatoi è di tipo cilindrico e, nella dislocazione in posizione verticale, la variazione di volume V_V del GNL è direttamente proporzionale alla variazione dell'altezza del livello del liquido "*h*" (1) in esso contenuto,

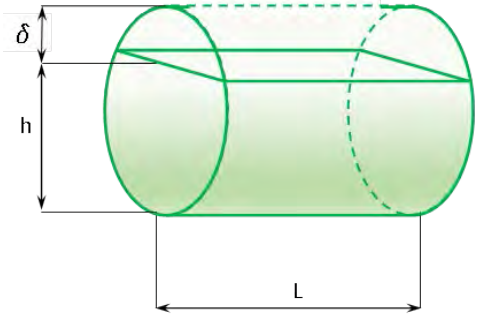
$$V_V = h * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (1) \qquad\qquad \delta = \mathrm{L} - \mathrm{h} \quad (2)$$

e quindi il grado di riempimento è direttamente proporzionale all'altezza della colonna di GNL misurata. Nella dislocazione dei serbatoi in orizzontale la diversa conformazione geometrica porta il volume del liquido contenuto V_0 a dipendere, in modo non lineare, dall'altezza del livello del liquido "*h*" secondo la relazione (3):

$$V_0 = L * \left[\left(\frac{D}{2}\right)^2 * \arccos\left(1 - \frac{2*h}{D}\right) + \left(h - \frac{D}{2}\right)\sqrt{D*h - h^2}\right] \quad (3) \qquad \delta = \mathrm{D} - \mathrm{h} \quad (4)$$

Dall'analisi della formula (3) ad un certo incremento dell'altezza del livello del liquido "*h*" non corrisponde una proporzionale variazione del grado di riempimento e questo dipende anche dal particolare grado di riempimento raggiunto.

Preso come esempio un serbatoio di diametro D=2,5 m e volume di V=50 m^3, a cui corrisponde, senza considerare i fondi bombati reali, una lunghezza L=10,19 m, è possibile esprimere, mediante il grafico 1, le relazioni (2) e (4). Si mette così in evidenza l'andamento del volume del liquido contenuto al variare dell'altezza "δ" fra la volta del serbatoio ed il pelo libero del liquido stesso, nei due casi, V_0 (tracciato blu) e V_V (tracciato rosso) con serbatoio disposto in orizzontale ed in verticale rispettivamente.



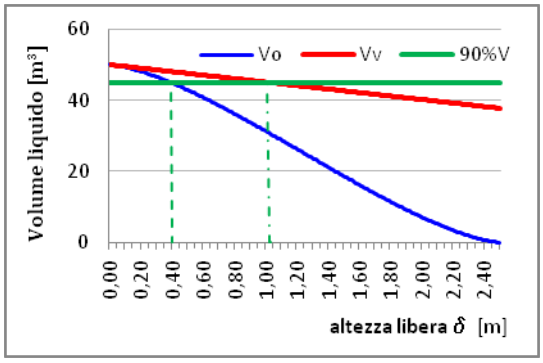


Grafico 1. Volume di riempimento di un serbatoio, in orizzontale V_o e in verticale V_v, al variare dell'altezza "δ" fra pelo libero del liquido e la volta del serbatoio.

Il grafico 1 evidenzia come il grado di riempimento del serbatoio del 90%, indicato con la linea verde (90%V), corrisponde ad un'altezza libera "δ" di circa 1,019 m nel caso di serbatoio verticale contro 0,39 m nel caso di serbatoio orizzontale. Nelle fasi terminali del riempimento di un serbatoio orizzontale di GNL, i margini di operatività sono quindi complicati dal ristretto margine di altezza libera disponibile all'interno del serbatoio stesso. Anche l'utilizzo di pressostati differenziali di classe 0,5, che con GNL di densità 450 kg/m^3, corrisponde, teoricamente, alla possibilità di apprezzare la variazione del livello di GNL di 13 mm, non migliora le condizioni di misura a causa degli inevitabili fenomeni di roll over interni al serbatoio in fase di riempimento.

5. Descrizione dell'impianto oggetto di intervento

L'impianto di stoccaggio e gassificazione del GNL alimenta un'utenza civile con grandi consumi e lontana dalla rete di distribuzione del metano. Tutto l'impianto è certificato come insieme per costituire un tutto integrato e funzionale secondo la Direttiva 2014/68/UE (PED) applicando le norme standardizzate EN 13458, EN 13445, EN13480. L'impianto è costituito principalmente dalle seguenti attrezzature: un serbatoio criogenico di capacità geometrica nominale superiore a 50 m^3 ad asse orizzontale installato fuori terra; un impianto di ri-gassificazione; un regolatore di pressione; un punto di carico per effettuare il riempimento mediante scarico delle autobotti; tubazioni di collegamento; strumentazione; accessori di controllo, regolazione e sicurezza atti a proteggere il serbatoio dal superamento dei limiti massimi di pressione PS, temperatura TS e riempimento previsti dai calcoli di progettazione.
In particolare, il serbatoio è a doppia parete con intercapedine sottovuoto, riempita di materiale isolante. La pressione massima di progetto è pari a 11 bar mentre la pressione d'esercizio, in condizioni normali è, compresa tra 3 bar e 5 bar. La temperatura di progetto del serbatoio interno è di –196°C. A servizio di questo sono installate 4 valvole di sicurezza delle quali due tarate alla pressione di 11 bar e due a 12,1 bar. Gli scarichi delle valvole di sicurezza e di espansione termica vengono convogliati alla torcia fredda.

5.1. Evento anomalo nella fase di caricamento del serbatoio GNL

Nella fase di caricamento del serbatoio GNL si è verificato un evento anomalo che ha comportato il sovra riempimento del serbatoio. È seguito il blocco dell'erogazione del gas alle utenze, che ha provocato un aumento repentino della pressione interna del serbatoio ed il successivo intervento delle valvole di sicurezza. Tale condizione ha provocato la fuoriuscita di GNL dalla torcia di scarico, posizionata sopra il serbatoio. Lo sversamento verso il basso ha investito il mantello esterno del serbatoio stesso e ha provocato la formazione di una nube di gas di GNL che si è estesa nell'area dell'impianto. In questa condizione si è reso necessario l'intervento sul posto dei Vigili del Fuoco per mettere in sicurezza l'impianto e l'area circostante.Foto 3, Impianto durante lo sversamento



5.2. Attività svolte nell'immediatezza

Successivamente all'allarme giunto in Centrale Operativa 115 da parte di un manutentore degli impianti, sono stati attivati i locali Vigili del Fuoco volontari, inviando contestualmente delle risorse del Corpo Permanente di Trento a mezzo elicottero e via terra con le necessarie dotazioni. E' stato palesato, fin da subito, il sovra riempimento del serbatoio, con fuoriuscita incontrollata di gas e fase liquida del prodotto, anticipata dal blocco degli utilizzi per eccesso di pressione. Le operazioni di controllo e messa in sicurezza dell'area con gas freddo ancora presente al suolo da parte dei soccorsi intervenuti hanno confermato l'assenza di persone, unitamente alla verifica ed eventuale allontanamento di sorgenti di innesco legate all'impiantistica installata e/o a fonti terze. Si è progressivamente constatata l'integrità del serbatoio e la condizione di vuoto nell'intercapedine, escludendo per il momento la fessurazione del mantello esterno investito dal flusso criogenico dello spandimento. Per ricondurre verso una situazione ordinaria i parametri interni di pressione e grado di riempimento, sono stati riavviati gli impianti termici utilizzatori del gas alla massima potenza disponibile col fine di consumarlo. Il riavvio si è reso possibile solo dopo l'apertura manuale di una valvola di bypass nel sistema di gassificazione, che era in blocco a seguito delle sovrappressioni generatesi nel sovra-riempimento.

5.3. Messa in sicurezza

Il giorno successivo, post confronto fra tecnici della ditta installatrice e tecnici Vigili del Fuoco del Corpo Permanente, si è concordata una linea di azione per svuotare il serbatoio, permettendo così l'effettuazione di controlli non distruttivi atti a

confermare l'integrità dello stesso e parallelamente condurre la ricerca delle cause del sinistro.
Si è quindi montato un sistema di svuotamento in emergenza per consumare direttamente in fase liquida il GNL presente con capacità massima della torcia a caldo dell'ordine di 1200 kg/h, raddoppiato nei giorni successivi mediante un'analoga torcia del CNVVF. Tale sistema è rimasto inoperante, lasciando per una settimana gli impianti utilizzatori al massimo della potenza disponibile, con consumi stimabili nell'8% al giorno. Successivamente si è concordato una bonifica a mezzo torce calde di circa il 35% del contenuto, pari a 9300 kg, è stata consumata la fase liquida sfruttando la sola pressione interna del serbatoio, poi implementata mediante l'attivazione del vaporizzatore interno. Nella fase finale sono stati collegati 3 pacchi da 16 bombole/cad di azoto compresso 50 litri a 200 bar, per pressurizzare e consumare il rimanente metano nel serbatoio, consegnandolo infine bonificato per le successive operazioni. La successiva analisi dell'evento incidentale ha coinvolto tutte le parti interessate dal gestore al proprietario, costruttore, enti di controllo, ecc. portando alla stesura di un programma di azioni per la rimessa in funzione in sicurezza del serbatoio. E' stato stabilito un programma di controlli sul serbatoio e sulla strumentazione al fine di escludere danneggiamenti degli stessi e una revisione delle procedure per il rifornimento e per l'emergenza.

5.4. Controlli effettuati per valutare l'integrità del serbatoio GNL.

I punti principali del piano di controllo sono stati: la prova del vuoto dell'intercapedine; l'analisi dell'andamento della pressione all'interno del serbatoio; i controlli non distruttivi sul serbatoio; la verifica della corretta taratura delle valvole di sicurezza; la sostituzione di alcuni dispositivi di sicurezza automatici (indicatore e interruttore di livello) ritenuti più performanti; la verifica del corretto funzionamento dell'intero impianto GNL.
Dato l'esito positivo dei controlli effettuati si è potuto rimettere in esercizio l'impianto.

5.5. Principali misure volte ad evitare il sovra riempimento del serbatoio

Le principali protezioni atte ad evitare il sovra-riempimento del serbatoio, al momento dell'evento, erano: un trasmettitore di livello (pressostato differenziale per la misura del grado di riempimento) per allarme alto livello impostato all'86% e soglia di allarme e di blocco per altissimo livello all' 88% del volume del serbatoio; uno swich di altissimo livello (seconda protezione di sovra-riempimento), che comanda l'allarme relativo e la chiusura della valvola sulla linea di riempimento al 90% circa del volume del serbatoio.
Sono state analizzate dal costruttore dell'impianto GNL le cause probabili che hanno portato all'evento, in particolare:
– Analisi delle impostazioni del sistema di misura del grado di riempimento del serbatoio. La verifica delle impostazioni ha messo in evidenza una non ottimale calibrazione dei pressostati differenziali del sensore di livello e l'impostazione del

volume di riferimento pari al volume della denominazione commerciale del serbatoio in luogo di quella effettiva, con una ripercussione sulla misura del grado di riempimento, sempre in difetto. Con serbatoi disposti orizzontalmente ed il conseguente ridotto campo di operatività risulta essenziale provvedere alla sistematica calibrazione dei pressostati differenziali destinati alla misura del grado di riempimento.

– Analisi dati telemetria. Dall'analisi della telemetria effettuata dal gestore/costruttore dell'impianto, i dati trasmessi dal sistema di telemetria hanno mostrato un funzionamento regolare del sistema di blocco, con intervento alla seconda soglia del Trasmettitore di livello, che ha comandato la chiusura della valvola sulla linea di riempimento quando il livello del liquido nel serbatoio ha raggiunto circa 88,5% del volume interno. La pressione nel serbatoio, al momento della chiusura della valvola, era pari a 3,6 bar. Trascorsi circa 15 minuti dal termine del carico, la pressione nel serbatoio è salita repentinamente fino al valore di 11,9 bar facendo aprire le valvole di sicurezza alla loro pressione di taratura. Il sistema di rivelazione gas, attivato dalla fuoriuscita di GNL, ha comandato la chiusura delle valvole pneumatiche; inoltre, lo switch d'altissimo livello (tarato al 90%) non è intervenuto in quanto il trasmettitore di livello aveva già bloccato il riempimento al 88,5%.

– Verifica documentale del carico. Dai documenti di trasporto si è rilevato che la densità del liquido era pari a 427 kg/m^3, bassa, in riferimento al valore standard di 450 kg/m^3, ed in funzione del quale era stata tarata la strumentazione di misura del livello di riempimento. Dall'analisi delle forniture all'impianto nell'ultimo biennio, riportate nel Grafico 2, emerge che la densità del gas fornito all'impianto, in molte occasioni, era inferiore al valore medio standard di 450 kg/m^3 di taratura della strumentazione (linea verde). Ciò ha comportato, durante la fase di riempimento del serbatoio, una sottostima del livello effettivo da parte della strumentazione. L'impostazione della strumentazione con un valore di densità pari a 435 kg/m^3 (linea rossa), consente una misura del grado di riempimento del serbatoio in favore della sicurezza e più precisa di almeno il 3%.

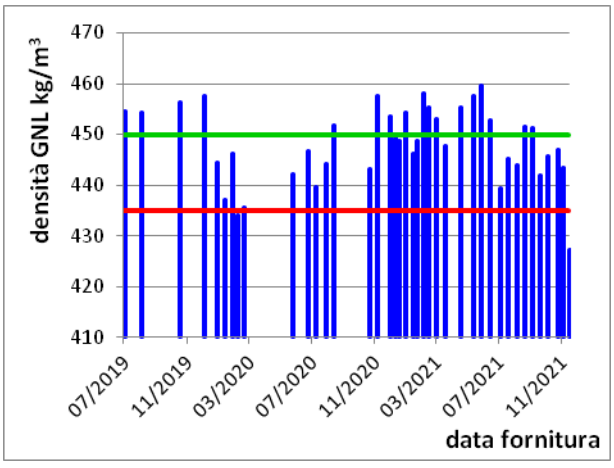


Grafico 2. Valori della densità del GNL dei rifornimenti dell'impianto nell'ultimo biennio

Alla luce degli approfondimenti effettuati si è concluso che il sovra-riempimento, e l'intervento dalle valvole di sicurezza verificatisi, è stato causato da vari fattori concomitanti, tra cui il principale legato alla bassa densità del GNL. La densità del GNL in fase di caricamento, infatti, era inferiore alla densità del GNL di taratura della strumentazione di misura del grado di riempimento; ciò ha causato una sottostima

del livello effettivo da parte della strumentazione. Gli altri fattori concomitanti che hanno influito sull'accadimento del sovra-riempimento del GNL sono da ricollegare alla non ottimale calibrazione dei pressostati differenziali destinati alla misura del grado di riempimento e ad una assunzione del volume del serbatoio pari al valore della denominazione commerciale, in luogo dell'effettiva capacità, che si discosta sempre in difetto. In questo modo, il grado di riempimento del serbatoio, invece che vicino all'88% (valore al quale il sistema ha azionato la chiusura della valvola sulla linea di riempimento) era prossimo a colmare il volume massimo interno. Il limitato spazio disponibile per la fase vapore, che veniva ridotto ulteriormente dalla dilatazione termica del GNL, ha causato un incremento repentino della pressione interna, che ha comportato l'apertura delle valvole di sicurezza, una volta raggiunta la loro pressione di taratura.

6. Azioni di miglioramento messe in atto

A seguito dell'evento e delle analisi svolte, l'impianto e le misure organizzative per la sua gestione sono stati rivisti e migliorati.

6.1. Configurazione della torcia fredda

Nei sopralluoghi è emersa la criticità della zona di installazione della torcia fredda, sfogo delle valvole di sicurezza e degli sfiati dell'impianto di stoccaggio del GNL. Da progetto era posizionata sopra il mantello del serbatoio e nel corso dell'incidente questo risultava fattore critico, in quanto il GNL fuoriusciva a bassissima temperatura anche in basso, lambendo la superficie esterna del serbatoio, con possibili criticità per la resistenza meccanica del mantello e quindi di conservazione del vuoto. Si è evidenziata anche la presenza del rischio di investimento di gas/liquido a bassissima temperatura, per i lavoratori che accidentalmente si potevano trovare nella zona di passaggio per accedere all'impianto, parzialmente sotto la zona di sversamento di GNL dalla torcia fredda.
Il costruttore ha provveduto perciò a modificare la posizione della torcia fredda, collettore degli sfiati, in modo che, l'eventuale sversamento di GNL avvenga in una zona sicura, senza interessare il mantello esterno o altre strutture dell'impianto e fuori dalle zone di passaggio o stazionamento di lavoratori. Il costruttore ha predisposto anche la prevista documentazione e ciò non ha determinato la ricertificazione dell'impianto.

6.2. Misure tecniche impiantistiche adottate a seguito dell'evento

Al fine di ridurre ulteriormente l'eventualità di sovra-riempimenti nella fase di rifornimento, sono state effettuate le seguenti modifiche impiantistiche su indicazione del costruttore: sostituito il trasmettitore di livello attuale con uno nuovo con soglia di allarme alto livello ridotta da 86% attuale a 83 %, blocco di livello portato dall'attuale 88% a 84%; disinstallato lo switch di altissimo livello, che comanda la chiusura della valvola riempimento al 90% del livello e allarme collegato; installato, al

suo posto, un nuovo trasmettitore di livello che segue le stesse logiche d'allarme e blocco ma con soglia tarata a 85% invece che a 90%. Entrambi gli strumenti sono stati tarati per densità del GNL pari a 435 kg/m^3 invece della precedente 450 kg/m^3, migliorando l'accuratezza della lettura ed aggiungendo un ulteriore margine di sicurezza.

6.3. Revisione delle procedure

Le operazioni di scarico del GNL risultavano essere state effettuate da una ditta specializzata del settore con autisti preparati. Tuttavia, nella verifica delle documentazioni acquisite dal fornitore e dal committente, sono emerse palesi carenze nella gestione della fase di consegna e relativo scarico del GNL nel serbatoio interessato. Tali carenze sarebbero riconducibili a tre principali criticità:

a) procedure di consegna del GNL;

b) valutazione dei rischi interferenti fra le attività svolte dai vari soggetti che operano sull'Impianto (proprietario impianto, fornitore GNL, manutentori e utilizzatore dell'impianto);

c) valutazioni relative al rischio di esplosione per la presenza di atmosfere esplosive.

Dall'indagine svolta, per ciascuna criticità si è provveduto a contestare alle parti interessate i contenuti ed a richiedere una loro revisione sui i seguenti aspetti:

a) controllo preventivo delle caratteristiche fisiche del GNL, pre-carico del serbatoio del cliente. La procedura ha infatti inserito l'obbligo, per l'operatore che esegue il travaso del GNL camion-serbatoio, di effettuare prima dello scarico, il controllo del valore di densità del GNL riportato sui documenti di trasporto, consegnati al momento del carico camion. Se questo valore dovesse risultare inferiore a 435 kg/m^3 - valore di taratura dei misuratori di livello del serbatoio - il livello massimo di riempimento deve essere ulteriormente ridotto del 5% e nel caso specifico, il livello massimo di riempimento non deve superare il valore dell'80% della capacità totale;

b) a fronte della Valutazione dei Rischi eseguita dal cliente che utilizza il GNL, considerata l'esistenza di rischi derivanti da interferenze presenti nell'esecuzione delle attività appaltate per la fornitura di GNL e per la manutenzione dell'impianto, sono state rilevate tutte le possibili situazioni d'interferenza, inserite nel D.U.V.R.I. (ex art. 26 del d.lgs.81/08) e condivise con tutti gli attori. Principali aspetti individuati: pericolo di investimento, durante l'arrivo, transito, partenza del camion cisterna all'interno ed in prossimità dell'azienda; rumore dovuto all'utilizzo di macchinari; irritazione da inalazione-contatto per uso di prodotti chimici e sostanze, in funzione delle caratteristiche del prodotto, desumibile dalla rispettiva scheda di sicurezza; eventi di elettrocuzione; sversamenti accidentali di GNL.

Si mette in evidenza che per quanto riguarda le fasi di scarico del GNL, fra le azioni adottate al fine di garantire l'assenza di rischi, da parte del cliente è stata predisposta una specifica "Check-list", che, compilata al momento dell'arrivo del mezzo, viene poi registrata negli atti aziendali. Vi sono dei punti di controllo, sull'attività svolta dagli autisti prima di poter accedere all'impianto ed iniziare le operazioni di scarico. Ad

esempio, il personale del cliente utilizzatore, controllerà che l'autista abbia verificato (da documenti di trasporto) la densità del GNL da caricare nel serbatoio e qualora anche una sola delle verifiche previste non venisse rispettata, non risulterà possibile procede allo scarico.

c) l'impianto di stoccaggio, di vaporizzazione e di riduzione del GNL installato presso il cliente é in comodato d'uso e risulta, come previsto dalla normativa, provvisto di marcatura CE ai sensi della direttiva europea 2014/68/UE. L'installazione presso i luoghi di lavoro del cliente, richiede che sia presente anche la valutazione del rischio relativa al rischio di esplosione, redatta ai sensi del titolo XI del d.lgs. 81/08. Nello specifico, la valutazione del rischio individuava in modo corretto tutte le sorgenti di emissione presenti su detto impianto e le relative estensioni delle zone con pericolo di esplosione. La valutazione considera anche le sorgenti di emissioni generate durante la fase di rifornimento del GNL ed introdotte da tutti i possibili automezzi di rifornimento del GNL. Nel documento di valutazione del rischio sono specificate le misure organizzative, procedurali e di coordinamento da adottare da tutti gli operatori, che per qualsiasi motivo accedono all'impianto GNL.

7. Conclusioni

L'esame del particolare impianto di stoccaggio di GNL, caratterizzato dalla collocazione in orizzontale del serbatoio, ha messo in evidenza sia aspetti di tipo impiantistico che di tipo organizzativo/gestionale che debbono essere tenuti in debita considerazione. Tale esame ha portato ad un'azione di miglioramento: dal punto di vista impiantistico, che ha riguardato la posizione geometrica della torcia fredda e la necessità di una scrupolosa gestione dei pressostati differenziali in termini di calibrazione e di impostazione della densità del GNL, al fine di garantire una affidabile misura del grado di riempimento del serbatoio; dal punto di vista delle procedure di gestione delle operazioni rifornimento del GNL, che ha reso necessaria la codifica in modo scrupoloso e dettagliato delle procedure, non solo per il personale addetto al trasporto/rifornimento ma anche per la ditta che accoglie la fornitura. Questo in termini di gestione dei rischi interferenziali all'interno di attività e della gestione dei luoghi con pericolo di esplosione. La conoscenza di tali azioni di miglioramento messe in atto sullo specifico impianto si ritiene possano essere utili a tutti i possibili utenti di questa tipologia di depositi di GNL, anche ad asse verticale, contribuendo a ridurre la probabilità di incidenti nelle fasi di caricamento ed aumentando nel contempo l'affidabilità impiantistica.

8. Bibliografia

[A] Shell Lng–Studie Verflüssigtes Erdgas–Neue Energie Für Schiff Und Lkw

[B] Il gas GNL: analisi delle caratteristiche e dei comportamenti fisici – Claudio Giacalone. https://www.puntosicuro.it, articolo n. 4375 19/12/2018

[C] News 8.10.2012, Fonte: https://www.bbc.com/news/av/world-asia-19868055

Recipienti a pressione per stoccaggio gpl. Analisi mediante approccio statistico sui malfunzionamenti rilevati nelle installazioni e considerazioni sulla valutazione di conformità nei serbatoi soggetti a modifica

A. Rotondaro[1], A. F. Cosentini[2]

[1] Esperto PED
[2] Inail - Uot di Catanzaro

Abstract

I depositi per lo stoccaggio del gas di petrolio liquefatto ad uso di impianti domestici ed industriali sono largamente diffusi su tutto il territorio italiano.
Ogni deposito è sottoposto ad un piano di verifiche periodiche che ha lo scopo di mantenere sempre efficiente ed in totale sicurezza l'impianto di stoccaggio ad uso dell'utente finale. Le manutenzioni e le attività di verifiche sono affidate a società di manutenzione specializzate attrezzate per interventi ordinari e straordinari.

Keywords: vessel, materiali, indagine.

1. Introduzione

L'analisi dei dati relativi agli interventi ordinari e straordinari effettuati presso gli impianti di serbatoi GPL, installati presso i clienti, ha permesso l'elaborazione di un report statistico riguardante circa 10.000 interventi effettuati negli ultimi 12 anni nell'area del centro-sud Italia. Con il database è possibile settare vari parametri e variabili, quali stagionalità, localizzazione dei malfunzionamenti, tipi di problematiche, tipologia e caratteristiche dei depositi fissi.

2. Depositi fissi cilindrici per stoccaggio gpl

Un impianto di stoccaggio gpl è costituito da un serbatoio di capacità adeguata equipaggiato con apparecchiature per l'esercizio, il controllo e la sicurezza.
I serbatoi GPL analizzati nel presente lavoro sono costituiti essenzialmente da un corpo cilindrico e da due fondi in acciaio saldati in modo solidale tra loro.
Possono essere ad asse orizzontale o verticale di capacità fino a 13 mc, già istallati fuori-terra o interrati. Fanno parte della membratura a pressione i manicotti con filettatura NPT conica utilizzati per l'assemblaggio delle strumentazioni di sicurezza ed accessori di servizio necessari per l'utilizzo dei serbatoi stessi in conformità alla normativa europea UNI EN 14570. Gli accessori presenti su tutti i serbatoi sono: sotto valvola e relativa valvola di sicurezza, gruppo di servizio multi-valvola, valvola di riempimento, valvola di prelievo in fase liquida, valvola di spurgo inferiore (presente

solo nei depositi fuori terra), indicatore di livello magnetico a galleggiante, kit di riduzione della pressione di 1° e di 2° stadio.

Analisi delle tipologie di depositi fissi cilindrici

Sono stati esaminati i depositi con le seguenti caratteristiche:

Capacità:	da 300 litri a 13.000 litri
Asse:	Verticale (si sviluppa lungo un asse perpendicolare al terreno e con gli equipaggiamenti di sicurezza e di servizio posti sul fondo bombato superiore) ed Orizzontale (si sviluppa lungo un asse parallelo al terreno e con gli equipaggiamenti di sicurezza e di servizio posti sulla generatrice superiore del recipiente)
Tipo di installazione:	Interrata (al di sotto del piano di campagna), Guscio (avvolto da un "guscio" plastico interrato al di sotto del piano di campagna) e Fuori terra (ancorato al di sopra del piano di campagna)
Prodotto stoccato:	GPL Propano/ Butano con tensione di vapore 5 < Ps < 18 bar
Max riempimento:	80% della capacità nominale del serbatoio per tipo fuori terra 85% della capacità nominale del serbatoio per tipo interrato
Press. max. di esercizio:	17,65 bar
Utenze:	Domestiche ed Industriali

3. Analisi statistica

3.1 Tipologie di depositi analizzati

Il presente lavoro di ricerca è stato incentrato sull'analisi statistica degli interventi effettuati dalla società di manutenzione nel periodo compreso tra il 01/01/2012 ed il 30/06/2023.

Numero totale dei serbatoi verificati:	**6.561**	
Serbatoi ad asse orizzontale:	4.964	
Serbatoi ad asse verticale:		1.597
Serbatoi fuori terra:		4.222
Serbatoi interrati epox:	2.308	
Serbatoi interrati guscio:	31	

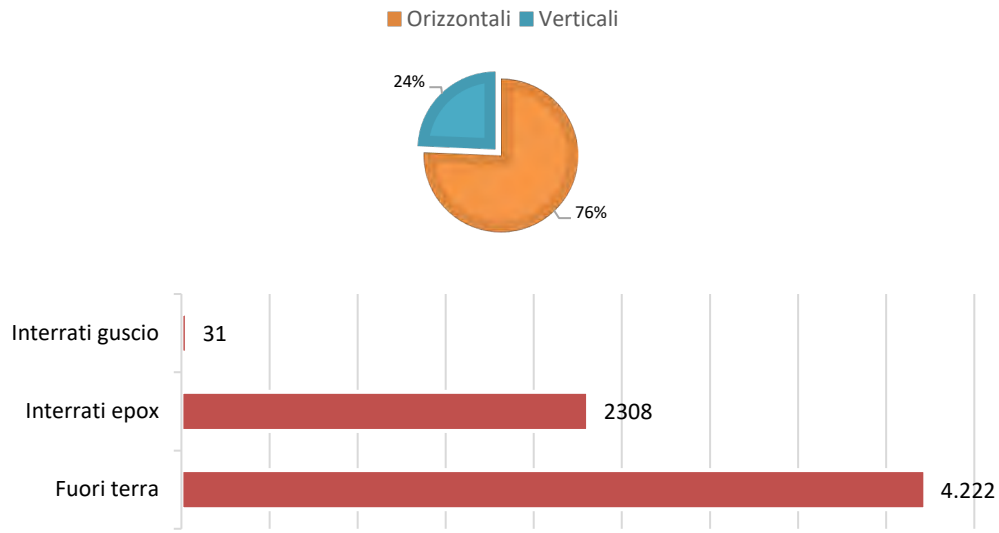


Grafico 1. Analisi dei depositi soggetti ad attività manutentiva



Immagine 1. Tipologia di depositi: da sinistra: Interrato Guscio, Fuori Terra, Interrato Epox

3.2 Rapporto statistico Nuove Installazioni / Dismissioni depositi di stoccaggio

Nella prima indagine si è confrontato, nel periodo temporale di riferimento, le nuove installazione di depositi e le dismissioni, per le versioni Fuori Terra ed Interrata Epox.

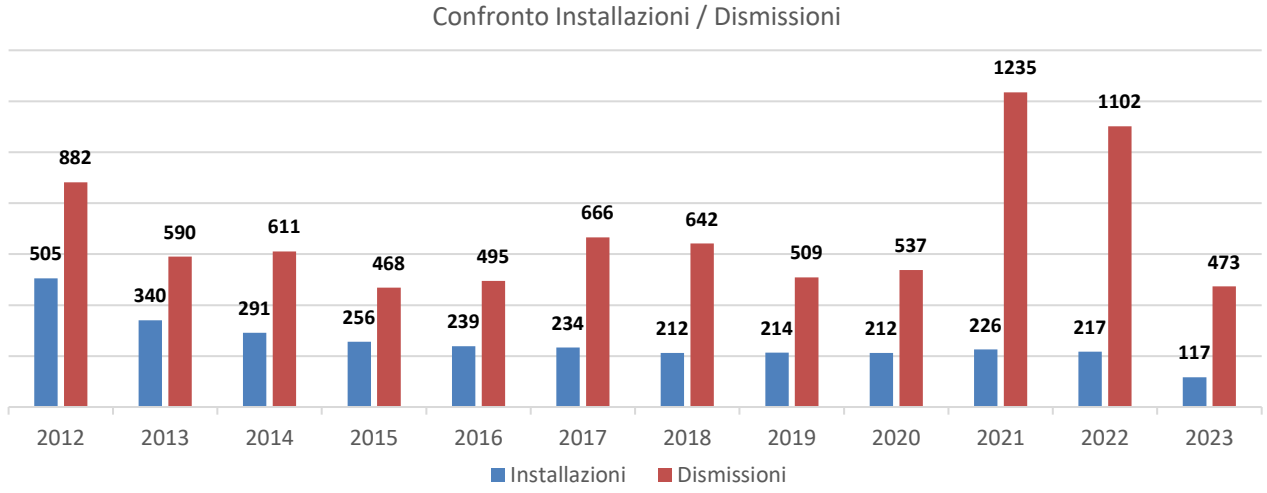


Grafico 2. Rapporto depositi di stoccaggio gpl: Nuove Installazioni / Dismissioni

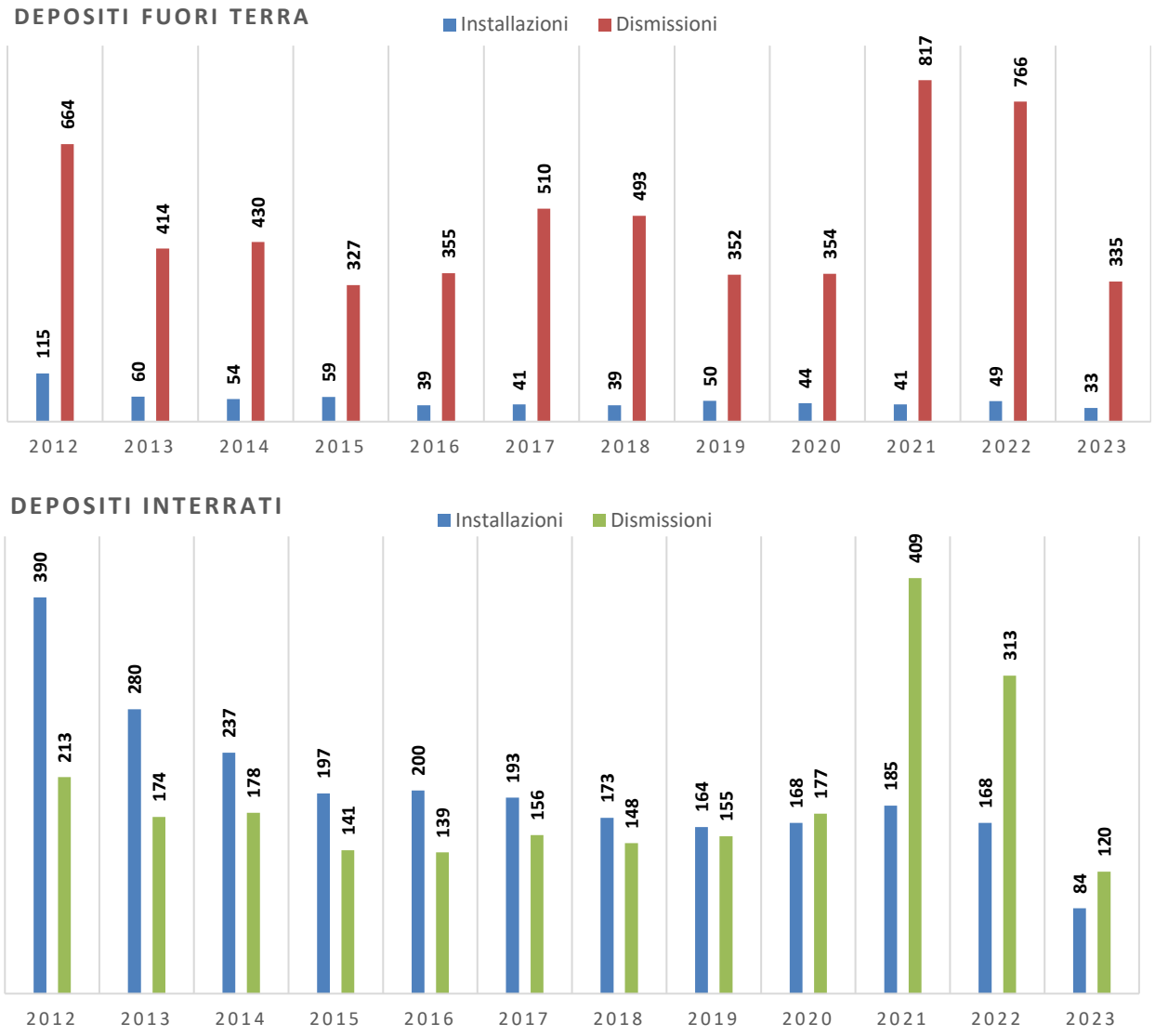


Grafico 3. Nuove Installazioni / Dismissioni in relazione alla tipologia di utilizzo

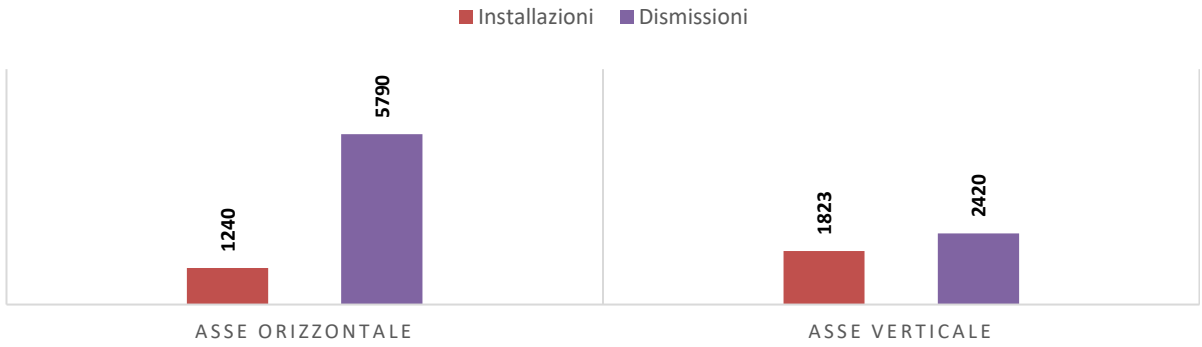


Grafico 4.Nuove Installazioni / Dismissioni in relazione all'asse del serbatoio

Si conferma il trend che prevede un numero di installazioni di nuovi depositi di stoccaggio pari a circa 0,5 volte il numero delle dismissioni con un'inversione nei depositi ad uso interrato a causa, da un lato, della larga diffusione della tipologia interrata e dall'altro lato dalle difficoltà legate alla dismissione dei depositi in disuso.

3.3 Analisi statistica generale degli interventi

Le attività di manutenzione, sorveglianza e controllo di un deposito per stoccaggio gpl sono state relazionate a delle macroaree di indagine:

a. Tipologie di depositi
b. Anno di fabbricazione del serbatoio di stoccaggio
c. Tipologia di installazione ed asse del serbatoio
d. Periodicità degli interventi

a. Tipologie di depositi

Gli interventi realizzati presso i depositi dalla società di manutenzione, nel periodo temporale considerato, sono stati esaminati con una serie di filtri successivi, a cascata, in modo da determinare ogni tipologia di attività manutentiva:

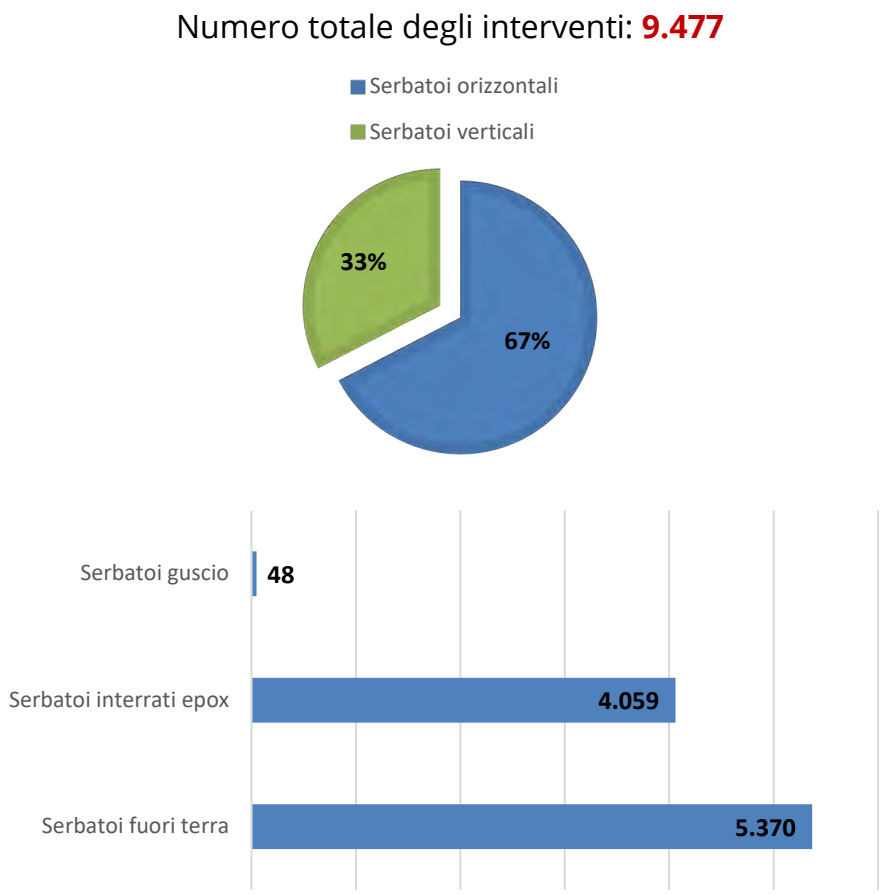


Grafico 5. Analisi dei dati relativi agli interventi

b. Anno di fabbricazione del deposito

È stata inoltre fatta un'analisi in base all'anno di costruzione del serbatoio oggetto di intervento distinguendo gli interventi effettuati su serbatoi fabbricati prima dell'entrata in vigore della Direttiva Europea PED (dal 1972 al 1997 escluso) o successivamente alla stessa (dal 1997 ad oggi).

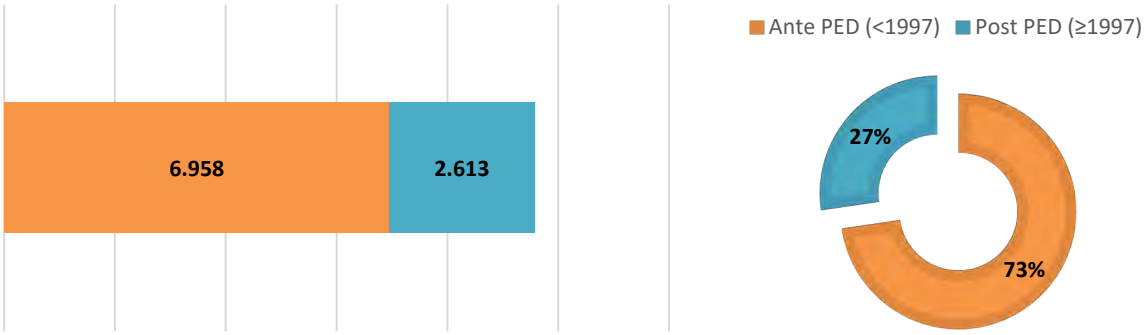


Grafico 6. Analisi degli interventi in rapporto all'anno di costruzione del serbatoio (Ante PED / Post PED)

c. Tipologia di installazione ed asse del deposito

Dall'analisi della correlazione dei dati tra gli interventi effettuati sui serbatoi installati e l'orientamento del deposito stesso scaturisce una casistica di interventi maggiore sui serbatoi ad asse orizzontale fuori terra e ad asse verticale interrato.

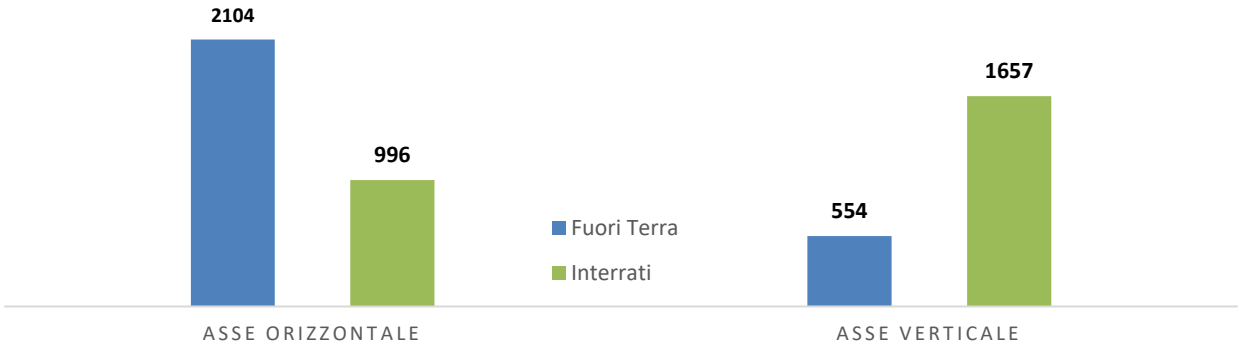


Grafico 7. Confronto tipologia di installazione / asse del deposito

d. Periodicità degli interventi

Un parametro importante nell'attività di programmazione delle manutenzioni scaturisce dall'analisi degli interventi (ordinari e straordinari) filtrati in base al periodo di intervento, suddiviso in estivo (da maggio ad ottobre) ed invernale (da novembre ad aprile).

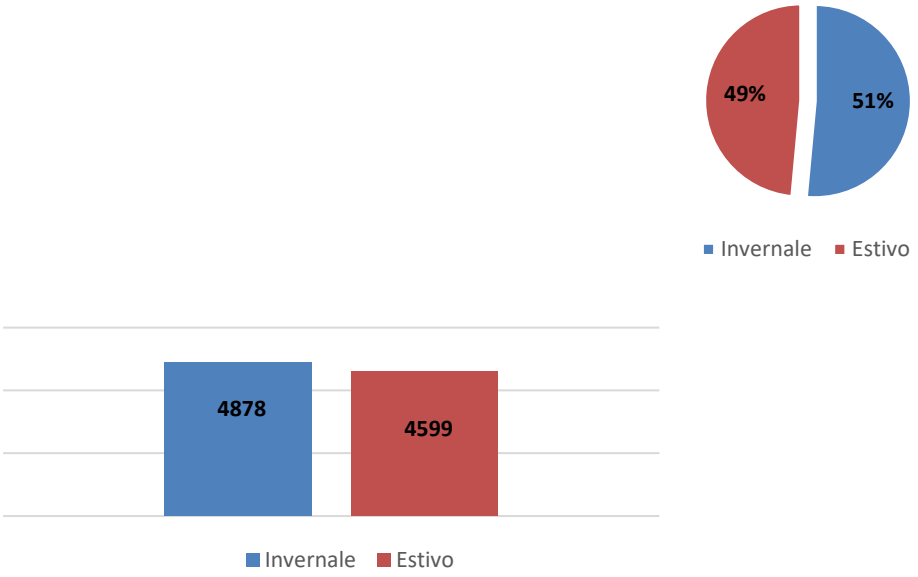


Grafico 8. Periodicità degli interventi

3.4 Analisi statistica particolare degli interventi

L'indagine è proseguita andando a particolarizzare l'approccio con un focus su una scala ridotta, relativa alle singole voci di attività manutentiva.

a. Interventi su accessori di sicurezza e di servizio

L'analisi è stata svolta sia sui depositi interrati che su quelli fuori terra. Il componente maggiormente soggetto a danneggiamento risulta essere il quadrante dell'indicatore di livello, soprattutto nei modelli più datati contenenti glicerina e nella versione fuori terra.

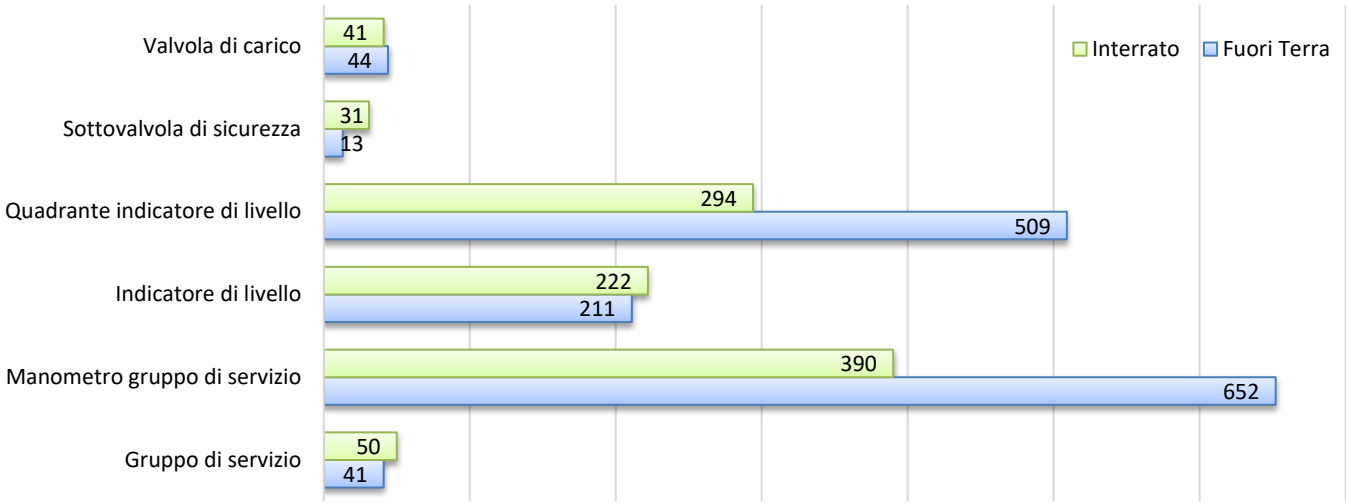


Grafico 9. Analisi degli interventi per ogni singolo accessorio di sicurezza e di servizio

Anche gli interventi sugli accessori sono stati esaminati in base all'orientamento del serbatoio. Il deposito fuori terra ad asse orizzontale e quello interrato ad asse verticale risultano essere maggiormente soggetti ad interventi.
Stessa analisi è stata fatta per l'anno di costruzione del serbatoio in relazione all'entrata in vigore della PED. La tipologia fuori terra ante PED (molto diffuso in passato) e quella interrata post PED (maggiormente utilizzato negli anni recenti) risultano le più coinvolte in attività di manutenzione.

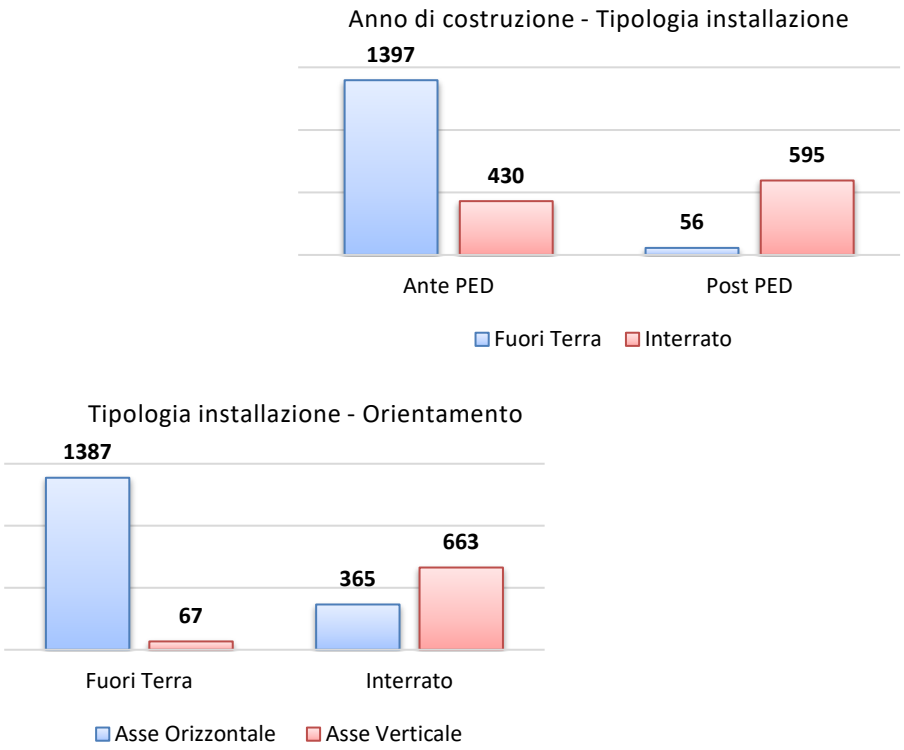


Grafico 10. Analisi degli interventi in relazione all'orientamento del serbatoio

b. <u>Interventi su gruppo di riduzione e di regolazione</u>

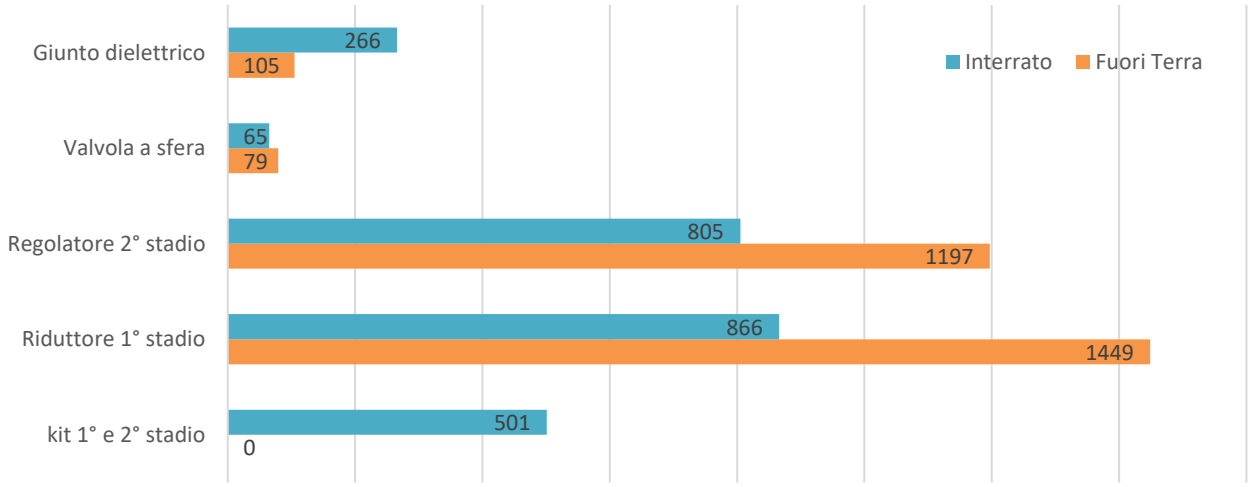


Grafico 11. Analisi degli interventi sul gruppo di regolazione e di riduzione

Gli elementi più sollecitati sono i riduttori ed il regolatore. Quasi il doppio degli interventi risultano essere effettuatati sui serbatoi fuori terra, in quanto maggiormente esposti agli agenti atmosferici, quali pioggia, ghiaccio e polveri.

4. Considerazioni sulla valutazione di conformità di serbatoi soggetti a modifica

Come descritto in precedenza, il parco dei serbatoi installati presso gli utenti finali è caratterizzato da depositi con una vita di esercizio all'attivo importante. Nonostante ciò, in Italia, nel rispetto dell'attuale quadro normativo, è ancora molto diffusa l'attività di adeguamento a seguito modifica dei serbatoi ritirati dagli utenti per poi essere re-immessi sul mercato a seguito l'attività di valutazione di conformità e successiva marcatura CE.

La valutazione della conformità dei serbatoi alla Direttiva PED 2014/68/UE deve essere effettuata utilizzando uno dei moduli previsti dalla Direttiva, individuati sulla base della categoria dell'apparecchio, considerando i seguenti dati di input:

Prodotto in stoccaggio	GPL
Gas pericolosi	Gruppo I
Capacità dei serbatoi	Fino a 13.000 litri
Tipologia del serbatoio / Installazione	Orizzontale - Verticale / Interrata - Fuori Terra
Max pressione di esercizio	17,65 bar
Pressione di prova idraulica	25,24 bar
Temperatura di esercizio	-20°C ÷ +50°C
Materiali membrature in pressione	Fe410.2 KG/KW - Fe460.2 KG/KW - Fe510.2 KG/KW - P355NH

Nell'Allegato II della Direttiva 2014/68/UE "Tabelle di valutazione della conformità", per recipienti per gas pericolosi del gruppo 1, nella tabella 1 – Recipienti di cui all'art. 3, punto 1.1, lettera a), primo trattino, si identifica il gruppo IV.
I serbatoi esistenti sono stati fabbricati da diversi Costruttori nazionali in base a progetti redatti secondo le normative tecniche vigenti nel periodo di costruzione. Tali norme possono essere le Raccolte ISPESL (VSR, S ed R) vigenti prima dell'entrata in vigore della Direttiva PED, o la Direttiva stessa se già in vigore nel periodo di costruzione.
Per i serbatoi ante PED la costruzione era subordinata all'approvazione da parte dell'ISPESL di un progetto redatto da un tecnico abilitato ed al collaudo "omologativo" dei serbatoi, in ditta.
I processi di fabbricazione di questa tipologia di apparecchi a pressione fanno riferimento ad una produzione in serie. Durante le fasi di gli stessi sono stati sottoposti ad una serie di prove, controlli e collaudi da parte sia del costruttore che dell'ISPESL tra cui il controllo sui materiali impiegati, la qualifica dei procedimenti di saldatura e dei saldatori, le prove non distruttive, la prova idraulica e la verifica degli accessori di sicurezza del serbatoio stesso.
A seguito dell'esito positivo del collaudo di costruzione ad ogni serbatoio veniva associato un numero di matricola rilasciato dal Dipartimento ISPESL competente per territorio. L'emissione del "libretto matricolare" sul quale la firma del funzionario ISPESL ne garantiva l'esito positivo delle prove e dei controlli previsti.
Nel libretto, quindi, sono riportate la matricola del serbatoio, la data di prima immatricolazione, gli estremi del documento ISPESL di approvazione alla costruzione (emesso a seguito dell'esito positivo dell'esame progetto), gli estremi di rintracciabilità dei materiali impiegati, il disegno schematico dell'apparecchio, l'indicazione degli accessori di sicurezza installati ed il certificato di taratura della valvola di sicurezza nel quale sono riportate le caratteristiche tecniche.
I serbatoi, corredati del proprio "libretto matricolare", sono stati installati negli anni in conformità alle norme specifiche di prodotto, verificati prima della messa in servizio e periodicamente controllati durante la loro vita di esercizio.
L'attività di adeguamento ha lo scopo di adeguare e/o verificare la rispondenza alla Direttiva 2014/68/UE di serbatoi esistenti, di stoccaggio GPL adibiti ad uso domestico, già installati del tipo Fuori Terra ed Interrati. Tale adeguamento si rende necessario a seguito della modifica di alcuni parametri di progetto, ad esempio la temperatura, ed il cambio di destinazione d'uso.
La sussistenza di tali presupposti rende possibile l'attività sui serbatoi in conformità alla Direttiva PED. Si sottolinea che la nuova marcatura CE viene apportata solo a seguito del buon esito dei controlli eseguiti dal fabbricante.
Per una corretta analisi della valutazione di conformità di apparecchi a pressione da sottoporre a modifica si prende in considerazione la "*guida blu all'attuazione della normativa UE sui prodotti 2016*" della Commissione Europea ed il *parere condiviso del FION (Forum Italiano degli Organismi Notificati PSD/SPV) n. 327 del 02/04/2020*.

Nello specifico, in tale parere si evince che, nel caso di un'attrezzatura a pressione già costruita ed in esercizio prima dell'avvento della PED essa deve soddisfare i RES anche se, evidentemente, al momento della costruzione:

- non esistevano ancora obblighi formali previsti dai moduli della PED in merito ai procedimenti di saldatura e qualifica del personale coinvolto (saldatori e tecnici NDT);
- le normative di costruzione non erano armonizzate alla PED ma alle regolamentazioni nazionali, per cui alcuni RES potevano non essere stati considerati;
- i valori delle prove di pressione variavano secondo le normative nazionali.

Il nuovo fabbricante dovrà verificare e certificare la rispondenza ai RES della Direttiva. Anche se alcuni requisiti di sicurezza PED risulteranno soddisfatti tramite la documentazione allegata al "libretto ISPESL" a corredo dell'attrezzatura, la responsabilità della sicurezza e del soddisfacimento dei RES pertinenti all'attrezzatura ed all'insieme sarà a carico del nuovo fabbricante, che dovrà stilare la relativa dichiarazione di conformità CE e le istruzioni operative di uso e manutenzione.

Nel caso di serbatoi costruiti ante PED, poiché un'omologazione ISPESL corrisponde, per alcuni aspetti e per modalità, ad una valutazione di conformità PED di IV categoria secondo il modulo G o B+F, le considerazioni di seguito riguardano tutti i tipi di apparecchi a pressione già omologati ISPESL appartenenti a qualunque categoria PED:

a. Un apparecchio a pressione omologato ISPESL potrebbe non soddisfare tutti i RES ad esso pertinenti a seguito di modifica. Infatti, la normativa italiana previgente esigeva il soddisfacimento solo di alcuni di tali requisiti. Gli altri non considerati dovranno essere comunque valutati e soddisfatti dal fabbricante dell'insieme o dell'attrezzatura a pressione modificata;
b. L'attrezzatura deve essere identificabile mediante targa dati e punzonature e deve essere stata collaudata od omologata dall'Ente che, all'epoca della costruzione, era autorizzato dallo Stato membro per tale attività;
c. L'attrezzatura deve essere corredata dalla documentazione essenziale.

I requisiti PED contemplati dalla previgente normativa italiana possono essere considerati già soddisfatti e rispondenti alla PED se, dalla rispondenza documentale, si verificano le seguenti condizioni:

1. Per la progettazione e la costruzione dell'apparecchio omologato ISPESL siano state applicate le normative tecniche "Raccolte ISPESL" all'atto della fabbricazione in quanto è possibile renderle coerenti con la attuale normativa europea armonizzata alla PED effettuando le valutazioni aggiuntive richieste dalla UNI/PdR 55:2019.
2. Devono risultare valutati positivamente secondo PED dal fabbricante dell'insieme o dell'attrezzatura i materiali delle membrature a pressione con appropriate valutazioni particolari dei materiali.
3. Per le saldature già realizzate i procedimenti di saldatura, il personale di saldatura e quello addetto ai controlli non distruttivi devono essere qualificati. Tale qualifica

deve essere valutata ed accertata ai sensi della normativa vigente all'atto della fabbricazione. Le certificazioni sono state preventivamente approvate dall'ISPESL come organismo di controllo nell'anno di fabbricazione. Anche i controlli non distruttivi eseguiti con esito favorevole possono essere presi in considerazione in quanto valutati positivamente dagli ispettori ISPESL.

4. Per il superamento della verifica finale, eseguita dal fabbricante, l'apparecchio deve risultare ispezionato.

Per molti serbatoi esistenti spesso può risultare difficile avere la documentazione a corredo del serbatoio stesso completa in ogni sua parte, soprattutto in riferimento ai certificati 3.1 dei materiali. Anche nel caso di serbatoi con anno di costruzione molto recente si pone il problema della possibilità di adeguarlo in quanto, in ottemperanza alla Direttiva PED, l'unico documento richiesto è la Dichiarazione di Conformità CE che non richiede l'esplicitazione di informazioni sui materiali, sugli spessori e tantomeno sulle qualifiche di saldatura.

Pertanto, la possibilità di modifica dei serbatoi in acciaio saldato, nonostante la norma vigente lo consenta, sta andando sempre più verso una difficile attuazione a causa della mancanza, anche parziale, di documentazione a corredo dei serbatoi stessi.

Questo nonostante la precedente immissione sul mercato del prodotto identificato chiaramente con un univoco numero di matricola/fabbrica facente parte di un unico lotto di produzione e con la tracciabilità garantita dall"autorizzazione di immissione stessa.

Tale paradosso, chiaramente presente sui serbatoi che hanno già una lunga vita di esercizio, si accentua ancor di più sui serbatoi di nuovissima costruzione per i quali, come anticipato precedentemente è richiesta la sola Dichiarazione di Conformità, documento questo senza nessuna informazione tecnica. Si potrebbe, per assurdo, verificare il caso di un serbatoio costruito ieri ed oggi non più modificabile poiché impossibilitati ad avere un documento con le informazioni necessarie, tra l'altro, non richieste in fase di prima immissione sul mercato.

5. Conclusioni

L'obiettivo del presente elaborato è stato quello di creare una casistica di indagine accurata per identificare e catalogare i possibili problemi legati alle manutenzioni dei piccoli serbatoi di GPL destinati sia alle utenze domestiche che a quelle industriali.

I casi studio possono essere di aiuto al lavoro dei manutentori nella gestione delle verifiche periodiche di ispezioni ordinarie e straordinarie.

Con le considerazioni, invece, sulla valutazione di conformità dei serbatoi da assoggettare a modifica si è voluto mettere in risalto alcune delle problematiche esistenti o che possono insorgere anche su recipienti a pressione di ultimissima costruzione derivanti da un approccio normativo che, da un lato, in fase di immissione sul mercato richiede solo la Dichiarazione di Conformità CE ma che,

dall'altro, in fase di modifica, richiede documenti complementari che il fabbricante originario non è tenuto a trasmettere.
In un momento così delicato per le gravose situazioni ambientali del pianeta sarebbe opportuno cercare soluzioni tecniche valide per poter riutilizzare un recipiente a pressione in acciaio che dimostri di essere meritevole delle valutazioni positive di idoneità all'utilizzo.
Nell'ottica dell'economia circolare a basso impatto ambientale è da ritenersi inopportuno trasformare un recipiente in perfette condizioni di utilizzo (se adeguatamente verificate) in un rifiuto da smaltire. Tale idea oggi è ancora più valida poiché esistono nuove tecnologie e nuove sperimentazioni che possono aiutare il fabbricante ad effettuare ogni sorta di verifica ed indagine.

6. Bibliografia

[1] UNI EN 14570:2014 - Attrezzature e accessori per GPL

[2] UNI EN 7131:2014 - Impianti a GPL per uso domestico e similare non alimentati da rete di distribuzione - Progettazione, installazione e messa in servizio

[3] UNI EN 14129:2014 - Attrezzature e accessori per GPL – Valvole di sicurezza limitatrici di pressione per recipienti a pressione per GPL

[5] DM 14 maggio 2014 - Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 13 mc

[6] CPS srl Fascicolo Tecnico FT_01. Serbatoi GPL, Rev.06 - Montalto Uffugo, 202023

[7] CPS srl Manuale di uso e manutenzione. Serbatoi GPL - Montalto Uffugo, 2023

La riparazione di attrezzature a pressione con materiali compositi a distanza di undici anni dall'emanazione del Decreto-Legge 22 giugno 2012, n. 83, "Misure urgenti per la crescita del Paese". Aspetti tecnici e normativi alla luce delle riparazioni eseguite e dei risultati ottenuti

A. Falla[1], A. Blanco[1], G. Mugnieco[2], C. Percolla[3]

[1] Ved Vetroresina Engineering Developmeent
[2] Sonatrach Italia, Raffineria di Augusta
[3] Inail Uot di Catania

Abstract

Dalle prime necessità di ristabilire l'integrità strutturale, alla possibilità di ripristinare condizioni di integrità, le riparazioni in materiale composito, combinazione di soluzioni studiate per assicurare la continuità dell'esercizio senza impatto alcuno e supportate dai risultati, sono frutto della ricerca e dello sviluppo di materiali sempre più performanti.
La normativa italiana li classifica "interventi temporanei di riparazione", finalizzati a mantenere la stabilità strutturale e garantire il contenimento delle eventuali perdite per il tempo di ulteriore esercizio fino alla data di scadenza naturale della verifica periodica successiva alla temporanea riparazione. Esse sono effettuate secondo le specifiche tecniche previste ai sensi dall'articolo 3 del decreto 1° dicembre, n. 329, ed in conformità a norme tecniche internazionali riconosciute.
Molte riparazioni eseguite sono state monitorate, all'atto della rimozione, è stata ulteriormente confermata la qualità di esse, avendo non osservato decadimento alcuno, anche su riparazioni ch hanno lavorato diversi anni. Potrebbe una riparazione "definita temporanea" essere riconsiderata alla luce dei risultati osservati dopo oltre un decennio dall'emanazione del DECRETO-LEGGE 22 giugno 2012, n. 83? I risultati ottenuti, suffragati anche da autorevoli normative tecniche internazionali che arrivano a considerare una vita utile dell'intervento fino a 20 anni, portano certamente a utilmente approfondire se ci sono le condizioni per estendere, sia pure con massima cautela, la durata di una riparazione con materiali compositi.
Lo studio della presente vuole richiamare l'attenzione degli utilizzatori e degli addetti alla sorveglianza sulla possibilità di rivedere lo spazio temporale delle riparazioni oggetto della presente con l'intento di consolidarle sempre di più.

Keywords: riparazioni temporanee, materiali compositi, manutenzione, monitoraggio attrezzature

1 Norme tecniche internazionali

Le norme tecniche di riferimento sono, la ISO/24817, "*Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Composite repairs for pipework - Qualification and design, installation, testing and inspection"* e l'ASME PCC-2*, "Repair of Pressure Equipment and Piping - Part. 4."*

Gli standards internazionali sopra citati normano le riparazioni di membrature (tubazioni, serbatoi, Vessel) eseguita con materiali compositi nell'ambito dei settori petrolchimico, chimico e produzione di energia.

Le due norme, tra loro molto simili, stabiliscono quali sono le condizioni di applicabilità, le richieste progettuali, indicano come eseguire la progettazione dell'intervento, come qualificare i materiali (prove da eseguire sui materiali da utilizzare) come qualificare il personale operativo e quali sono i controlli da eseguire durante le varie fasi dalla progettazione all'applicazione e dopo aver eseguito la riparazione.

La norma divide le riparazioni in due grandi famiglie:

- Riparazione di tipo A (interventi su elementi dove non è ancora presente un foro);
- Riparazione di tipo B (interventi su elementi dove è presente un foro o lo spessore residuo sia inferiore ad 1 mm);

Le due normative differiscono in funzione della tipologia di riparazione:

La **ISO 24817** suddivide le riparazioni in tre classi secondo la seguente tabella:

ISO 24817			
Repair Class	**Typical Service**	**Design Pressure**	**Design Temperature**
Class1	Low specification duties, e.g. static head, drain, cooling medium, sea (service) water, diesel and other utility hydrocarbons	< 2 Mpa	< 40 °C
Class 2	Fire water/deluge systems	< 2 Mpa	< 100 °C
Class 3	Produced water and hydrocarbons, flammable fluid, gas systems Class 3 also covers operating conditions more onerous than described	Limited to repairs designed in compliance with this document and of a thickness equivalent to < D/12	Defined in 7.5.3

Tabella 1. Classi di tipologia d'intervento

- L'**ASME PCC-2** Part 4 – Articles, suddivide le riparazioni in due classi, così come segue:
- 4.1 - Nonmetallic Composite Repair Systems: High-Risk Applications;
- 4.2 - Nonmetallic Composite Repair Systems: Low-Risk Applications.

Entrambe le normative individuano una vita utile della riparazione fino a 20 anni.
Gli standards internazionali in funzione della classe di riparazione stabiliscono quali tests eseguire sui materiali da utilizzare nelle riparazioni.
I produttori delle materie prime (resine, tessuti in fibra di vetro e carbonio, top coat, pulitori etc.), le devono testare secondo le normative di riferimento e qualificare i test con l'ausilio degli enti certificatori.


TYPE EXAMINATION CERTIFICATE

Certificate No: TAK000011G
Revision No: 1

This is to certify:
That the Composite Repair Systems

with type designation(s)
Pipe and Tank Repair Calculation Tool version 2.0.3, Pipe and Tank Repair Calculation Tool version 2.1.3

Issued to

is found to comply with
ISO 24817:2018 "Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Composite repairs for pipework – Qualification and design, installation, testing and inspection"
ASME PCC2-2015 Part 4 – Article 4.1 "Nonmetallic Composite Repair Systems: High-Risk Applications"

Application :

Issued at Hamburg on 2018-10-15

This Certificate is valid until 2023-10-14.

for

Approval Engineer:

This Certificate is subject to terms and conditions overleaf. Any significant change in design or construction may render this Certificate invalid.
The validity date relates to the Type Examination Certificate and not to the approval of equipment/systems installed.

Form ID: Revision: 2016-12 Page 1 of 2

TYPE APPROVAL CERTIFICATE

Certificate No: TAK00000E2
Revision No: 3

This is to certify:
That the Composite Repair Systems

with type designation(s)

Issued to

is found to comply with
ISO 24817:2017 "Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Composite repairs for pipework – Qualification and design, installation, testing and inspection", Edition 2, Corrected version 2018-01

Application :
Repair of all kind of pipe work geometries like pipes, pipe-components and vessels made of carbon (manganese) steel with through wall and non-through wall defects per classes 1, 2 and 3. The maximum permissible operating temperature is limited to 130°C.

Issued at Hamburg on 2021-08-03

This Certificate is valid until 2026-08-02

for

Approval Engineer:

This Certificate is subject to terms and conditions overleaf. Any significant change in design or construction may render this Certificate invalid.
The validity date relates to the Type Approval Certificate and not to the approval of equipment/systems installed.

Form code: TA 201 Revision: 2021-03 Page 1 of 2

Figura 1. Certificati materie prime (Henkel Italia S.r.l.)

In accordo alla norma e sulla base dei risultati dei test eseguiti sui materiali, gli utilizzatori possono elaborare un software per la progettazione meccanica dell'intervento di riparazione.
L'applicazione dei prodotti per la riparazione è effettuata manualmente con il metodo "Hand lay-up", ed è difficilmente meccanizzabile; quindi, gli standards pongono particolare attenzione alle attività di posa, e di conseguenza alla qualifica del personale addetto alle riparazioni. È previsto infatti che il personale sia qualificato dal produttore dei materiali (normalmente i produttori effettuano dei corsi con test finale alla presenza degli enti certificatori); la qualifica, viene

mantenuta nel tempo se il numero di interventi positivi, nell'arco temporale definito (solitamente un anno) raggiunge un certo numero.
Le procedure di riparazione, in conformità a quanto previsto dalle norme sono abbastanza puntuali e precise; i parametri fondamentali, importanti per la riuscita della riparazione, su cui non viene ammessa deroga alcuna, sono, la preparazione superficiale del supporto e la capacità di posa del personale.
La normativa è molto restrittiva e prevede tutta una serie di check list, tra cui una relativa alla ispezione preliminare delle membrature da riparare e un'altra relativa al monitoraggio delle attività di esecuzione dell'intervento, fase per fase, fino ai controlli finali a valle della riparazione, ad ulteriore conferma della qualità raggiunta.

2 La legislazione per le temporanee riparazioni

L'utilizzatore di una qualsiasi attrezzatura o assieme a pressione, nel corso del regolare esercizio, ha l'obbligo di garantire il perfetto stato di conservazione dell'impianto nel suo complesso e quindi di ogni componente dello stesso. Di conseguenza dovrà predisporre un piano di manutenzione, ordinario e straordinario, con cui accertare e confermare il buono stato di conservazione delle attrezzature in esercizio; se ne ricorre la necessità, deve predisporre una attività di "riparazione" tale da poter ripristinare le condizioni di sicurezza originarie dell'attrezzatura e/o dell'assieme. Il legislatore ha previsto tali azioni, tant'è che nel decreto legislativo dell'1dicembre 2004 n°329, all'Art.14 specifica cosa si intende per riparazione di una attrezzatura a pressione e come bisogna agire nel caso in cui si dovesse ritenere necessario intervenire. Nello specifico l'Art.14 del D.gls 329/04 recita" *la riparazione consiste nella sostituzione di parte di un'attrezzatura a pressione oppure nella riparazione con o senza saldatura, senza variazione alcuna del progetto originario*".
L'utilizzatore, nel caso in cui ritiene necessario intervenire con una attività di riparazione su una singola attrezzatura o più parti di un impianto a pressione, deve porre fuori servizio l'impianto o parti di esso; il porre fuori servizio un impianto a pressione in molti casi comporta una serie di azioni che possono richiedere un impegno temporale notevole con fasi in cui il livello di rischio potrebbe essere elevato. Il legislatore ha quindi previsto che in certe condizioni l'utilizzatore possa intervenire anche con l'attrezzatura in esercizio; si evidenzia che il legislatore ha autorizzato una azione eccezionale solo per alcuni impianti, nello specifico per "*gli impianti a ciclo continuo, per quelli che rivestono carattere di pubblica utilità o servizio essenziale, in presenza di difetti che possono pregiudicare la continuità di esercizio di un'attrezzatura*". Per questa tipologia di impianti a giudizio e sotto la responsabilità dell'utilizzatore possono essere effettuati interventi "temporanei di riparazione" finalizzati a mantenere la stabilità strutturale dell'attrezzatura e garantire il contenimento delle eventuali perdite per il tempo di ulteriore esercizio. Questo è quanto previsto dall'Art. 36, comma 5.2 del Decreto-legge del 22 giugno 2012 n.83 con cui si modifica l'Art.57, comma 9, del decreto-legge del 9 febbraio 2012, n.5, convertito con modificazioni nella legge del 4 aprile 2012, n.35 recante "disposizioni urgenti in materia di semplificazioni

e di sviluppo". Lo stesso decreto-legge precisa che le temporanee riparazioni sono eseguibili secondo le specifiche tecniche previste nel decreto dell'1dicembre 2004 n.329 o norme tecniche internazionali riconosciute.
Per le Temporanee Riparazioni è disponibile la UNI/TS 11325-5 "Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 5; interventi temporanei sulle attrezzature a pressione" con la quale si forniscono indicazioni operative di base per gli interventi temporanei da effettuare su attrezzature a pressione appartenenti a determinate categorie di impianti sulle quali sono stati rilevati difetti che ne possono pregiudicare il funzionamento. La specifica tecnica precisa che questa tipologia di riparazione è finalizzata a mantenere la stabilità strutturale dell'attrezzatura per il tempo di ulteriore esercizio fino alla fermata successiva dell'attrezzatura o al limite temporale stabilito nell'analisi dei rischi, se inferiore. Tale specifica può trovare applicazione su tubazioni, recipienti, generatori di vapore e generatori acqua surriscaldata.
La tipologia d'intervento di temporanea riparazione, come definita nella specifica tecnica UNI/TS 11325-5, è anche presente a livello internazionale, per esempio API 570, API 579, etc. etc., in cui vengono definite le metodologie applicabili per gli interventi temporanei e/o per l'esercizio temporaneo in presenza di difetti.

3 Perché riparare con i compositi

I materiali compositi negli ultimi decenni sono sempre più presenti nella vita quotidiana di ognuno di noi, in quanto:

- Hanno eccellente resistenza alla corrosione;
- Sono particolarmente leggeri (rapportati all'acciaio);
- Hanno resistenze meccaniche almeno paragonabili a quelle dei tradizionali materiali da costruzione;
- Si prestano ad essere sagomati facilmente senza particolari sforzi e difficoltà per assumere forme complesse e particolari.

Negli ultimi 50 anni i materiali compositi hanno sempre più sostituito quelli tradizionali in diversi ambiti delle costruzioni. Oggi è impensabile immaginare componenti di automobili in metallo tanto si è abituati a non vederli più da tempo.
Nei settori, petrolifero, della raffinazione e dell'energia, dove la corrosione e la ricerca di materiali alternativi con pesi contenuti è stata da sempre perseguita, questi materiali sono presenti ormai da circa 60 anni, prendendo il posto di tanti altri materiali tradizionali: tubazioni, serbatoi, grigliati, profilati, supporti di materiale composito sono ormai di uso comune.



Figura 2. Strutture in materiale composito (Archivio V.E.D. s.r.l.)

Negli ultimi 15 anni tali materiali sono stati utilizzati anche nelle riparazioni e nelle ristrutturazioni, sia in ambito industriale che civile. Infatti, le caratteristiche di leggerezza, resistenza alla corrosione, alta capacità di resistenza agli sforzi e l'adattabilità a forme anche complesse ed irregolari fanno sì che essi si prestano ad essere impiegati per l'esecuzione di riparazioni in opera.



Figura 3. Esempi di rinforzo strutturale (Archivio V.E.D. s.r.l.)

La riparazione di una pipeline o di un serbatoio, effettuata con materiali compositi, è progettata in funzione delle caratteristiche della linea o del serbatoio, garantisce l'alta resistenza meccanica, non appesantisce la struttura, magari già indebolita da anni di esposizione agli agenti chimici ed atmosferici presenti all'interno di un sito industriale. Una membratura riparata con i compositi risulta protetta anche dall'attacco di eventuale corrosione esterna. Grazie alla lavorabilità, non vi sono limiti dimensionali nell'esecuzione della riparazione. Per effettuare una riparazione con i compositi non serve ricorrere ad attrezzature che potrebbero risultare essere pericolose da impiegare in ambienti a rischio incendio e/o esplosione (zone Atex). L'intervento

normalmente è abbastanza veloce e in pochi giorni si può passare dall'analisi del problema alla progettazione dell'intervento e all'esecuzione della riparazione.



Figura 4. Rinforzi strutturali (Archivio V.E.D. s.r.l.)

Tutto ciò porta ad asserire che la riparazione con i compositi è veloce in quanto si passa rapidamente dalla ispezione alla progettazione e quindi all'intervento di riparazione e subito viene ripristinata l'integrità strutturale della membratura permettendo l'esercizio dell'apparecchiatura in condizioni di sicurezza.
Le limitazioni di un intervento di riparazione con i materiali compositi possono essere la temperatura di parete in fase di riparazione e/o quella di esercizio o l'aggressività di alcuni fluidi alla resina, tutte valutazioni che vengono fatte in fase di progettazione. In fase di progettazione si valutano anche la tipologia di corrosione e la velocità della stessa.

4 Analisi di alcune riparazioni

Gli utilizzatori di impianti industriali chiedono, interventi veloci, eseguiti in condizioni di sicurezza per gli addetti, che si continui ad esercire l'apparecchiatura senza rischi di qualsiasi natura e tipo, che si eviti lo sversamento di prodotti pericolosi nell'ambiente, che l'intervento operato consenta di esercire l'impianto fino alla prossima manutenzione programmata.
Per fare ciò viene eseguita una analisi dei rischi sia durante la riparazione che a seguito della riparazione stessa.
Si verifica la compatibilità dei materiali con i fluidi circolanti e con l'ambiente circostante, si controllano gli spazi d'intervento, la fattibilità della preparazione superficiale e si stabilisce come proseguire l'intervento. La fase dell'applicazione molto importante viene eseguita con personale specializzato che ha tutte le qualifiche previste dalle normative. Tutto ciò comporta che le riparazioni con materiali compositi risultano effettivamente durevoli nel tempo. Vi sono riparazioni anche molto importanti che hanno diversi anni di esercizio senza aver subito nessun ammaloramento.



Figura 5. Esempio di rinforzo su una colonna (Archivio V.E.D. s.r.l.)

Altro aspetto a cui prestare molta attenzione è l'uso di attrezzature che garantiscano la corretta preparazione superficiale ai fini di riuscire ad eseguire un profilo di ancoraggio idoneo, senza arrecare ulteriore danno alla membratura da riparare. Infatti, è necessario minimizzare il rischio di peggiorare i difetti a seguito della preparazione superficiale idonea alla riparazione. Il campo di applicazione di tali interventi si sposta anche verso la prevenzione; infatti, eseguendo dei controlli preventivi si può intervenire prima che nell'elemento compaia una perdita, e agire preventivamente evitando danni, economici, a persone, cose ed ambientali. Le attività preventive danno sempre maggiore garanzia.

5 Rimozione di una riparazione

Nel rispetto di quanto stabilito dalla normativa sulle temporanee riparazioni, quando arriva la data di scadenza naturale della verifica periodica successiva alla temporanea riparazione, la committente deve rimuovere la temporanea riparazione. Quindi incarica una ditta per la rimozione, normalmente la stessa ditta che l'ha prima eseguita ed i motivi sono abbastanza ovvii. Successivamente alla rimozione la stessa committente incarica un'altra ditta per eseguire la riparazione "definitiva" dell'apparecchiatura (classica riparazione con sostituzione delle parti ammalorate e ripristino alle condizioni originarie, di solito con saldatura).
Riportiamo di seguito alcune considerazioni su una riparazione eseguita, rimossa dopo circa un anno di esercizio. Per la rimozione, così come per la riparazione è stata preparata una procedura; in pratica è stato prodotto un progetto di demolizione per la valutazione attenta necessaria ad evitare di arrecare danni alle parti integre nell'intento di rimuovere il composito della riparazione
Quando si esegue una riparazione riveste fondamentale importanza la fase progettuale, andando ad evidenziare tutti i rischi e tutte le soluzioni ingegneristiche possibili; In questo caso la membratura era sotto-spessore per erosione causata dal fluido interno e quindi, avendo stimato la velocità di avanzamento di essa è stato ritenuto necessario intervenire in quanto l'ulteriore riduzione dello spessore non avrebbe più assicurato la resistenza alla pressione. Anche in previsione di una eventuale aumento di tale velocità, per contrastare gli effetti di erosione di parti della membratura (difetti passanti), è stata applicata sul mantello una piastra metallica

(sacrificale) che si estendeva oltre la zona erosa, il composito aveva il compito di mantenere tale piastra aderente alla membratura residua e nel contempo assicurare la resistenza meccanica richiesta dalla pressione interna all'apparecchiatura nonché dalle azioni meccaniche dovute al peso proprio della colonna e delle altre forze su di essa agenti; ripristino strutturale vero e proprio.



Figura 6. Schede di attività di rinforzi strutturali (Archivio V.E.D. s.r.l.)

.



Figura 7. Mantello della colonna riparata (DN 1000) (Archivio V.E.D. s.r.l.)

La colonna, dopo la riparazione ha continuato ad essere esercita per poco più di un anno e nel corso di esso è stato monitorato, per quanto possibile, lo stato del composito con l'intento di individuare l'insorgere di eventuali indicazioni, sia pure minime, che potessero essere utili a fare considerazioni di sorta, ma nulla di tutto questo, nessuna evidenza… Essendo stata raggiunta la data della verifica periodica, ci è stato affidato l'incarico di rimuovere la riparazione temporanea per poi procedere alla riparazione definitiva.
L'attività di rimozione del composito e di quant'altro applicato è stata molto impegnativa ed ha comportando l'impiego di personale e mezzi maggiore di quanto era stato necessario nella fase di riparazione. Da conoscitori delle difficoltà e complessità a cui si sarebbe andati incontro, abbiamo progettato l'intervento di rimozione emettendo una dettagliata procedura. È stato necessario praticare delle incisioni sulla superficie del composito che potessero essere punto di partenza ed innesco per la rimozione del materiale con mezzi meccanici.



Figura 8. Rimozione del rinforzo strutturale (Archivio V.E.D. s.r.l.)

Da una analisi degli elementi rimossi, gli stessi risultavano molto compatti, privi di delaminazioni e difetti di qualsiasi tipo.



Figura 9. Parte di rinforzo rimosso (Archivio V.E.D. s.r.l.)

Ripristinare il tutto, o quasi, come era ante-temporanea riparazione, ha richiesto diversi giorni di lavoro. Persone più o meno esperte hanno osservato la demolizione del composito e ciascuno, osservando le difficoltà di rimozione legate alla resistenza dei materiali, magari senza averne i titoli, ha espresso opinione negativa sul fatto che la riparazione veniva così eliminata.
Per noi applicatori e poi demolitori, la cosa non ci ha sorpreso affatto in quanto abbiamo eseguito e monitoriamo costantemente altre riparazioni con compositi simile a questa in trattazione riconducibili. Aggiungiamo che per questo caso esposto abbiamo proceduto ad ulteriori analisi e approfondimenti sui materiali rimossi riscontrando perfetto stato di conservazione, nessuna delaminazione e mantenimento delle caratteristiche meccaniche.



Figura 10. Apparecchiatura senza rinforzo (Archivio V.E.D. s.r.l.)

6 Conclusioni

Dalle esperienze maturate possiamo concludere la presente trattazione asserendo che queste tipologie d'intervento, risolvono tutta una serie di problematiche degli impianti industriali migliorando sia le condizioni di sicurezza che le condizioni ambientali.
Il rinforzo strutturale infatti consente di poter intervenire su una membratura in fase preventiva, cioè non appena si viene a conoscenza del decadimento della stessa, (sia essa per corrosione esterna o interna, per erosione, o per altri motivi ancora), la stessa può essere riparata riportandola alle condizioni iniziali, evitando la possibilità di innescare perdite e/o situazioni di pericolo, in modo da potere esercire lo stesso in sicurezza e senza danni ambientali. In caso di situazioni particolari con membrature troppo ammalorate (con presenze di fuoriuscite di prodotti), questo intervento può essere comunque di ausilio, in quanto si riesce ad intervenire in tempi rapidi, contenendo eventuali problematiche, consentendo il prosieguo dell'esercizio dell'impianto.
Le riparazioni come previsto anche dalle normative internazionali (vita utile fino a 20 anni) potrebbero essere considerate definitive in quanto riportano l'apparecchiatura

alle condizioni iniziali di resistenza. Vi sono interventi che sono stati eseguiti da oltre 7 anni e sono ancora in esercizio senza dare segni di decadimento.
Negli ultimi anni, questa tipologia di intervento è sempre più richiesta da chi esercisce questa tipologia d'impianto in quanto, non è invasiva, è di veloce esecuzione, non va a gravare sulle strutture, si presta ad essere applicata anche su forme complesse ed estese. Intervenire in fase preventiva, ossia prima della comparsa di difetti passanti, rende più agevole e veloce l'intervento, previene l'immissione di fluidi nell'ambiente le cui conseguenze potrebbero anche essere molto pericolose e annullano il rischio di collasso totale dell'apparecchiatura.
Uno degli aspetti su cui focalizzare l'attenzione è proprio la durata della riparazione; vi sono infatti delle riparazioni eseguite su apparecchiature che sono in esercizio da diversi anni, oltre sei, e da noi monitorate ed osservate e non manifestano segnali d'invecchiamento.
Il dover rimuovere una riparazione da una apparecchiatura sembra essere in alcuni casi una forzatura che comporta uno spreco di denaro tempo e problematiche ambientali.

7 Bibliografia

[1] ISO 24817:2017(E) Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Composite repairs for pipework – Qualification and design, installation, testing and inspection.

Riparazione e rimessa in esercizio del generatore di vapore a tubi d'acqua Macchi appartenente al Gruppo 3 della Centrale A2A Lamarmora di Brescia

F. Rossetti[1], N. Palumbo[1], A. Serra[2], P. Tria[3]

[1] Inail – Uot di Brescia
[2] ATS Brescia
[3] A2A Calore & Servizi Srl

Abstract

Questa memoria espone i lavori di sostituzione e installazione di una nuova valvola di sicurezza saldata, posta a protezione della tubazione del vapore surriscaldato finale (SH) del generatore di vapore Macchi al servizio della Centrale Lamarmora di A2A di Brescia. La sostituzione della valvola ha seguito l'iter previsto dal d.m. 1 dicembre 2004, n. 329. Nello specifico, l'utente ha provveduto a richiedere il benestare alla riparazione all'INAIL UOT di Brescia. Successivamente la riparazione è stata verificata attraverso l'approvazione del fascicolo tecnico di riparazione e l'esame visivo dimensionale del giunto saldato. L'iter procedurale si è concluso con il rilascio del consenso al riavvio dell'esercizio dell'attrezzatura riparata da parte dell'ATS Brescia quale soggetto incaricato delle verifiche periodiche. Il lavoro evidenzia le problematiche legate alla sostituzione della valvola di sicurezza sul surriscaldatore che per questi geneneratori di vapore è saldata. Inoltre, è fondamentale accertare l'area della sezione di spinta della valvola che in molti casi non è riportata nel certificato rilasciato dal costruttore.

Keywords: riparazione, generatore di vapore a tubi d'acqua, valvola di sicurezza, riavvio.

1. Introduzione

Si descrivono nel dettaglio le attività svolte per l'esecuzione degli interventi di riparazione di un generatore di vapore a tubi d'acqua consistenti nella sostituzione e installazione di una nuova valvola di sicurezza saldata, posta a protezione della tubazione del vapore surriscaldato finale (SH) del generatore di vapore Macchi al servizio della Centrale Lamarmora di A2A di Brescia, nonché la procedura di rimessa in esercizio del generatore di vapore stesso e la prova di funzionamento della nuova valvola installata con la verifica della taratura effettuata in esercizio mediante martinetto idraulico.

2. Descrizione delle operazioni eseguite per la riparazione e la rimessa in esercizio

Di seguito si elencano le fasi principali dell'iter di riparazione e rimessa in esercizio

1. Richiesta di esame proposta di riparazione all'INAIL UOT di Brescia;
2. Rilascio del parere positivo di riparazione da parte dell'INAIL UOT di Brescia;
3. Rimozione della valvola esistente tramite sbullonamento lato uscita e taglio a freddo lato ingresso;
4. Valutazione dei dati di targa e dei materiali di costruzione della nuova valvola;
5. Preparazione del cianfrino DN 6" spessore 36,5 mm, come indicato nella relativa WPS (lato tubo). Il cianfrino realizzato ha le stesse dimensioni come da disegno rilasciato dal costruttore della nuova valvola da installare;
6. Esecuzione dei controlli non distruttivi sui cianfrini tramite liquidi penetranti;
7. Esecuzione della saldatura DN 6" (diametro esterno) spessore 36,5 mm, utilizzando i processi TIG + SMAW, secondo quanto indicato nella relativa WPS (Welding Procedure Specification);
8. Esecuzione dei liquidi penetranti a circa metà saldatura e controllo ad ultrasuoni con registrazione (PHASED ARRAY) a saldatura terminata;
9. Trattamento termico localizzato (ciclo 680°C x 60 minuti, salita/discesa 100 °C/h), come indicato nella tabella di saldatura;
10. Esecuzione del test di durezza;
11. Esecuzione ultrasuoni con registrazione (PHASED ARRAY) a distanza di 48 ore dal raffreddamento del trattamento termico;
12. Verifica di riparazione;
13. Rimessa in esercizio.

3. Valutazione tecnica di riparazione

Con riferimento all'art. 14 del d.m. 329/04 [1] e alla lettera circolare ISPESL 14/05 [2], si è valutato che:

- l'intervento viene eseguito su attrezzatura in esercizio dal 1987 e in regola con le verifiche periodiche;
- il materiale del componente nuovo è metallurgicamente uguale a quello da sostiutire;
- i procedimenti di saldatura e i trttamenti termici sono equivalenti agli originari;
- le norme tecniche da utilizzare per la riparazione sono le Raccolte VSG, M ed S [3], [4] e [5].

Dalle valutazioni sopra riportate, si evince che l'intervento, in base alla circ. 14/05 [2], ricade nella fattispecie di "sostituzione senza modifiche di membrature secondarie saldate".

3.1 Caratteristiche del generatore di vapore e della valvola di sicurezza

Il generatore di vapore sottoposto a procedura di riparazione è dotato di surriscaldatore, economizzatore e tubazioni di collegamento, i cui dati di progetto sono riportati nella seguente Tabella 1.

CARATTERISTICHE TECNICHE DELLA ATTREZZATURA A PRESSIONE											
CAMERA				Press. ammiss. MAX bar	Temper. ammiss. MIN °C	MAX	FLUIDO Natura	Stato	Gruppo	VOL. (litri) max	DN (-) max
1	X	Corpo Principale		124	///	328	acqua	V	2	92000	
2	X	Surriscaldatore	Interno Tubi	124	///	520 max	acqua	V	2	42500	
~~3~~		~~Risurriscaldatore~~	~~Esterno Tubi~~								
4	X	Economizzatore	Camicia	124	///	330,2	acqua	V	2	3750	
5	X	Tubazioni		124		520 max	acqua	V	2	2870	

Tabella 1. Configurazione e dati tecnici del generatore di vapore

Il surriscaldatore sul quale è stato effettuato l'intervento è l'unico presente e non è intercettabile. La raccolta E [6] prevede che le valvole di sicurezza, poste a protezione dello stesso surriscaldatore, abbiano una portata di scarico non inferiore al 25% della produzione del generatore di vapore al carico massimo continuo. Lo stesso generatore di vapore deve essere provvisto nella zona del vapore saturo (corpo cilindrico) di valvole di sicurezza che devono scaricare almeno il 65% della produzione del generatore al carico massimo continuo. Comunque la somma delle due portate non deve essere essere inferiore al 100% della produzione in parola.
La valvola di sicurezza del surriscaldatore deve essere idonea a scaricare vapore surriscaldato, avere una pressione di taratura inferiore alla pressione massima ammissibile e comunque inferiore a quella della valvola di sicurezza installata nella zona del vapore saturo. I materiali di costruzione della valvola devono idonei a lavorare con quelle condizioni di pressione e temperatura, integri dal punto di vista metallurgico e corredati di certificati di collaudo da parte del fabbricante di tipo 3.1.

3.2 Personale e procedimenti di saldatura

L'esecuzione delle saldature è stata effettuata da saldatori qualificati da Organismo Notificato, secondo la norma UNI EN ISO 9606-1 [7]. Le qualifiche dei procedimenti di saldatura (WPQR) sono approvate secondo la norma UNI EN ISO 15614-1 [8]. L'esecuzione, dei controlli non distruttivi è stata anch'essa effettuata da personale qualificato secondo la norma UNI EN ISO 9712 [9].
In sede di verifica sono stati acquisiti:

1. gli attestati di abilitazione del personale coinvolto nella saldatura e nei controlli non distruttivi;

2. il welding book con le schede WPS – WPQR
3. i report dei controlli non distruttivi
4. il diagramma del trattamento termico dopo saldatura

Le figure che seguono rappresentano il dettaglio del cianfrino (Figura 1), la sua realizzazione e i controlli con liquidi penetranti (Figura 2), la saldatura ultimata (Figura 3).

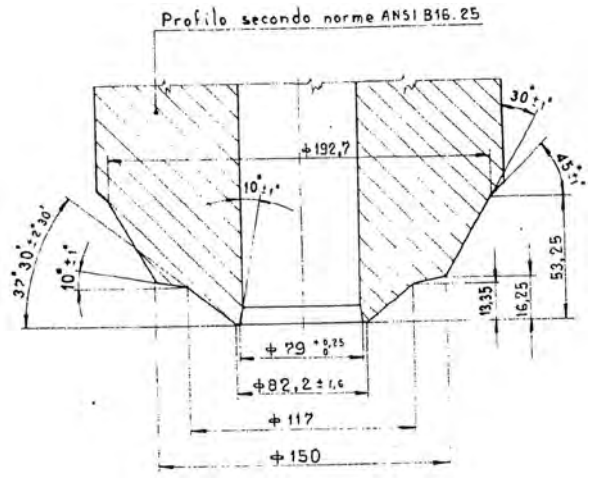


Figura 1. Finitura del bocchello della valvola di sicurezza da installare



Figura 2. Realizzazione del cianfrino e sua verifica ai liquidi penetranti



Figura 3. Saldatura della nuova valvola

4. Test delle valvole di sicurezza in situ in condizioni di pieno funzionamento

Per descrivere la procedura di test utilizzata si è fatto riferimento alle seguenti definizioni:

Valvola di sicurezza: valvola che automaticamente, senza l'assistenza di un'energia diversa da quella del fluido in questione, scarica, al raggiungimento della pressione di taratura, una quantità di fluido al fine di prevenire il superamento di una pressione di sicurezza predeterminata o di progetto dell'attrezzatura sulla quale è installata la valvola e che è progettata per richiudersi e impedire un ulteriore flusso di fluido dopo che sono state ripristinate le condizioni di esercizio a pressione normale. [11]

Martinetto: Dispositivo atto a esercitare, sullo stelo della valvola, una forza, controllabile e determinabile, avente direzione uguale e verso opposto a quelli della forza esercitata dalla molla della valvola. *Nota:I martinetti generalmente sono costituiti da un elemento che genera la forza di sollevamento dello stelo delle valvole di sicurezza e da una strumentazione che misura la stessa forza o la pressione che la determina. L'elemento che genera la forza di sollevamento è generalmente del tipo pneumatico o idraulico.* [12]

*Test della valvola di sicurezza in condizioni operative:*procedura che permette di verificare la pressione di taratura della valvola di sicurezza senza prevederne lo smontaggio dall'attrezzatura su cui è installata la stessa valvola (Figura 4).

I vantaggi riscontrati nella procedura utilizzata sono i seguenti:

- il metodo di prova può essere utilizzato per tutte le marche di valvole di sicurezza;
- è possibile eseguire il collaudo e la regolazione della valvola anche sotto la pressione di esercizio e quindi senza l'arresto dell'impianto;
- il metodo di prova può essere utilizzato per tutte le dimensioni nominali;
- non è necessario rimuovere/rimontare o trasportare la valvola;
- vi è risparmio sui costi;

- non si rende necessaria alcuna interruzione/variazione nella marcia dell'impianto;
- è l'unico metodo per testare le valvole di sicurezza saldate;
- al termine del test può essere rilasciato un certificato di collaudo per ogni valvola;
- si tratta di sistemi di controllo approvati dai maggiori enti di certificazione.

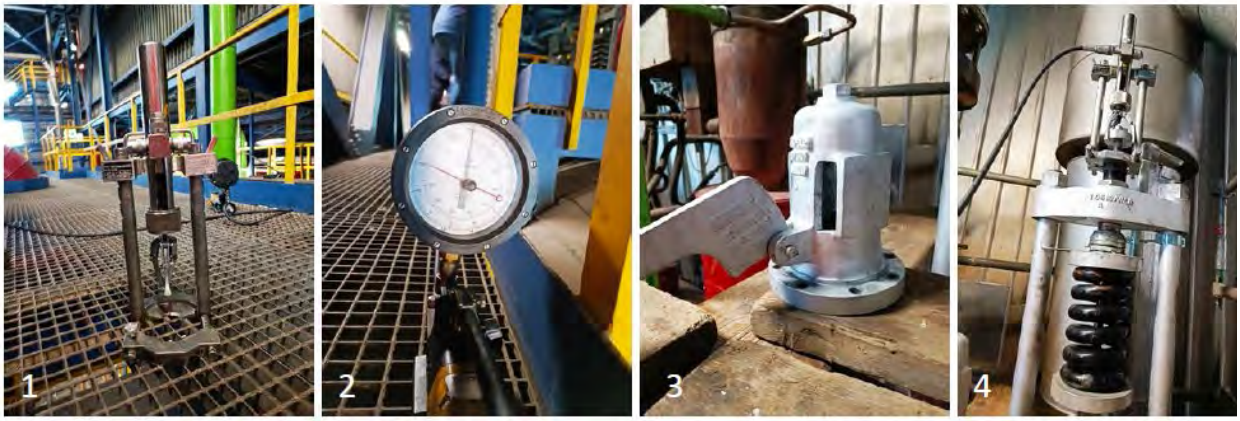


Figura 4. 1) Martinetto idraulico, 2) Pompa manuale ad olio, 3) Cappuccio della valvola, 4. Posizionamento del martinetto sullo stelo della valvola

4.1. Principio fisico alla base del metodo e le formule operative utilizzate

La prova consiste nell'esercitare sullo stello della valvola una forza, controllabile e misurabile, avente direzione uguale e verso opposto a quelli della forza esercitata dalla molla della valvola. La pressione di taratura della valvola di sicurezza e l'accuratezza della prova si determinano mediante le seguenti formule:

$$Pt = P_A + Pe$$

$$P_A = F_S / (A_S \times 10)$$

$$\Delta p = Pt - Pe$$

$$e\% = [1 - (d_i / d_m)^2] \times 100$$

dove:

Pt = Pressione di taratura della valvola di sicurezza;

P_A = Pressione aggiuntiva;

Pe = Pressione di esercizio del generatore al momento della prova a monte della valvola;

F_S = Forza di sollevamento esercitata dal martinetto sullo stelo della valvola tolto il peso proprio del martinetto (massa della parte mobile del martinetto x accelerazione di gravità);

A_S = Area di spinta della valvola di sicurezza;

Δp = Differenza tra la pressione di taratura della valvola di sicurezza e la pressione di esercizio dell'impianto a monte della stessa;

e% = scostamento relativo percentuale delle aree della valvola di sicurezza;

d_i = Diametro interno della sede della valvola di sicurezza;

d_m = Diametro medio (media aritmetica) della sede della valvola di sicurezza.

4.2. Esempio pratico

Verifica di funzionamento della valvola di sicurezza a protezione della tubazione vapore surriscaldato (SH) del generatore di vapore in oggetto.

Dati della valvola

- *Ingresso*: butt weld diametro interno 3"; diametro esterno 6"
- *Uscita*: flangia 6" ANSI 300 RF
- *Capacità di scarico*: 88407 kg/h di vapore a 520 °C
- *Stato fisico del vapore*: surriscaldato
- *Pressione di taratura a freddo del fabbricante*: 110,5 bar
- *Campo di regolazione della pressione differenziale di prova a freddo*: 108,7/114,4 bar
- *Materiali*: corpo ASTM A 217 WC6
- *Tipo orifizio*: L
- *Diametro orifizio*: 52 mm
- *Area orifizio*: 2120 mm^2
- *Diametro interno*: 64,65 mm
- *Diametro medio:* 67,35 mm
- *Area di spinta*: 35,62 cm^2

È particolarmente importante ricordare che l'area di spinta è un dato che in genere non è disponibile nella documentazione della valvola di sicurezza ed è abbastanza difficile ottenerla da fonti diverse dal costruttore. È pertanto necessaria un'attestazione dalla quale risulti in maniera chiara ed inequivocabile la superficie dell'area di spinta.

Dati di esercizio del generatore

La pressione e la temperatura di esercizio del GV sono state verificate pari rispettivamente a 86 bar e 500 °C rilevandone il valore mediante lettura del manomentro e del termometro a servizio del GV stesso.

Dati del martinetto

Nel certificato denominato *"Verbale di taratura dispositivo per la verifica della taratura delle valvole di sicurezza in esercizio"* rilasciato dall'INAIL è indicato il periodo di validità della taratura dello strumento. Il martinetto è equipaggiato con strumenti di misura correlati ai valori delle grandezze da rilevare. Il manometro è conforme alla UNI EN 837-1 con classe di accuratezza 0,6 o migliore.

Modalità di esecuzione della prova di taratura

La verifica della taratura viene effettuata con il generatore in esercizio: si toglie il cappuccio della valvola, dopodiché si pone il martinetto nella parte superiore della valvola e si manda in pressione il martinetto con una pompa manuale ad olio. L'azione

del martinetto determina l'annullamento della forza della molla antagonista, e l'inizio dell'apertura della valvola di sicurezza. Durante l'operazione di verifica della taratura mediante martinetto, la forza di sollevamento deve avere una velocità di incremento sufficientemente lenta da consentire la lettura dei valori istantanei.
In seguito si legge il valore di Forza (misurata in newton [N]) che ha prodotto l'intervento della valvola di sicurezza. Conoscendo il valore della superficie di sfogo (sezione di spinta) si risale alla pressione massima d'intervento (Figura 5).

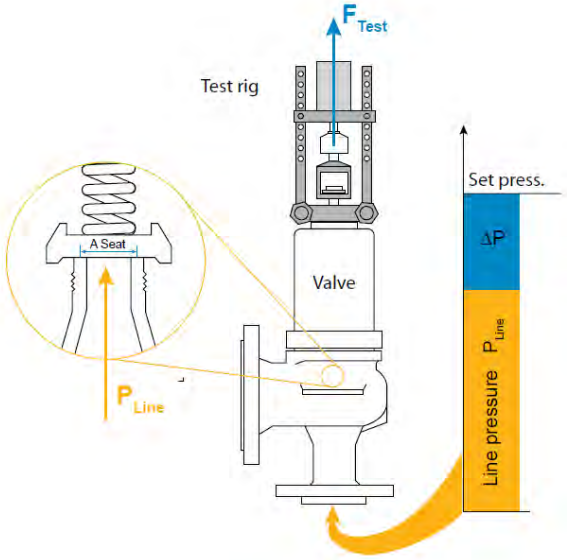


Figura 5. Schematizzazione della prova

La verifica strumentale effettuata in campo ha fornito i seguenti dati seguenti dati:

$$F_S = 8726\ kN$$
$$A_S = 35{,}62\ cm^2$$
$$P_A = 24{,}49\ bar$$

con i quali è stata calcolata la pressione di taratura

$$Pt = 86 + 24{,}49 = 110{,}49\ bar$$

che conferma quella preimpostata dal fabbricante della valvola.

Nel caso di valvole di sicurezza con connessione di ingresso saldata come, per esempio, sui surriscaldatori o sui risurriscaldatori, il valore massimo di $\Delta p/Pt$ % può eccedere i valori riportati nella Tabella 2 fermo restando il valore massimo del *35%*. Il valore di incertezza percentuale [*i%*] non deve superare il *±2%*. L'incertezza della misura va calcolata secondo la seguente formula:

$$i\% = [e\% \times (\Delta p/Pt\ \%)] / 100$$

In base al valore di scostamento relativo percentuale delle aree della valvola di sicurezza [*e%*], nella Tabella 2 è rilevabile il valore del rapporto massimo percentuale tra Δp e la pressione di taratura della valvola di sicurezza.

e%	*Valore massimo di Δp/Pt %*
≤ 4,40	*35,00*
4,40 < e% ≤ 5,00	*32,50*
5,00 < e% ≤ 5,50	*30,00*
5,50 < e% ≤ 6,25	*27,50*
6,25 < e% ≤ 7,00	*25,00*
7,00 < e% ≤ 8,00	*22,50*
8,00 < e% ≤ 9,00	*20,00*
9,00 < e% ≤ 10,50	*17,50*
10,50 < e% ≤ 12,50	*15,00*
12,50 < e% ≤ 15,00	*12,50*
15,00 < e% ≤ 18,50	*10,00*

Tabella 2. Valori massimi di Δp/pt % (i valori in tabella limitano a ±2% l'incertezza, correlata alla reale area di spinta della valvola, sul valore calcolato della pressione di taratura)

Nel caso di valvole di sicurezza con connessione di ingresso saldata, aventi diametro interno della sede $d_i > 50$ *mm*, il valore massimo di *Δp/Pt %* può essere mantenuto al 20% anche per i valori di *e% > 9.*
In particolare, nel caso specifico, sostituendo i valori numerici rispettivamente nelle formule (4) e (5) si ottiene:

$$e\% = [1 - (64{,}65/67{,}35)^2] \times 100 = 7{,}86 \quad \text{e} \quad \Delta p/Pt\ \% = 24{,}49/110{,}49 = 22{,}16$$

con cui si ricava:

$$i\% = (7{,}86 \times 22{,}16)/100 = \pm 1.74\%$$

L'esito della prova di verifica taratura risulta pertanto accettabile. L'incertezza calcolata è infatti inferiore al limite *±2%* correlato alla reale area di spinta della valvola sul valore calcolato della pressione di taratura.

5. Conclusioni

Le riparazioni delle attrezzature in pressione devono essere preventivamente autorizzate e verificate, dopo l'esecuzione dei lavori, da parte dell'INAIL competente per territorio e rimesse in esercizio a seguito del consenso o verifica del soggetto incaricato delle verifiche periodiche pubblico o privato.
E' stata esaminata, nel dettaglio, la prova in esercizio di una valvola di sicurezza installata tramite saldatura al surriscaldatore di un generatore di vapore e si sono le attrezzature da utilizzare e i dati basilari da ricavare nella verifica di taratura. È

necessario utilizzare strumenti tarati ed efficienti e avere i dati completi e corretti della valvola oggetto della verifica.

6. Bibliografia

[1] Decreto Ministeriale n° 329 del 01/12/2004 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000”, n. 93, G.U. Serie Generale n. 22 del 28/01/2005 S.O. n. 10

[2] Lettera Circolare ISPESL n. 14/05 – “Oggetto: Applicazione del D.M. 329/04 di attuazione dell'Art 19 del D. Lgs. 93/2000 – Chiarimenti e precisazioni sulle Riparazioni”, Prot. 3878 del 06/12/2005

[3] Raccolta VSG – ISPESL “Specificazioni Tecniche Applicative del Decreto Ministeriale 21 Novembre 1972 per la Verifica della Stabilità dei Generatori di Vapore d’Acqua” rev. 1995 ed. 1999

[4] Raccolta S – ISPESL “Specificazioni Tecniche Applicative del Decreto Ministeriale 21 Novembre 1972 per l’Impiego della Saldatura nella Costruzione e Riparazione degli Apparecchi e Sistemi in Pressione” rev. 1995 ed. 1999.

[5] Raccolta M – ISPESL “Specificazioni Tecniche Applicative del Decreto Ministeriale 21 Novembre 1972 riguardanti l’Impiego dei Materiali nella Costruzione e Riparazione degli Apparecchi e Sistemi in Pressione” rev. 1995 ed. 1999.

[6] Raccolta E – ANCC – “Specificazioni Tecniche Applicative del Decreto Ministeriale 21 Maggio 1972” ed. 1972

[7] UNI EN ISO 9606-1: 2017 “Prove di qualificazione dei saldatori - Saldatura per fusione - Parte 1: Acciaio” Inserire la corrispondenza nel testo e il titolo completo della norma

[8] UNI EN ISO 15614-1: 2019 “Specifica e qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici - Prove di qualificazione della procedura di saldatura - Parte 1: Saldatura ad arco e a gas degli acciai e saldatura ad arco del nichel e sue leghe” Inserire la corrispondenza nel testo e il titolo completo della norma

[9] UNI EN ISO 9712: 2022 Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttiveInserire la corrispondenza nel testo e il titolo completo della norma

[10] Lettera Circolare ISPESL n. 65 del 06 agosto 1992 – “Oggetto: Dispositivi per verifiche di taratura di valvole di sicurezza”

[11] UNI EN ISO 4126-1: 2019 “Dispositivi di sicurezza contro le sovrapressioni – Parte 1: Valvole di sicurezza”

[12] UNI 11513: 2013 “ Verifica in esecizio della taratura delle valvole di sicurezza mediante martinetti”

Evoluzione microstrutturale degli acciai grado 91 e 92. Lo studio dei precipitati come strumento per valutarne l'invecchiamento e la resistenza allo scorrimento viscoso

A. Antonini[1], A. Alvino[1], A. Tonti[1], S. Matera[3], O. Tassa[3]

[1] Inail - Dit
[3] RINA Consulting - CSM S.p.A. Roma

Abstract

Gli acciai ASTM A213/A335 Gr 91 e 92 sono acciai legati al 9% di Cr, progettati per impieghi a temperature e pressioni elevate (100000 ore a 540°C-600°C e 240-260 bar rispettivamente) nell'industria petrolchimica e negli impianti di produzione di energia. Le notevoli proprietà meccaniche e la resistenza allo scorrimento viscoso di questi materiali sono strettamente legate alla loro peculiare microstruttura, ottenuta mediante opportuni trattamenti termici: una matrice di martensite rinvenuta in cui sono presenti carburi di Cr e Mn di tipo $M_{23}C_6$ (a bordo dei grani, subgrani e lath) e carbonitruri di Nb e V (finemente dispersi nella matrice stessa).
Nel corso della vita in servizio la microstruttura di questi materiali subisce delle trasformazioni a carico delle fasi presenti, che si riflettono in un generale peggioramento delle proprietà meccaniche e soprattutto della resistenza allo scorrimento viscoso. Sia la temperatura che il carico applicato sono fattori che influenzano queste trasformazioni, spesso promuovendone l'insorgenza, come pure accelerando i processi di degrado microstrutturale. Una correlazione tra il comportamento a creep e la microstruttura di questi acciai non è tuttavia semplice, poiché molteplici e non ancora del tutto noti sono i meccanismi con cui il danno si manifesta e si propaga.

Keywords: danneggiamento, scorrimento viscoso, microstruttura, acciai alto cromo.

1. Introduzione

Gli acciai ASTM A213/A335, grado 91 e grado 92 sono stati sviluppati con l'obiettivo di garantire un servizio di lunga durata a temperature e pressioni elevate, grazie all'elevata resistenza al creep ed alla corrosione. La loro struttura è basata su una matrice di martensite rinvenuta, rafforzata per precipitazione di carburi $M_{23}C_6$ (M = Cr, Fe, Mo, W) e carbonitruri MX (M = V, Nb, X = C, N) finemente dispersi, e per indurimento in soluzione, attraverso elementi come Mo o Mo/W [1,2]. L'elevata resistenza alla corrosione è garantita invece dalla presenza di un alto contenuto di Cr (8-10%).

Nelle condizioni operative in cui questi materiali trovano impiego, alta temperatura e alta pressione, la forma di danneggiamento che viene riscontrata più frequentemente è il creep [3-8], che si manifesta in conseguenza di tutta una serie di cambiamenti a carico della microstruttura, quali l'aggregazione dei carburi $M_{23}C_6$, la nucleazione e coalescenza di fasi intermetalliche quali fasi di Laves Fe_2Mo; $Fe_2(W,Mo)$ e fase Z (Cr,Nb,V)N [9], il recupero (o recovery) della struttura martensitica ed infine la nucleazione, crescita e coalescenza di cavità [10].
Questa memoria è il risultato di un lavoro effettuato nell'ambito di un progetto avviato dall'INAIL in collaborazione con RINA Consulting-Centro Sviluppo Materiali S.p.a. (CSM) denominato "Steel Grades 91 and 92 Microstructure and Precipitate Evolution Atlas". Questo progetto è finalizzato alla realizzazione di un atlante di riferimento in cui verranno riportate le variazioni microstrutturali osservate negli acciai di grado 91 e 92 sia nel materiale base che nei giunti saldati, in condizioni sperimentali riproducenti quelle di servizio. L'obiettivo è individuare una relazione tra parametri microstrutturali, degrado del materiale e vita spesa, così da ottenere informazioni più affidabili per la stima della vita residua. Il progetto si propone di identificare le relazioni tra la temperatura, tempo e stress e l'evoluzione della microstruttura; sono stati eseguiti test di invecchiamento in forno e prove di creep a temperatura costante e per tempi prestabiliti con interruzioni per l'esecuzione delle indagini microstrutturali, monitorando il recovery della martensite, l'andamento della durezza, l'evoluzione dei precipitati in termini di morfologia e dimensioni, la crescita delle cavità ecc. Le attività sperimentali sono state organizzate in sei sotto-progetti, incentrati su invecchiamento a temperatura costante in forno, creep test isotermico su materiale base Gr91 e Gr92 e creep test isotermico su HAZ di Gr91 e Gr92.
Ad integrazione dei risultati ottenuti con il progetto Atlante sono state effettuate prove di creep con la metodica dello Small Punch Creep Test [11-12], eseguite su alcuni provini di dimensioni opportune ricavati da materiale precedentemente utilizzato nel progetto. Anche i risultati di tali prove sono riportati nella presente memoria.

2. Materiale e metodi

Sono stati utilizzati tubi in acciaio di grado 91 (ASTM A213) e grado 92 (ASTM A 335), in condizioni normalizzate (N) e rinvenute (T) e indicate P91 T0, P92 T0 (T0 per tempo zero) e campioni provenienti da impianto P91 Ex, P92 Ex (Ex per esercito), campioni di laboratorio, di invecchiamento isotermico T 91 Aged, prodotti in ambito del precedente progetto Atlas [13]. In Tab.1 e in Tab.2 sono riportate la composizione chimica degli acciai e degli standard di riferimento e i dettagli del prodotto. Nella Tab.3 sono riportate le condizioni di esposizione e di invecchiamento. I giunti saldati testa-testa dei materiali P91 T0 e P92 T0 sono stati fabbricati secondo specifica della procedura di saldatura (WPS) e controllati come richiesto dagli standard di fabbricazione.

Grades 91 and 92		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	Nb	V	Al	Ni	N	B
Grade 91 ASTM A 335/A	min	0.08	0.20	0.30			8.00	0.85		0.06	0.18			0.03	
	max	0.12	0.50	0.60	0.020	0.010	9.50	1.05		0.10	0.25	0.04	0.40	0.07	
P91 T_0	676780	0.09	0.31	0.45	0.016	0.003	8.35	0.88	<0.5	0.07	0.19	0.005	0.14	0.051	0.0002
P91 EX	285821	0.092	0.38	0.43	0.012	0.002	8.88	0.93		0.07	0.24	0.014	0.28	0.047	
T91 Aged		0.114	0.25	0.32	0.005	0.005	8.39	0.87		0.07	0.21	0.05	0.17	0.037	
Grade 92 ASTM A 335/A	min	0.07		0.30			8.50	0.30	1.5	0.04	0.15			0.03	0.001
	max	0.13	0.50	0.60	0.020	0.010	9.50	0.60	2.0	0.09	0.25	0.01	0.40	0.07	0.006
P92 T_0	Q68093	0.10	0.33	0.48	0.009	0.006	8.92	0.34	1.6	0.07	0.18	0.005	0.12	0.053	0.0041
P92 EX	P5092	0.10	0.36	0.54	0.012	0.008	8.64	0.40	1.7	0.052	0.19	0.006	0.16	0.039	0.0034

Tabella 1. Composizione chimica nominale delle leghe in esame e analisi composizionale dei materiali oggetto di studio.

Grades 91 and 92	Material Source		Product Details		Final stage heat treatment			
					Normalization (N)		Tempering (T)	
	Material Manufacturer	Cast heat	form	dimension mm	N °C	holding time minutes	T °C	holding time minutes
P91 T_0	TENARIS	676780	Pipe	OD 219 x WT 25.4	1070	*	780	*
P91 EX	BENTELER	285821	Pipe	OD 88.9 x WT 17.5	1060	20*	775	60***
T91 Aged			Tube	OD 38.1 x WT 4.6	1070	*	780	*
P92 T_0	WYMAN GORDON	Q68093	Pipe	OD 333.5x WT 23.0	1068	60**	779	150*
P92 EX	WYMAN GORDON	P5092	Pipe	OD 307 x WT 70	1060	20*	770	60

cooling pattern: *air cooling, ** Fan, *** still air

Tabella 2. Stato di fornitura dei materiali esaminati

3. Test di invecchiamento e prove di creep

I test di invecchiamento sono stati programmati a tre diverse temperature (550°C-600°C-650°C) in forni con monitoraggio continuo della temperatura, per tre campioni T91 Aged, gia sottoposti a precedente invecchiamento isotermo di circa 46000 ore, in un progetto precedente (vedi Tab.3). Il tempo di invecchiamento programmato è 25000 ore tale a raggiungere una durata totale di 71000 ore, con interruzioni programmate a 4000, 8000, 16000 ore per le investigazioni sulla microstruttura.

Grades 91 and 92	Exposure Material	Exposure conditions				
T91 Aged	Laboratory aged samples	Identification sample code	ageing temperature °C			ageing time hours
		M53	550			46,334
		M54	600			46,000
		M55	650			46,334
P91 EX	ENEL Torrevaldaliga power plant TN4 Line VP - draining line	Data set	Exposure Temperature °C	Pressure Barg	Stress MPa	exposure time hours
		design values	612	268		
		exercise	604	252	54.0	74,000
P92 EX	ENEL Torrevaldaliga power plant TN4 Line SX(CV)	design values	612	267	42.6	
		exercise	604	252	40.2	74,000

Tabella 3. Condizioni sperimentali nei test di invecchiamento e condizioni di esercizio dei materiali prelevati ex-service.

I creep test dei campioni P91 T0 e P92 T0 sono stati programmati sia per il materiale base che per le HAZ dei giunti saldati a temperature comprese tra 550°C e 650°C con carico applicato costante, secondo UNI EN ISO 204:2009, adottando le pratiche di prova specificata dalle linee guida ECCC. Due differenti geometrie di provini lisci sono state utilizzate: una per il materiale base e l'altra per i giunti saldati, secondo lo standard ISO 204:2018. Le sollecitazioni applicate, ricavate dai data sheet di ECCC, sono state scelte per tempi di rottura programmati tra 10000 e 100000 ore, gli stessi carichi sono stati utilizzati con i provini cross-weld.
L'analisi dei precipitati e della microstruttura è stata effettuata con microscopio elettronico SEM dotato di EDS, sono state utilizzate immagini SEM-SE, SEM-BSE per l'analisi automatica AIA e caratterizzazione delle cavità da creep. La valutazione delle dimensioni, della morfologia, della composizione chimica, della cristallografia dei precipitati è stata fatta con il TEM su repliche estrattive.
Le prove di Small Punch Creep Test sono state eseguite con un macchinario "Sputt500" (Fig. 1) progettato e costruito in accordo con quanto previsto da CWA 15627:2007 e aggiornato con lo standard EN 10371:2021.

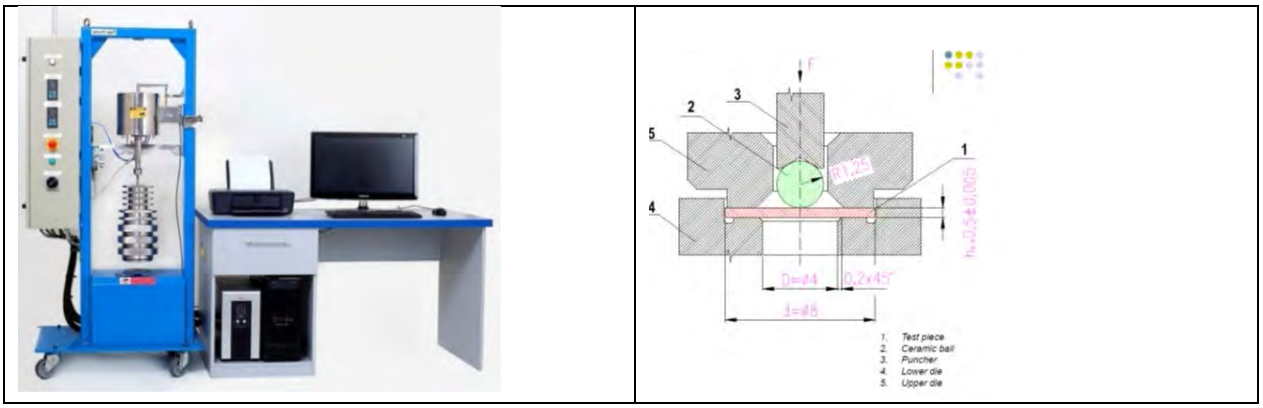
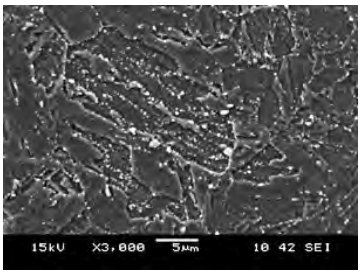


Figura 1. Insieme della macchina Sputt500 e particolare dello schema di funzionamento dello small punch test.

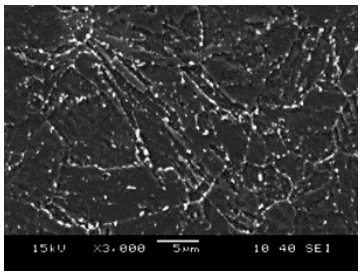
4. Risultati e discussione

Caratterizzazione campioni invecchiati termicamente

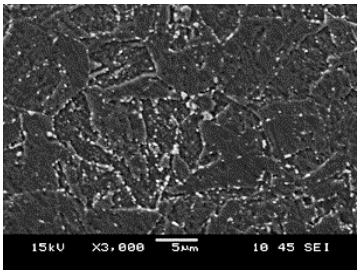
I campioni T91 Aged sottoposti ad invecchiamento isotermico a differenti temperature sono stato osservati mediante microscopio elettronico e le microstrutture e lo stato dei precipitati sono stati messi a confronto nella Fig. 2. All'aumentare del tempo di invecchiamento è stata osservata una leggerissima diminuzione della durezza, che da 220HV_{10} osservata nella condizione iniziale, normalizzata e rinvenuta, dopo le circa 71.000 ore di ricottura a 650°C, 600°C e 550°C scende a 210HV_{10}, 213HV_{10} e 217HV_{10}.



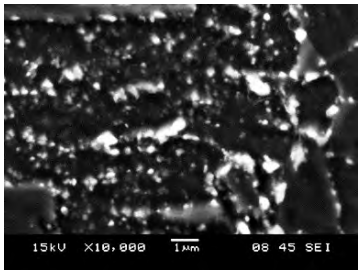
M53 550°C 71,674 h



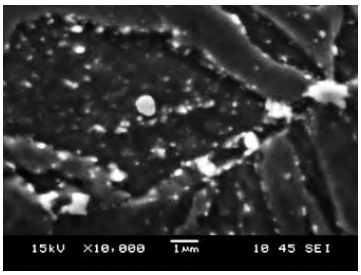
M54 600°C 71,340 h



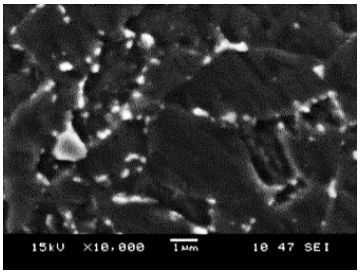
M55 650°C 71,674



M53 550°C 71,674 h



M54 600°C 71,340 h



M55 650°C 71,674 h

Cr wt%	Fe wt%	Mo wt%	precipitate type and position	Cr wt%	Fe wt%	Mo wt%	precipitate type and position
29.1	66.4	4.5	$M_{23}C_6$ GB	9.1	70.4	20.5	Laves LB
8.0	51.8	40.2	Laves GB	13.8	84.7	1.5	$M_{23}C_6$ WL
17.3	80.5	2.2	$M_{23}C_6$ LB	20.0	78.1	1.9	$M_{23}C_6$ LB

GB Grain Boundary, LB Lath Boundary, WL Within Lath

Figura 2. Microstruttura di campioni T91 Aged osservati con SEM-SE (Mag 3000X) e panoramica dello stato dei precipitati rilevato con DEM-SE-EDS (Mag 10.000X). Tipica composizione EDS dei carburi $M_{23}C_6$ e delle fasi intermetalliche di Laves.

L'acciaio P91, come si evince anche in Fig. 2 è caratterizzato da microstruttura di martensite rinvenuta, in cui si distinguono gli aghetti entro i bordi grano austenitici e i bordi dei sub-grano poligonali ferritici, all'interno degli aghetti di martensite recuperata. I bordi di grano austenitico e i bordi di sub-grano di ferrite poligonale sono circondati in modo continuo da carburi $M_{23}C_6$ ricchi di Cr, Fe, Mo e particelle di fase di Laves ricche di Fe e Mo. La comparsa della Fase di Laves è osservata dopo 3.000 ore di invecchiamento a 550°C e 600°C e dopo 10.000 ore di invecchiamento a 650°C [13]. In Fig. 3 è riportata una distribuzione della dimensione delle particelle di fase di Laves osservate, in termini di frazione areale occupata F_A, determinata mediante SEM-BSE-AIA.
Le immagini al TEM, riportate in Fig. 4, delle repliche estrattive mostrano lo stato di precipitazione dei campioni invecchiati; un esempio dei dati di composizione delle particelle, rappresentati in termini di diagrammi ternari, è mostrato in Fig. 5: sono presenti diversi tipi di precipitati, $M_{23}C_6$, MX, fase di Laves; la fase Z è stata osservata solo a 650°C con una frequenza inferiore al 14%.

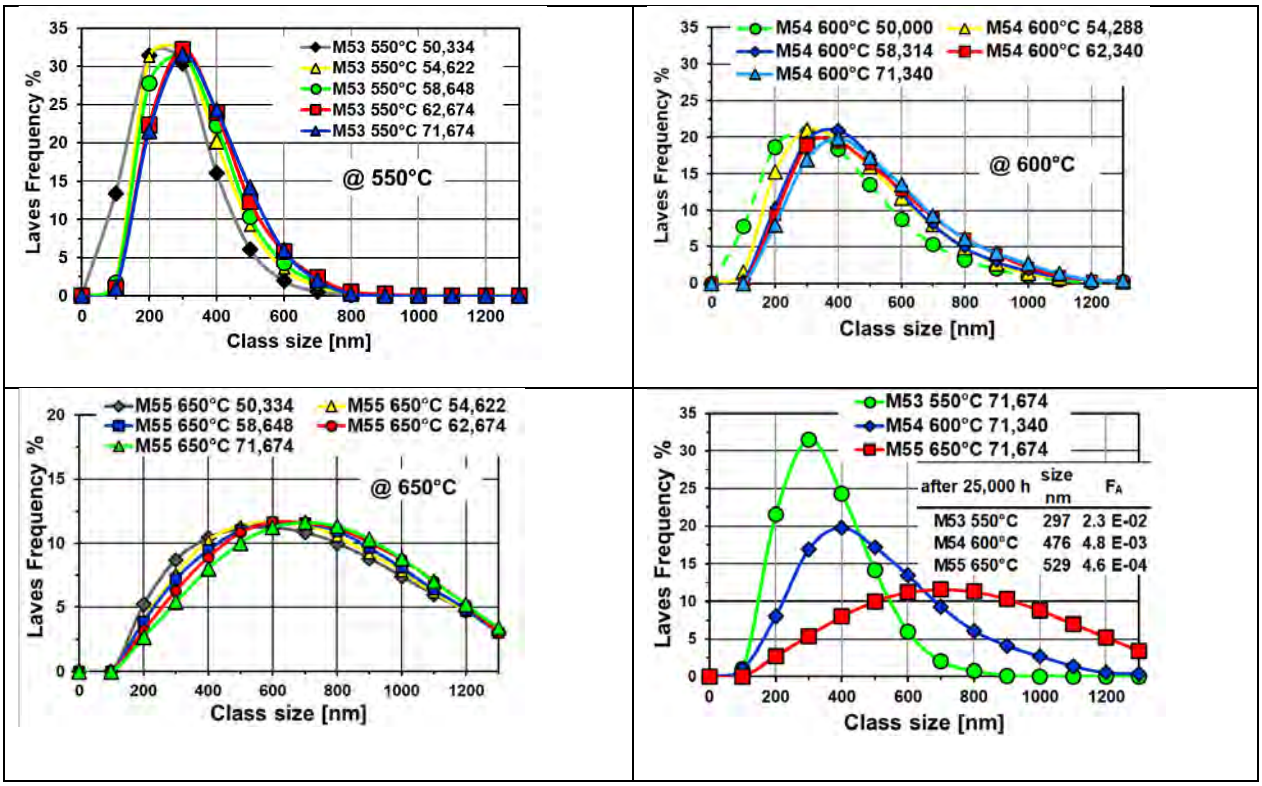
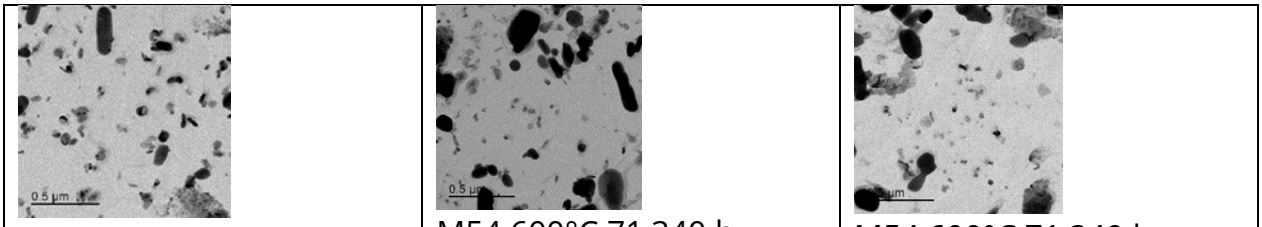
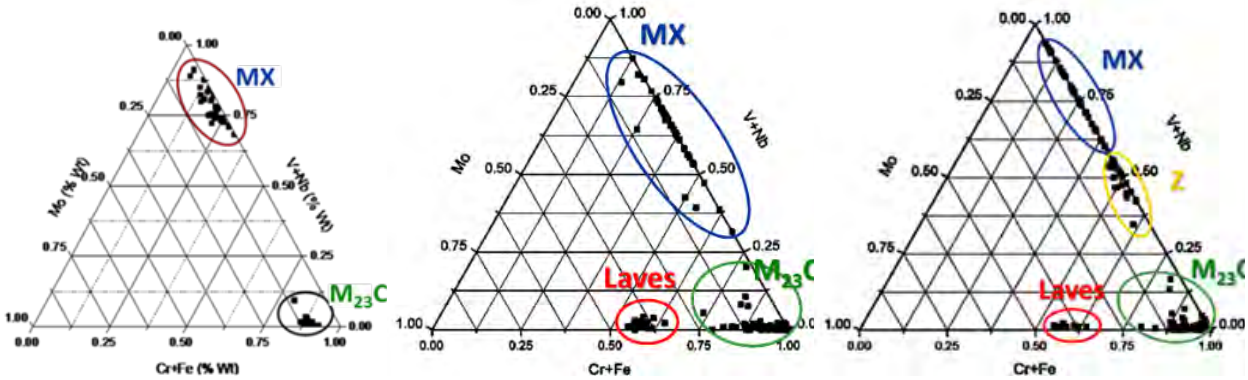


Figura 3. Confronto della distribuzione della dimensione delle particelle della fase di Laves in campioni Grado 91 invecchiati termicamente a 550°C, 600°C e 650°C per diversi tempi, valutati mediante SEM-BSE AIA.



M53 550°C 71,674 h | M54 600°C 71,340 h | M54 600°C 71,340 h

Figura 4. Immagini TEM dei precipitati dei campioni di Grado 91 invecchiati per 71.000 ore.



Grade 91 As treated(N+T) | Grade 91 M54 600°C 71,340 h | Grade 91 M55 650°C 71,340 h

Figura 5. Diagrammi ternari dei precipitati analizzati mediante TEM in campioni di Grado 91 invecchiati termicamente per un tempo di circa 71.000 ore.

Dai grafici riportati in Fig. 6 e Fig. 7 è possibile effettuare una valutazione dell'andamento delle dimensioni medie delle particelle e della frazione areale FA in funzione del tempo di invecchiamento e della temperatura, per ogni tipologia delle particelle osservate, combinando i dati ottenuti mediante TEM-EDS e SEM-EDS, quelli ricavati dal precedente progetto [13] e dati provenienti da precedenti lavori [14-15].

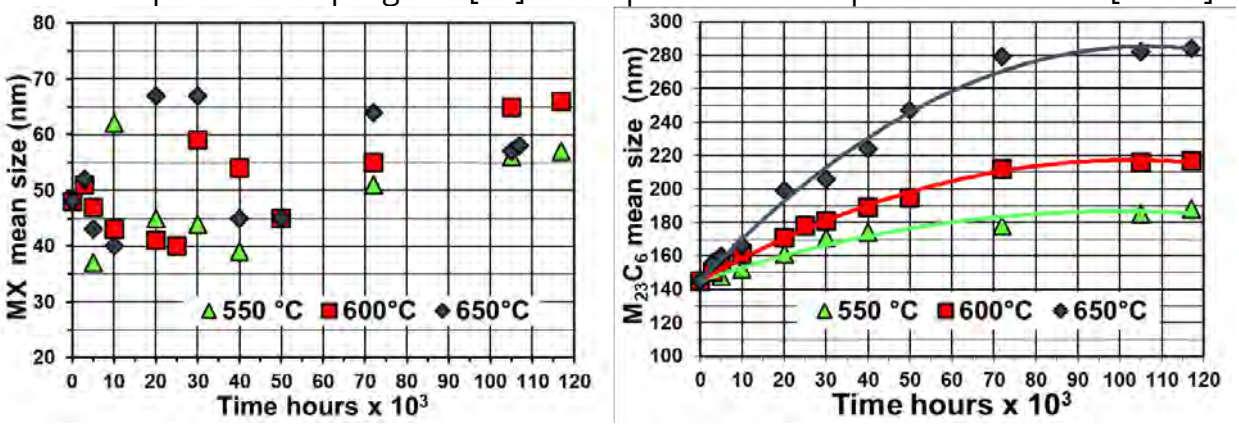


Figura 6. Dimensione media delle particelle di diversi tipi di precipitati rispetto al tempo di invecchiamento per diverse temperature: a) MX valutata da TEM, b) $M_{23}C_6$ valutata da TEM.

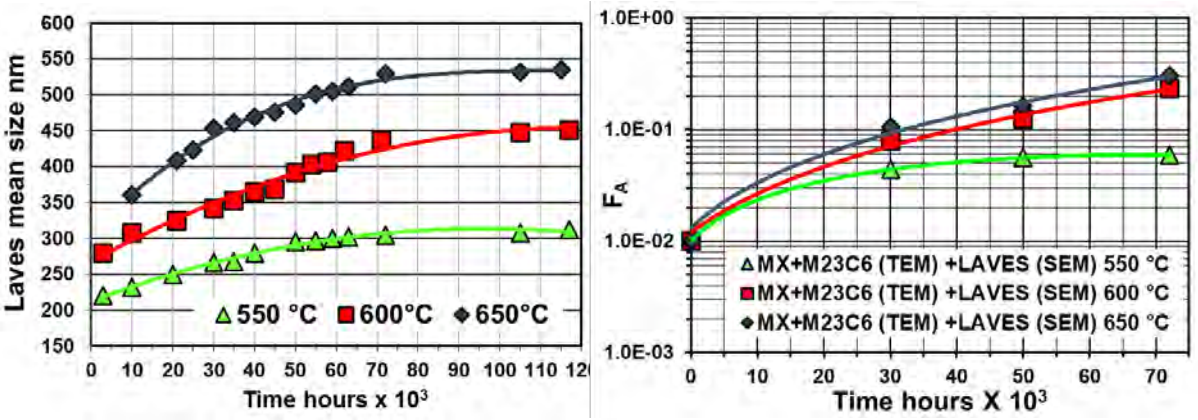


Figura 7. Dimensione media delle particelle di diversi tipi di precipitati rispetto al tempo di invecchiamento per diverse temperature: a) fase di lave valutata da SEM-EDS, b) Frazione areal F_A della popolazione complessiva di precipitati composta da MX e $M_{23}C_6$ (valutata da TEM-EDS) e fase Laves (valutata da SEM-BSE-AIA).

Le informazioni ottenute dall'osservazione della microstruttura dei campioni sottoposti a invecchiamento isotermico possono essere riassunte come segue:

- Presenza di sottograni di ferrite poligonale con elevata quantità di carburi $M_{23}C_6$ sia grossolani che fini ad evidenziare rinvenimento di martensite in termini di progressione del processo di recupero degli aghetti, soprattutto dopo 71.000 ore (Fig.2);
- Stabilità delle dimensioni dei carbonitruri MX all'interno di un ristretto intervallo da 40nm a 70nm (Fig.6a);

- Presenza sia di carburi $M_{23}C_6$ grossolani (Fig 6b) che di fasi di Laves grossolane (Fig. 7a), le cui dimensioni aumentano all'aumentare della temperatura di invecchiamento impiegata.

Caratterizzazione campioni P91 Eserciti e P92 Eserciti

È stata investigata la microstruttura dei campioni eserciti provenienti da impianto, P91 Ex (604°C, 54 MPa 74.000 ore), P92 Ex (604°C 40 MPa 74.000 ore) e posta a confronto con quella osservata in campioni conservati nelle condizioni di produzione (as-receveid). Nei campioni eserciti si osserva una diminuzione della durezza: si passa da 220 HV_{10} di P91 T0 a 217 HV_{10} di P91 Ex e da 210 HV_{10} di P92 T0 a 206 HV_{10} di P92 Ex. Dall'analisi dei precipitati osservati sulle repliche estrattive ricavate dai campioni eserciti e dai campioni come ricevuti (T0), la principale differenza che si evince, come si può osservare nei relativi diagrammi ternari dei precipitati riportati in Fig. 8, risulta nella presenza di fase di Laves nei campioni eserciti. Solo una quantità molto bassa di fase Z è stata rilevata nel campione P91 Ex con una frequenza di circa 2%.

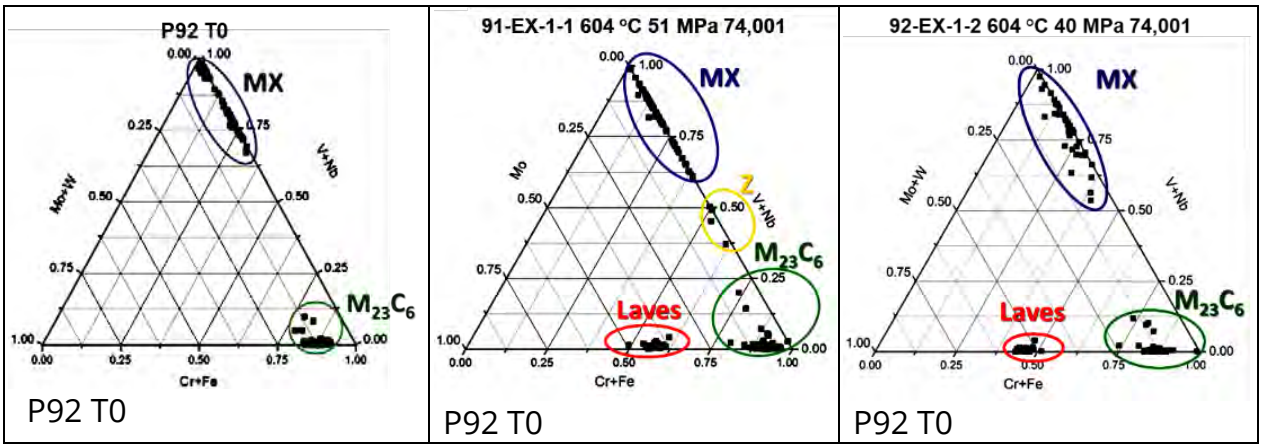


Figura 8. Diagrammi ternari dei precipitati analizzati mediante TEM-EDS presenti nei campioni P91 T_0 e P92 eserciti.

È stato quindi effettuato un confronto della distribuzione dimensionale delle fasi di Laves (Fig. 9a) e delle dimensioni medie dei vari precipitati presenti (MX, $M_{23}C_6$ e Laves) misurati mediante TEM-EDS e della frazione areale F_A occupata (Fig. 9b), che risulta essere un accertamento quantitativo della distribuzione della dimensione, misurata mediante SEM-AIA.

L'analisi microstrutturale di entrambi gli acciai eserciti ha evidenziato uno stadio avanzato del processo di recovery della martensite rinvenuta e un'evoluzione dello stato dei precipitati presenti, con coalescenza dei carburi $M_{23}C_6$ e formazione/aggregazione delle fasi di Laves.

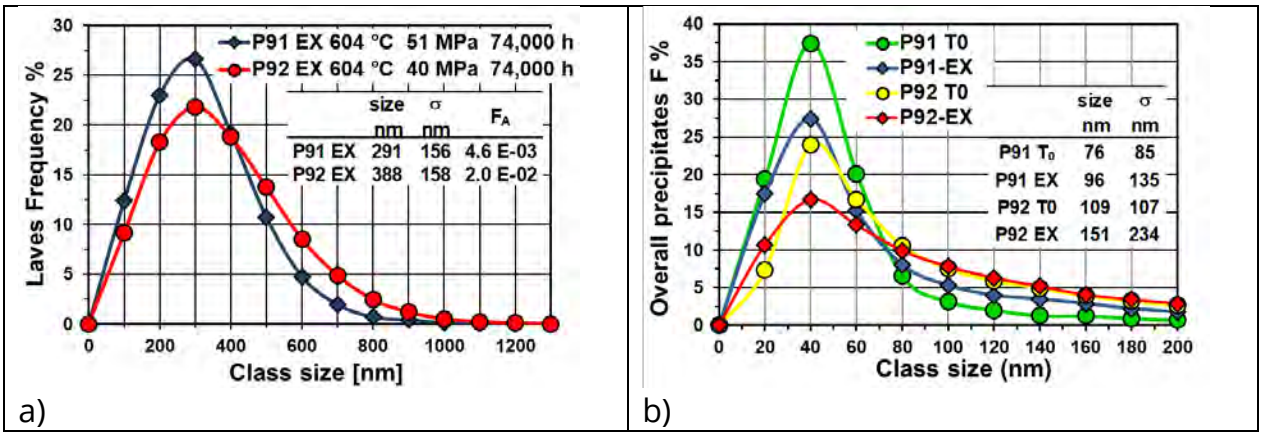
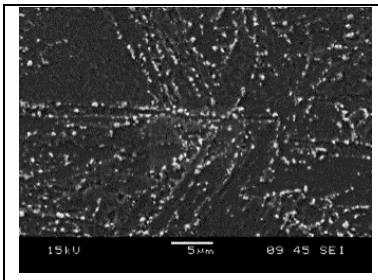


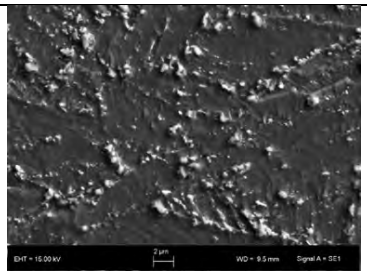
Figura 9. a) Confronto della distribuzione dimensionale delle fasi di Laves; b) popolazione complessiva dei precipitati.

Caratterizzazione campioni P92 (MB) da creep test

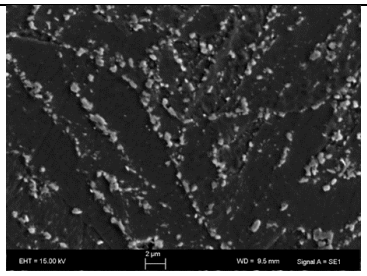
Campioni di acciaio Grado 92 sono stati sottoposti a prove di creep alla temperatura di 600°c e 650°C per una durata a medio termine di circa 20.000 ore. Sui provini che sono giunti a rottura (localizzata sempre nel tratto utile) sono state eseguite analisi metallografiche e di durezza. Riguardo quest'ultima, nel tratto utile è apprezzabilmente più bassa rispetto ai valori as received e raggiunge un valore minimo nell'area vicino alla frattura, dove si passa rispettivamente da 192 HV_{10} a 175 HV_{10}, indicando un certo grado di rammollimento. L'indagine microstrutturale ha evidenziato una microstruttura di martensite rinvenuta con aghetti all'interno di grani austenitici originari, unitamente a sottograni ferritici poligonali sui bordi degli aghetti di martensite (Fig. 10). I precipitati riscontrati dall'osservazione mediante TEM delle repliche di estrazione, mostrate in Fig. 11, sono rappresentati da carburi $M_{23}C_6$, carbonitruri MX e fase di Laves; come si evince dai diagrammi ternari dei precipitati mostrati in Fig. 12, è stata rilevata una quantità piuttosto limitata anche di fase Z con una frequenza di circa il 2-8% e solo dopo le prove di creep a 620°C.



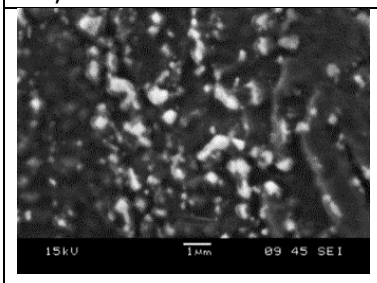
P92 600°C 125 MPa 21,887 h



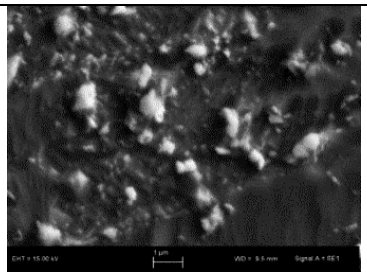
P92 620°C 114 MPa 13,187 h



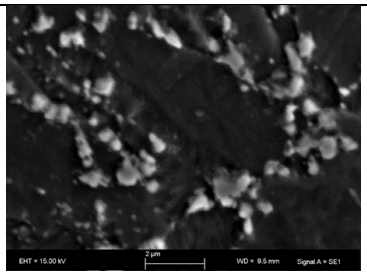
P92 620°C 102 MPa 20,570 h



P92 600°C 125 MPa 21,887 h

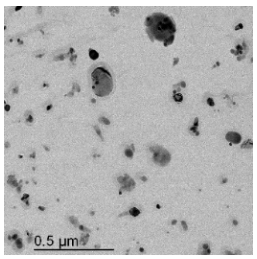


P92-620°C 114 MPa 13,187 h

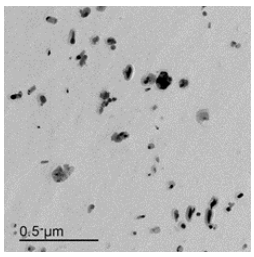


P92 620°C 102 MPa 20,570 h

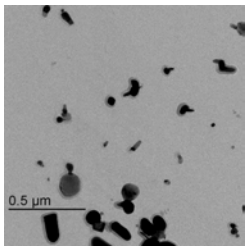
Figura 10. Microstrutture osservate da SEM-SE (Mag 3.000X) e panoramica dello stato dei precipitati (Mag 10.000X) da SEM-SE-EDS. Provini Provenienti da creep test rotti su P92 (MB).



600°C 125 MPa 21,887 h



92-620°C 114 MPa 13,187 h



92- 620°C 102 MPa 20,570 h

Figura 11. Immagini TEM sulla replica estrattiva presa nel tratto utile dei creep test di P92 (MB).

Sono state osservate, mediante SEM, un numero molto ridotto di microcavità, con dimensioni comprese tra 0,2 e 2 µm, presenti solo nel tratto utile in prossimità della zona fratturata. Alcuni esempi di cavità situate vicino la zona fratturata sono riportati in Fig. 13. Le microcavità di scorrimento non si trovano solo sui bordi del grano austenitico e sui bordi degli aghetti, ma spesso sono osservabili vicino a inclusioni non metalliche tipo ossidi di manganese (MnO), allumina (Al_2O_3), ossidi di titanio (TiO_2) e solfuro di manganese (MnS). Le inclusioni non metalliche possono agire come siti "trappola" per gli elementi in traccia, che in questi punti si accumulano dando

origine a luoghi di discontinuità, aumentando la suscettibilità alla formazione e crescita di cavità [16-17]. I precipitati al contorno delle cavità e all'interno delle stesse sono principalmente $M_{23}C_6$ e fase di Laves.

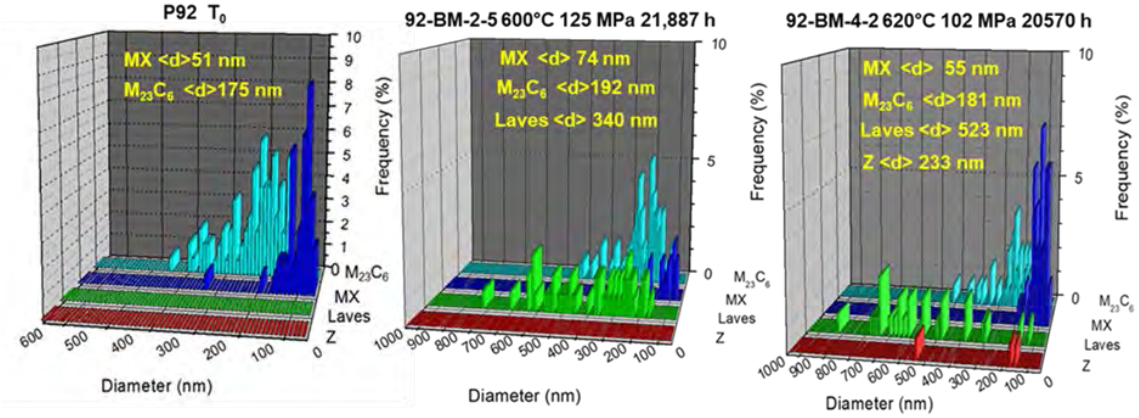
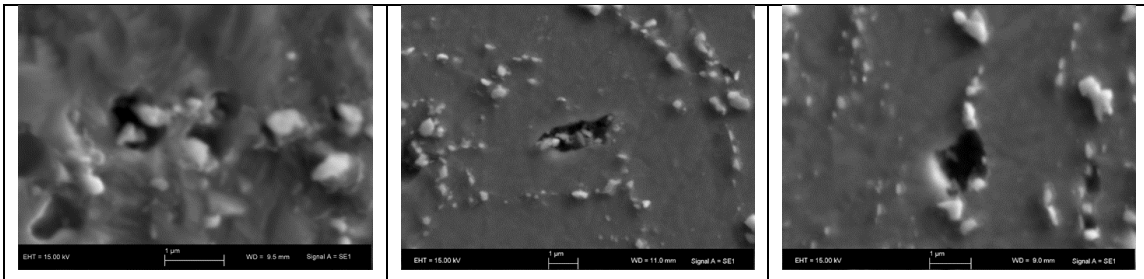


Figura 12. Confronto tra la distribuzione dimensionale la dimensione media dei precipitati osservati mediante TEM-EDS.



P92 620°C 114 MPa 13,187 h	P92 620°C 102 MPa 20,570 h	P92 620°C 102 MPa 20,570 h

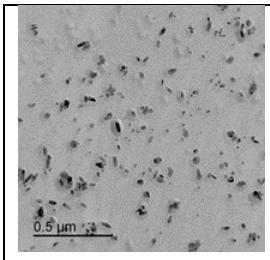
Figura 13. SEM-SE immagini di microcavità presenti nel tratto utili vicino alla frattura.

Caratterizzazione campioni P92 e P91 (HAZ) da creep test su giunti saldati

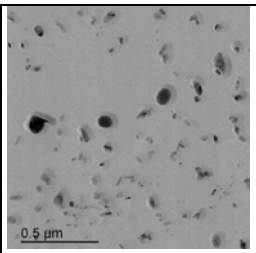
I creep test dei campioni di giunti saldati di P91 e P92 effettuate a 550°C, 600°C e 650°C per un tempo previsto di 10.000, 20.000 e 50.000 ore sono falliti prematuramente, confermando la necessita di utilizzare nel calcolo del carico il coefficiente di riduzione (Weld Strength Reduction Factor) WSRF 0,564 come introdotto nelle Raccomandazioni ECCC [18-19]. Le ispezioni visive combinate con l'indagine microscopica hanno dimostrato che le rotture sono posizionate al di fuori del metallo di saldatura. Uno spiccato rammollimento è evidenziato dalla diminuzione di durezza (220 HV_{10} per P91 e 210 HV_{10} per P92) attraverso il tratto utile, fino al valore minimo nella zona prossima alla frattura, da 198 HV_{10} a 162 HV_{10} per P91 e da 197 HV_{10} a 174 HV_{10} per P92. Questa evidenza sperimentale fa propendere per una valutazione della microstruttura in cui la matrice sia composta per lo più da sottograni ferritici poligonali, originati dai bordi degli aghetti di martensite rinvenuta.

Dopo solo 5.000 ore nelle condizioni sperimentali, mediante repliche estrattive (Fig. 14) e analisi delle seconde fasi mediante TEM-EDS, riportata nei diagrammi ternari (Fig. 15) si individua la presenza, oltre che dei carburi $M_{23}C_6$ e dei carbonitruri MX (presenti già nei materiali in condizioni as received), anche della fase di Laves. Fa eccezione il campione P91 sottoposto a 650°C, perché a tale temperatura questa fase non è termodinamicamente stabile.
I risultati che riguardano i cambiamenti della microstruttura possono essere dunque così riassunti:

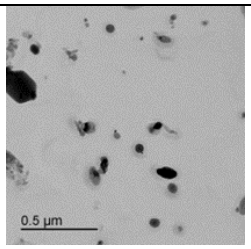
- Recupero (recovery) della martensite rinvenuta, che diviene quasi completo nella HAZ, dove si sono verificate le rotture
- Aggregazione dei carburi $M_{23}C_6$
- Formazione e aggregazione delle fasi di Laves (salvo che nel provino a 650°C)



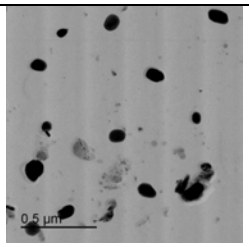
P91HAZ600°C122MPa18h



P91HAZ 650°C 54MPa 2487 h

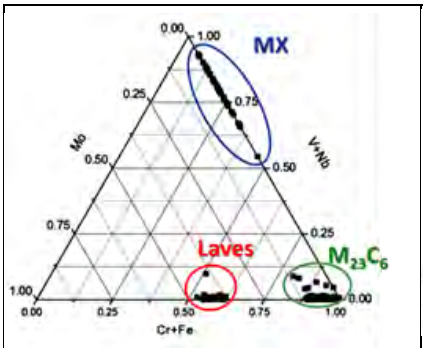


P92HAZ 600°C 141MPa2760h

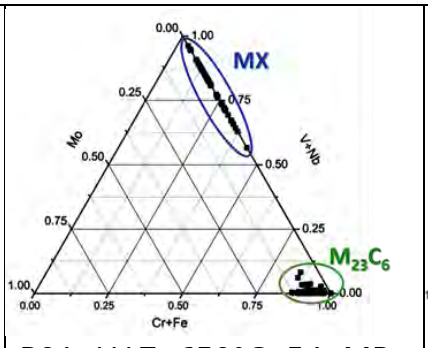


P92 HAZ 650°C 65MPa 3877h

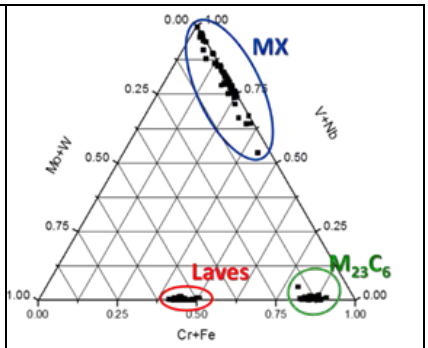
Figura 14. Immagini TEM delle repliche estrattive ricavate lungo il tratto utile dei provini di creep dei giunti saldati.



P91 HAZ 600°C 122 MPa 1888 h



P91 HAZ 650°C 54 MPa 2487 h



P92 HAZ 650°C 65 MPa 3877 h

Figura 15. Diagrammi ternari dei precipitati analizzati mediante TEM-EDS nelle repliche estrattive ricavate lungo il tratto utile dei provini di creep dei giunti saldati.

L'osservazione mediante SEM dei provini di creep rotti, dei giunti saldati, lungo il tratto utile, ha messo in evidenza un numero molto ridotto di microcavità da creep, con dimensioni comprese tra 0,2 e 2 µm, rilevate in prossimità delle zone fratturate.

Come si può osservare in Fig. 16, esse sono localizzate sui bordi di grano della prior-austenite, sui bordi degli aghetti e in prossimità delle inclusioni non metalliche. I precipitati intorno alle cavità e all'interno delle stesse sono principalmente carburi $M_{23}C_6$ e fase di Laves.

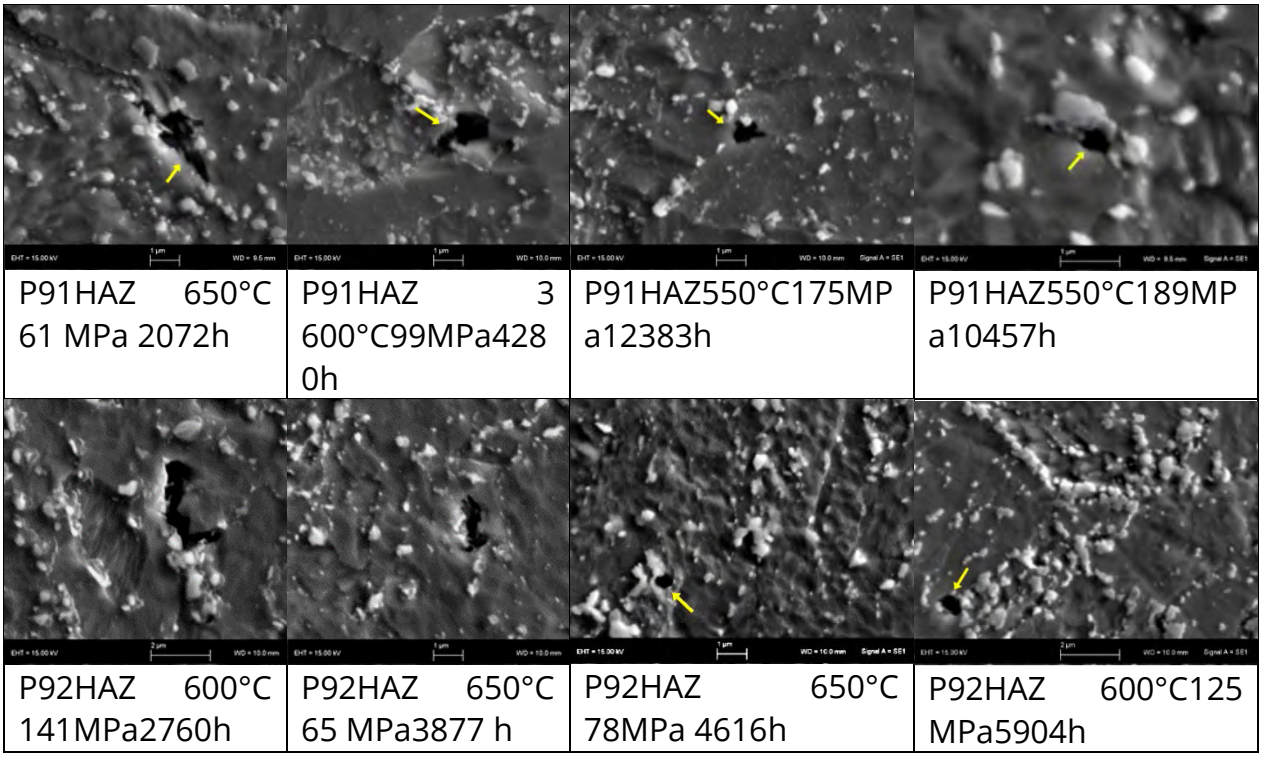


Figura 16. Immagini SEM-SE di microcavità presenti nei provini di creep rotti dei giunti saldati, nel tratto utile in prossimità della frattura.

5. Small Punch Creep Test

Per preservare l'integrità dei componenti in servizio in regime di creep, la valutazione delle proprietà meccaniche residue non può effettuarsi mediante prove di scorrimento uniassiale, perché necessitano di quantità di materiale troppo elevate. La tecnica dello Small Punch, normata dallo standard EN 10371:2021, prevede invece l'utilizzo di un provino di dimensioni ridotte (8mm di diametro, 0,5mm di spessore) e non richiede la dismissione del componente dopo il prelievo di materiale tant'è che può essere considerata una prova non distruttiva. Il test si fa avvenire posizionando un provino in un forno a temperatura e atmosfera controllate ed applicandovi meccanicamente un carico costante mediante opportuno indentatore, fino a rottura. Nel corso delle ricerche sul progetto Atlante, è stata avviata una campagna di small punch creep test, eseguiti su porzioni di materiale ricavate dai provini rotti dei test uniassiali. Dalle curve di deformazione/tempo registrate con lo strumento, attraverso elaborazioni, è possibile ricavare la corrispondente curva di Strain (ε)/tempo e applicando il metodo Omega (Ω) ricavare la vita residua del materiale [20-21]. I grafici

a seguire (Fig. 17) mostrano i risultati di alcune delle prove eseguite. Si tratta di risultati preliminari, da rielaborare con quelli di altre prove condotte sul medesimo materiale in condizioni differenti, al fine di determinare tutti i parametri necessari per calcolare la vita residua. Tali test sono al momento ancora in corso di esecuzione.

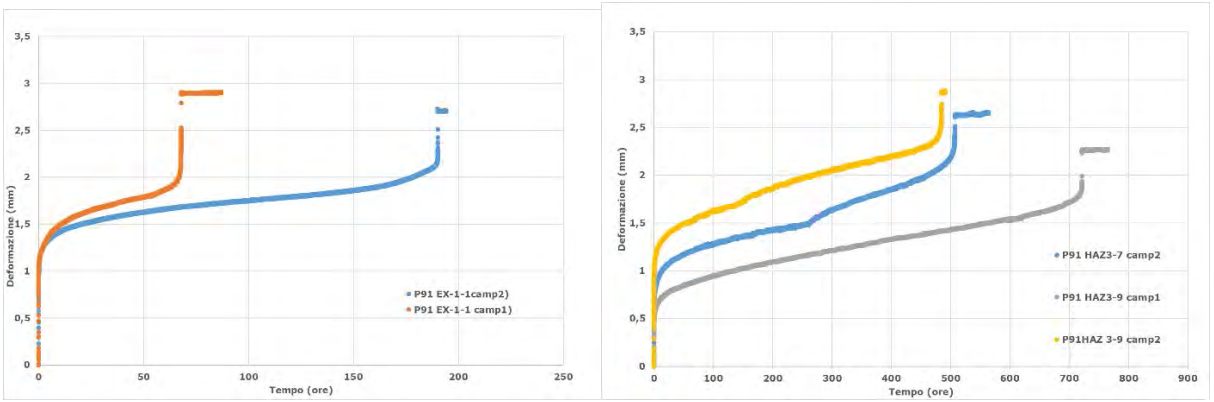


Figura 17. Grafici deformazione vs tempo ottenuti dalle prove di small punch creep test

6. Conclusioni

I risultati finora ottenuti confermano che sia durante l'invecchiamento isotermico che durante l'esposizione a condizioni di creep la microstruttura degli acciai grado 91 e grado 92 evolve controllata da due meccanismi principali: l'aggregazione dei carburi $M_{23}C_6$ e la formazione e aggregazione della fase di Laves.
L'ingrossamento sia dei carburi $M_{23}C_6$ che della fase di Laves aumenta all'aumentare della temperatura da 550°C a 650°C, essendo la frazione areale occupata F_A, riferita ai precipitati complessivi, maggiore alle temperature più alte. L'aggregazione dei carburi $M_{23}C_6$ e delle fasi di Laves, che comporta la presenza di particelle più grossolane, appare il meccanismo più importante di degrado della microstruttura. Particelle grossolane sono potenziali siti in cui gli sforzi si concentrano, favorendo quindi la nucleazione delle cavità e la susseguente loro crescita. I carbonitruri di tipo MX, finemente dispersi nella matrice e responsabili della elevata resistenza al creep degli acciai grado 91 e 92, non subiscono grandi variazioni né in termini dimensionali né di composizione. La loro trasformazione in fase Z, non sembra avvenire facilmente, dato che quest'ultima, negli esperimenti di invecchiamento isotermico non è stata trovata, con l'eccezione di una limitata quantità soltanto dopo 71.000 ore di invecchiamento isotermico a 650°C, mentre nei provini di creep rotti dopo 20.000 ore la sua presenza si attesta su percentuali molto basse.

7. Bibliografia

[1] J. Hald, L. Korcakova. Precipitate stability in creep rresistant ferritic steel experimental investigations and modelling. ISIJ International Vol.43 (2003) 420-427

[2] C. Liu, D. Zhang, Y. Liu,Q. Wang, Z. Yan Investigation on the precipitation behavior of M3C phase in T91 ferritic steels. Nuclear Engineering and design 241 (2011) 2411-2415

[3] Tamura, M.; Abe, F. Analysis of the Degradation in the Creep Strength of High-Cr Martensitic Steels. J. Mater. Sci. Res. 2021, 10, 1.

[4] J. Panait, C.; Bendick, W.; Fuchsmann, A.; Gourgues-Lorenzon, A.F.; Besson, J. "Study of the microstructure of grade 91 steel after more than 100000 hours of creep exposure at 600°C" Int. J. Press. Vessel. Pip. 2010, 87 326-335.

[5] Shibli, A.; "Remaining life assessment issues in high Cr martensitic steels and development of new innovative tools for damage monitoring and life assessment" Trans. Indian Inst. Met. 2010, 63, 2-3, 339-348.

[6] Hasegawa, Y.; Ishii, N.; Kodama, M.; Kunieda, A.; Shimizu, K.; Kamada, Y. Possible microstructural resistant factors in P91 steel to the magnetic domain wall motion of electro-magnetic inspection method. In Proceedings of the High Temperature Plant Materials, Inspection, Monitoring & Assessment—MIMA 2 Conference, London, UK, 11–13 October 2022.

[7] Di Nunzio, P.E.; Cipolla, L.; Tiberi Vipraio, S.; Martelli, S.; Somers MA, J. Quantitative X-ray diffraction analysis of development of Z phase in 12%Cr–Nb–V–N steel. Mater. Sci. Technol. 2010, 26, 1423–1428.

[8] V.Sklenicka, K. Kucharova, M. Svoboda, L. Kloc, J. BursiK, A. Kroupa. Long-term creep behavior of 9-12%Cr power plant steels. Materials Characterization 51 (2003) 35-48

[9] J. Hald, O. Tassa, S. Matera "Creep Behavior and Precipitate Evolution of P92 after Long-Term Creep" Proc. 4th International ECCC Conference Creep & Fractur Düsseldorf, Germany (2017).

[10] A.; Shibli, A.; Utilizzo del microscopio a scansione di forza (SFM) per la valutazione delle cavità allo stadio iniziale negli acciai martensitici. Proceedings of the AIPnD 2022 Conference - National Conference on Non-Destructive Testing Monitoring Diagnostics, Verona, Italy, 19-21 October 2022.

[11] Izaki, T.; Kobayashi, T.; Kusumoto, J.; Kanaya, A. A creep life assessment method for boiler pipes using small punch creep test International Journal of Pressure Vessel and Piping 86 (2009) 637-642.

[12] Blagoeva, D. Development of a residual lifetime prediction methodology for creep and fracture behavior of ferritic martensitic steel using small punch testing technique. PhD Thesis Università di Pisa 2009.

[13] A.Tonti, G. Augugliaro, D. Lega, D. Ramires, L. Alleva, A. Di Gianfrancesco, S. Matera, O.Tassa "Microstructure atlas and Life Assessment Tools" Proc. 3rd International ECCC Conference Creep & Fracture. Rome Italy (2014).

[14] L. Cipolla., S. Caminada, D. Venditti, H:K Danielsen, A. Di Gianfrancesco, "Microstructural evolution of ASTM P91 after 100,000 hours exposure at 550°C and 600°C", LIEGE (2010).

[15] A. Di Gianfrancesco, S. Tiberi Vipario, D. Venditti, G. Cumino,."Microstructural Evolution of ASTM P91 after 100,000 Hours Exposure at 550°C, 600°C and 650°C"Int. Conf. Creep 2011; May 2012, Kyoto Japan.

[16] S. Yadav, B. Sonderegger, B. et alt "Characterization and quantification of cavities in 9Cr martensitic steel for power plants" Materials Science and Technology (2015).

[17] J.D. Parker, J. A Siefert "Creep Fracture in Tempered Martensitic Steels" Int J Petrochem Sci Eng 2018, Volume 3 Issue 1 (2018).

[18] M. Yaguchi, K. Nakamura "Re-evaluation of long-term creep strength of welded joint of ASME Grade 91 type steel" Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2016 July 17-21, 2016, Vancouver, British Columbia, Canada.

[19] R. Krein "Creep Rupture Strength of P91and P92 welded joints" ECCC Workshop on Creep Strength and Heat to heat Variation of High Chromium Steels" December 2019 RINA CSM Rome.

[20] G. L. Cosso, C. Servetto. Application of the Omega Method (API 579-1/ASME FFS-1) to the Life Assessment of a Service Exposed component ECCC Creep Conference 21-23 April 2009, Zurich

[21] F. Dobes, K. Milicka. Application of creep small punch testing in assessment of creep lifetime. Materials Science and Engineering A 510-511 2009, 440-443.

La riparazione di tetti di serbatoi utilizzando materiali compositi: aspetti tecnici e di sicurezza

A. Blanco[1], A. Falla[1], A. Lillo[1], A. Russo[1], R. Acerboni[2], F. Boella[2], A. De Palma[2], G. Saputi[3], E. Artenio[4]

[1] VED Vetroresina Engineering Development S.r.l.
[2] Inail Uot di Venezia
[3] Inail - DC Ricerca
[4] Inail - Dit

Abstract

Le modalità consolidate di riparazione di tetti, sia fissi che galleggianti, di serbatoi di grandi dimensioni, richiedono normalmente lo svuotamento e la bonifica del serbatoio ed il ripristino delle parti ammalorate con materiale metallico.
Oggi, utilizzando i materiali compositi, è possibile eseguire alcune riparazioni che, confrontate con i metodi tradizionali, sono più economiche e consentono di limitare fortemente l'impatto sull'ambiente oltre che assicurare la continuità dell'esercizio del serbatoio, con evidente impatto positivo sulle attività di manutenzione.
Preliminarmente è prevista un'accurata analisi tecnica sulla tipologia dei materiali da utilizzare, al fine di impiegare materiali che abbiano appropriate caratteristiche di resistenza chimica rispetto al prodotto stoccato, oltre a uno studio ingegneristico dell'intervento e alle relative problematiche strutturali e alle modalità di ancoraggio dei laminati al supporto esistente.
All'attività descritta, oltre agli aspetti tecnici, considerata la particolarità della modalità di intervento, massima rilevanza è stata data alla verifica di tutti gli aspetti inerenti alla sicurezza dei lavoratori, analizzando tutti i rischi collegati all'attività da effettuare ed ai luoghi dove l'attività viene svolta, e adottando tutti gli accorgimenti necessari per mitigarli. La riparazione con materiali compositi prevede l'esecuzione di attività a freddo e può essere quindi svolta, attraverso una specifica e accurata valutazione dei rischi specifici, senza escludere dal servizio il serbatoio, con importanti benefici per l'utilizzatore, sia in termini di disponibilità dell'impianto, sia in termini di ridotto impatto ambientale.

Keywords: riparazioni, materiali compositi, manutenzione, sicurezza dei lavoratori.

1. Introduzione

Negli impianti industriali, nel settore petrolchimico in particolare, si può osservare la presenza di numerosi serbatoi cilindrici fuori terra di grandi dimensioni. Per tali

serbatoi esistono tipicamente due tipologie di copertura: a tetto fisso o a tetto galleggiante.
I serbatoi dotati di tetto galleggiante sulla superficie liquida del fluido stoccato hanno caratteristiche tali da evitare quanto più possibile il formarsi di un'intercapedine tra liquido e tetto, questo per evitare l'accumulo di vapori. Essi sono infatti origine di un aumento della pressione interna al serbatoio e della possibile emissione di prodotti volatili in ambiente. Per questa ragione, i serbatoi con tetto galleggiante sono utilizzati nello stoccaggio di liquidi ad alta tensione di vapore.
I serbatoi in acciaio, come ogni apparecchiatura, necessitano di una continua e costante manutenzione al fine di evitare emissioni inquinanti in ambiente.
I serbatoi a tetto galleggiante, data la struttura concava del tetto, possono essere soggetti a fenomeni di corrosione esterna a seguito dello stagnamento di un elettrolita come l'acqua. Fenomeni di questo tipo possono portare alla riduzione dello spessore delle lamiere in acciaio che fungono da copertura o alla nascita di difetti passanti e quindi alla fuoriuscita della parte in stato gassoso del fluido stoccato.
Nel caso dei serbatoi a tetto fisso, il fenomeno corrosivo ha origine dalla condensa dei vapori del fluido, generata dalla differenza di temperatura tra ambiente esterno ed interno serbatoio. Questa condizione comporta una maggiore aggressione corrosiva da parte dei vapori sulla superficie del tetto.
In questo contesto, all'interno degli impianti industriali la manutenzione si occupa di supervisionare e programmare gli interventi di riparazione.



Figura 1. Esempio dell'aggressione corrosiva del fluido sulla superficie del tetto di un serbatoio.

2. L'utilizzo dei materiali compositi nella riparazione di tetti di serbatoi in acciaio

I metodi di riparazione tradizionali di tetti di serbatoi possono prevedere la completa sostituzione dello stesso, soluzione che risulta molto onerosa, o la riparazione del tetto utilizzando delle lamiere in acciaio da saldare.
Mentre per la costruzione di un nuovo tetto è previsto lo svuotamento e la bonifica dell'intero serbatoio, per la riparazione è previsto lo svuotamento e una successiva bonifica, solamente qualora risulti pericoloso operare in presenza del fluido stoccato. Entrambe le soluzioni presentano costi elevati e tempi operativi lunghi.
Per ovviare a queste problematiche sono state studiate soluzioni alternative. I materiali compositi, negli ultimi decenni hanno riscontrato un notevole interesse grazie alle particolari proprietà meccaniche, ottenibili a seguito di una accurata progettazione, oltre alle ottime caratteristiche di resistenza chimica. L'utilizzo di materiali compositi a matrice polimerica, permette di evitare indesiderati fenomeni corrosivi, altamente aggressivi e pericolosi, inevitabili quando si utilizzano materiali metallici.
I vantaggi maggiori dell'utilizzo dei materiali compositi, rispetto all'acciaio, sono i seguenti:

- leggerezza: un acciaio strutturale come il S275JR presenta un peso specifico pari a circa 7850 Kg/m^3 mentre un composito come la vetroresina (ad es., resina poliestere/fibra di vetro) presenta un range di peso specifico pari a circa 1500÷1750 Kg/m^3. La variabilità è dovuta alla possibilità, da parte del progettista, di poter modificare le percentuali in peso della matrice o del rinforzante, in accordo alle caratteristiche desiderate. Pertanto, un composito come la vetroresina è circa 4÷5 volte più leggera rispetto ad un acciaio. Nel caso di una riparazione di un tetto di un serbatoio in acciaio, rispetto a una riparazione tradizionale come la saldatura di nuova lamiera, l'utilizzo di laminati in materiale composito permette di eseguire una riparazione che non appesantisce ulteriormente la struttura, oltre a presentare minori problematiche durante la posa in opera;
- eccellente resistenza chimica: i materiali compositi come la vetroresina presentano una eccellente resistenza chimica, dai fluidi più comuni come l'acqua a quelli tradizionalmente stoccati in grandi serbatoi fuori terra come il greggio;
- elevate resistenze meccaniche: una delle peculiarità dei materiali compositi è quella di poter essere progettati per ottenere le proprietà meccaniche desiderate lungo le principali direzioni di sollecitazione meccanica.

3. Analisi del processo esecutivo della riparazione

In seguito al successo riscontrato dalla applicazione delle prescrizioni e delle procedure descritte dalle norme internazionali ISO 24817 e ASME PCC-2, inerenti alle riparazioni in materiale composito di apparecchiature e tubazioni in acciaio negli impianti petrolchimici, si è pensato di trasferire lo stesso know-how anche nelle riparazioni di superfici piane come quelle di tetti di serbatoi atmosferici.
Una prima soluzione prevede la realizzazione di una copertura ausiliaria in materiale composito, da ubicare sopra quella già esistente del serbatoio metallico.
Una seconda soluzione consiste, sui tetti dei serbatoi galleggianti, nella posa di bende in fibra di carbonio e/o vetro, impregnate di resina epossidica, a seguito di una accurata preparazione superficiale del substrato in acciaio.
Un'ulteriore soluzione consiste nell'applicazione di laminati in materiale composito sulle zone maggiormente ammalorate, ove gli stessi laminati vengono ancorati sulle aree del tetto con condizione migliore.
La procedura esecutiva prevede la produzione di pannelli laminati in resina vinilestere, fibra di vetro e/o fibra di carbonio. Il bilanciamento in peso dei vari componenti del composito mira ad ottenere un coefficiente di dilatazione lineare termica paragonabile a quello dell'acciaio, al fine di mitigare la formazione di tensioni fra il substrato in acciaio e il laminato in materiale composito, causate dalle variazioni della temperatura esterna.
I pannelli possono essere realizzati tramite il sistema manuale "hand lay-up" oppure utilizzando un sistema semi automatico come la macchina "taglia-spruzzo"(spruzzatrice di resina e fibra di vetro corta).
Ogni singolo pannello in PRFV viene realizzato nel seguente modo:

- liner superficiale interno/esterno: le superfici del pannello saranno formate dalla sovrapposizione di strati di vetro C e/o mat di vetro impregnati da resina poliestere. Il liner, così costituito, garantisce la resistenza chimica del laminato agli agenti atmosferici;
- struttura interna: la funzione è quella di garantire la resistenza meccanica del pannello di copertura alle sollecitazioni cui esso sarà sottoposto in esercizio e durante le operazioni di trasporto e posa in opera. Per garantire la leggerezza del pannello, in modo da facilitarne il montaggio in opera, si potrà utilizzare un tessuto alveolato in fibra di vetro e resina poliestere. Per ottenere caratteristiche meccaniche superiori si possono utilizzare altre tipologie di rinforzante come le fibre di carbonio;

Il processo di riparazione dei vari difetti presenti sul tetto del serbatoio prevede la copertura degli stessi tramite l'utilizzo dei laminati in materiale composito e successiva giunzione alle lamiere in acciaio del tetto esistente tramite viti auto perforanti.

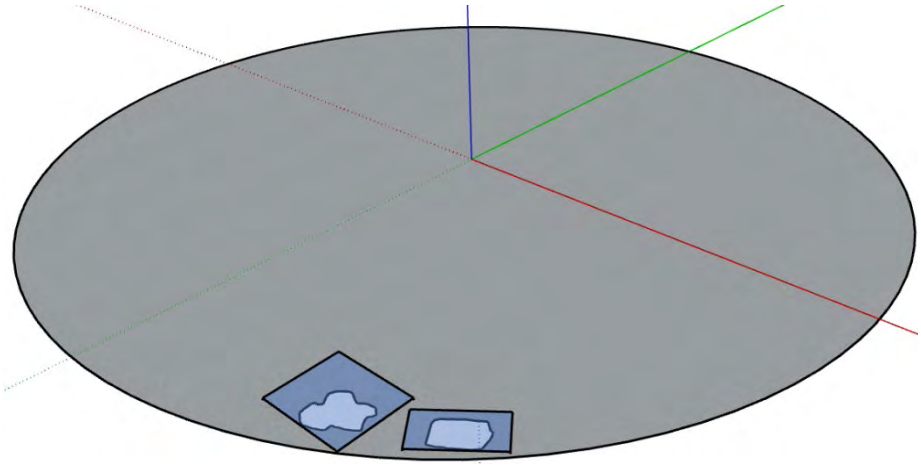


Figura 2. Posizionamento laminati in materiale composito sui difetti presente nel tetto di un serbatoio.

Successivamente, al fine di permettere una migliore giunzione fra i laminati in materiale composito e il tetto esistente, si procede ad eseguire delle saldature chimiche fra i vari laminati.
In alcuni casi, può essere preferibile evitare l'ancoraggio dei laminati sulla superficie in acciaio del tetto del serbatoio, in modo da permettere la dilatazione dei laminati dovuta ai fenomeni di dilatazione termica, evitando così l'innesco di sollecitazioni.

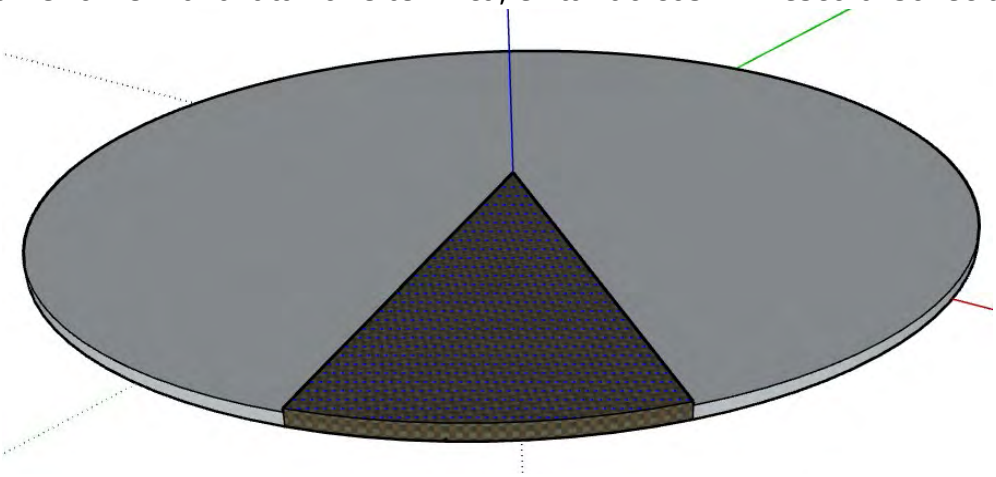


Figura 3. Giunzione di laminati in materiale composito

Riassumendo, questa operazione permette di riparare i difetti presenti sulla superficie di un tetto di un serbatoio in modo rapido, a freddo, nel rispetto delle norme ATEX, permettendo la continuità dell'utilizzo del serbatoio, evitando quindi operazioni di svuotamento e bonifica dello stesso.



Figura 4: Esempio di riparazione di un tetto fisso di un serbatoio in acciaio tramite l'utilizzo di laminati in materiale composito.

4. L'analisi dei rischi e le soluzioni operative nelle riparazioni di tetti di serbatoi utilizzando materiali compositi

Data la particolarità dell'intervento, è necessaria una accurata analisi dei rischi inerenti la sicurezza degli operatori coinvolti.
Prima di procedere con le fasi operative è opportuno conoscere lo stato della copertura del serbatoio: in ogni caso è necessario procedere con la massima prudenza, valutando ogni rischio e assumendo i criteri di sicurezza più idonei a questa tipologia di intervento.
La sinergia creatasi fra il committente e l'esecutore della riparazione ha evidenziato diverse criticità, inerenti il contesto e l'area di intervento: condizioni climatiche, pericolosità del fluido stoccato all'interno del serbatoio, altezza, difficoltà in caso di eventuale soccorso, condizione dell'attuale impianto di sostegno della copertura del serbatoio.
Risulta necessaria quindi un'attenta analisi dei fluidi stoccati all'interno del serbatoio, valutando il rischio per inalazione e/o contatto dei vapori. In generale la scelta dei DPI viene valutata in relazione alla tipologia di impianto, alle condizioni di lavoro e ambientali, alla geometria del serbatoio e al fluido contenuto.



Figura 5. L'operatore, dotato di tutti i DPI necessari, è costantemente agganciato al sistema di recupero.

Tutti gli operatori, come di consueto in impianti chimici e petrolchimici, hanno l'obbligo di indossare abbigliamento trivalente, guanti protettivi, elmetto di sicurezza, scarpe antinfortunistica, occhiali protettivi.
Per accedere all'area di intervento, si è deciso di creare alcuni punti di accesso e/o uscita dall'area di lavoro, sulla copertura del serbatoio, tramite l'installazione di ponteggi disposti in modo radiale rispetto alla circonferenza del serbatoio.
L'importante aspetto dell'utilizzo per le persone di attrezzature di sollevamento non previste a tal fine, è stato oggetto di accurata valutazione, nel rispetto dell'allegato VI del D.lgs. 81/08 e s.m.i., e delle circolari emesse in argomento dal Ministero del Lavoro e delle Politiche Sociali.
Gli operatori, una volta giunti a livello dell'area di lavoro, vengono assicurati tramite l'utilizzo di idonea imbragatura di sicurezza collegata ad una gru di servizio: infatti, qualora dovesse accadere un cedimento del piano di lavoro, il sistema di imbracatura permetterà di evitare la caduta degli operatori. Per eseguire l'intervento si è optato per l'utilizzo di tre gru:

- la prima gru ha il compito di permettere la movimentazione dei materiali necessari per eseguire l'intervento (ad es., laminati in materiale composito);

- la seconda gru assolve il compito, come descritto sopra, di salvaguardare l'incolumità degli operatori;
- la terza gru ha lo scopo di servire, in caso di necessità, al recupero del personale operante.



Figura 6. L'operatore durante la fase di saldatura dei laminati in materiale composito. Esso opera sul piano di camminamento e agganciato costantemente al sistema di recupero.

Durante ogni fase operativa, lo stato di sicurezza degli operatori viene monitorato da un osservatore, posto su uno dei ponteggi di servizio, e dall'assistente dell'operatore della gru. Particolare attenzione va posta sulla scelta delle postazioni degli osservatori al fine di garantire la migliore visibilità possibile.
Gli operatori, una volta eseguito l'accesso sul piano di lavoro, si muovono esclusivamente su piani di camminamento costruiti ad hoc, utilizzando tavole di legno con una lunghezza idonea tale da permettere almeno tre punti di appoggio, delle stesse, sul sistema di sostegno in acciaio della copertura: in questo modo si permette di evitare il sovraccarico della struttura andando a distribuire il peso dell'operatore su punti diversi.

Per questa tipologia di intervento, considerando l'altezza del piano di lavoro, lo spostamento di materiali pesanti e l'utilizzo di gru, è necessario valutare i rischi generati dagli eventi atmosferici come il vento. Questo rischio viene mitigato scegliendo un limite di velocità del vento oltre il quale le attività vengono sospese fino alla presenza di condizioni più favorevoli. La velocità del vento viene valutata tramite l'utilizzo di un anemometro posto sulla gru adibita alla movimentazione dei materiali.

5. Conclusioni

L'accurata analisi tecnica e la relativa progettazione hanno permesso, oltre ad evitare il fermo impianto, una riduzione dei costi intorno al 30% rispetto ad un sistema tradizionale. I tempi di riparazione sono anch'essi inferiori ma legati a fattori meteorologici (quali il vento in particolare). Le varie fasi di lavoro devono necessariamente essere sviluppate contestualmente alla valutazione dei rischi per il personale coinvolto. Questo metodo permette di evitare l'utilizzo di procedimenti rischiosi che rappresentano comunque un pericolo per l'impianto, in ambienti come quello dei complessi petrolchimici. L'innovazione proposta nell'utilizzo di materiali compositi, che presentano una maggiore resistenza alla corrosione rispetto all'acciaio, permette un abbattimento dei costi di manutenzione, minori rischi ambientali e una maggiore longevità dell'apparecchiatura in servizio. Per i motivi sopracitati, questo metodo viene sempre maggiormente richiesto e di conseguenza utilizzato.

Analisi di difetti su generatori di vapore: rilievi di cricche trasversali, esame delle cause, provvedimenti adottati per l'esercizio in sicurezza

E. Pichini[1], I. Mazzarelli[2], M. Panciatichi[3], M.M. Radici[3], C. Bolgiani[3]

[1]Inail - Dit
[2]Inail - Uot di Milano
[3]EDISON Spa

Abstract

A seguito di controlli di routine pre-servizio di generatori di vapore a funzionamento ciclico e stagionale sono state rilevate alcune cricche affioranti sulle saldature di composizione (longitudinali e circonferenziali) del fasciame e fondo/fasciame.
La memoria descrive le attività messe in atto dall'utilizzatore finalizzate alla caratterizzazione - in termini di dimensioni e localizzazione - dei difetti che si sono poi rivelati di natura diffusa (esami distruttivi, non distruttivi, analisi SEM, analisi dei depositi, etc.). Sono state effettuate valutazioni per risalire alle probabili cause legate alla fabbricazione originaria e/o all'esercizio, come poi è emerso sulla base delle micrografie al cuore della saldatura, e dell'analisi SEM, che ha evidenziato depositi sulla superficie delle cricche passanti per tutto lo spessore del materiale base. Sono descritte le conseguenti attività di riparazione in conformità alle disposizioni legislative e al codice di progetto originario (VSG, Raccolta S); in conclusione si mettono in evidenza i provvedimenti adottati per l'esercizio in sicurezza e le attività di monitoraggio a seguito del primo ciclo di funzionamento.

Keywords: generatori di vapore, meccanismi di danno, saldature, cricche da tenso-corrosione, riparazione.

1. Controlli di routine e danneggiamento

Le attrezzature oggetto del presente lavoro sono quattro generatori di vapore a tubi da fumo "*gemelli*" sottoposti annualmente a controlli di routine (*pre servizio*). Il loro funzionamento è di tipo stagionale nel periodo 15 ottobre/15 aprile, in quanto alimentano una sottocentrale di scambio termico per il teleriscaldamento cittadino. Durante le normali attività di pre-servizio effettuate a giugno 2022, in previsione della seconda verifica di integrità sono stati effettuati anche i controlli previsti dall'art. 12 del d.m. 329/04, l'esame visivo e la prova idraulica hanno rilevato quattro cricche trasversali ravvicinate, di cui alcune passanti, su una saldatura longitudinale testa a testa del fasciame del corpo cilindrico.

È stato implementato un piano dei controlli per ogni generatore, su una percentuale pari al 25% circa di tutte le saldature di composizione prossima alla posizione del difetto rilevato.
Il piano è stato condotto mediante liquidi penetranti PT, magnetoscopie MT, ultrasuoni difettoscopici UTD condotti dall'esterno, quest'ultimo esame ha rivelato in tutti i generatori cricche in più posizioni delle saldature del fasciame e fondo/fasciame in posizioni prossime al lato interno del corpo cilindrico. Nel dettaglio, per due dei quattro generatori le cricche si presentavano su tutte le saldature longitudinali del fasciame e circonferenziali anteriori, centrale e posteriori; per uno di essi su tutte le saldature tranne la circonferenziale posteriore; sull'ultimo generatore su tutte le saldature, equamente distribuite, tranne la circonferenziale anteriore. Per i primi tre generatori le cricche si presentavano maggiormente sul lato superiore destro vista fronte bruciatore.
Nell'ottica di riportare i generatori in condizioni di idoneità per l'esercizio, e al tempo stesso garantire la fornitura del calore alla rete del teleriscaldamento, e in previsione delle necessarie attività di riparazione, l'utilizzatore ha inteso coordinarsi preliminarmente con l'INAIL, soprattutto per consolidare un percorso atto ad assicurare le seguenti attività:

- indagine completa, caratterizzazione dei difetti, stima delle cause;
- predisposizione, esecuzione e controllo della riparazione;
- scelta dei regimi di servizio ed eventuali altre azioni per la mitigazione delle cause;
- piani di ricontrollo ed esami particolari sullo stato di sollecitazione delle saldature dopo un determinato periodo di servizio.

2. Indagini e caratterizzazione dei difetti

2.1 Analisi costruttiva e storia del generatore

La fabbricazione dei generatori in conformità al d.m. 21/11/1972 e secondo il codice Raccolte ISPESL VSG, S, M, risale al mese di gennaio 2001, i limiti ammissibili del generatore di vapore sono PS 15 barg e TS 202 °C, con una capacità di 26000 litri, producibilità 19,5 t/h e superficie riscaldata 370 m^2. Il materiale del fasciame e dei fondi è ASTM P355NH con spessore 20mm, per la camera di combustione (focolare formato a caldo) ASTM P295GH con spessore 20mm, per le piastre tubiere normalizzate dopo rullatura ASTM A516 Gr60 con spessore 25mm, i tubi da fumo sono in ASTM A210Gr A1 3,2 mm. La categoria di saldatura è 2b secondo Raccolta S ($z=0,85$). La fabbricazione non ha previsto sovraspessori di corrosione del fasciame, né il trattamento termico in quanto lo spessore è inferiore a 35mm.
La messa in servizio è avvenuta il 09/09/2003 (visita interna), 12/01/2004 (prova idraulica) ed il 23/01/2004 (prova a caldo), le verifiche periodiche sono state regolari.
Le attività di riparazione 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, hanno riguardato la sostituzione di alcuni tubi da fumo per presenza di micro cricche sulle saldature

tubo/piastra posteriore e anteriore ascrivibili presumibilmente a sbilanciamenti dei flussi termici e a non perfetta esecuzione delle saldature originarie. Nel 2014 è avvenuta la ricertificazione in PED come insieme per rendere i generatori "*abili*" al funzionamento in regime di sorveglianza discontinua 72h, l'attività ha anticipato la verifica di integrità e quindi ha previsto un accertamento delle membrature del generatore, inclusi i controlli non distruttivi delle saldature, che non ha evidenziato alcun fenomeno di danneggiamento.
Oltre alle verifiche periodiche previste dal d.m. 11/04/2011 sono state effettuate ulteriori attività di riparazione 2016/2018/2021, sempre per la sostituzione di alcuni tubi da fumo e nel 2018 per la sostituzione integrale della camera di inversione dei fumi.
I giunti longitudinali (figura 1) delle saldature del fasciame e fondo/fasciame sono

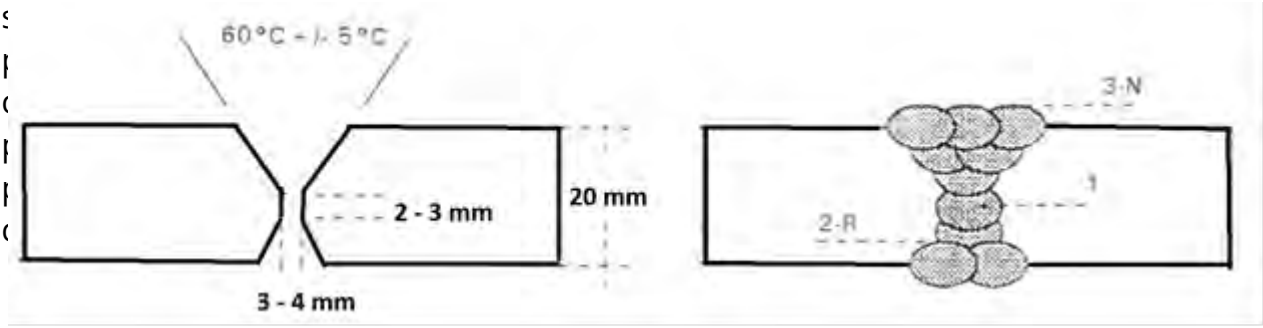


Figura 1. Particolare dei giunti longitudinali

2.2 Analisi dell'esercizio

Il profilo di utilizzo delle caldaie durante la stagione termica è ciclico su base mensile e giornaliera, in relazione alle esigenze della rete di teleriscaldamento. Le ore annuali di funzionamento si attestano mediamente tra 1500 e 2500, con un numero di avviamenti altrettanto elevato (funzionamento ciclico).
Storicamente la gestione prevedeva la modulazione della pressione di esercizio tra 8 bar e 10 bar. Relativamente all'alimentazione dei generatori, tutte le condense vengono recuperate, comprese quelle di processo, miscelate tra loro e rimandate ai generatori di vapore, (condense di rete con una temperatura media di 75°C). Non è presente un sistema di degasaggio delle condense di rete prima dell'invio alle caldaie. L'acqua di *make-up* è prodotta con un impianto a osmosi inversa con trattamento finale. Il condizionamento dell'acqua avviene mediante dosaggio di deossigenante a base DEHA e alcalinizzante a base fosfati.
Il monitoraggio dei parametri dell'acqua di caldaia viene effettuato mediante misure manuali di Ph, conducibilità totale e del residuo di deossigenante con cadenza giornaliera e le correzioni sui dosaggi vengono eseguite di conseguenza. Dall'esame dei dati storici non sono state rilevate particolari anomalie dei parametri chimici con riferimento alle richieste normative e al manuale d'uso dei generatori.

2.3 Caratterizzazione dei difetti

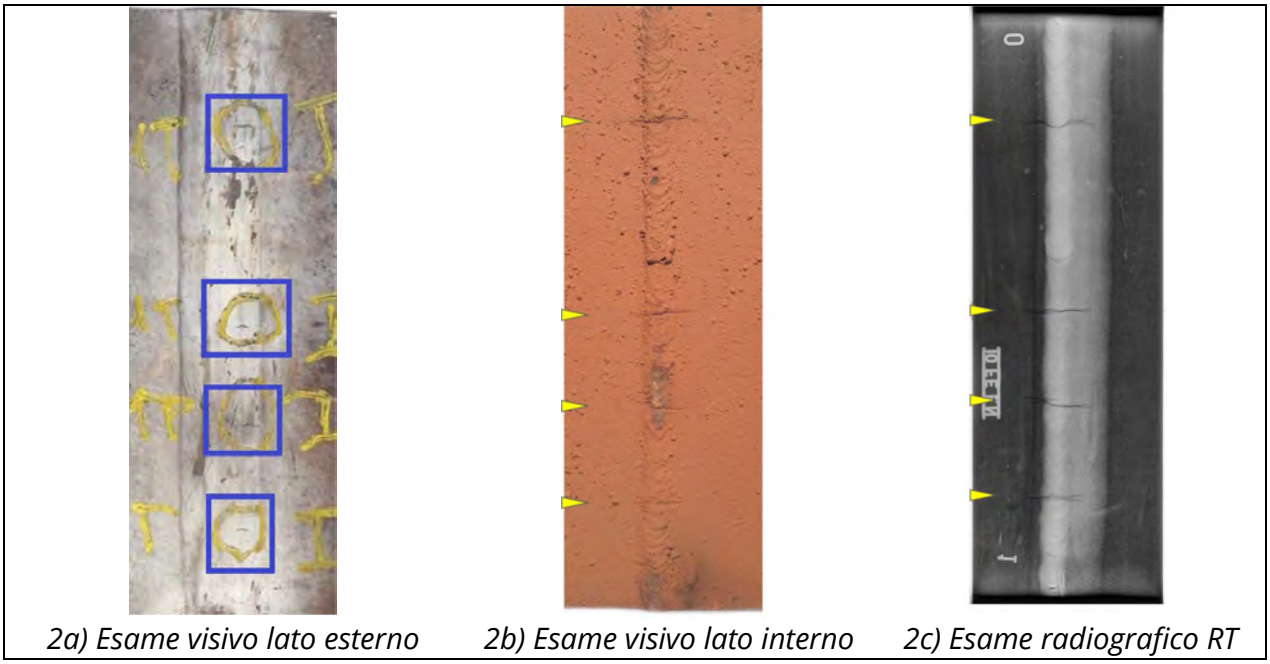
Nel mese di luglio 2022 l'utilizzatore, al fine di individuare tutti i difetti e la loro posizione, ha messo in atto un piano di controllo al 100% di tutte le saldature di composizione mediante esame MT e UTD, inclusi PT al 100% delle saldature della camera di inversione fumi e delle piastre tubiere frontali e posteriori, e saldature di bocchelli, derivazioni e passo d'uomo.

È stata prelevata mediante taglio termico la porzione di lamiera del fasciame di dimensione 300x400 mm, contenente una saldatura longitudinale con i 4 difetti della saldatura citati. I risultati dei controlli di seguito indicati sono stati presentati in un rapporto tecnico dall'Istituto Italiano della Saldatura[1].

In laboratorio sono stati eseguiti i seguenti esami: analisi chimica materiale base e zona fusa con caratterizzazione meccanica, visivo VT, radiografico RT, macrografia e micrografia, prova di durezza e microdurezza Vickers HV_{10}, HV_1, frattografia della cricca, esame SEM (microscopia elettronica a scansione) e analisi EDS (spettrometria per dispersione di energia), analisi XRD dei depositi (diffrattometria ai raggi X), analisi chimica estratto acquoso dei depositi, caratterizzazione meccanica.

L'esame VT ha mostrato sulla superficie interna uno strato compatto di colore rossastro duro e aderente con pustole localizzate sparse casualmente di diametro massimo 3mm; dopo sabbiatura si è avuta evidenza di alcuni pitting localizzati

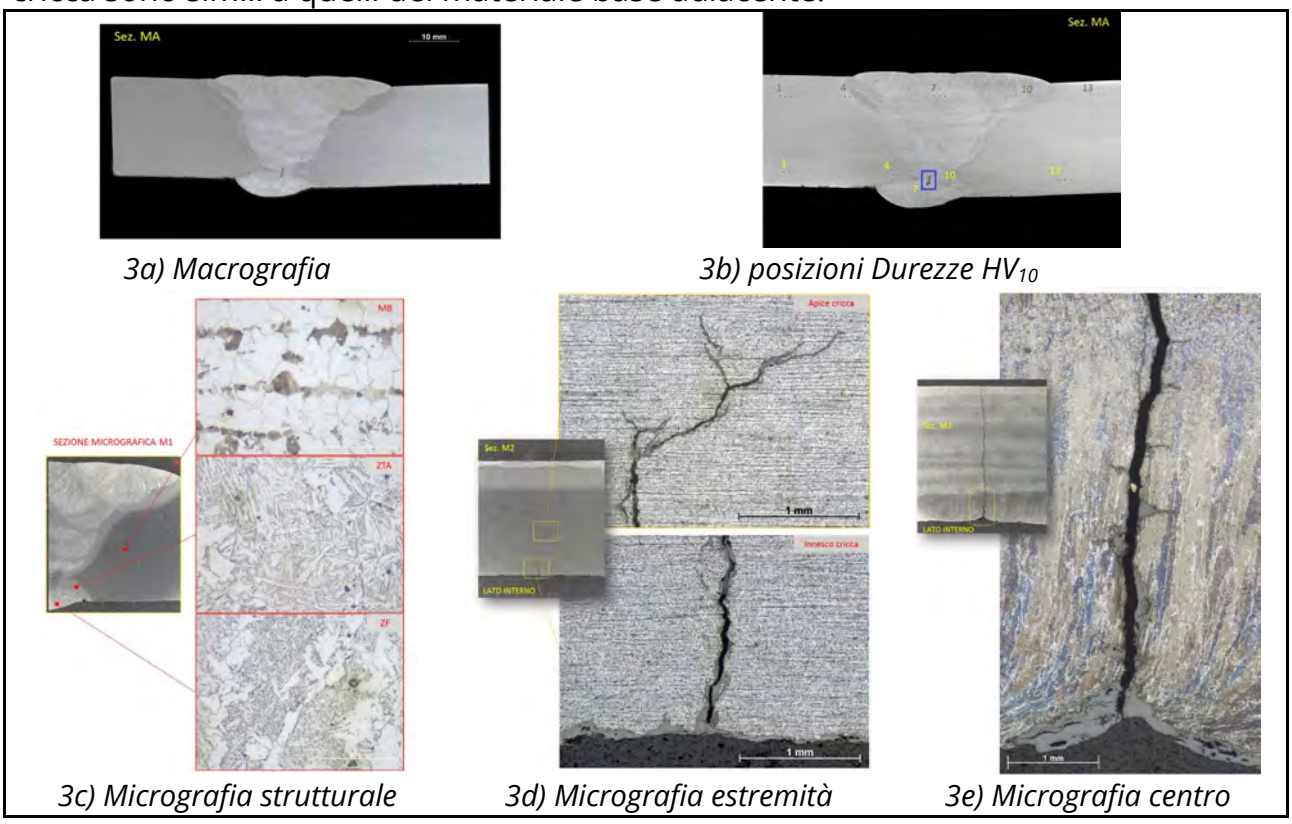
Come mostrato in figura 1, la saldatura esterna (2a) e interna (2b) hanno un profilo regolare e sono visibili le quattro indicazioni già note dai precedenti controlli effettuati dall'esterno, questo esame ha consentito di stabilire tuttavia che le cricche trasversali interessano anche la zona termicamente alterata ZTA e il materiale base, come confermato dall'esame radiografico (2c), ciò ha impattato notevolmente sulle scelte iniziali delle modalità di riparazione e sul successivo monitoraggio dei generatori.



2a) Esame visivo lato esterno *2b) Esame visivo lato interno* *2c) Esame radiografico RT*

Figura 2. Immagini del campione

La macrografia (figura 3a) conferma l'esecuzione del cordone di testa con passate multiple al dritto e a rovescio con un lieve slivellamento dei lembi e la presenza di un tarlo di dimensioni accettabili. La micrografia (3c) prelevata dalla sezione macrografica 3a, finalizzata alla caratterizzazione della microstruttura evidenzia strutture compatibili col materiale di fabbricazione (MB: ferrite/perlite – ZTA: ferrite aciculare/bainite/carburi – ZF: ferrite proeutotteoide a struttura dendritica/ferrite aciculare/carburi) ed evidenzia un innesco corrosivo localizzato al piede del cordone della saldatura a rovescio. La micrografia all'estremità della sezione trasversale della cricca figura 3d) evidenzia andamento transgranulare ramificato, contenente ossidi stratificati e con innesco sulla superficie del fasciame. Si evidenzia anche una cricca secondaria comparabile con la fessurazione principale, mentre quella al centro della cricca figura 3e), anch'essa stratificata, conferma strati di ossido sulla superficie interna e nella zona di innesco. I valori di durezza HV_{10} (166/176 MB – 184/246 ZTA – 202/222 ZF) nelle posizioni di figura 3c) sono coerenti con i valori attesi per l'acciaio utilizzato e non hanno correlazioni con i difetti rilevati. I valori di microdurezza HV_1 (197/201) su impronte del cordone interno di saldatura nella zona di innesco della cricca sono simili a quelli del materiale base adiacente.



3a) Macrografia *3b) posizioni Durezze HV_{10}*

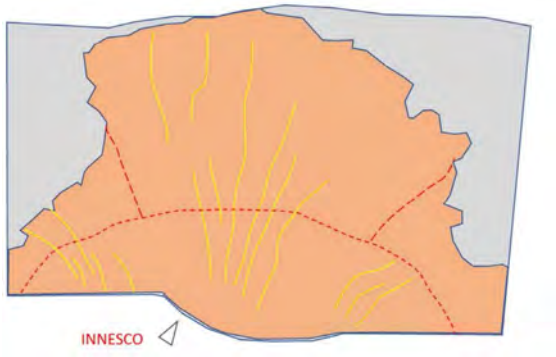
3c) Micrografia strutturale *3d) Micrografia estremità* *3e) Micrografia centro*

Figura 3. Macrografie e micrografie del campione e della cricca

La frattografia dopo l'apertura della cricca in figura 4, provocata mediante rottura fragile a seguito di immersione in azoto liquido, mostra una superficie ruvida e irregolare completamente ricoperta di ossido, il punto di innesco è sul cordone

interno e la propagazione avanza verso l'esterno prima in forma semiellittica e poi a ventaglio.

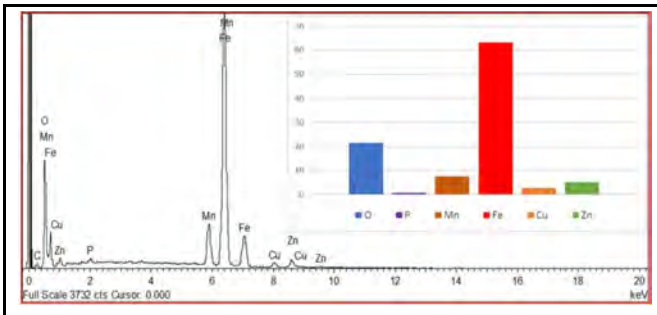


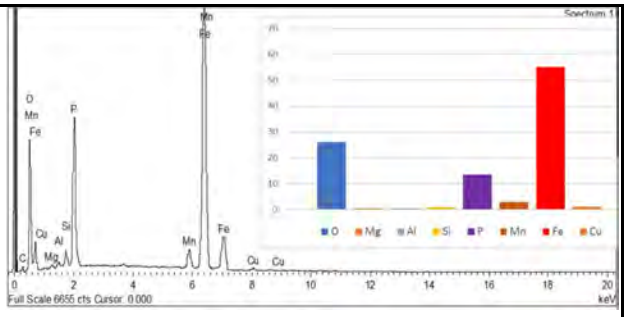


3a) superficie della cricca *3b) morfologia della cricca*

Figura 4. Frattografia della cricca

L'analisi EDS della superficie interna del campione figura 5a) rileva la presenza di ferro, ossigeno e manganese, mentre quella sulla superficie della frattura figura 5b) evidenzia la presenza di due strati differenti: ossigeno/ferro (grigio chiaro) ed ossigeno/fosforo (grigio scuro), confermata dall'analisi SEM, con la presenza diffusa di cristalli/composti di morfologia aghiforme.





5a) EDS superficie interna campione *5b) EDS superficie interna della cricca*

Figura 5. Risultati analisi EDS

L'analisi XRD della superficie interna del campione risulta interpretabile come una miscela di composti Fe_3O_4 di struttura cubica (magnetite) ed Fe_2O_3 (ematite), mentre l'analisi chimica dell'estratto acquoso dei depositi su tale superficie ha mostrato quantità di ioni solubili nei depositi (cloruri, fluoruri, calcio, magnesio e potassio) compatibili con ossidi e prodotti insolubili dei depositi attribuibili a utilizzo di acqua di caldaia a modesta conducibilità totale.
L'analisi chimica del materiale base eseguita mediante spettrometro a emissione ottica conferma l'utilizzo di materiale P355NH con carbonio equivalente pari a 0,41 inferiore a 0,43 previsto dalla UNI EN 10028-1, analogamente l'analisi della zona fusa corrisponde a quella di un materiale d'apporto tipico per acciai al carbonio non

legati. I valori ottenuti dalla caratterizzazione meccanica (prove di trazione e resilienza) sono conformi alla UNI EN 10028-3.

2.4 Analisi delle cause

Sulla base delle indagini effettuate è possibile ricondurre le cricche a fenomeni di rottura assistiti da un ambiente corrosivo (Environmentally Assisted Cracking – EAC), nel caso specifico denominato anche Strain Induced Corrosion Cracking (SICC), di norma associato a uno stato di sollecitazione dinamico oligociclico e residuo di tipo statico sotto forma di tensioni residue di saldatura.
La sola tensione circonferenziale in esercizio non sarebbe stata in grado di attivare il fenomeno; quindi, la causa principale è da ritenersi nelle eccessive tensioni residue che hanno determinato un incremento della risultante degli sforzi diventata prossima al carico di snervamento del materiale.
In base alle considerazioni fatte è necessario valutare il tipo di procedimento di saldatura utilizzato, il fabbricante avrebbe potuto adottare soluzioni tecniche maggiormente orientate alla prevedibilità del rischio legato all'esercizio di tipo ciclico del generatore.
Sebbene non rivestano carattere di obbligo normativo, affinché il materiale sia sollecitato il meno possibile dalle tensioni residue indotte dalla saldatura, le cautele adottabili in tali casi sono:
- preriscaldo a temperature superiori rispetto a quelle adottate (10°C conforme alla UNI EN ISO 1011-1);
- riempimento e finitura dei cordoni mediante arco sommerso con un diametro di filo inferiore 2,4 o 3,2 mm, anziché i 4mm adottati, in modo da mantenere a regimi più bassi gli apporti termici;
- rasatura finale delle riprese al rovescio delle saldature longitudinali in modo tale da eliminare o comunque ridurre possibili inneschi di rottura al piede delle stesse durante l'esercizio; nel caso di tensioni indotte da esercizio ciclico e attacco chimico di un acqua di caldaia con parametri non ottimali, le tensioni residue di saldatura aumentano notevolmente nelle variazioni di sezione (piede del cordone), creando una tridimensionalità delle tensioni concentrate su tale sezione e fornendo sollecitazioni puntuali che talvolta superano il limite di snervamento del materiale;
- trattamento termico dopo saldatura (PWHT) anche per spessori inferiori a 35mm;
- calandrare nuovamente le virole dopo l'effettuazione delle saldature longitudinali per evitare difetti di cilindricità delle virole.

Dal punto di vista del processo è emerso un ambiente corrosivo: è necessario quindi comprendere se il danno sia stato favorito da specifiche condizioni fisico chimiche, in particolare va verificata quale fattore primario la presenza di ossigeno disciolto nell'acqua di alimento e di caldaia (O_2); tale fenomeno di ingresso di ossigeno è tanto più critico quanto più bassi sono il pH e la conducibilità dell'acqua. Pertanto, devono essere valutati i fattori secondari quali la conducibilità (ioni Cl^- e SO_4^{--}) e il pH. Nel

caso esaminato i valori di conducibilità, pH e residuo di deossigenante DEHA sono conformi alla UNI EN 12953-10[2], tuttavia è importante il monitoraggio della chimica dell'acqua nelle fasi di fermo impianto che se del caso (valori inferiori a 9 del pH) va corretta con soluzioni alcalinizzate scongiurando l'ingresso di ossigeno (inertizzazione o additivazione diretta di deossigenante) come previsto dalla norma. All'interno delle cricche è stato rilevato un eccesso di fosforo in forma di fosfato di ferro, laddove era naturale attendersi invece ossidi di ferro. Sempre secondo la UNI EN 12953-10 il tenore di fosfato PO_4 ammesso è pari a 10/30 mg/l; non sono disponibili dati storici dei dosaggi ma è ragionevole pensare alla necessità di azioni volte a un loro monitoraggio e finalizzate a una mitigazione del fenomeno.

3. Attività di riparazione

Dopo aver mappato tutti i difetti riscontrati è stata ingegnerizzata una proposta di riparazione che ha previsto l'asportazione delle saldature interessate e il materiale base contiguo, e l'inserimento mediante saldatura di tegoli di nuovo materiale ASTM A516 Gr 70 con caratteristiche tensili migliori sia a freddo che a caldo rispetto al materiale ASTM A355NH dello stesso gruppo. Tale approccio assicura la completa eliminazione dei difetti e può pertanto configurarsi come un intervento valido nel lungo periodo.
L'attività di riparazione è stata condotta secondo l'art. 14 del d.m. 329/04 e nel rispetto della circolare ISPESL 14/05, la quantità, la tipologia e la posizione dei difetti riscontrati a seguito del piano di controllo complessivo dei generatori, nonché lo studio delle modalità di esecuzione ha comportato l'analisi accurata, tra l'altro, di alcuni aspetti tecnici e normativi fondamentali:

- scelta delle dimensioni di tegoli o porzioni di tegolo affiancate fra loro, per evitare eccessivi danneggiamenti durante il taglio delle membrature originarie affette da difetti (piano di taglio composto);
- con riferimento al piano di taglio, scelta della nuova ubicazione dei giunti saldati (vedi figura 6) in conformità alla regola S.3.4 della Raccolta S ISPESL[3] (introduzione di nuove saldature a incrocio e non allineate con le precedenti); stante la necessità di agire anche sul materiale base non si è ritenuta sufficiente la scriccatura e il rifacimento della sola zona fusa della saldatura;
- scelta del procedimento di saldatura a piena penetrazione da adottare stante la non praticabilità della ripresa a rovescio per la presenza dei tubi da fumo;
- scelta della sequenza del piano dei controlli;
- difficoltà operative in corrispondenza di eventuali disallineamenti originari di fabbricazione originaria su saldatura longitudinale del fasciame.

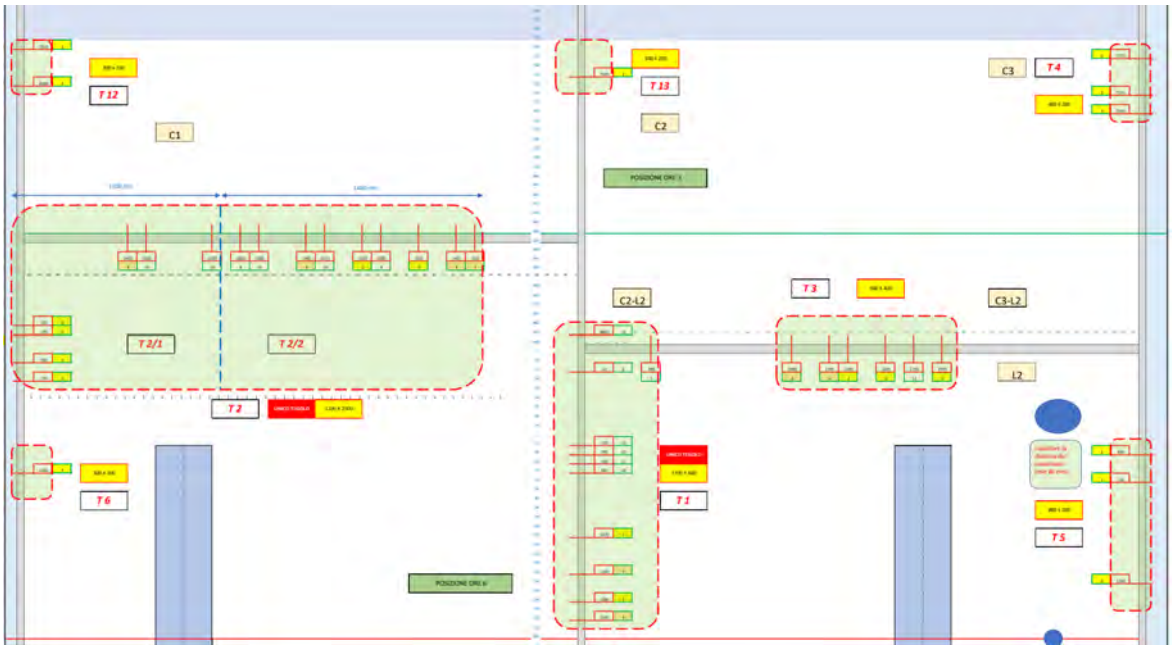


Figura 6. Piano di taglio

Alcuni tegoli presentavano notevoli dimensioni; pertanto, il taglio a freddo è stato effettuato per porzioni (si veda linea blu tratteggiata sul tegolo sinistro della saldatura longitudinale), si è proceduto prima al taglio e alla saldatura della nuova membratura tegolo T2/1 (vedi figura 7a al 50% di esecuzione e dopo PT) e solo successivamente si è effettuato il taglio e la nuova saldatura del tegolo T2/2, ciò per evitare eccessive deformazioni delle membrature da mantenere.
In base alla regola S.3.4 e con riferimento alla figura 6 sono state rispettate le distanze minime di giunti paralleli ed affiancati su fasciami (per saldature longitudinali 300 mm pari al minimo della norma, per saldature circonferenziali 200 mm pari al doppio del valore richiesto dalla norma) e per incroci di saldature (formazione di una T in ogni caso, due incroci a T sulla stessa saldatura circonferenziale distanti almeno 300mm), nonché nel rispetto della distanza minima di 60mm di giunti da altre saldature di bocchelli e passi d'uomo.
Osservando la figura 7a si può notare che in alcuni casi è risultata conveniente la rimozione di tegoli ancora maggiori comprendenti ampie porzioni della saldatura longitudinale e circonferenziale, in maniera tale da limitare saldature affiancate e allineare la porzione di saldatura circonferenziale di riparazione a quella esistente.
Il procedimento adottato in occasione della riparazione è TIG a piena penetrazione (141 apporto in W 46 4 4 Si1 - EN ISO 636-A spessore 2.4 mm), elettrodo di riempimento parziale (111 elettrodo E42 5B 32 H5 EN ISO 2560-A prima passata 2,5 mm successive 3,25 mm), completamento e finitura MIG/MAG ad elettrodo animato (136 elettrodo T 46 2 PC 1 H5EN ISO 17632-A 1,2 mm).
È stato adottato un preriscaldo di 80°C e temperature di interpass non superiori a 200°C, l'esecuzione è avvenuta mediante tecnica di saldatura a blocchi con sequenza

a passo del pellegrino (figura 7b) applicata al primo 50% sullo spessore totale del cordone di saldatura (favorisce lo scarico delle tensioni di saldatura).
Alla fine delle passate di finitura e dopo raffreddamento sotto coibente, i nuovi cordoni di saldatura sono stati rasati per consentire il controllo MT al 100%.



Figura 7a) – tegolo T2/1 caldaia A

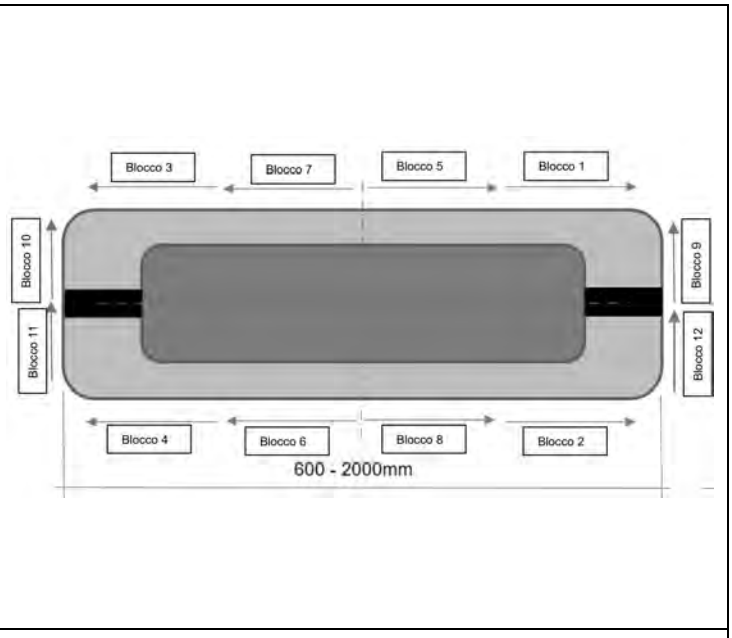


Figura 7b) sequenza blocchi passo del pellegrino

Il piano dei controlli ha previsto: VT 100%, PT 100% dei cianfrini dopo l'attività di taglio. Dopo completamento delle prime tre passate (141+111) ogni saldatura è stata esaminata con controllo VT e PT al 100%. In questa fase sono stati eseguiti controlli di durezza HB su materiale base, zona fusa e zona termicamente alterata. A ultimazione delle saldature sono stati eseguiti MT ed UT difettoscopici al 100%, in ultimo la prova idraulica al valore 1,125 volte la PS.

4. Limitazione del fenomeno e monitoraggio

Lo scopo principale era quello di consentire l'esercizio ai sensi dei regolamenti vigenti,–ma anche di studiare nuove specifiche legate a materiali e processi di fabbricazione che consentano di migliorare il comportamento nel tempo in funzione dei regimi di carico e del tipo di esercizio.
Si è resa necessaria una corretta gestione della chimica dell'acqua di alimento e di caldaia, ottimizzando alcuni parametri oltre le ordinarie richieste normative. In particolare, per i valori di O_2 disciolto dell'acqua di alimento e del pH dell'acqua di caldaia, sono stati rilevati mediante la misura indiretta del residuo di deossigenante, che talvolta può diventare inaffidabile; o che dovrebbe almeno essere integrata da misure dirette dell'ossigeno nell'acqua di alimento dato che nel caso specifico l'alimentazione avviene in assenza di degasaggio caratterizzata da maggiori tenori di O_2.

Il monitoraggio deve essere esteso anche nelle fasi di fermo impianto con eventuale correzione dei valori in tali fasi e durante i riavviamenti. È buona norma in questi casi a pressioni di riavviamento inferiori a 6 barg adottare alcalinizzanti volatili e deossigenante con pH definiti in base al prodotto usato.
Vista l'importanza che riveste il monitoraggio della chimica dell'acqua per questa tipologia di impianto, è stato implementato su tutte le caldaie il monitoraggio in continuo dei valori di Ph, conducibilità totale e ossigeno disciolto a partire dalla stagione 2023/2024.
Dal punto di vista delle tensioni residue, e visto che i controlli non distruttivi a fine riparazione hanno scongiurato la presenza di ulteriori difetti, si è reso necessario adottare regimi di esercizio per quanto possibile tesi a ridurre la fatica, quali ad esempio regimi di pressione ridotti (da 8/10 barg a 6/9 barg a seconda del carico termico, limitandone anche la modulazione tra tali valori) pur garantendo il carico termico al cliente e una miglior distribuzione del carico sui quattro generatori evitando avviamenti e fermate cicliche degli stessi.
Alla fine del primo ciclo di esercizio effettuato dopo gli interventi di riparazione (1° ottobre 2022 – 15 aprile 2023) è stato replicato il piano dei controlli effettuato in occasione delle indagini preliminari e della riparazione, ossia:

- visita interna ed esterna di tutte le saldature del generatore;
- esecuzione di PT ed MT al 100% su tutte le saldature longitudinali del corpo cilindrico e PT 100% sulle piastre tubiere anteriori e posteriori;
- esecuzione UT difettoscopici al 100% su tutte le saldature longitudinali del corpo cilindrico, che non hanno riscontrato alcuna indicazione né sulle porzioni di saldatura originaria né su quelle effettuate durante la riparazione.

I controlli non hanno rilevato difetti.
Su uno dei quattro generatori sono stati effettuati controlli mediante estensimetri elettrici con lo scopo di valutare il livello di deformazione e tensione (in termini di tensione equivalente di Von Mises) in specifici punti situati in zone ritenute critiche per il tipo di riparazione effettuata, oltre a verificare l'assenza di deformazioni plastiche monitorando il ritorno a zero della deformazione dopo lo scarico della pressione. Le caratteristiche del materiale sono Modulo di elasticità lineare (o di Young) = 205940 Mpa ± 5%, Coefficiente di Poisson = 0.295 ± 5%.
Il componente è stato strumentato con 13 sensori a tre griglie 0°/45°/90° secondo UNI 10478-4:1998, posti in prossimità del cordone di saldatura (distanza 10 mm) e dislocati secondo le figure 8a ed 8b, al fine di valutare l'andamento delle deformazioni in corrispondenza delle saldature degli inserti confrontandole con le deformazioni risultanti sulle saldature originarie longitudinali che circonferenziali.
Sono stati effettuati tre cicli di pressurizzazione da 0 a 15 barg, con 5 step da 3 bar sia in carico che scarico (ciclo di assestamento). L'acquisizione delle deformazioni è stata eseguita con frequenza di campionamento pari a 10 Hz. Ogni step di pressione è stato mantenuto costante per almeno 60 secondi.

Dal valore della deformazione nelle tre direzioni è stato calcolato lo stato di tensione nei punti di misura secondo le formule 1 e 2.

$$\sigma_{1,2} = E\left[\frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2\,(1-v)} \pm \frac{1}{2\,(1+v)}\sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + [2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)]^2}\right] \quad (1)$$

$$\tan 2\,\theta = \frac{2\,\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)}{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)} \quad (2)$$

Per ogni punto di misura è stata calcolata la tensione di Von Mises (σVM) per la valutazione dello stato equivalente di tensione nei punti di interesse mediante la formula 3.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1{}^2 + \sigma_2{}^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad (3)$$

Con:
ε_a, ε_b, ε_c, rispettivamente deformazioni delle griglie 1, 3 e 2
σ_1 e σ_2 massime tensioni calcolate nel punto di misura
ϑ angolo tra la griglia 1 e la massima tensione misurata.

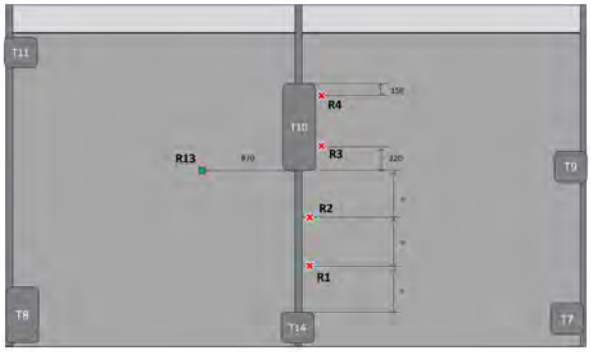


Figura 8a) – posizionamento sensori

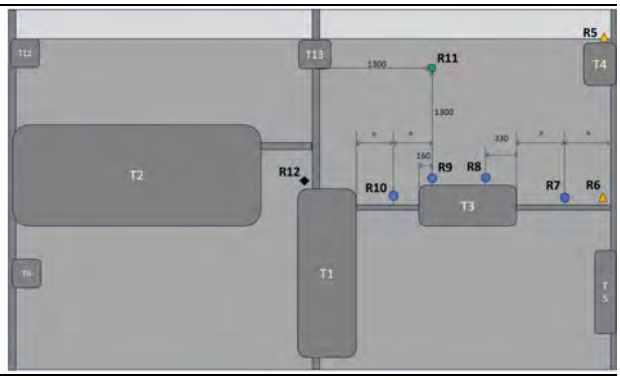


Figura 8b) – posizionamento sensori

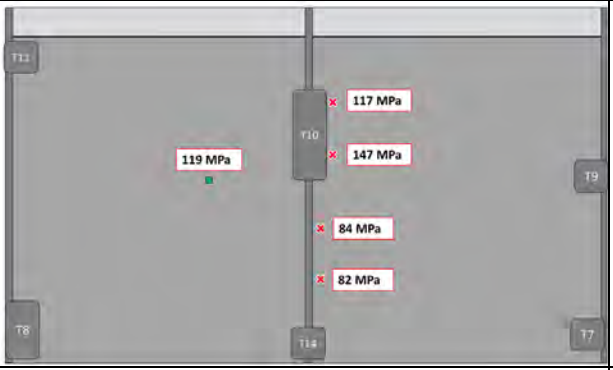


Figura 8c) – posizionamento sensori

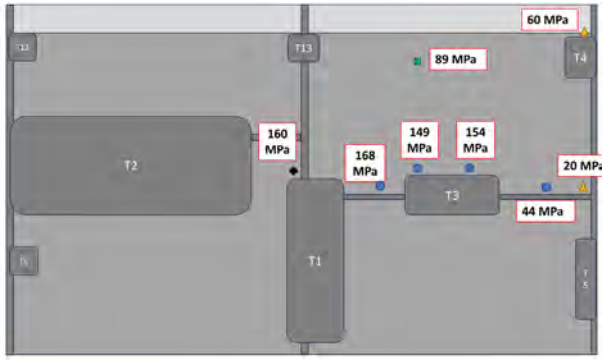


Figura 8d) – posizionamento sensori

Dai valori ottenuti riportati nelle figure 8c ed 8d si può notare che le tensioni in prossimità dei cordoni degli inserti sono tendenzialmente più elevate rispetto a quelli

sui cordoni originari e del materiale base, mentre le tensioni in prossimità del cordone circonferenziale dei fondi della caldaia sono più basse rispetto alla zona centrale.
La tensione massima misurata è pari a 168 MPa nel punto R10 che si trova in prossimità di un cordone assiale originario compreso tra due inserti (T_1 e T_3), la sollecitazione massima ammissibile del materiale è pari a 237 MPa.
Il ritorno a zero deformazione, una volta ripristinata la pressione di partenza, è stato verificato. Si escludono pertanto deformazioni permanenti di tipo plastico.
L'angolo ϑ tra le direzioni principali per tutti i punti di misura di avvicina ai 90° a conferma che il campo di tensione è vicino al caso ideale del cilindro in pressione in tutti i punti strumentati.

5. Conclusioni

La riparazione di attrezzature a pressione non dovrebbe essere solo finalizzata al ripristino delle condizioni che consentono un esercizio in sicurezza; è necessario in alcuni casi indagare sulle cause che hanno determinato l'origine dei difetti e la loro evoluzione nel tempo.
Questo approccio consente evidentemente di valutare le tecniche di riparazione, i provvedimenti da adottare per il futuro esercizio e, fattore ancor più rilevante, le scelte costruttive per future forniture, quali ad esempio i materiali da adottare, i procedimenti di fabbricazione più idonei e che garantiscono maggior protezione da fenomeni di danneggiamento, le condizioni di processo migliori in base all'esercizio specifico delle attrezzature.
Il lavoro ha consentito altresì di valutare più accuratamente l'applicazione di toppe multiple nei processi di riparazione; infatti, è dimostrato che lo stato tensionale dell'attrezzatura risente fortemente della localizzazione reciproca delle toppe e della loro conformazione rispetto alle saldature originarie; seppur non richiesto dalla normativa in alcuni casi è opportuno l'impiego di controlli mediante estensimetri elettrici anche durante l'applicazione del piano di controllo di riparazione.

6. Bibliografia

[1] Adile, Ferrari, Murgia – Istituto Italiano della Saldatura – Indagini di laboratorio su campione prelevato dal fasciame di un generatore di vapore. 28.08.2022

[2] Norma UNI EN 12953-10: 2005 – Caldaie a tubi da fumo. Requisiti relativi alla qualità dell'acqua di alimentazione e dell'acqua di caldaia.

[3] Raccolta S ISPESL - Specificazioni tecniche applicative del Decreto Ministeriale 21 novembre 1972 per l'impiego della saldatura nella costruzione e riparazione degli apparecchi e sistemi a pressione – revisione 1995 edizione 1999.

Valutazione dell'integrità strutturale di tubazioni in pressione: il caso di una condotta forzata realizzata nel 1940

F. Piccini, L. Scano

[1] S.S.I. s.r.l. – Studio Scano

Abstract

La valutazione dello stato di conservazione delle tubazioni risulta di fondamentale importanza per l'esercizio sicuro e la programmazione degli interventi di manutenzione straordinaria o di sostituzione. Nella presente memoria si illustra il caso di una condotta forzata in tubi di acciaio rivettati (D_{max} = 2m, P_{max} = 10barg) realizzata nel 1940 per alimentare le 3 turbine di una centrale idroelettrica.
Una estesa campagna CND ha permesso di quantificare la perdita di metallo occorsa sulla tubazione e di stabilire un tasso di corrosione di riferimento sulla base dei precedenti controlli eseguiti nel 1985. La pronunciata disuniformità degli spessori rilevati, assieme all'evidenziarsi di alcuni trafilamenti localizzati, hanno evidenziato una perdita di metallo generalizzata accompagnata da zone di corrosione localizzata e hanno suggerito di valutare la vita residua nei confronti di entrambi i meccanismi di danno.
È stata eseguita una stress-analysis della condotta in accordo al codice EN 13480-3 e in varie condizioni di spessore. Il calcolo ha incluso anche i carichi derivanti dalle dilatazioni termiche, dalle sovrapressioni da colpo d'ariete, e dall'azione del sisma in conformità alle norme tecniche per le costruzioni (NTC2018). Al termine, è stato possibile stimare una vita residua seguendo l'approccio della API 579-1 Part 4/5 Level 2, e definire un intervallo di ricontrollo. La zona che è risultata più critica nei confronti della resistenza alle sovrapressioni indotte dal colpo d'ariete è stata infine oggetto di un'analisi FEM avanzata ad elevato strain-rate tipo explicit-dynamics con gli spessori previsti al termine della vita residua stimata.

Keywords: Fitness-For-Service, piping, stress-analysis, corrosion

1. Introduzione

Nella presente memoria si descrivono le attività eseguite per portare a termine l'analisi di integrità di una condotta forzata fabbricata in tubi di acciai al carbonio a servizio di una centrale idroelettrica. La condotta è stata messa in opera indicativamente nel 1940 ed alimenta tre turbine posizionate all'interno dell'edificio della centrale.
Il percorso, per gran parte rettilineo ed in pendenza, termina con un cambio di direzione di quasi 90° in pianta prima di arrivare agli stacchi ed alle riduzioni per le tre macchine.

Le tubazioni sono realizzate in lamiera d'acciaio al carbonio con unioni ottenute per chiodatura a caldo, secondo due modalità costruttive dettagliate nel seguito.
Le problematiche segnalate dall'utilizzatore assieme alle risultanze della ricognizione e l'esame visivo preliminare esterno, hanno suggerito da subito la necessità di valutare possibili danneggiamenti di tipo localizzato e diffuso, con eventuale influenza di agenti esterni, dell'usura e della corrosione. Si è quindi definito un piano di controlli che comprende rilievi spessimetrici puntuali ad ultrasuoni (UTS), rilievi puntuali di profondità dei crateri da corrosione esterna con calibro di profondità ("pit gauge"), ed esame di screening da eseguire con onde guidate a corto raggio (MRUT).
Ragioni di esercizio e di sicurezza hanno fatto escludere l'ipotesi di effettuare controlli interni di qualsiasi tipo.
Al termine dei controlli eseguiti da tecnici di Livello II e III UNI EN ISO 9712 [1], le analisi statistiche sugli spessori, ed il confronto con i dati della precedente campagna di misure, meno estesa ed eseguita nel 1985, o con i valori nominali degli spessori, hanno consentito di stimare un tasso di corrosione annuo, e quindi di poter quantificare gli spessori futuri prevedibili secondo i modelli che descrivono i vari meccanismi di danno presi in considerazione e per vari orizzonti temporali, con l'obiettivo di definire una vita residua ed un conseguente piano di ricontrollo.
Le analisi strutturali condotte sulla tubazione complessiva, modellata con i suddetti spessori previsti, hanno preso in considerazione i carichi dovuti alla pressione, ma anche le azioni sismiche imposte dalle nuove norme tecniche sulle costruzioni NTC2018 [2] e quelle dovute alle variazioni termiche ed al flusso dell'acqua.
Per gli elementi più critici sono stati realizzati dei modelli FEM di dettaglio che hanno permesso di ottenere una stima più affidabile dell'affidabilità nel tempo dell'opera.
Una analisi di tipo "explicit-dynamics" con un modello non lineare del materiale, ha infine consentito di simulare anche le conseguenze della manovra di chiusura rapida di emergenza della valvola a valle (colpo d'ariete).

2. Descrizione della tubazione

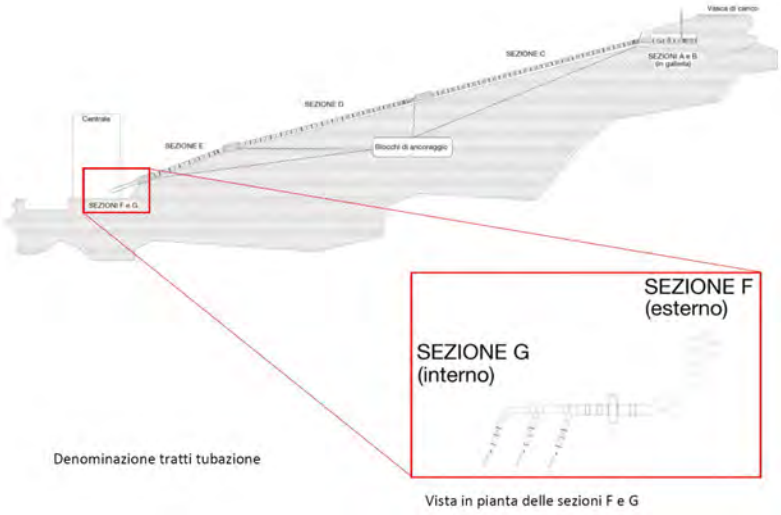


Figura 1. Vista laterale della condotta e dettaglio in pianta del tratto terminale

La condotta forzata oggetto delle presenti note presenta le seguenti caratteristiche generali:

Diametro massimo: 2024mm	Pressione massima a valle: 10.0barg
Lunghezza: 388m (da rilievi del 2021)	Portata massima: 10m^3/s
Dislivello: 90m (approssimativo)	

I tubi sono stati fabbricati per chiodatura a caldo di lamiere in acciaio al carbonio, e sono dotati di anelli di rinforzo circonferenziale in angolare L90x9 ed UPN100.
I supporti sono costituiti da selle in piastre d'acciaio solidali alla tubazione, appoggiate su profili metallici inghisati nei blocchi di fondazione interrati in calcestruzzo armato. Tali selle costituiscono degli appoggi che consentono il movimento longitudinale e bloccano gli scorrimenti trasversali all'asse della condotta.
Il percorso della tubazione, in cunicolo per i primi 25 m e aperto in trincea per la rimanente parte, è diviso in cinque sezioni intervallate da blocchi di calcestruzzo di dimensioni ragguardevoli che costituiscono i punti di vincolo longitudinale e di ancoraggio al pendio.
Sono presenti quattro giunti di dilatazione a bicchiere con flangia premistoppa bullonata a monte, posizionati immediatamente a valle di 4 dei suddetti blocchi di ancoraggio, atti a compensare le deformazioni assiali della tubazione indotte dalle dilatazioni termiche e dai carichi.
La condotta è stata realizzata con due tipologie di tubo:

a) nella parte alta sono impiegati tubi ottenuti da chiodatura a caldo longitudinale e circonferenziale di lamiere d'acciaio
b) nella parte a valle sono impiegati tubi lisci con chiodature solo circonferenziali per realizzare le unioni fra un tratto ed il successivo

Il tratto terminale presenta una curva plano-altimetrica che porta la tubazione all'ingresso alla sala macchine ed agli stacchi di alimentazione delle stesse.
Gli stacchi a tee sono realizzati con sovrapposizione di fasciature chiodate, e ad ogni stacco il diametro della tubazione si riduce.



Figura 2. Tubazioni con giunti chiodati longitudinali e circonferenziali (sx), solo circonferenziali (centro) e dettaglio di stacco a tee (dx)

Dal punto di vista PED [3] la tubazione si inquadra come riportato in tabella, ovvero è esclusa dagli obblighi ai sensi dell'art. 1.2(b):

Tipologia:	Costruttore:	Modello e N.F. (mat. ISPESL):	Anno Fabbricazione:
Condotta	ATB	N.P.	1940
PS (barg):	TS - T_{min}/T_{max} (°C):	DN:	
10.0	-10/+60	2000	
Fluido contenuto:	Gruppo PED:	Categoria PED:	
acqua	2	esclusa art. 1.2(b)	

3. Campagna di controlli

Per ottenere una stima quanto più possibile affidabile della vita residua della condotta si è eseguita una campagna di controlli ed in dettaglio:

- Esame visivo esterno dell'intera condotta (VT)
- Rilievi geometrici delle tubazioni
- Rilievi puntuali di spessore (PTR) con sonda piana ad ultrasuoni (UTS)
- Rilievi di profondità dei crateri da corrosione con calibro di profondità digitale
- Esame di screening con onde guidate a corto raggio (MRUT)

L'esame visivo ha evidenziato e confermato quanto già esposto nella descrizione dell'opera, consentendo di individuare le zone con più evidente presenza di danneggiamento esterno dovuto a corrosione da cloruri in prossimità del passaggio sotto ad un ponte stradale.
Il rilievo spessimetrico è stato eseguito con sonda ultrasonora piana, seguendo le indicazioni delle L.G. INAIL 2012 [4], con un totale di circa 5000 misure eseguite su 8/16 posizioni circonferenziali, osservando, per quanto possibile, una maglia di indagine compresa fra 500 e 1000mm.
Sono state intercettate alcune zone soggette a corrosione locale pronunciata e su di esse sono state eseguite ulteriori misure di spessore seguendo una maglia molto più fitta (10mm) con estensione sufficiente a coprire tutta la zona con spessore ridotto.

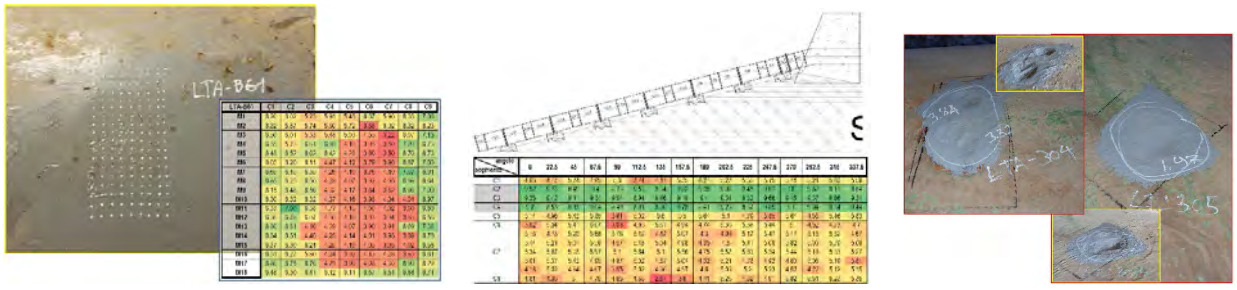


Figura 3. Estratti dai report CND per una LTA, per un tratto di tubazione e per un cratere

Il tratto A in uscita dalla vasca di carico è risultato particolarmente ammalorato tanto da rendere di fatto impossibile la determinazione dello spessore tramite ultrasuoni.

L'esame di screening con onde guidate a corto raggio (MRUT) ha confermato un diffuso stato di corrosione interna molto irregolare, in particolare per i primi tratti a monte (identificati con A, B e C nello schema generale alle pagine precedenti).

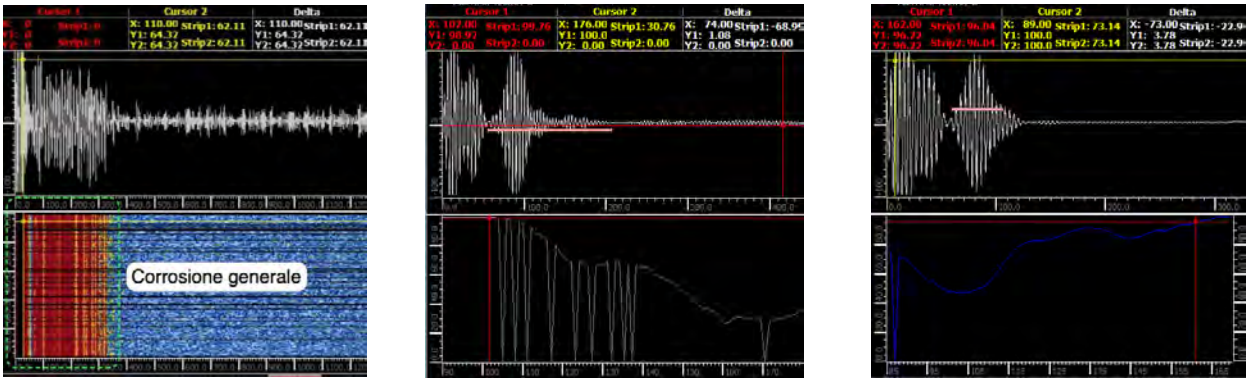


Figura 4. Estratto dal report MRUT per la parte a monte, intermedia ed a valle.

Il rilievo della profondità dei crateri sulla faccia esterna della tubazione, localizzati nella zona sotto l'attraversamento stradale, ha infine permesso di caratterizzare le perdite di metallo localizzate dovute a corrosione crateriforme e di eseguirne una valutazione mirata in sede di FFS.

4. Elaborazione statistica degli spessori

Partendo dagli spessori rilevati, per ogni tronco si è estratto il minimo assoluto t_{mm} e calcolato lo spessore medio t_{am}, che sono stati confrontati con gli spessori misurati nel 1985, se disponibili ed univocamente attribuibili ad una posizione, o a quelli nominali ricavati da disegno, ove disponibile, o ragionevolmente ipotizzati se non si sono trovati riscontri a disegno.
L'analisi dei dati ha messo in rilievo uno stato di corrosione molto diffuso ed irregolare in particolare nelle sezioni A, B e C, nelle quali si evidenziano anche vari punti isolati a spessore ridotto (minimi locali) ed un paio di zone a spessore ridotto più estese, sulle quali sono state eseguite misurazioni con maglia più fitta (10mm), come indicato in precedenza.
Al termine dell'elaborazione delle misure, per ogni sezione si è considerato il valore massimo del tasso di corrosione C_{rate} fra quelli ottenuti, e si è quindi potuto ottenere lo spessore di corrosione futura: $FCA = C_{rate} \cdot R_{life}$, dove R_{life} è la vita residua ipotizzata per il componente.

- Sezione A-B: 0.036 mm/anno
- Sezione C: 0.046 mm/anno
- Sezione D: 0.042 mm/anno
- Sezione E: 0.065 mm/anno
- Sezione F-G: 0.068 mm/anno

Per ogni sezione sono state eseguite numerose misure di spessore (n>15 per sezione) e di conseguenza, nel rispetto delle indicazioni della norma API579-1 [5], si è potuto

calcolare il coefficiente di variazione (COV), dato dal rapporto tra deviazione standard e valore medio degli spessori. Il COV consente di caratterizzare il danneggiamento: un valore basso (<10%) indica una perdita di metallo "generalizzata", mentre un elevato valore di COV fa presumere la presenza di zone a spessore ridotto molto localizzate, ossia uno stato di corrosione non uniforme, come confermato anche dalle analisi di screening nel nostro caso.

5. Analisi di integrità Fitness-For-Service

La presenza di danneggiamento sulla condotta richiede la valutazione dell'idoneità della stessa all'esercizio e la stima di una vita residua per poter programmare gli eventuali interventi di manutenzione e la prossima campagna di controlli.
Le suddette valutazioni vengono eseguite secondo le modalità della norma API579-1 secondo la quale tale calcolo può essere portato a termine con procedimenti di complessità crescente (Analysis level1,2 e 3), cui corrispondono stime di vita residua aventi margini di sicurezza via via meno elevati e cautelativi.
In sintesi, la norma API579-1 suddivide le attrezzature a pressione in tipologie (par. 4.2.5):

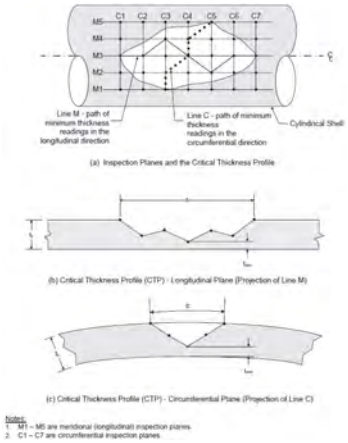
- Type A: esiste un legame diretto fra pressione e spessore della parete;
- Type B, Class 1: come Type A, ma con l'aggiunta di carichi esterni che sono determinanti per il calcolo dello spessore minimo della membratura;
- Type B, Class 2: non esiste un'equazione che correla pressione e carichi allo spessore della membratura, tuttavia esistono delle procedure a codice per il calcolo di uno spessore minimo che assicura una adeguata resistenza
- Type C: non esistono equazioni o procedure a codice per il calcolo dello spessore minimo della membratura (p.e. componenti per le quali è richiesta analisi FEM).

Il livello minimo dell'analisi da eseguire su un componente è funzione della sua tipologia.
Per quanto concerne le analisi che seguono, possiamo assumere che la condotta sia un componente Type B class 1 visto che oltre alla pressione, anche i carichi dovuti al peso e ad azioni esterne (sisma, dilatazioni termiche, carichi dinamici dovuti al moto del fluido) sono rilevanti nel definire lo spessore minimo della membratura.
Alla luce delle misure effettuate e delle analisi statistiche condotte sulle stesse, risultano evidenti due meccanismi di danneggiamento prevalenti ed estesi, per i quali si eseguono i calcoli di vita residua secondo le indicazioni della norma API 579-1:

- Perdita di metallo generalizzata per danno da corrosione diffusa della superficie interna, e le LTA individuate sui tronchi a monte: Sec.4 Level 2
- Perdita di metallo localizzata per la corrosione crateriforme individuata sulla superficie esterna in prossimità dell'attraversamento stradale: Sec.5 Lev.1/2

Dal punto di vista operativo, per i tronchi con valori del COV non elevati (≤ 10%) le valutazioni strutturali sono state eseguite partendo dallo spessore minimo o dal medio rilevato (si veda di seguito) opportunamente ridotto in funzione del FCA

calcolato per la vita residua ipotizzata R_{life}, ed eseguendo quindi una analisi globale secondo EN 13480-3 [6] per mezzo del software commerciale per pipeline stress-analysis AutoPIPE Advanced CONNECT edition di Bentley.



Per le due LTA individuate, come detto, si è invece seguito il metodo CTP (Critical Thickness Path, illustrato a lato) che prevede l'individuazione di due percorsi ortogonali, uno in direzione meridiana(m) e l'altro circonferenziale(c), passanti per il punto di spessore minimo e per i minimi nella relativa direzione.

Individuati tali percorsi, la procedura prevede il calcolo dello spessore medio nelle due direzioni sulla base dell'estensione dei due percorsi (s e c) o, se risulta inferiore, della lunghezza

$$L = Q \cdot (D \cdot (t_{am} - FCA))^{0.5}$$

dove D è il diametro interno corroso e Q un coefficiente fornito dall'API 579-1.

6. Stress analysis secondo EN 13480-3 e FEM

L'analisi globale ha preso inconsiderazione i seguenti carichi permanenti:

- Peso proprio della tubazione (tubi ed accessori vari di linea) e del fluido contenuto;
- Pressione interna, variabile in funzione della differenza di quota rispetto al pelo libero della vasca di carico, ovvero lungo lo sviluppo della condotta:
- Carico inerziale sulle curve
- Reazioni vincolari date dai vincoli modellati per riflettere il reale funzionamento delle selle che reagiscono interamente solo a compressione e per attrito a taglio;

Sono state inoltre considerate anche le seguenti azioni definite occasionali ai sensi di EN 13480-3 par. 4.2.5.2, Annex A:

- Azione dinamica del fluido nel transitorio (colpo d'ariete dovuto alla manovra rapida della valvola a valle). L'entità della sovrapressione è data dalla legge di Joukowski:

  $$\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v$$

  Il software impiegato è in grado di svolgere un'analisi dinamica considerando tale tipo di carico, la cui intensità massima dipende dal tempo di chiusura che, cautelativamente, è stato ipotizzato pari a t=L/2a=0.9s (con L=lunghezza della tubazione).
- Ai sensi del paragrafo 4.2.5.3 della EN 13480-3, risulta eccezionale il carico sismico che viene determinato come prescritto dalle NTC2018.

Sono infine di natura secondaria:

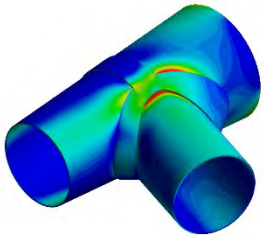
- carichi termici valutati per una variazione di temperatura da -10° a +60°C, ipotizzate sufficientemente lente da non far insorgere gradienti di temperatura nello spessore del materiale.

Per quanto concerne le caratteristiche del materiale, in mancanza di dati e documentazione progettuali e nell'impossibilità di effettuare prelievi per eseguire prove di laboratorio, si è eseguita una ricerca bibliografica ed assunto quali parametri di resistenza ed elasticità quelli dell'acciaio più diffusamente impiegato attorno agli anni '40 per la realizzazione di questo tipo di manufatti, ovvero "SM Steel" (tratto da [7]):

Modulo di Young:	212000 MPa @ RT
Modulo di Poisson:	0.3
Densità:	7850 kg/m^3
Coefficiente di espansione termica:	1.3·10^{-5} °C^{-1}
Carico di snervamento minimo ($R_{p0.2t}$):	180 MPa @ RT (SM steel)
Carico di snervamento minimo ($R_{p0.2t}$):	180 MPa @ +60 °C (SM steel)
Carico di rottura minimo:	300 MPa (SM steel)
Tensione ammissibile f:	120 MPa @ +60 °C (EN 13480-3)

Il software AutoPIPE è in grado di eseguire l'analisi della tubazione considerando i succitati carichi e di creare le combinazioni di carico ed eseguire le verifiche di resistenza secondo quanto previsto della EN 13480-3, applicando ove necessario i fattori di intensificazione degli sforzi (SIF) forniti dall'utente per le componenti non codificate.

Nel nostro caso gli stacchi a tee con fasciature chiodate hanno richiesto la modellazione FEM per ricavare dei valori dei SIF da introdurre nelle verifiche, ottenuti con il metodo classico per tee fuori standard (si veda anche Mair, 2013 [8] e Scano, 2014 [9]).





Le analisi svolte sono non lineari per geometria, includono eventuali lift-off dai supporti e gli attriti sugli stessi.

Sono inoltre inclusi l'effetto Bourdon sulle curve, il "pressure stiffening" e gli effetti del secondo ordine dovuti all'allungamento dei tubi per pressione.

Sono state portate a termine delle stress analysis in varie condizioni di spessore della condotta:

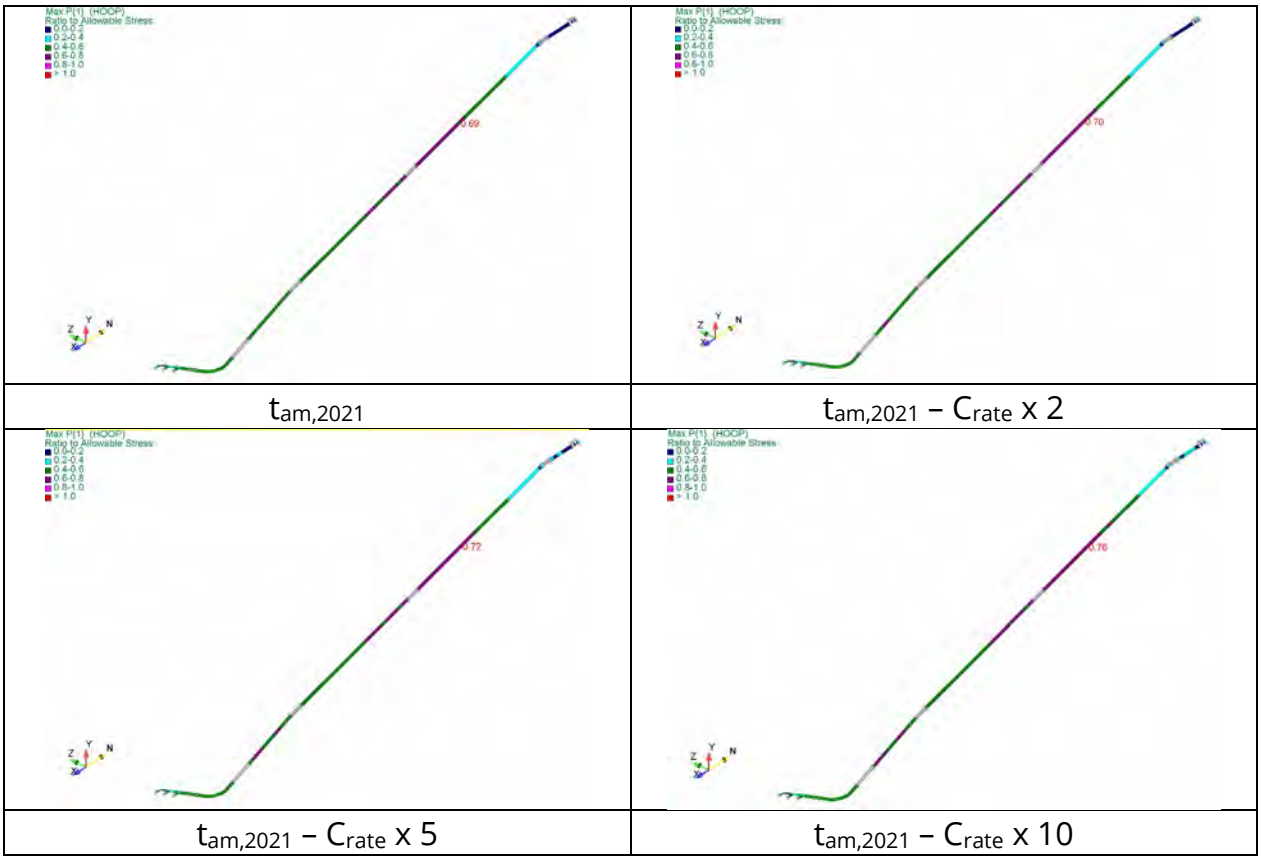
- spessore nominale
- spessori t^*_m rilevati nel 2021
- spessore previsto a 2 anni a partire da t^*_m e C_{rate} ricavati in precedenza
- spessore previsto a 5 anni a partire da t^*_m e C_{rate} ricavati in precedenza
- spessore previsto a 10 anni a partire da t^*_m e C_{rate} ricavati in precedenza

Il valore di t^*_m è stato assunto dapprima pari al minimo misurato per i vari tronchi t_{mm}, e quindi al valore medio delle misure eseguite sugli stessi t_{am}.

Le analisi svolte mostrano che lo sfruttamento del materiale è pari a circa 85% già in condizioni di progetto (spessori nominali).

Passando agli spessori ottenuti dalla campagna di misure si è ottenuto che:

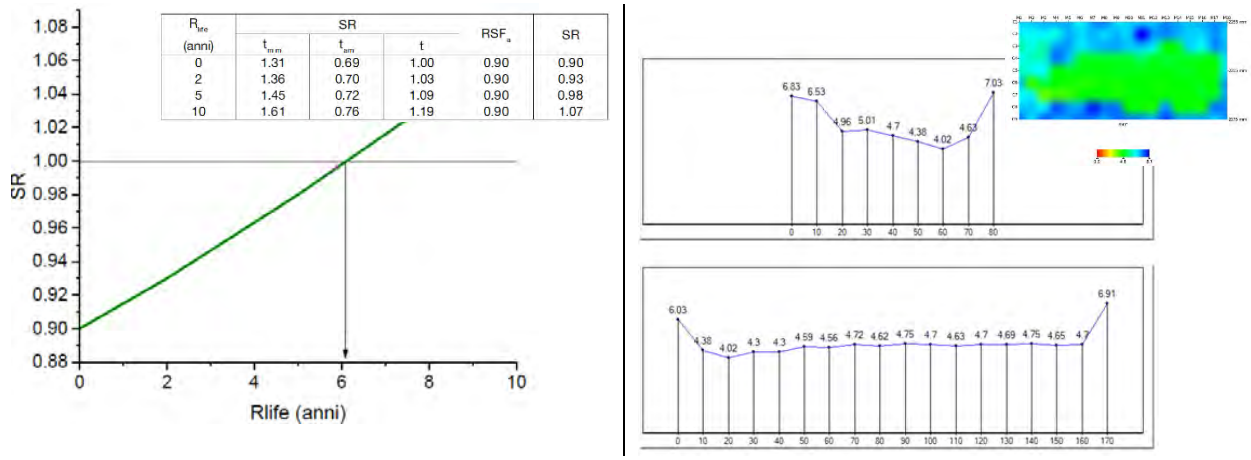
partendo cautelativamente dai valori minimi misurati per ogni sezione, si hanno vari tronchi non verificati sia in condizione attuale (2021) che con gli spessori previsti in futuro.
I tassi di sfruttamento massimi dei tronchi non verificati sono compresi nel range 131÷161%.
Le stesse analisi sono state quindi condotte ricavando lo spessore di calcolo dal valore medio degli spessori misurati t_{am} al posto del minimo t_{mm}: $t_{calcolo} = t_{am} - C_{rate} \times R_{life}$



$t_{am,2021}$	$t_{am,2021} - C_{rate} \times 2$
$t_{am,2021} - C_{rate} \times 5$	$t_{am,2021} - C_{rate} \times 10$

Figura 5. Le verifiche risultano soddisfatte partendo dagli spessori medi misurati.

La valutazione della vita residua si è infine basata spessori a termine ottenuti partendo da valori intermedi fra i t_{mm} e i t_{ma} e nel calcolo, come ammesso dalla API 579-1 per analisi Level 2, si è applicato anche il $RSF_a = 0.9$, che consente di ottenere valutazioni meno cautelative, pervenendo ad una stima di 6 anni.



R_{life} (anni)	SR t_{min}	SR t_{am}	SR t	RSF_a	SR
0	1.31	0.69	1.00	0.90	0.90
2	1.36	0.70	1.03	0.90	0.93
5	1.45	0.72	1.09	0.90	0.98
10	1.61	0.76	1.19	0.90	1.07

Figura 6: estrapolazione della vita residua ed estratto valutazione CTP per le LTA.

La vita residua per corrosione localizzata, valutata secondo le indicazioni della API579-1 Sec.4 è stata calcolata con l'ausilio del software Codeware INSPECT per le due LTA riscontrate, ed è risultata superiore ai 10 anni, e quindi non determinante.

7. Stabilità della tubazione nei confronti di sovrapressioni

Un'ultima verifica è stata condotta nei confronti della stabilità delle tubazioni nei confronti della sovrapressione da colpo d'ariete.
Tale verifica è stata effettuata mediante analisi di tipo explicit-dynamics con il software commerciale FEM ANSYS Mechanical Enterprise, su un modello dei tronchi C33 e C34 in condizioni di minimo spessore al termine della vita residua di 6 anni calcolata in precedenza, ovvero con spessori pari a 2.02mm e 3.22mm rispettivamente.
L'entità della sovrapressione è valutata con la già citata legge di Joukowski, mentre il comportamento elasto-plastico del materiale è stato descritto con una curva di incrudimento calcolata secondo la teoria di Ramberg-Osgod (API 579-1 Annex 2E, par. 2E.3.4) che è un modello di tipo "isotropic-hardening", associato ad un criterio di rottura del materiale basato su un limite alla deformazione plastica equivalente al 20%.
Il carico impulsivo, infine, è stato modellato con una rampa gaussiana di lunghezza pari all'intervallo di tempo richiesto alla perturbazione per attraversare i due trochi in esame ovvero circa 3.68e-3s.

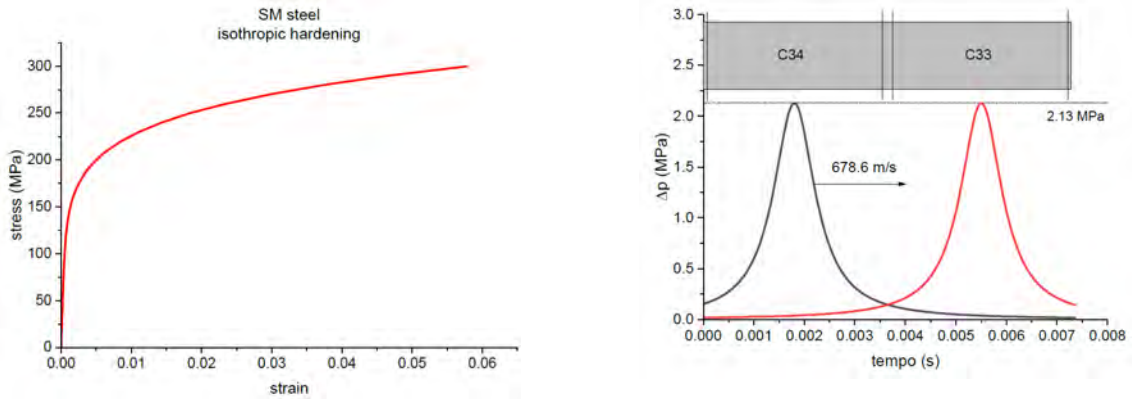


Figura 7. Curva stress-strain del materiale e rampa gaussiana per il carico impulsivo

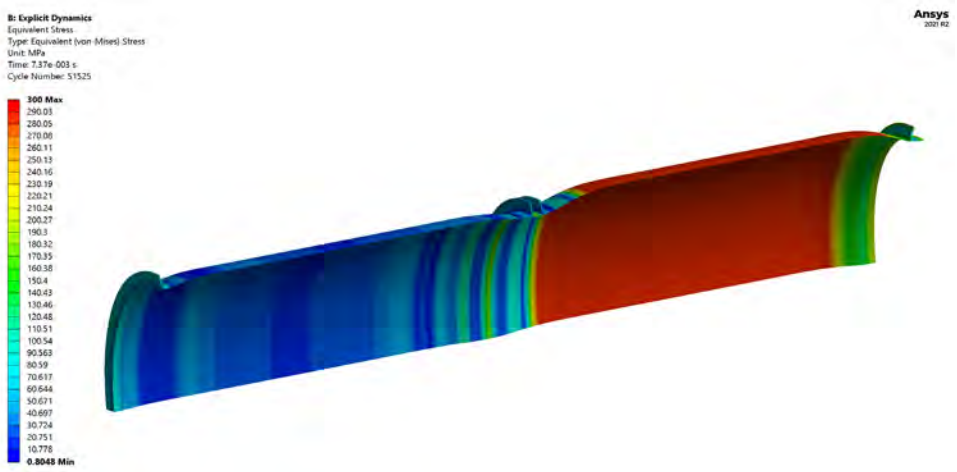


Figura 8. Picco di deformazione sotto l'azione del carico impulsivo da sovrapressione (colpo d'ariete).

L'analisi explicit-dynamics è giunta a termine evidenziando stati deformazione notevoli, che tuttavia non sono superiori al limite di deformazione plastica assunto come criterio di rotture del materiale, e ne attestano quindi una sufficiente resistenza.

8. Conclusioni

La campagna di rilievi e misure effettuate e la successiva elaborazione dei dati hanno consentito di ottenere per ogni tronco dei valori di spessore minimo e medio, ed una stima del tasso di corrosione di lungo periodo basata sugli spessori misurati nel 1985 o, in mancanza di questi, sugli spessori nominali.
È stato inoltre possibile evidenziare i meccanismi di danno in atto ed eseguire specifiche e mirate analisi di FFS in conformità alla norma API 579-1, avvalendosi di vari strumenti software per l'esecuzione di stress-analysis dell'intera condotta e di studi di dettaglio per ottenere i SIF appropriati per gli elementi non standard impiegati nella realizzazione dell'opera, oltre che per le analisi di integrità delle zone a corrosione fortemente localizzata.

Le stress analysis eseguite sull'intera condotta hanno preso in considerazione i carichi da pressione interna ed anche quelli dovuti al sisma, al moto del fluido ed alle sovrapressioni dovute alla chiusura rapida a valle. Gli effetti del colpo d'ariete sono stati dapprima valutati sull'intera opera ed in seguito approfonditi con un modello FEM 3D ed un'analisi di tipo explicit-dynamics eseguita sui due tronchi risultati più sollecitati da tale tipo di carico.
Al termine delle elaborazioni è stato quindi possibile fornire una stima della vita residua della condotta e stabilire un congruo periodo di ricontrollo della stessa.
Inoltre, sono state individuate le componenti maggiormente usurate e sollecitate, fornendo uno possibile criterio oggettivo per una razionale pianificazione dei lavori di manutenzione straordinaria dell'opera.

9. Bibliografia

[1] UNI EN ISO 9712:2012 "Prove non distruttive – Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive"
[2] Norme Tecniche per le Costruzioni – NTC2018
[3] "Direttiva 2014/68/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 15 maggio 2014 concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione"
[4] INAIL Linee Guida Ed. 2012 "Esame visivo e spessimetria – Procedura sperimentale di verifica delle attrezzature a pressione"
[5] ASME "API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service", American Society of Mechanical Engineers, New York, 2021
[6] EN 13480-3 "Tubazioni industriali metalliche - Parte 3: Progettazione e calcolo", 2021
[7] ITCOLD Comitato Nazionale Italiano delle Grandi Dighe, 2019, "Condotte Forzate"
[8] Mair D., 2013, "Stress intensification factors for fabricated lateral piping connections", PVP2013-97220, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 14-18, 2013, Paris, France
[9] Scano L., 2014, "Stress Intensification factors for unreinforced elbow branch connections in old carbon-steel pipelines", PVP2014-28528, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 20-24, 2014, Anaheim, California

Forni reforming catalitico: fenomeni di degrado su tubazioni in acciaio hp grade

M. Giuffrida, C. Grazioli, M. Platania

Inail - Uot di Messina

Abstract

Le tubazioni in acciaio ad elevato tenore di nickel e cromo, trovano specifici utilizzi nell'ambito delle attrezzature a pressione che operano in condizioni gravose, in quanto garantiscono una maggiore efficienza con alte temperature di esercizio (tra 800°C e 950°C). Tali materiali, austenitici altamente legati, sono classificati come HP *grade* (*high performance* steel).
In ambito petrolchimico, vengono impiegati tubi in HP *grade* nei forni *steam reforming* per la produzione di idrogeno; questi tubi, detti catalitici, posti all'interno della camera di combustione, allineati in posizione verticale, sono interessati al loro interno da una reazione endotermica, alimentata in sommità da bruciatori, che determina a valle la produzione di idrogeno.
Il danno più frequente è legato alle alte temperature che possono determinare scorrimento viscoso, causato da un locale surriscaldamento del componente, ma anche un fenomeno di ovalizzazione dei tubi. Le indagini sperimentali evidenziano velocità di degrado non lineari nel tempo, che inducono gli utilizzatori a monitorare i fenomeni di degrado ed anticipare interventi di riparazione rispetto alle previsioni di vita utile, al fine di esercire in sicurezza evitando fermate di manutenzione non programmate.
Per valutare il degrado nei tubi catalitici, vengono adottati metodi innovativi di CND: correnti indotte, per individuare eventuali cricche, e lettura a mezzo laser del diametro per l'ovalizzazione.
La memoria vuole rappresentare le casistiche inerenti ad alcuni forni per *reforming* catalitico, considerando le evidenze sperimentali riportate in letteratura e le osservazioni in campo.

Keywords: tubi catalitici, HP grade, scorrimento viscoso.

1. Introduzione

I forni per reforming sono, allo stato attuale, ampiamente utilizzati nell'industria petrolchimica, anche a seguito delle richieste del mercato, per esempio di combustibili per autotrazione, che necessita di quantità notevoli di idrogeno. Questa tipologia di forni è quindi una parte essenziale per il processo produttivo, che prevede un certo numero di tubi riempiti con un catalizzatore (per esempio a base nichel),

allineati generalmente in direzione verticale e disposti per file parallele, a formare un percorso di flusso attraverso il forno stesso. Una miscela d'idrocarburi e vapore viene fatta fluire dall'alto all'interno dei tubi costantemente riscaldati ad elevata temperatura (tipicamente compresa tra 850 e 900° C) poiché le reazioni sono endotermiche. L'alta temperatura è garantita da appositi bruciatori disposti all'interno della camera di riduzione, e la reazione trasforma la miscela nella fase di attraversamento dei tubi catalitici, fino ad ottenere in uscita un composto gassoso ricco in idrogeno (65%÷75%); a valle, successivi livelli di reazione del gas di sintesi, consentono una produzione ulteriore di idrogeno (fig.1) [1].

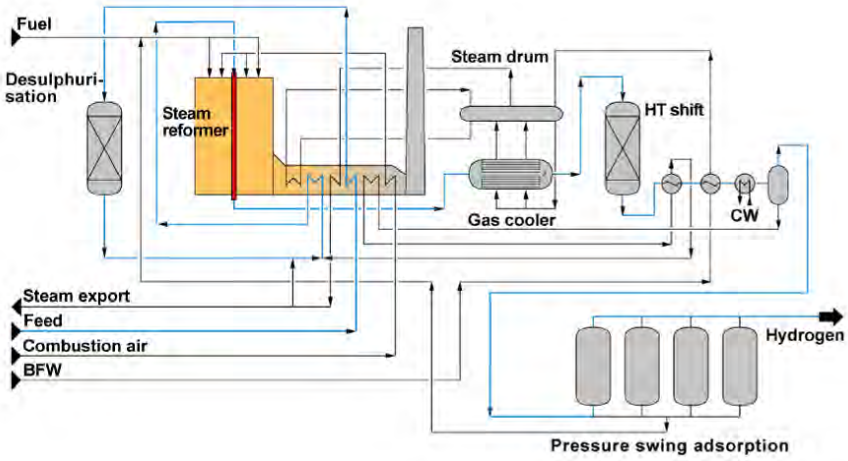


Figura 1. Schema di un impianto "steam reforming" per la produzione di idrogeno [1].

Nel processo di "*steam reforming* catalitico", la temperatura non risulta uniformemente distribuita, poiché la reazione endotermica avviene in quantità superiore nella parte alta del tubo e via via in quantità minore verso la parte bassa (uscita), dove si riduce lo scambio termico; ciò si riflette in temperature di pelle dei tubi intorno ai 490 °C- 550 °C nella parte superiore e maggiori nella parte inferiore, tra 800 e 1000 °C, mentre i valori di pressione si mantengono più o meno costanti (intorno 30-40 bar).
I tubi sono soggetti a condizioni estremamente impegnative a causa della tipologia dei processi coinvolti, si configurano quindi quali componenti più critici dei forni per reforming, di conseguenza va prestata grande attenzione nella scelta del materiale: si utilizzano infatti acciai austenitici ad alta lega, classificati HP *grade* (*high performance* steel) ad elevato tenore di nickel e cromo, specifici per alte temperature d'esercizio (850-950°C), che offrono in generale una migliore resistenza alla rottura per scorrimento ed alla corrosione rispetto agli acciai tradizionali [2].

2. I tubi catalitici

Negli ultimi decenni, gli acciai HP sono ampiamente utilizzati per la produzione di tubi resistenti al calore impiegati in impianti petrolchimici, sia in unità destinate ad ottenere idrogeno che in quelli per la produzione di metanolo o etilene. Questi tubi

radianti sono esposti, durante il servizio, a temperature piuttosto elevate e a pressioni interne relativamente alte, vengono quindi progettati per resistere a un ciclo di vita nominale di 100.000 h e lavorare a temperature fino a 980°C e pressioni interne di 10-40 bar [3].
L'esperienza operativa e l'analisi dei dati in letteratura evidenziano che un innalzamento di poche decine di gradi può portare ad una drastica riduzione del tempo di vita di un tubo catalitico, pertanto lo sviluppo di materiali dalle prestazioni più elevate, quali sono gli acciai HP *grade,* ha consentito un graduale innalzamento della temperatura massima d'esercizio per questo tipo di componenti, garantendo di pari passo una maggior efficienza dei processi ed una riduzione dei costi totali di produzione (nel processo di *steam reforming,* per esempio, all'aumentare della temperatura aumenta la produzione di idrogeno).
I tubi suddetti sono generalmente realizzati in acciaio austenitico fuso, resistente al creep. Gli acciai cosidetti della serie H funzionano a temperature vicino a 1000 °C [3], come il grado HK (25 Cr, 20 Ni, 0,4 C) o HP (26 Cr, 35 Ni, 0,4 C); la resistenza di questa lega dipende dai carburi di Cr, che subiscono effetti di danneggiamento termico durante il lungo periodo di servizio e possono essere stabilizzati con l'aggiunta di elementi micro-leganti (Nb e Ti) [4] [5]. In particolare, il grado HP-40 (25Cr-35Ni-0,4C-Fe) è diventato di uso comune per le sue buone proprietà meccaniche alle alte temperature di esercizio: i tubi in questo materiale sono prodotti mediante colata centrifuga e modificati con niobio (tab.1) per offrire eccellenti proprietà meccaniche alle alte temperature [4] [5].

C	*Si*	*Mn*	*Cr*	*Ni*	*Nb*	*Fe*
0.40	*1.50*	*1.50*	*25.00*	*35.00*	*1.50*	*Bal.*

0.2% YS Limit	*Tensile Strength*	*Elongation (L_0 = $5D_0$)*	*Thermal expansion 20-1000°C*
220 MPa	*440MPa*	*8%*	*$18.5x10^{-6}$/K*

Tabella 1. Composizione chimica nominale e caratteristiche meccaniche della lega HP40 [4].

Per quanto riguarda l'efficienza del trasferimento termico, più che la composizione chimica è il *design* del tubo ad essere il fattore determinante, cosicché le prestazioni migliori si ottengono con tubi centrifugati la cui superficie interna è costituita da rientranze alternate a sporgenze al fine di rendere massimo lo scambio termico tra il metallo ed il fluido all'interno. Un difetto intrinseco della colata centrifuga è la presenza di un'alta densità di pori sulla superficie interna del tubo, i quali vengono rimossi con una adeguata lavorazione di finitura in quanto possono aumentare la superficie esposta all'attacco della carburizzazione.
Sebbene i tubi siano solitamente progettati per una durata di 100.000 h (11,4 anni) sulla base della Recommended Practice 5301 dell'American Petroleum Institute (API)

[6], la loro durata media effettiva varia da circa 30.000 a 150.000 ore, a seconda delle condizioni di esercizio, e diventa critica già intorno alle 40000 h. Per questo le nuove ricerche del mercato produttivo si sviluppano verso un progetto di materiale ibrido per migliorare le prestazioni di questi componenti, alla luce dell'applicazione industriale prevista, ma con un equilibrio tra estensione della vita utile, riduzione del peso e aumento della temperatura di esercizio. Si realizzano quindi tubi rinforzati con varie disposizioni di fili esterni che hanno, per esempio, una resistenza al creep sostanzialmente maggiore rispetto al materiale del tubo; anche l'uso di un rinforzo refrattario intrecciato è un concetto particolarmente nuovo, che si sta esplorando per la riduzione del creep delle tubazioni.

3. Fenomeni di degrado

I tubi catalitici, esposti a temperature e pressioni elevate, spesso presentano cricche e cedimenti prematuri rispetto al loro normale ciclo di vita: i motivi di degrado del materiale durante il funzionamento sono essenzialmente di tipo metallurgico, meccanico e chimico e dipendono dal tipo di esercizio e dall'ambiente in cui opera l'impianto e/o il componente.
A seguito degli inevitabili danni riscontrati, negli ultimi due decenni sono state condotte molte ricerche in questo settore: gli studi presenti in letteratura, in contesti diversificati, hanno permesso di individuare le forme di danneggiamento per questo tipo di materiale, imputabili alle gravose condizioni operative, e i metodi di valutazione dell'entità dei danni.
Le risultanze mostrano che i tubi catalitici di impianti diversi hanno subito un degrado dopo una frazione di vita utile compresa tra 40000 h e 50000 h e le forme più pericolose e frequenti di danneggiamento che possono insorgere sono surriscaldamento e scorrimento viscoso (creep), fatica termica, carburizzazione, corrosione e ossidazione [2].
In particolare in impianti di reforming, il danno più frequente è quello dovuto a scorrimento viscoso, quasi sempre causato da un locale surriscaldamento del componente, soprattutto nella parte inferiore dei tubi; a causa dell'esposizione prolungata alle alte temperature, la microstruttura del materiale è soggetta a degrado: questo inizia all'interno della parete del tubo a circa due terzi della superficie esterna, rendendo molto difficile il rilevamento in situ. In genere, nelle prime fasi si verifica la precipitazione di carburi, in seguito, si assiste a una riduzione della resistenza ed a infragilimento a causa della coalescenza e dell'ingrossamento dei carburi. L'ulteriore degrado può portare a danni da cavitazione per scorrimento, microcricche e alla propagazione finale di macro-cricche (fig.2): in casi estremi si sono sviluppate cricche longitudinali (fig.3) che sono penetrate nell'intero spessore del tubo, determinando un cedimento [7] [8].

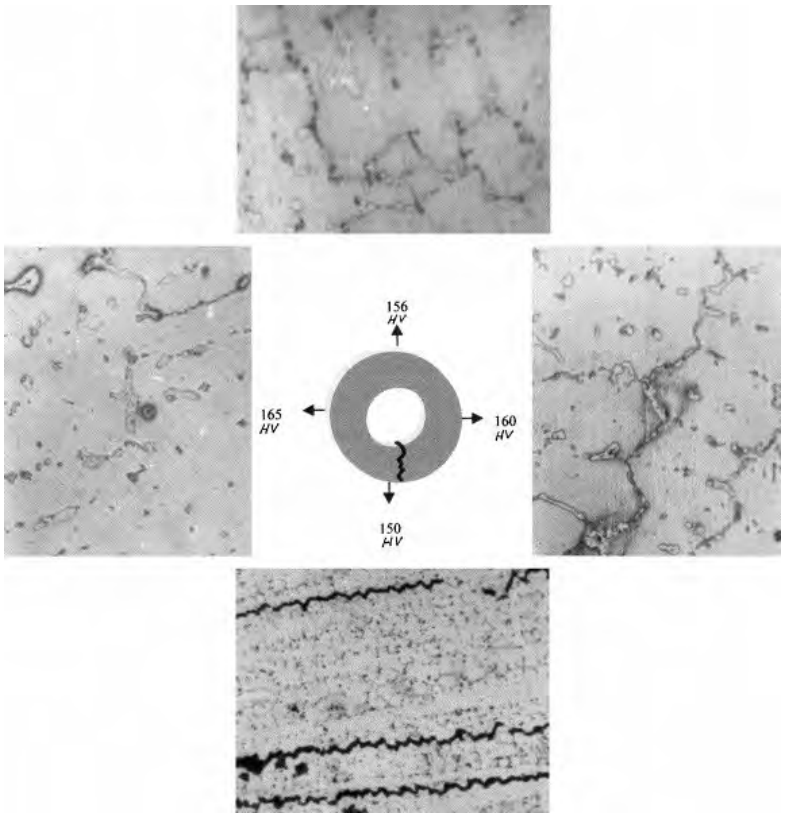


Figura 2. Evoluzione del degrado microstrutturale osservato con ottica metallografica, con indicazione dei valori di durezza. [8]

In alcuni processi chimici, un'altra forma di danneggiamento dei materiali è la carburizzazione o *metal dusting*, più frequente ad esempio nella produzione di etilene: a temperature elevate ed in presenza di alcune miscele di reagenti, si può determinare la deposizione di coke sulla superficie interna dei tubi catalitici, fenomeno che porta all'assorbimento di carbonio nella matrice metallica. La carburizzazione può alterare significativamente le proprietà meccaniche del materiale, riducendo la resistenza al creep, inoltre può generare forti tensioni interne, dovute all'aumento di volume dello stesso materiale, favorendo la formazione di cricche e rotture anticipate, infine comporta la disattivazione del catalizzatore ed una riduzione dello scambio termico tra metallo e fluido di processo, con conseguente innalzamento locale della temperatura [4].
Per questa ragione è importante monitorare l'eventuale formazione di coke e di conseguenza gestire e pianificare opportuni processi di pulizia. Il monitoraggio delle incrostazioni interne avviene attraverso il controllo della perdita di carico in continuo tra ingresso e uscita. L'eliminazione del deposito di coke nella superficie interna avviene, durante le fermate di manutenzione impianto, attraverso immissione di solo vapore (processo di steaming) ad alta temperatura (tra 730 °C e 780 °C) per una durata variabile tra le 12 e le 48 ore [9]. Il suddetto processo di decoking permette di rigenerare il catalizzatore e pulire lievemente la superficie interna dei tubi. La completa pulizia dalle incrostazioni viene invece effettuata, dopo avere scaricato il

catalizzatore, con una fresa pneumatica ad espansione che scrosta il materiale depositato all'interno dei tubi, senza intaccare la superficie metallica.
Durante il decoking, comunque, i tubi possono essere sottoposti ad un aumento di temperatura oltre i valori normali; quindi, un decoking frequente accelera il danno termico, un decoking meno frequente, invece, aumenta il tasso di attacco della carburizzazione. I risultati sperimentali hanno mostrato che la modalità di rottura di un tubo spesso è una combinazione dei due fenomeni sopra esposti, in quanto se è vero che la frattura intergranulare (cricca) (fig.3) avviene per deformazione da scorrimento, tuttavia, essa è accelerata da un attacco di carburizzazione che infragilisce il materiale [10].

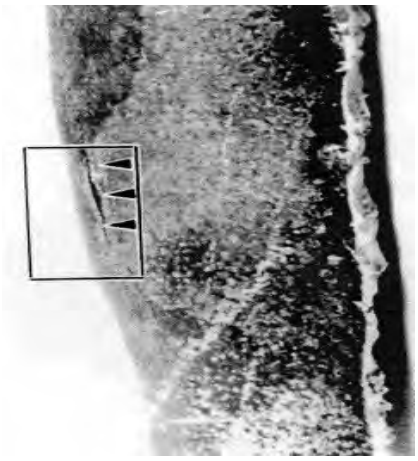


Figura 3. Cricca longitudinale in un tubo (cedimento localizzato) [13].

Le alte temperature possono comportare anche un fenomeno di deformazione plastica [9]: il degrado delle caratteristiche meccaniche, sempre connesso allo scorrimento viscoso, si manifesta in questo caso come una lenta deformazione del materiale sotto sforzo**,** causato principalmente dalla pressione interna (stress di cerchio), che si traduce in un cambiamento permanente della forma lungo l'asse longitudinale, ossia una crescita diametrale dei tubi determinata dal movimento delle dislocazioni o da fenomeni di diffusione nelle matrici metalliche, e favorita, probabilmente, anche dalla geometria di impianto (installazione verticale con fissaggi alle estremità).
Infine, si rileva il degrado dovuto a probabili processi di ossidazione o corrosione, che si manifesta con uno uno strato irregolare di materiale, dalla struttura porosa, che si sovrappone alla matrice austenitica. L'alterazione del materiale in corrispondenza della superficie può portare alla formazione di incrostazioni aderenti, nel caso di ossidazione, ovvero ad un assottigliamento generale o localizzato, con perdita di metallo, nel caso della corrosione; l'alterazione è dovuta al contatto con il fluido di processo; quindi, è funzione delle differenti tipologie di carica impiegata e, a lungo andare, può portare alla formazione di cricche. Tuttavia, diversi studi sui meccanismi di rottura dei reformer HP concordano sul fatto che, nella maggior parte dei casi, l'ossidazione (o la corrosione) gioca un ruolo secondario nella rottura rispetto alle cause del creep; inoltre la formazione di una scaglia di ossido protettivo che impedisce la diffusione del C nella lega è efficace nel ridurre l'entità dell'attacco di carburizzazione [10].

3.1. Scorrimento viscoso nei tubi catalitici

Dato che, per le tubazioni realizzate in acciaio, lo scorrimento viscoso rappresenta uno dei principali fenomeni di danneggiamento, risulta significativa la valutazione del

conseguente degrado, tenendo conto delle reali ore di esercizio e dei dati storici, in riferimento alla "vita utile" del componente.
Le disposizioni normative definiscono adempimenti per le attrezzarure a pressione soggette a creep e fissano le procedure di calcolo per stabilire la "vita residua", la periodicità dei controlli necessari e le competenze dei soggetti coinvolti. In maniera sintetica ricordiamo le seguenti:

- D.Lgs. 81 del 9 aprile 2008, T.U. per la sicurezza – stabilisce per le attrezzature che lavorano in regime di scorrimento viscoso o di fatica oligociclica l'obbligo del datore di lavoro effettuare la valutazione;
- D.M. 11 aprile 2011, all.II – specifica che per la valutazione si osservano le prescrizioni tecniche vigenti in materia e le autorizzazioni all'ulteriore esercizio vengono rilasciate dall'Inail;
- Circ. Ispesl 5 dicembre 2003, n.48 - Procedura tecnica per le verifiche di calcolo e controlli su componenti in pressione in regime di scorrimento viscoso del materiale;
- Specifica Tecnica UNI/TS 11325-2/4, Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione – Parte 2: Procedura di valutazione dell'idoneità all'ulteriore esercizio delle attrezzature e degli insiemi a pressione soggetti a scorrimento viscoso; Parte 4: Metodi operativi per la valutazione di integrità;
- Norma UNI 11706:2018, Valutazione dello stato di conservazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione a seguito del degrado strutturale e metallurgico da esercizio dei materiali.

Sulla base delle procedure indicate, la vita residua viene calcolata ipotizzando che il funzionamento futuro sarà simile a quello passato; come riferimento si utilizza il valore di temperatura effettiva del periodo di funzionamento più recente, che, per definizione, include l'impatto dei cicli termici.
Secondo la UNI 11325/2 e la circ. n.48/03, per valutare lo stato di degrado sono utilizzati i seguenti controlli:

- esame visivo (VT) e controllo dimensionale;
- controllo magnetoscopico (MT) o con liquidi penetranti (PT);
- esame con ultrasuoni (UT), difettoscopico, per il controllo delle saldature;
- esame microstrutturale con replica metallografica [11].

In particolare, l'indagine metallografica è fondamentale per la valutazione del degrado del materiale, poiché individua la formazione di micro vuoti a bordo grano: la valutazione si basa sulla classificazione di Neubauer, che fissa quattro diversi livelli di danneggiamento. Infatti, l'evoluzione da creep di acciai resistenti ad alta temperatura è legata dapprima alla comparsa di cavità isolate (grado 2), che successivamente si allineano (grado 3) e gradualmente, tramite coalescenza, formano microcricche (grado 4) che portano ad avviare la rottura sotto forma di cavità o microfessure (grado 5) [11] [12].

Nel caso dei tubi catalitici invece è dimostrato che tale classificazione non risulta adeguata alla composizione metallurgica del materiale. Di fatto sporadicamente si sono evidenziati casi con un grado di danno significativo (grado 1/2 e 2) in considerazione del lungo periodo di esercizio; inoltre l'entità del danno da creep è raramente distribuita in modo uniforme su tutta la sezione trasversale di un tubo per reforming e questo incide nella procedura di campionamento per la metallografia, in quanto per la valutazione sono necessarie regioni e non solo segmenti della parete del tubo.

Sono state condotte alcune ricerche sul cedimento prematuro dei tubi HP dei reformer, secondo le quali il meccanismo di rottura delle leghe HP-Nb passa da intragranulare a grain boundary a temperature superiori a 1000 °C, cioè si manifesta un cambiamento nel creep, da slip-climb (scorrimento da dislocazione) a diffusione atomica (scorrimento al bordo del grano). Questo si spiega con la microstruttura delle leghe HP-Nb che consiste principalmente in una matrice di austenite con particelle di carburo complesse precipitate negli spazi interdendritici [9]; questa struttura cambia in modo significativo durante l'esercizio, poiché la temperatura più elevata in alcune aree, più vicine ai bruciatori o nella parte inferiore del tubo, provoca la dissoluzione delle particelle di carburo presenti, che costituiscono una barriera ai movimenti delle dislocazioni. Infatti, quasi tutti i pori da creep si formano a seguito della precipitazione di carburi secondari (di cromo e niobio) nella matrice di austenite; le caratteristiche più evidenti possono essere riassunte in termini di coalescenza e ingrossamento dei precipitati interdendritici che portano alla formazione di cricche (fig.4) [13]. La separazione e la diffusione degli elementi di lega nell'interfaccia precipitato/matrice porta alla formazione di regioni depresse che, a loro volta, determinano l'innesco e la crescita dei pori e, in ultima analisi, il creep fragile [14].

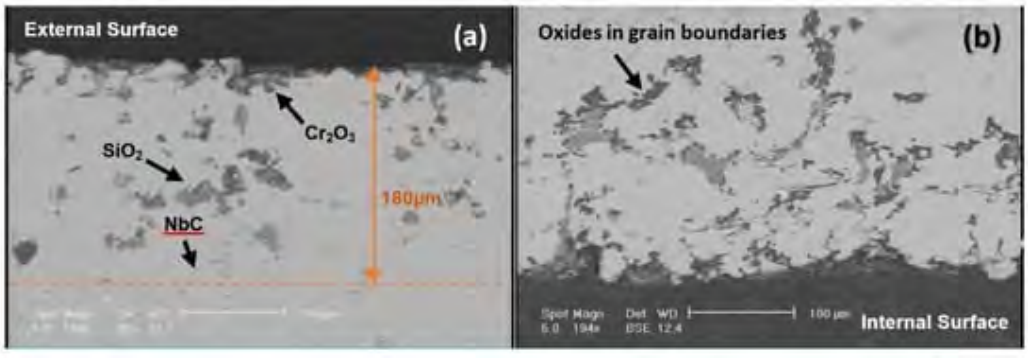


Figura 4. Micrografia di un tubo con ossidi e zone impoverite di cromo: (a) vicino alla superficie esterna; (b) vicino alla superficie interna [14].

Le macrocrepe si formano come risultato della coalescenza delle microcrepe, con un indice di crescita proporzionale alla deformazione, e crescono perpendicolarmente alla direzione della sollecitazione applicata; le crepe si verificano spesso nella fase finale del danno da scorrimento e immediatamente prima della rottura. Lo scenario

di cedimento è quindi schematizzato nelle seguenti fasi: inizio di cavità isolate, cavità allineate e formazione di microcricche accanto a particelle di carburo continue (fig.5).

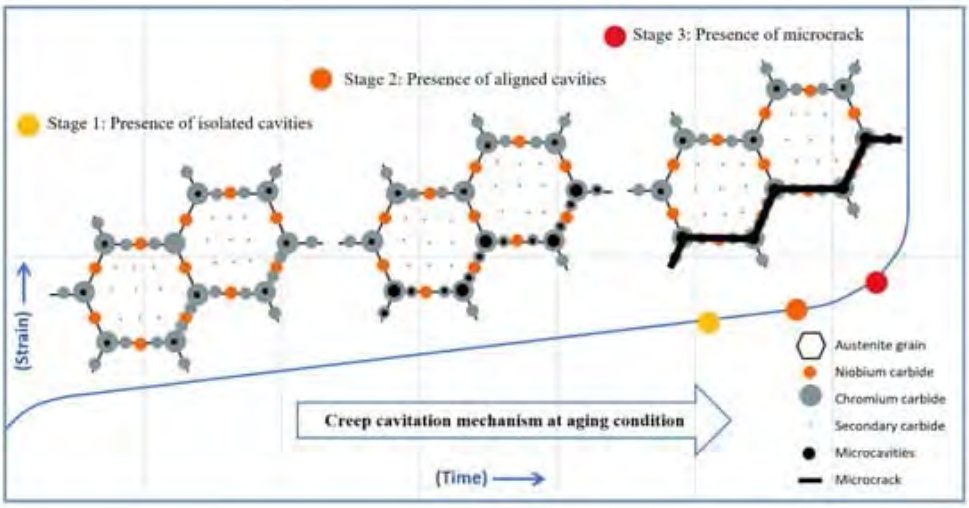


Figura 5. Meccanismo di iniziazione e crescita dei pori di creep durante il servizio [14].

È stato dimostrato quindi che l'innesco e la crescita di pori e microcricche da creep, dipende fortemente dalla morfologia strutturale, di conseguenza sono stati sviluppati materiali con l'aggiunta di titanio alla lega HP-Nb: infatti i tubi contenenti titanio hanno mostrato una maggiore stabilità termica e una maggiore resistenza al creep, dovuta alla formazione di particelle di carburo più fini e discrete [14].

4. Considerazioni finali

Sulla base degli approfondimenti bibliografici e dell'esperienza diretta, vengono sintetizzate alcune osservazioni.
I fattori che possono limitare la funzionalità dei tubi per reforming sono:
- carenze nel materiale in termini di proprietà meccaniche, difetti intrinseci, tolleranze di produzione;
- danni superficiali come decarburazione e carburizzazione;
- danni localizzati sotto forma di cricche o pori;
- surriscaldamento con e senza aumento di pressione.

Il surriscaldamento durante il servizio sembra tuttavia essere il principale responsabile del significativo degrado delle proprietà meccaniche e delle microstrutture, soprattutto nella parte inferiore del tubo. Una causa evidente deriva dalla strozzatura del *pigtail* del tubo; tale strozzatura durante il periodo di avvio, quando non vi è alcuna reazione endotermica all'interno del tubo, può causare il ristagno del flusso, che fa aumentare il tempo di permanenza del gas all'interno. Il soffocamento può essere causato però anche dal catalizzatore danneggiato: per evitare questo tipo di strozzatura, durante la carica è necessario prendere le dovute

precauzioni affinché non vi siano pezzi di catalizzatore rotti o qualsiasi altro materiale esterno.
L'osservazione delle lesioni su tubi danneggiati evidenzia che tutte le aperture sono avvenute sulle facce anteriori, ovvero quelle rivolte all'interno della camera di combustione, dove quindi ci si poteva aspettare temperature più elevate per la presenza dei bruciatori; l'idrogeno, che esce dai tubi lesionati, può fare aumentare a sua volta la temperatura e causare ulteriori danni di una certa entità.
Nel caso in cui i tubi del reformer abbiano subito un surriscaldamento simile durante il servizio, viene raccomandata la loro sostituzione; in alternativa, se le condizioni lo consentono, possono essere reinstallati ruotandoli di 180°.
D'altra parte, durante gli arresti imprevisti, i tubi sono esposti a un rapido raffreddamento che provoca uno stress termico; di conseguenza i tubi invecchiati sono più sensibili all'incremento dei danni microstrutturali da creep, con conseguente diminuzione del ciclo di vita prevista.
In alcuni casi, evidenziati da osservazioni in campo, il danno da creep si presenta come deformazione del diametro interno, non rilevata quindi dall'analisi metallografica. Sebbene la deformazione al momento del cedimento sia variabile (dipende in larga misura dal materiale e dalla storia termica), nella maggior parte dei casi i tubi crescono fino al 10% sulla superficie interna prima del cedimento.
Si noti che la deformazione a rottura sulla superficie esterna è sostanzialmente inferiore a quella interna; infatti, da un approfondimento sui dati rilevati tramite lettura laser esterna dei tubi di un catalizzatore, è emerso che il livello di deformazione da scorrimento era comunque basso e che le misurazioni di variazione del diametro erano influenzate dalle tolleranze di produzione. Si ritiene comunque necessario sostituire qualsiasi tubo che abbia registrato una crescita superiore ad una certa percentuale, inferiore comunque al 10%, indipendentemente dalla causa.
Ai fini della valutazione di vita residua dei componenti, è quindi necessario prendere in considerazione le criticità dovute al fenomeno di ovalizzazione; questo può essere indagato principalmente mediante lettura a mezzo laser del diametro interno ed esterno. Per questo tipo di indagine sono disponibili il metodo LOTIS (Laser Optic Tube Inspection System) [9] [15], che permette appunto la lettura in continuo del diametro interno, e più recente, il metodo MANTIS, che consente il tracciamento esterno dei tubi senza rimuovere il catalizzatore prima dell'ispezione. Si precisa che l'ispezione interna non è soggetta alle incertezze legate ai difetti di fabbricazione, in quanto, grazie alla lavorazione della superficie interna, la tolleranza è molto più stretta; può essere utile, laddove possibile, eseguire un'ispezione esterna prima che i tubi entrino in servizio, così da registrare le tolleranze di produzione ed eliminarle dal calcolo della deformazione da scorrimento.
Se ci soffermiamo sulle metodologie di valutazione della vita residua per l'idoneità al servizio, appare chiaro che i metodi di valutazione tradizionali quali Larson-Miller, non catturano adeguatamente il comportamento specifico delle leghe HP, per le quali, tra l'altro non sono disponibili in ambito normativo i dati di creep. In questi

metodi, vengono inseriti nel calcolo i dati di funzionamento effettivi, e non quelli di progetto: posto che una diminuzione della temperatura di soli 10-15°C comporta un raddoppio della vita di scorrimento, è lecito aspettarsi che un'estrapolazione di Larson Miller con una temperatura di esercizio effettiva, inferiore per esempio di 100°C alla temperatura di progetto (Tes= 850 °C, Tpr= 950 °C), possa comportare una vita utile di lunga durata. Del resto, una grande differenza tra le temperature di progetto e quelle di esercizio determina un'entità della deformazione da creep estremamente bassa, come emerge di fatto dai risultati dei controlli standard.
Alcuni studi propongono una stima del degrado utilizzando un approccio di meccanica della frattura non lineare; la metodologia introduce l'utilizzo di curve caratteristiche per valutare il danno e la vita residua dei tubi del reformer [16]. E' possibile inoltre valutare l'idoneità di ciascun tubo utilizzando una analisi agli elementi finiti (FEA, secondo le linee guida API579 [17]); l'analisi è basata su un modello sviluppato per le comuni leghe HP, facendo riferimento a test di rottura del materiale per scorrimento, condotti in laboratorio su tubi nuovi e invecchiati, convalidati da un'ispezione sul campo di un alto numero di altri tubi di reformer. L'analisi dei dati di ispezione con questa metodologia, basata quindi sulle deformazioni, è coerente quando la vita utile è ancora sufficientemente lunga e si hanno disponibili dati di riferimento o precedenti registrazioni.

5. Conclusioni

Sulla base delle evidenze raccolte, si può indicare che i tubi catalitici sono soggetti a degrado principalmente a causa di una combinazione di scorrimento viscoso (evidenziato dalla deformazione del diametro e dai cambiamenti nella microstruttura della lega) [15] e attacco di carburazione. I requisiti di resistenza alle alte temperature limitano la scelta dei materiali a un gruppo di acciai ad alto contenuto di Ni e Cr, rafforzati da precipitati di carburo e che possono contenere elementi di rinforzo aggiuntivi (Nb e Ti) [10].
Gli utilizzatori, lavorando con processi a ciclo continuo, hanno interesse a mantenere in sicurezza l'esercizio dei tubi del forno per l'intero periodo compreso tra le fermate di manutenzione programmata, e dunque mantenere sotto stretto controllo i parametri che possono esaltare i fenomeni di degrado. L'osservazione e la registrazione di misure e controlli in campo che illustrano l'entità dell'invecchiamento, unita agli studi ed alle prove di laboratorio, tornano utili sia all'industria che al mondo accademico nel trattare queste leghe, offrendo diverse prospettive per effettuare un'analisi comparativa ed indagare le cause dei diversi guasti.
Il calcolo della vita residua risultante può essere utilizzato per valutare il tasso di invecchiamento rispetto alle pratiche operative, pianificare la strategia di sostituzione dei tubi, stabilire gli intervalli di ispezione e valutare il rischio operativo complessivo dell'impianto di reforming.

Bibliografia

[1] A. Alvino, V. Mazzocchi, C. Delle Site, F. Giacobbe, Influenza delle condizioni di esercizio sul degrado di tubi in acciaio per impieghi ad alte temperature nell'industria petrolchimica, Conference: Giornate Nazionali sulla Corrosione e Protezione, 2009

[2] Kazempour-Liasi H., Z. Lalegani, M. Rayatpour. Life Assessment of HP-40Nb Reformer Furnace Tube of a Petrochemical Plant. Strength of Materials, 2021, vol.53 pp. 364-375

[3] Voicu R., Andrieu E., Poquillon D., Furtado J., Lacaze J. Microstructure evolution of HP40-Nb alloys during aging under air at 1000 C. Materials characterization, 2009, 60.9 pp. 1020-1027

[4] A. Alvino, V. Mazzocchi, A.Di Loreto, D. Lega, U. Iglio, D. Ramires, F. Giacobbe, Condizioni di degrado di tubi in acciaio HP grade per impieghi ad alte temperature, Conference: Giornate Nazionali sulla Corrosione e Protezione, 2009

[5] Bonaccorsi L., Guglielmino E., Pino R., Sili A. M., Chiofalo G., De Marco M., & Servetto C. Creep damage and metallurgical characterization of high alloyed reformer tubes after long service time. In ECCC–Creep & Fracture Conference 2014, pp. 1-11. (ECCC-European Creep Collaborative Committee)

[6] I. Le May, T. L. Da Silveira, and C. H. Vianna. Criteria for the evaluation of damage and remaining life in reformer furnace tubes. International journal of pressure vessels and piping, 1996, 66.1-3: 233-241

[7] Tawancy H. M., Ul-Hamid A., Mohammed A. I., Abbas N. M. Failure analysis of catalytic steam reformer tubes. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2005, 52.6 pp. 337-344

[8] Ray A.K., Sinha S.K., Tiwari Y.N., Swaminathan J, Das G., Chaudhuri S., Singh R., Analysis of failed reformer tubes. Engineering Failure Analysis, 2003, pp. 351-362.

[9] A. Alvino, D. Lega, F. Giacobbe, V. Mazzocchi, A. Rinaldi, Damage characterization in two reformer heater tubes after nearly 10 years of service at different operative and maintenance conditions. Engineering Failure Analysis, 2010, 17.7-8, pp.1526-1541

[10] Ul-Hamid A., Tawancy H. M., Mohammed A. R. I., & Abbas N. M.. Failure analysis of furnace radiant tubes exposed to excessive temperature. Engineering Failure Analysis, [11] Circolare ISPESL n.48/2003 "Procedura tecnica su verifiche di calcolo e controlli su componenti in pressione in regime di scorrimento viscoso del materiale"

2006, 13.6 pp.1005-1021

[12] F. Giacobbe, V. Mancuso, M. Lanzani, C. Sampietri, A. Branca, Confronto esito valutazioni sullo scorrimento viscoso di tubazioni in A335 P22 con oltre 200.000 ore di esercizio, Atti del Convegno SAFAP 2010

[13] Alvino A., Ramires D., Tonti A., Lega D. Influence of chemical composition on microstructure and phase evolution of two HP heat resistant stainless steels after long term plant-service aging. Materials at High Temperatures, 2014, 31.1 pp. 2-11

[14] Harandi A. N., Eslami A., Bahrami A., Bakhtafrouz A., Yazdan Mehr M. Failure Analysis of Two HP-Nb Heat-Resistant Tubes after 46,000 h Exposure to Reformer Service Conditions. Metals, 2023, 13.2 pp. 228

[15] Guglielmino E., Pino R., Servetto C., Sili A. Creep damage of high alloyed reformer tubes. In Handbook of materials failure analysis with case studies from the chemicals, concrete and power industries, 2016, pp. 69-91

[16] T.L. Da Silveira, I. Le May. Reformer furnaces: materials, damage mechanisms and assessment. Arabian Journal for Science and Engineering, 2006, 31.2C, pp. 99-119

[17] ASME FFS-1 API 579-1 “Fitness for Service” ed. 2021

L'approccio analitico per la sostituzione, mediante riparazione, di una tubazione munita di liner interno di protezione, facente parte di un sistema di desurriscaldamento vapore: l'esperienza di un Generatore di Vapore a Recupero di un Ciclo Combinato.

P. Traini[1], N. Palumbo[2], F. Rossetti[2]

[1] Enipower Mantova S.p.A.
[2] Inail - Uot di Brescia

Abstract

Un generatore di vapore a recupero dell'Enipower Mantova ha subito il danneggiamento del sistema intermedio di desurriscaldamento vapore di alta pressione, dovuto alla formazione di cricche nelle saldature di collegamento tra liner interno e pipe esterno, con rischio di distacco delle parti.
In seguito all'evento occorso, si è provveduto a sostituire, mediante pratica di riparazione, secondo l'art. 14 del D.M. 329/04, i tratti di tubazione ammalorati.
I nuovi tubi, pur mantenendo le stesse geometrie, materiali e parametri del progetto originale, sono stati oggetto di un accurato e attento studio fluidodinamico (CFD) e agli elementi finiti (FEM), per individuare una configurazione del liner interno in grado di evitare il ripetersi del problema.
La presente trattazione comprende tutto l'excursus del "*case history*", dalla rilevazione dei difetti all'illustrazione degli esiti delle simulazioni analitiche CFD e FEM che hanno individuato la soluzione del liner interno ottimale. Quest'ultima ha costituito la base per l'emissione delle specifiche tecniche e del piano di controllo qualità per la costruzione ed installazione delle nuove membrature di ricambio mediante pratica di riparazione con INAIL UOT di Brescia.

Keywords: Generatore di vapore a recupero, danneggiamento, cricche, riparazione, sistemi di desurriscaldamento vapore.

1. Introduzione

Lo stabilimento produttivo Enipower Mantova S.p.A. è costituito, oltre che da una centrale termica tradizionale a combustione tangenziale del 1971, alimentata a gas naturale, con turbina a vapore in contropressione da 56 MW elettrici in condizioni di esercizio nominali, anche da due Cicli Combinati fabbricati e marcati CE secondo il D. Lgs. n. 93/2000 come Insiemi e denunciati nel 2005 con Dichiarazione di Messa in Servizio ai sensi dell'art. 6, comma 1, del D.M. 329/04. I Cicli Combinati generano, in funzionamento di piena condensazione, 380 MW elettrici ciascuno.

Ogni Ciclo Combinato è costituito da una turbina a gas, alimentata da gas naturale, da 258 MW elettrici in condizioni ISO, da un Generatore di Vapore a Recupero (GVR) a tre livelli di pressione (bassa, media ed alta), con risurriscaldatore di media pressione ed attraversamento fumi orizzontale, da una turbina a vapore a tre stadi da 130 MW elettrici e da un condensatore ad aria (Air Cooled Condenser). Entrambi i cicli combinati lavorano in assetto cogenerativo, esportando vapore surriscaldato, per uso industriale, verso la rete vapore dell'attiguo stabilimento petrolchimico Versalis S.p.A., e per uso civile, verso la rete di teleriscaldamento della città di Mantova.
A completamento delle centrali a ciclo combinato, ci sono poi i servizi ausiliari composti principalmente dalla stazione di filtrazione e riduzione di pressione del gas naturale per le turbine a gas; dal sistema di stoccaggio e pompaggio dell'acqua demineralizzata di reintegro dei cicli; dal sistema di compressione e stoccaggio dell'aria servizi e strumenti; dal sistema a torri del tipo WET DRY per il raffreddamento dell'acqua a ciclo chiuso delle utenze di ciclo da raffreddare; dal sistema di piping di distribuzione del vapore surriscaldato a bassa e a media pressione.
La fig.1 riporta, in sintesi, lo schema di un Ciclo Combinato, con la rappresentazione degli elementi principali che lo costituiscono (ad esclusione dei sistemi ausiliari).

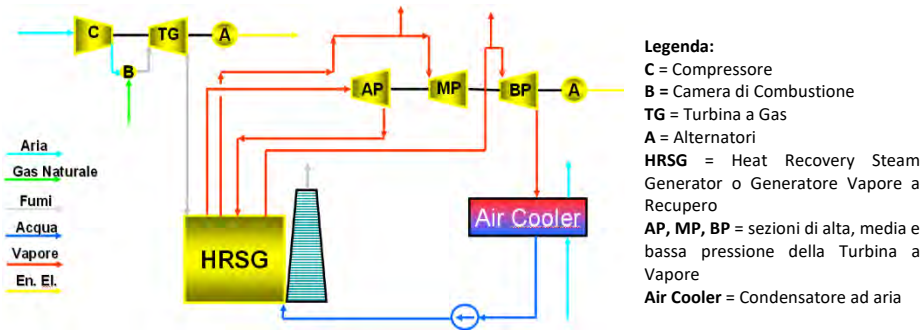


Figura 1. Schema del Ciclo Combinato di Mantova

All'interno del ciclo vapore, il GVR rappresenta il cuore del ciclo combinato, in quanto sfruttando la potenza termica dei fumi di scarico dalla turbina a gas (TG), lo stesso genera poi all'interno di attrezzature a pressione (tubi e recipienti) il vapore surriscaldato per la generazione di potenza della turbina a vapore (TV) e per l'esportazione verso utenze che ne sfruttino la potenza termica per fini impiantistici (petrolchimico e teleriscaldamento). Fatta eccezione per il preriscaldatore di bassa pressione, costruito in acciaio inossidabile, tutte le attrezzature a pressione del GVR (tubazioni, corpi cilindrici, collettori, tubi alettati di scambio, ecc.) sono state fabbricate in acciaio al carbonio, acciaio legato P22 e acciaio martensitico P91. La fig.2 riporta lo schema delle parti in pressione dei GVR con i relativi materiali di costruzione.

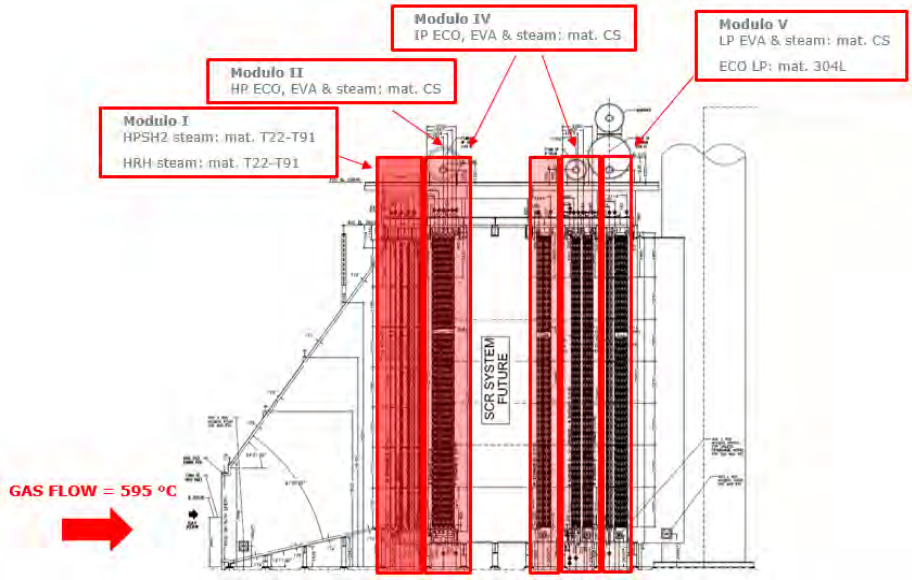


Figura 2. Schema delle parti in pressione dei GVR Enipower Mantova S.p.A. (vista in sezione longitudinale)

La presente trattazione riguarda il danneggiamento occorso ai liner interni di protezione delle tre tubazioni vapore di collegamento tra i banchi HPSH1 ed HPSH2 del GVR, la loro analisi per l'investigazione del meccanismo di danno agente e la conseguente sostituzione con tubi nuovi, ma con design del liner interno migliorativo e maggiormente resistente alle sollecitazioni termiche. Nella fig.3, è stata evidenziata la posizione dei tre componenti oggetto della presente trattazione, deputati dal punto di vista funzionale a convogliare il vapore surriscaldato dal banco HPSH1 al banco HPSH2, raffreddandolo tramite iniezione di acqua per raggiungere il set point di temperatura del vapore. I liner interni di protezione, e le loro saldature di collegamento al tubo esterno, si sono danneggiate proprio in corrispondenza della zona di ingresso dell'acqua di raffreddamento vapore, causandone in un caso il distacco dalla tubazione.

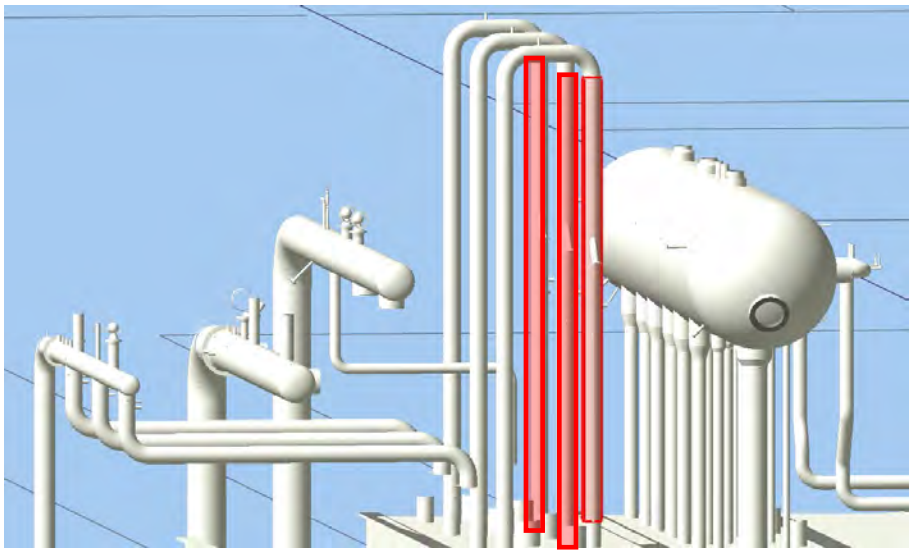


Figura 3. Posizione di una delle tre tubazioni con liner interni tra HPSH1 e HPSH2

Dal punto di vista certificativo, i tubi incamiciati sono inseriti all'interno della sezione HP e quindi del GVR come membrature a pressione, progettate secondo la raccolta ISPESL VSG rev. 95 ed. 1999.
Al fine di poter essere commercializzato, a sua volta il GVR, composto oltre che dai tre tubi incamiciati anche da altre membrature e attrezzature a pressione marcate CE e non, tra loro collegate per costituire un tutto integrato e funzionale, è stato nella sua interezza sottoposto ad una procedura globale di valutazione di conformità alla direttiva PED, per essere poi marcato CE, come Insieme, mediante l'attestazione di conformità di un Organismo Notificato.

2. Il danneggiamento e la sostituzione dei "tubi incamiciati": dallo studio CFD e FEM alla soluzione tecnica applicata

Nei paragrafi successivi, verrà ripercorsa la vicenda dal punto di vista della trattazione tecnica, dai rilievi dei difetti sino all'individuazione e alla scelta della migliore soluzione ingegneristica intrapresa per la sostituzione dei tre tubi danneggiati, al fine di raggiungere un livello globale di sicurezza ed affidabilità superiore agli originari.

2.1 Gli esiti delle ispezioni endoscopiche e la possibile causa del fenomeno

Di seguito si riportano i dati caratteristici dei componenti danneggiati:
Materiale tubazione esterna: ASTM A335 P22;
Materiale liner interno: ASTM A335 P22;
Materiale piastre da tubo: ASTM A335 P22;
Diametro esterno tubazione esterna: 273 mm;
Spessore nominale tubazione esterna: 25,4 mm;
Diametro esterno tubazione interna: 216 mm;
Spessore nominale tubazione interna: 6 mm;
Sovraspessore corrosione: 0 mm;
Temperatura di esercizio in/out: 490/430 °C;
Pressione di esercizio: 90 bar;
Temperatura di progetto: 502 °C;
Pressione di progetto: 131 bar;
Fluido: Vapore d'acqua surriscaldato.

Nelle figure successive sono riportati i disegni della tubazione incamiciata originale ed i dettagli degli accoppiamenti del liner al tubo mediante piastre saldate ad angolo e dei tondini interni saldati al liner per permettere il suo scorrimento.

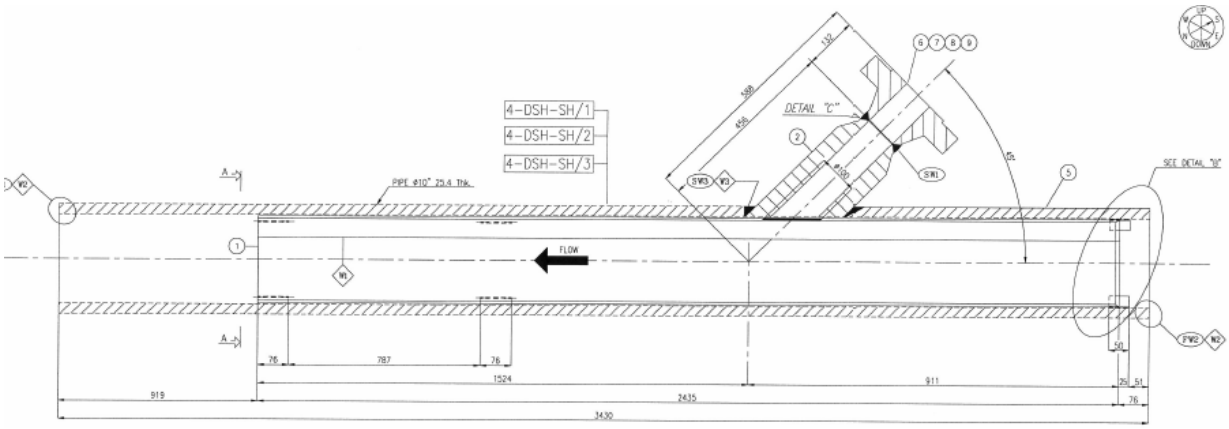


Figura 4. Disegno costruttivo della “tubazione originale” con liner interno

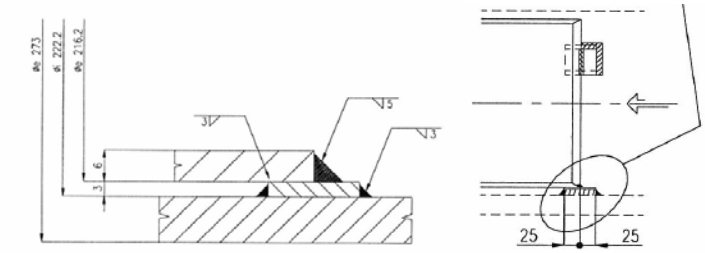


Figura 5. Dettaglio dell’accoppiamento mediante piastra saldata tra liner e “tubazione originale”

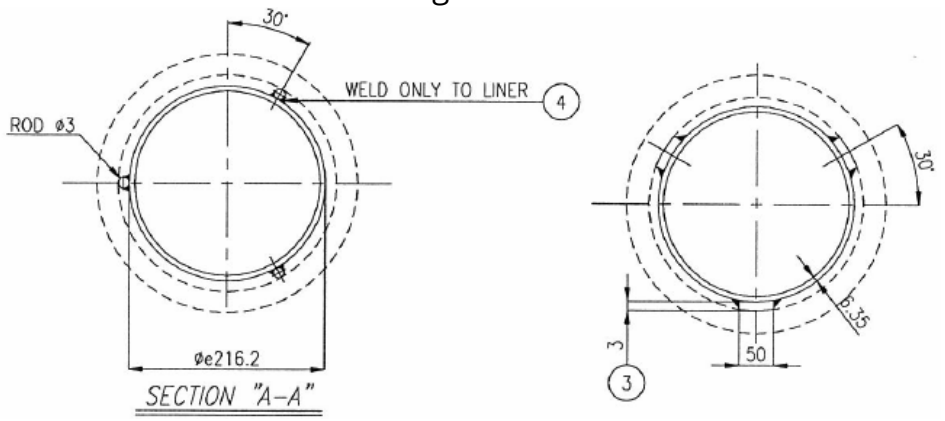


Figura 6. Dettagli delle piastre di collegamento e tondini di scorrimento del liner della “tubazione originale”

Durante una campagna ispettiva di controlli non distruttivi eseguiti sul GVR, in seguito ad alcune segnalazioni pervenute da altri siti della flotta Enipower, sono state effettuate delle indagini con video-endoscopio all’interno delle tre tubazioni.
Le endoscopie hanno rilevato indicazioni riconducibili a cricche, di lunghezza variabile, alcune anche molto estese, sia sulle saldature di collegamento tra liner e tubazione esterna, sia sul materiale base del liner stesso (figg. 7 e 8).



Figura 7. Punto di ingresso per l'endoscopia interna della tubazione

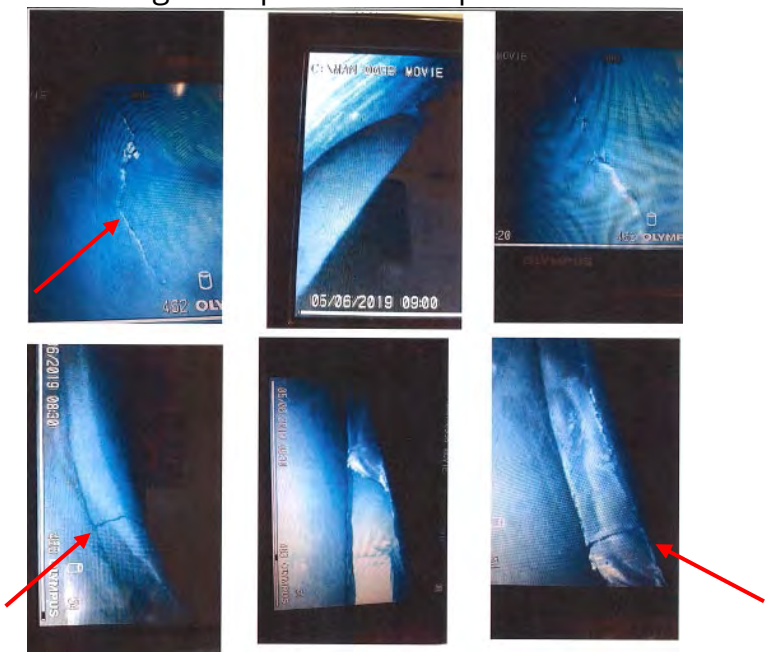


Figura 8. Esame visivo con video-endoscopio del liner interno e delle sue saldature alla tubazione esterna: presenza di cricche

La collocazione delle cricche (in corrispondenza delle saldature tra liner interno e tubazione esterna) ha fatto pensare ad un fenomeno di fatica termica indotto dalle particolari condizioni operative a cui è soggetto il componente. Il design dell'ancoraggio del liner alla tubazione, soggetto a stati di tensione variabili nel tempo ed in alcuni punti con magnitudo amplificate (ad es. sulle saldature piastra-liner-tubo), non è apparso idoneo e sufficientemente robusto e duraturo.
A valle delle ispezioni condotte e dei relativi rilievi, è stato programmato ed eseguito un intervento di sostituzione dei tre tubi danneggiati, chiedendo il benestare all'intervento all'INAIL UOT di Brescia mediante la presentazione di un progetto di riparazione migliorativo rispetto a quello originario ed i cui contenuti verranno illustrati nei paragrafi successivi. Le tre tubazioni nuove incamiciate sono state

costruite secondo il progetto di riparazione approvato dall'INAIL UOT di Brescia e sotto la supervisione dell'INAIL UOT di Milano, dipartimento territorialmente competente della sede della ditta meccanica in cui sono state costruite le membrature. L'installazione presso la sede dell'utilizzatore e riparatore Enipower Mantova è avvenuta invece sotto l'egida sempre della UOT di Brescia.

2.2 Il progetto "migliorativo" di riparazione dei tre tubi con liner interno

La configurazione della nuova tubazione munita di liner interno, che ha costituito il progetto per la costruzione delle nuove tubazioni incamiciate e la relativa sostituzione eseguita sul GVR, ha mantenuto inalterati dati di progetto, geometria e materiali rispetto a quella originaria, ma sono stati migliorati gli accoppiamenti saldati interni, nonché alcuni accessori, sempre interni, come di seguito descritto.
Di seguito si riportano i dati caratteristici dei componenti nuovi:
Materiale tubazione esterna: ASTM A335 P22;
Materiale liner interno: ASTM A335 P22;
Materiale piastre da tubo: ASTM A335 P22;
Diametro esterno tubazione esterna: 273 mm;
Spessore nominale tubazione esterna: 25,4 mm;
Diametro esterno tubazione interna: 219,1 mm;
Spessore nominale tubazione interna: 18,26 mm;
Sovraspessore corrosione: 0 mm;
Temperatura di esercizio in/out: 490/430 °C;
Pressione di esercizio: 90 bar;
Temperatura di progetto: 502 °C;
Pressione di progetto: 131 bar;
Fluido: Vapore d'acqua surriscaldato.

Nelle figg. 9-12, è rappresentato il disegno complessivo della "nuova tubazione di progetto", nonché i seguenti particolari:

a) Il liner interno, costituito sempre da tubo in P22, è stato scelto con uno spessore maggiore ed un diametro interno inferiore rispetto al progetto originale, al fine di utilizzare un tubo commerciale ed evitare lamiere calandrate e saldate, oggetto di ulteriori potenziali punti deboli (fig. 9).
b) I pins di centraggio del liner interno sono stati realizzati in modo tale da migliorare la rigidezza di fissaggio, nonché lo scorrimento del liner interno, con diminuzione di effetti di impuntamento e di vibrazioni (fig. 10).
c) Il fissaggio del liner alla tubazione esterna, prima realizzato mediante semplici piastre saldate con saldature ad angolo, con la nuova configurazione è stato effettuato mediante membrana saldata a 360°C, con placcatura finale in Inconel di spessore 2 mm (figg. 11-12).

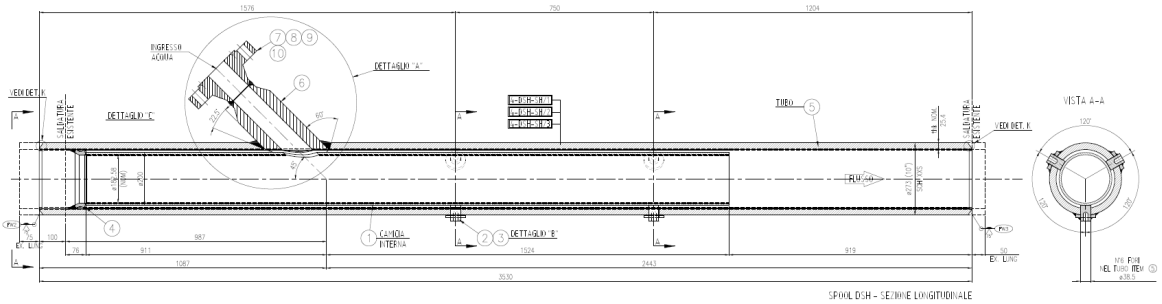


Figura 9. Disegno della "nuova tubazione di progetto" con liner interno migliorativo

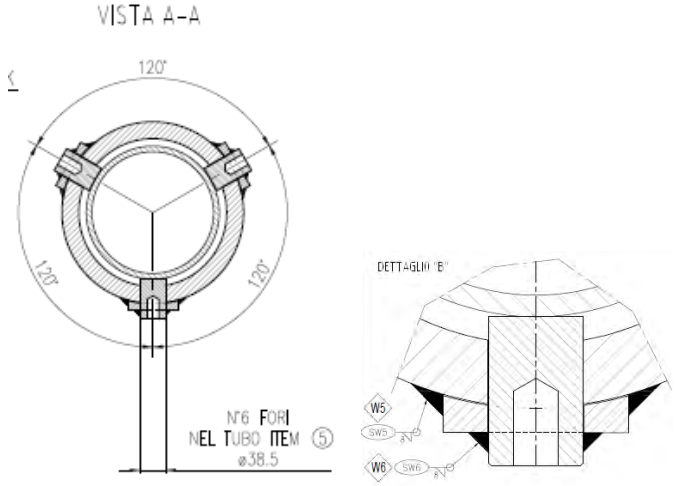


Figura 10. Particolare dei pins di scorrimento del nuovo liner della "nuova tubazione di progetto"

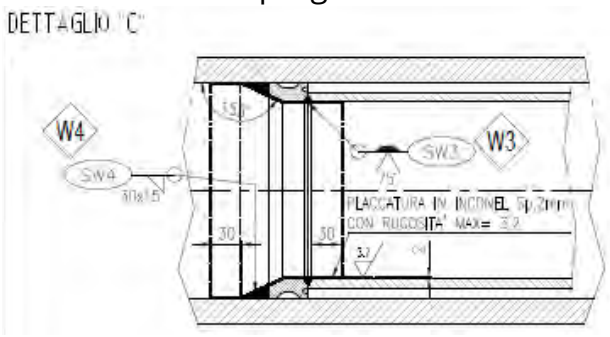


Figura 11. Particolare saldatura della nuova membrana di fissaggio liner alla "nuova tubazione di progetto"

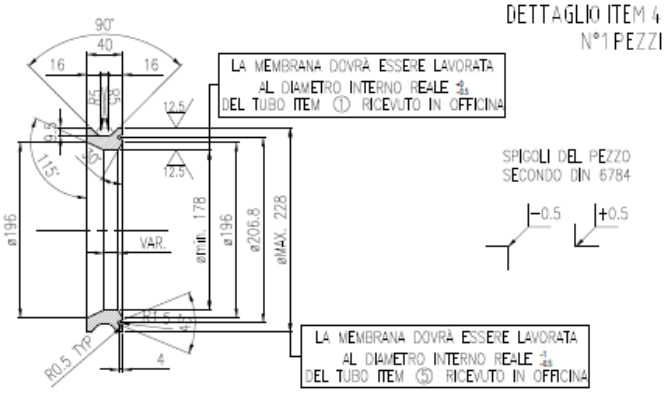


Figura 12. Particolare della nuova membrana di fissaggio del liner alla "nuova tubazione di progetto"

La scelta dei particolari su descritti per il progetto esecutivo è scaturita ed è stata validata da uno studio fluidodinamico del tipo CFD e agli elementi finiti FEM, confrontando il "nuovo progetto" delle figg. 9-12, con una "soluzione intermedia" rappresentata nelle figg. 13-14.

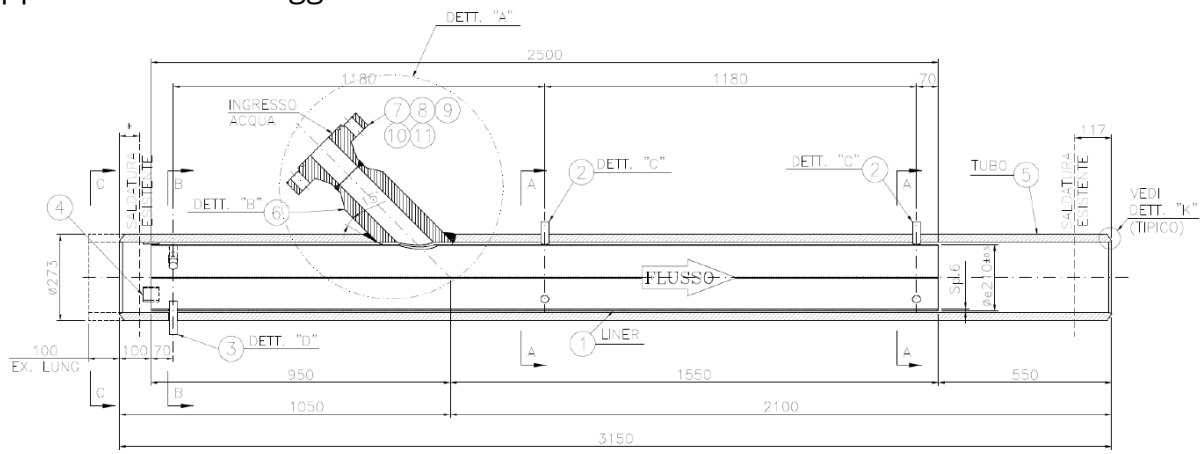


Figura 13. Disegno della "tubazione intermedia"

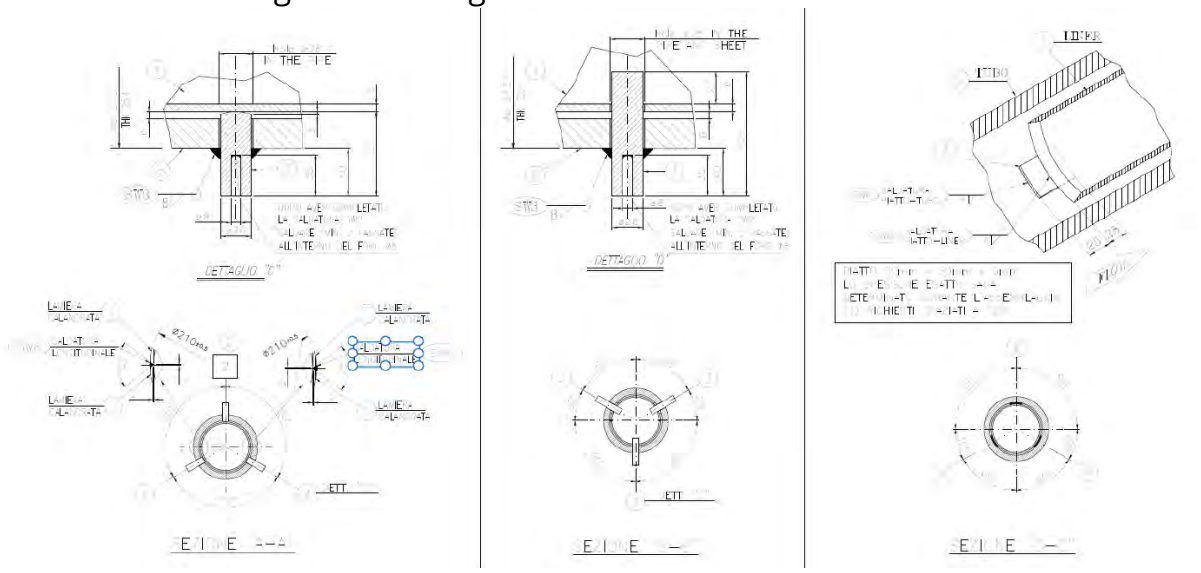


Figura 14. Particolari della Disegno della "tubazione intermedia"

Per entrambe le soluzioni, all'interno della linea vapore viene iniettata, mediante valvola desurriscaldatrice, acqua surriscaldata ad elevata pressione con l'obiettivo di ridurre la temperatura del fluido all'interno della linea vapore. Il fenomeno di miscelazione dei due flussi è stato studiato mediante una simulazione stazionaria monofase, elaborando delle ipotesi semplificative, ma robuste funzionalmente, della fisica del modello, per tenere in considerazione l'aspetto multifase della miscelazione. Pertanto, sono stati adottati due differenti approcci per simulare la condizione di ingresso della portata di acqua dovuta all'iniettore: il primo approccio è basato sulle equazioni della conservazione della massa, ipotizzando che l'acqua iniettata abbia già raggiunto lo stato di vaporizzazione (quindi la densità utilizzata per il calcolo della velocità è stata posta pari allo stesso valore della densità del vapore che attraversa la linea); il secondo approccio è basato sull'equilibrio dell'equazioni di Bernoulli tra

ingresso e uscita dell'iniettore (in questo approccio per valutare la velocità di uscita dell'acqua dall'iniettore si è utilizza la densità dell'acqua e la pressione di iniezione dell'acqua surriscaldata).
Inoltre, sono stati considerati due differenti domini di controllo per il calcolo CFD, utilizzando due tipologie di discretizzazione. Il primo modello geometrico è stato realizzato considerando la geometria della parete interna del condotto oggetto di analisi. Il secondo modello geometrico invece ha considerato anche la "cavity", ossia l'intercapedine che si realizza tra pipe interno (inner pipe) e pipe esterno (outer pipe). Il secondo approccio permette di valutare anche fenomeni locali del comportamento dei fluidi.
Infine, gli output delle simulazioni CFD sono stati utilizzati come dati di input per il calcolo FEM. In particolare, sono stati utilizzati i campi di temperatura sulle superfici di parete dei vari componenti, considerando le condizioni di simulazione più conservative.
I campi termici di parete CFD hanno permesso una precisa simulazione FEM per determinare il campo termico che si instaura nel outer pipe, nell'inner pipe e nelle connessioni tra questi due elementi (piatto saldato e sealing membrane).
È stata fatta una verifica degli stress sia in condizioni di design che operative per entrambe le soluzioni, utilizzando ASME VIII. Div.2 par 5.2. Il confronto tra le due soluzioni è stato analizzato anche dal punto di vista della fatica, usando ASME VIII div.2 parte 5.5.3.
È stata analizzata anche la possibilità di utilizzo del materiale SA-240 SS316L vs SA-387 Gr22 Cl2 per quanto riguarda la camicia interna (inner pipe).
La figura 15 rappresenta le griglie di discretizzazione utilizzate per le diverse simulazioni CFD. In particolare, la soluzione "intermedia" e di "progetto" si differenziano solo per quel che riguarda il dettaglio di modellazione dalla cavità presente tra inner pipe (camicia) e outer pipe. Mentre nella soluzione "intermedia" è presente una cavità di tipo aperto, nella soluzione di "progetto" la cavità è di tipo chiusa.
Le mesh realizzate hanno una densità tale da garantire accuratezza dei risultati e residui ridotti sulle variabili calcolate.

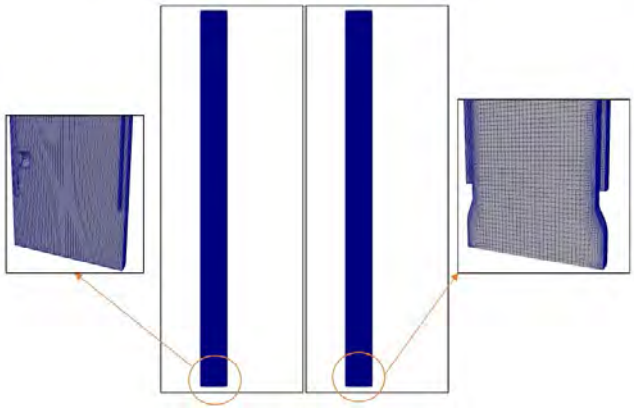


Figura 15. Mesh modello della cavità: aperta a sx per la soluzione "intermedia", chiusa a dx per quella "di progetto"

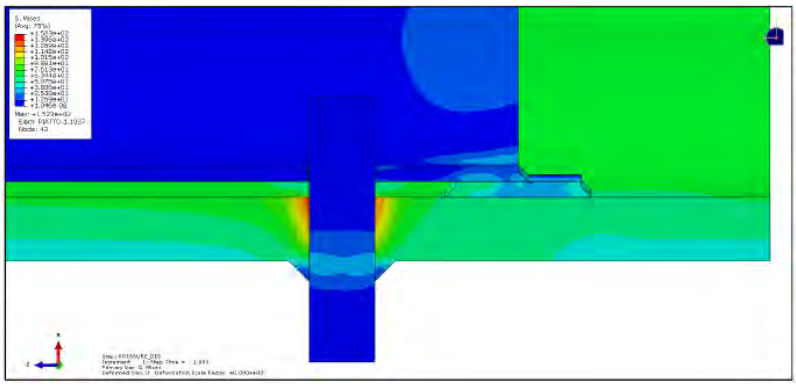


Figura 16. Dettaglio VM stress sul piatto saldato modello “intermedio”

Per l’analisi CFD, è stato utilizzato il solutore “rhoSimpleFOAM”, un solutore generico stazionario per flussi turbolenti e compressibili. In accordo al metodo dei volumi finiti (FVM) le equazioni che governano il moto del fluido sono state integrate su tutto il volume di controllo. Le equazioni integrali sono state discretizzate in equazioni lineari algebriche. Le simulazioni CFD sono state svolte adottando un modello di turbolenza “standard k-epsilon”, modello generico per applicazioni industriali.
Di seguito sono riportate le immagini della mesh numerica per i calcoli termici e strutturali per le due diverse soluzioni “intermedia” e “di progetto” analizzate, nonché le mesh dei dettagli dei due differenti accoppiamenti interni. La mesh è stata sottoposta ad un’analisi di sensitività per verificare la bontà di calcolo e la stabilità dei risultati ottenuti.

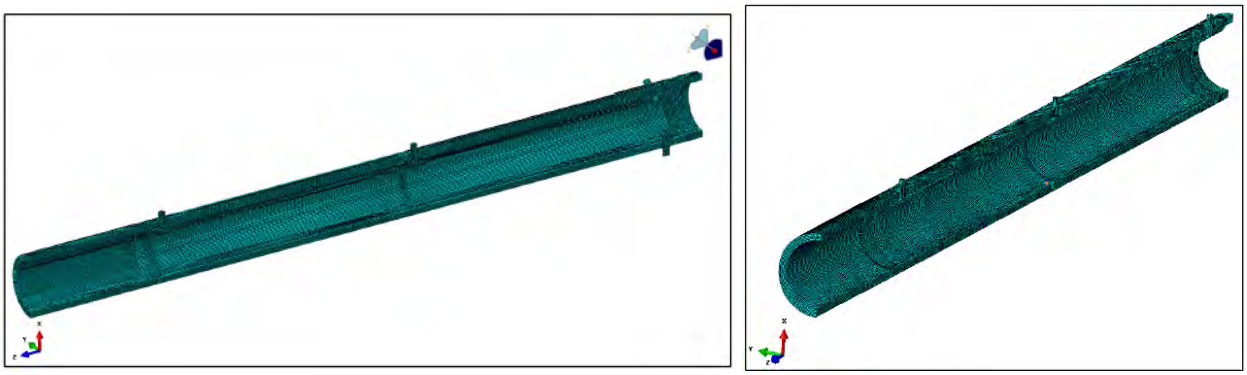


Figura 17. Mesh globale modello “intermedio” cavity aperta (sinistra) e modello “di progetto” cavity chiusa (destra)

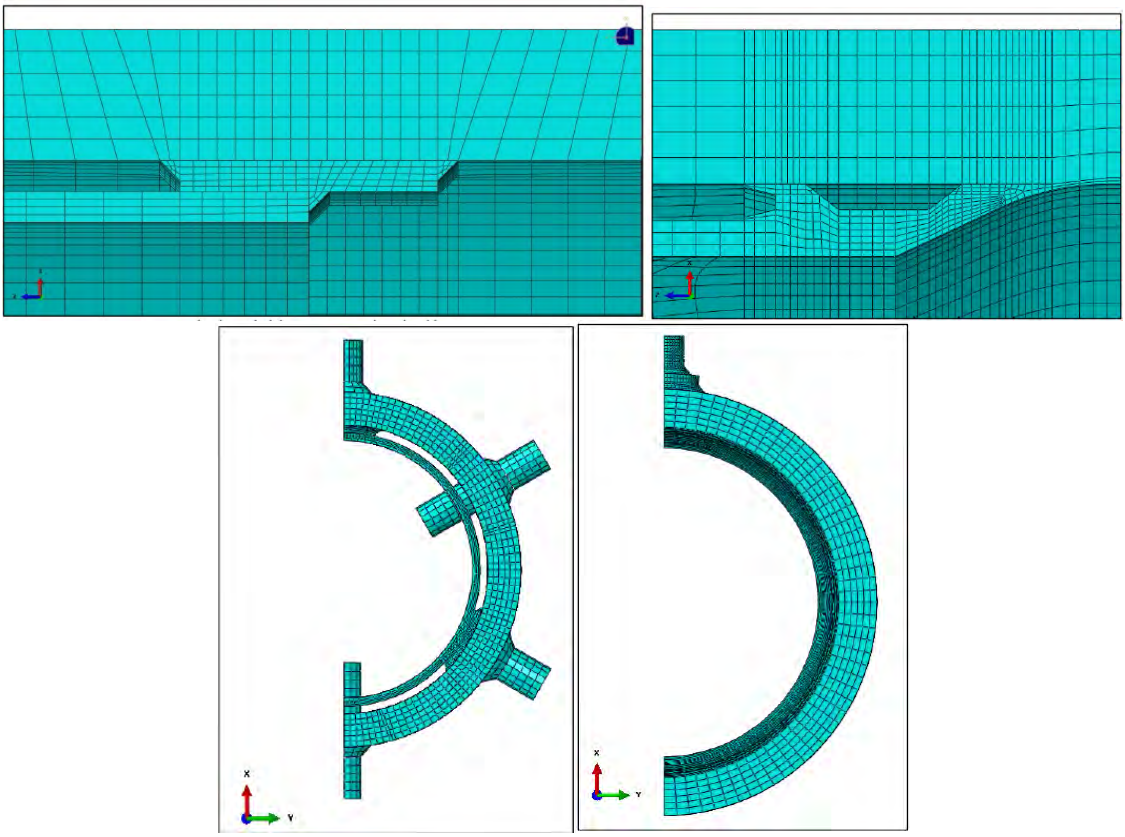


Figura 18. Dettagli di mesh del piatto saldato aperto di collegamento del liner interno per il caso “intermedio” a sinistra e della membrana saldata chiusa per il caso di “progetto” a destra

È stata eseguita un’analisi del potenziale uso del materiale SA-240 SS316L in sostituzione del SA-387 Gr.22 Cl.2., relativo ai piatti saldati e all’inner pipe. Come si evince dai valori di ratio degli stress secondari rispetto all’ammissibile, le path relative ai piatti saldati hanno dato un valore di ratio maggiore di 1. Ciò è imputabile alla rilevante differenza del coefficiente di espansione termica tra i due materiali che produce un elevato stress termico nei casi operativi. Per questo motivo l’ipotesi di piatti interni e inner pipe in AISI 316L è stata scartata.
È stata condotta un’ampia indagine di funzionamento e confronto tra due soluzioni per il tubo desurriscaldatore incamiciato: tipo “intermedio” (molto simile a quello utilizzato nell’impianto e oggetto dei difetti) e “di progetto”.
L’indagine sui due diversi casi è stata condotta innanzitutto da un punto di vista fluidodinamico, per valutare la distribuzione delle temperature di parete, da usare nel successivo step per il calcolo degli stress di tipo operativo.
Dai risultati delle simulazioni CFD si denota che quantitativamente il comportamento globale delle due soluzioni “intermedio” e “di progetto” è sostanzialmente comparabile, in quanto i differenziali termici sono simili. Tale risultato viene confermato anche dalle analisi delle sollecitazioni di tipo operativo. Le due soluzioni si differenziano per gli effetti locali dovuti al comportamento del fluido all’interno della cavità. La cavità della soluzione “intermedia” è una cavità aperta in cui fluisce per tutta

la sua estensione longitudinale una parte del vapore che contribuisce allo scambio termico tra la parete interna e la parete della tubazione in modo convettivo e pertanto più efficiente. Questo favorisce una distribuzione più uniforme del campo di temperatura sulla tubazione della linea. La soluzione "di progetto" invece presenta una cavità di tipo chiuso in cui il campo di velocità è pari a zero. Ciò implica che il vapore all'interno della cavità chiusa è praticamente fermo, essendo la zona della *sealing membrane* una zona di ristagno del fluido e ciò implica che il fenomeno di scambio termico tra inner pipe e outer pipe avviene sostanzialmente per conduzione. Poiché per un fluido lo scambio termico conduttivo è molto meno efficiente dello scambio termico convettivo, la tubazione presenta una zona più "fredda" nella zona centrale, che si uniforma nuovamente a valle della zona di ristagno. Come però già detto in precedenza, questo fenomeno è quantitativamente del tutto ininfluente ai fini del comportamento globale del due soluzioni proposte.
È stata inoltre valutata la funzionalità della soluzione "intermedia" con diametro dell'inner pipe minore, aumentando l'altezza radiale della "cavity". Ciò, comporta un miscelamento peggiore del vapore, aumentandone la temperatura di uscita, poiché diminuisce la portata di vapore miscelata ed aumenta la portata non miscelata nella zona della "cavity".
Nella soluzione "di progetto", diminuendo il diametro della camicia, la miscelazione è efficiente alla stessa maniera in quanto tutto il fluido passa all'interno dell'inner pipe.
I risultati ottenuti dalla simulazione CFD nella zona di miscelamento potrebbero aver sottostimato localmente il gradiente termico reale, per tale motivo si otterrebbe una flessione maggiore del tubo interno. Nella soluzione "intermedia" i perni posti radialmente a 120° e le piastre di collegamento sarebbero maggiormente sollecitate rispetto alla soluzione di "progetto", in quanto in quest'ultima il carico verrebbe assorbito da una maggiore sezione resistente della membrana circonferenziale di attacco dell'inner pipe. Tra l'altro la configurazione flessibile della membrana, permette oltre che una migliore distribuzione dei carichi tra i perni, anche una più uniforme distribuzione dei carichi a tutta la tubazione, con ratio di utilizzo più bassi.
Considerando gli stress linearizzati nella condizione di design, nonostante entrambe le soluzioni siano accettabili, la soluzione "intermedia" ha un valore di ratio dello stress membranale locale maggiore rispetto a quelli registrati localmente nella soluzione "di progetto" con la *sealing membrane* (0.95 rispetto a 0.72).
L'analisi di confronto tra SA-387 Gr22 Cl2 e SA-240 SS316L per piatti/membrana e per l'inner pipe, ha escluso l'utilizzo dell'AISI, dovuto al fatto che per l'elevata differenza tra i coefficienti di espansione termica insorgono tensioni termiche rilevanti, con valori di ratio tra gli stress secondari e l'ammissibile superiori a 1.
L'analisi FEM ha inoltre mostrato come il tubo interno sia praticamente per nulla sollecitato sia in condizioni di design che operative. Gli stud che lo distanziano hanno pressioni di contatto per nulla rilevanti; pertanto, il numero e la distanza tra essi non influenza la soluzione.

La verifica a fatica ha mostrato come la soluzione “di progetto” sia migliore rispetto a quella “intermedia”, in quanto il numero di cicli limitante per la prima è 262.482 (limitante nella saldatura tipo fillet dei perni radiali) rispetto a 35.484 cicli per la seconda (nella saldatura fillet del piatto saldato). Anche l’analisi a fatica ha escluso l’utilizzo del materiale SA-240 SS316L per tale applicazione.
In definitiva, tra le due soluzioni, considerando i più favorevoli stress membranali locali nel caso design e la verifica a fatica nella saldatura fillet del piatto che collega l’inner tube con l’outer tube, si è scelta come migliorativa quella “di progetto”, con i dettagli sopra illustrati.

3. Conclusioni

Il presente lavoro ha voluto illustrare l’approccio critico con cui la società Enipower Mantova, a fronte di un problema rilevato su un componente critico di impianto, ha effettuato tutte le analisi di campo e numerico-sperimentali per individuare i punti deboli che hanno causato la *failure*, e quindi la migliore soluzione ingegneristica in termini di sicurezza, affidabilità e durabilità per la sostituzione del componente.

Nel caso specifico, la rottura dell’inner pipe di una tubazione di desurriscaldamento vapore di un GVR è stata addotta principalmente alla povertà ingegneristica e costruttiva delle piaste di collegamento tra i due tubi. Un’analisi di tipo CFD e poi FEM, ha permesso di confrontare due diverse soluzioni e di scegliere quella ingegneristicamente più robusta e duratura, anche al fenomeno della fatica, escludendo l’acciaio inossidabile per alcuni componenti e migliorando alcuni dettagli e particolari costruttivi. La soluzione implementata è stata oggetto di esame progetto di riparazione a cura dell’Inail UOT di Brescia ed è stata costruita come membratura di ricambio col supporto dell’Inail UOT di Milano.

Bibliografia

[1] Decreto Ministeriale n. 329 del 01/12/2004 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93."
[2] Lettera circolare dell’ISPESL n. 14/05 “Applicazione del D.M. 329/04 di attuazione dell'Art 19 del D. Lgs. 93/2000 – Chiarimenti e precisazioni sulle “Riparazioni”.
[3] Lettera circolare dell’ISPESL n. 161/07 “Procedura specifica per la riparazione, mediante sostituzione di membrature di ricambio, di una attrezzatura a pressione – Rifer. Circolare ISPESL n. 14/05”.

Importanza della "preparedness" nella gestione degli eventi Natech nell'ambito degli stabilimenti PIR

F. Geri[1], S. Pantanella[1], C. Raimondo[2] E. Sampino[2], S. Tafaro[3]

[1] Presidenza del Consiglio dei ministri, Dipartimento della Protezione Civile
[2] Raffineria di Milazzo (ME)
[3] Comandante Provinciale Vigili del Fuoco di Catania

Abstract

Nell'articolo viene esplicitata la modalità di realizzazione dell'esercitazione per la gestione di eventi Natech in uno stabilimento PIR, definendo le attività, predisposte ed attuate secondo un approccio graduale, che il gestore in concorso con le Autorità, ha predisposto per la gestione operativa del rischio Natech generato da sisma e da relativo tsunami. Le attività sono declinate nell'ambito di indirizzi nazionali derivanti dal Programma nazionale per il soccorso sismico, nell'ambito della c.d. funzione rischi indotti "Natech" prevista nel programma nazonale. Le attività hanno riguardato la interazione di piani di emergenza interna con le procedure di intervento del sistema di protezione civile, l'attuazione di procedure operative e la loro validazione attraverso l'attività esercitativa, la verifica dell'attività operativa di gestione dei punti critici di impianto con particolare riferimento ai potenziali *loss of containment* (LOC). Dette attività si sono svolte tenendo conto di condizionalità «sistemiche» legate alla forzante di rischio sismico, quali il black out elettrico e la riduzione dell'accessibilità all'area di stabilimento per danni alla rete di trasporto.

Keywords: preparazione, previsione, prevenzione, gestione, rischio indotto, rischio Natech, perdita di contenimento, attività addestrativa nazionale, servizio nazionale di protezione civile, sistema di allerta maremoti, comitato operativo, direzione di comando e controllo.

1. Introduzione

La identificazione e definizione delle modalità di integrazione della gestione interna allo stabilimento con le attività di gestione territoriale di protezione civile in caso di forzanti naturali (sisma, tsunami, alluvione, ecc) che generano eventi NaTech, può rendere più efficace la risposta e la gestione del rischio, a seguito sia di una corretta individuazione ed analisi di fattori interni ed esterni allo stabilimento stesso sia di una loro integrazione per una gestione coordinata della risposta stessa. Tra i fattori salienti considerati nella fase di "preparazione" per il rischio natech generato da una calamità naturale vi sono: individuazione dei principali elementi critici di impianto da cui possono originare perdite di contenimento (LOC) e relative tipologie e quantità rilasciate, il livello di preparazione degli operatori addetti all'emergenza nella gestione

di attività nell'ambito di uno scenario Natech, i sistemi di allerta e per l'attivazione delle procedure di emergenza, i mezzi di comunicazione con le strutture esterne, eventuali indisponibilità dei sistemi di soccorso esterni.

2. Il Programma nazionale per il soccorso in caso di evento sismico

Il Programma nazionale di soccorso persegue l'obiettivo del coordinamento e della direzione unitaria dell'intervento del Servizio nazionale della protezione civile, fornendo gli indirizzi per la predisposizione delle pianificazioni di emergenza, per quanto di rispettiva competenza, del Dipartimento della protezione civile e delle componenti e delle strutture operative del Sistema nazionale di protezione civile. La Direttiva (DPCM 14/01/2014) fornisce indicazioni per la redazione della pianificazione dell'emergenza dal livello nazionale al livello regionale e locale, per assicurare:
1)capacità di allertamento
2)capacità di attivazione
3)capacità di intervento
del servizio nazionale della protezione civile in caso di evento sismico.
La direttiva del Presidente del Consiglio dei ministri del 3 dicembre 2008, concernente «indirizzi operativi per la gestione delle emergenze», presupposto indispensabile per assicurare l'ottimizzazione della capacità di allertamento, attivazione e intervento del Servizio nazionale della protezione civile, stabilisce che la prima risposta ad eventi emergenziali deve essere garantita, in modo quanto più immediato, dai sistemi locali di protezione civile, a meno di eventi catastrofici che ne annullino la prima capacità di reazione. Nell'ottica propria della protezione civile, il carattere resiliente va perseguito, ai diversi livelli territoriali e istituzionali, nella strutturazione dei sistemi di protezione civile e nella predisposizione dei relativi strumenti di pianificazione dell'emergenza.
I Piani nazionali per rischio sismico si compongono di una prima parte, che definisce la Struttura organizzativa nazionale, e di una seconda parte, che riporta l'Organizzazione di
protezione civile e gli elementi conoscitivi del territorio, definiti su scala regionale. La gestione di una emergenza può essere vista come un sistema la cui identità è connessa all'unitarietà di comportamento rispetto all'ambiente esterno, devastato da uno scenario di danno e si concretizza nell'attivazione sinergica delle funzioni di supporto ai vari livelli territoriali. Le «funzioni di supporto» rappresentano raggruppamenti omogenei di attività con la cui sinergia è possibile risolvere problemi complessi ed è, di fatto, l'applicazione del principio dell'auto-organizzazione di un sistema complesso.

2.1 La funzione "Rischi indotti"

Nell'ambito della gestione di una emergenza nazionale, la funzione "rischi indotti" si occupa del raccordo operativo per le attività di raccolta, verifica ed analisi dei dati di carattere tecnico-scientifico relativi ai possibili altri rischi conseguenti agli effetti dello

scuotimento sismico. Cura, inoltre, le previsioni meteo. La Funzione coordina gli accertamenti tecnici per la valutazione dei rischi indotti, effettuati in collaborazione con le altre Funzioni di supporto competenti, con l'Amministrazione regionale, il Distretto idrografico, con i Comuni interessati e con i Centri di Competenza del Dipartimento della Protezione Civile e con i consigli degli ordini professionali, anche per definire gli interventi di mitigazione e di ripristino, in forma integrata con la Funzione Tecnica e di Valutazione, in particolare per il ripristino delle strutture e delle infrastrutture danneggiate. La raccolta dei dati di interesse tecnico scientifico in emergenza avviene in contatto con il Centro Funzionale Centrale cui si trasferiscono, ove necessario, i dati raccolti per le successive elaborazioni. La tematica meteo tratta la realizzazione di previsioni di dettaglio, nell'ambito delle attività più generali del Sistema di allertamento nazionale, riferite all'area d'impatto dell'evento. A seguito di un evento sismico, la funzione si occupa di curare la gestione degli effetti Natech sugli impianti PIR. In particolare verifica eventuali effetti sugli impianti, l'attuazione dei controlli prescritti dalla normativa sugli stabilimenti a rischio di incidente rilevante con le Prefetture-UTG, anche a seguito del verificarsi di ulteriori successivi eventi sismici di intensità significativa. Ove richiesto, provvede a individuare i tecnici competenti per il supporto in dette verifiche, nonché per la valutazione del rischio residuo. Verifica l'eventuale necessità di messa in sicurezza sul luogo dell'evento e l'adozione delle misure di contenimento dei rischi.

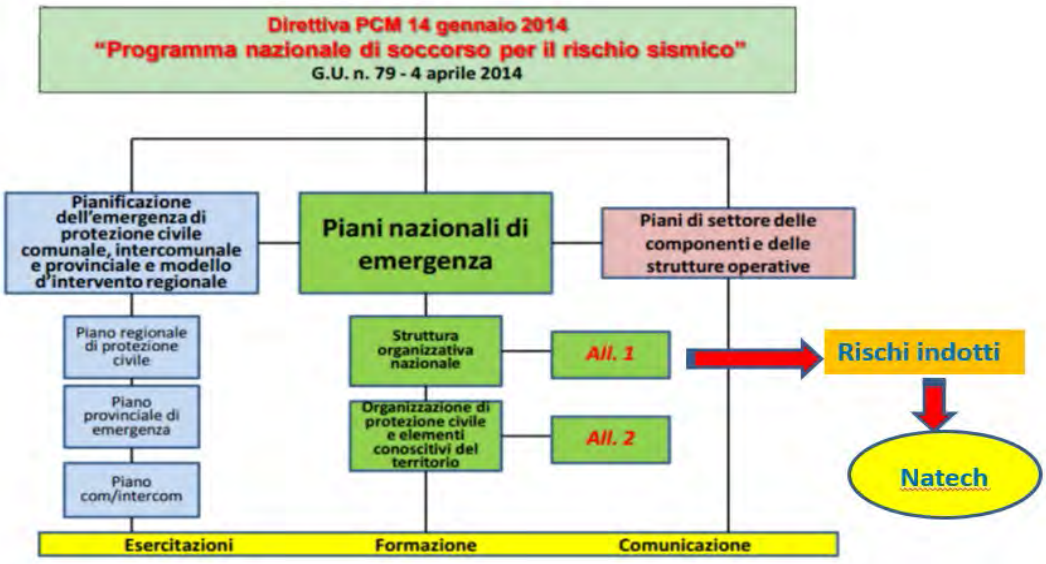


Figura 1. Schema generale del Programma Nazionale Soccorso Rischio Sismico

2.2 Attività per la gestione degli eventi Natech nell'ambito degli stabilimenti PIR

Per la gestione dell'emergenza nell'ambito della funzione "rischi indotti" occorre tenere conto dei principali effetti e criticità che possono rappresentare fattori di amplificazione della magnitudo delle conseguenze per eventi NaTech. Tra gli effetti più rilevanti sugli stabilimenti sono:

a) successione di eventi con effetti domino
b) perdita di energia elettrica/contemporanei fuori servizio
c) perdita di fluidi da connessioni, rottura tubazioni, sloshing, snervamento bulloni di ancoraggio
d) perdita di pressione dell'acqua
Le principali criticità «sistemiche» legate alla forzante di rischio naturale capace di amplificare gli effetti del rischio Natech, vi sono:
a) blackout elettrico
b) Blackout dei sistemi di comunicazione
c) riduzione/mancanza accessibilità all'area di stabilimento per danni alla rete di trasporto esterna
d) indisponibilità di risorse esterne di intervento dovuta all'aumento della domanda di intervento di tutto il territorio colpito
E' opportuno quindi che il gestore si avvalga di strumenti di supporto che consentano, in caso di evento NaTech, di identificare il prima possibile i rischi per la popolazione e di dare indicazioni alle squadre di emergenza su come fronteggiarli nonché prevedere attività di formazione ed addestramento per il personale preposto al loro utilizzo. Importante è inoltre tenere conto dell'esperienza storica di gestione delle emergenze originate da eventi NaTech, che dimostra come l'efficacia della risposta dipenda dalla corretta individuazione ed analisi, nella fase di preparazione, di una serie di fattori e da come durante l'evento le loro interazioni siano state integrate, in modo da consentire una gestione coordinata della risposta. Tra i principali fattori da considerare nel corso dell'emergenza NaTech vi sono:

- sostanze pericolose presenti: individuazione delle aree dello stabilimento in cui sono presenti sostanze pericolose; loro natura e caratteristiche di pericolosità; principali elementi critici di impianto da cui possono originare perdite di contenimento (LOC) e relative tipologie e quantità rilasciate; conoscenza delle appropriate procedure di primo soccorso e di pulizia e delle misure di protezione per gli addetti all'emergenza (squadre di stabilimento e dei vigili del fuoco ed altre Autorità) e loro livello di preparazione;
- risorse umane: numero degli operatori di emergenza potenzialmente disponibili; loro livello di abilità e competenze nella gestione di attività nell'ambito di uno scenario Natech;
- comunicazione: sistemi di allerta e per l'attivazione delle procedure di emergenza; mezzi di comunicazione quali telefoni, radiotrasmittenti, cercapersone e sistemi di allarme;
- servizi antincendio e gestione rilasci: rilevazione ed estinzione incendi e/o rilevazione rilasci sostanze pericolose; eventuali indisponibilità dei sistemi antincendio; mobilitazione di personale, attrezzature e forniture di supporto per lo smaltimento dei detriti, l'evacuazione e le operazioni di ricerca e salvataggio;
- pronto soccorso medico: adeguato trattamento e trasporto dei feriti/persone esposte e interesse per lo stato di salute, a fronte di rilascio di sostanze pericolose.

La risposta nel caso di accadimento di un evento NaTech in uno stabilimento PIR presenta dunque aspetti specifici che vanno affrontati nell'ambito del proprio SGS-PIR con il concorso degli enti e delle strutture del sistema di protezione civile territorialmente competenti, per una corretta pianificazione e gestione dell'emergenza, anche al fine di una integrazione e allineamento delle attività dei vari attori (Gestore, Prefettura, Comune, Regione, DPC, VVF, ARPA) nell'ambito della funzione "rischi indotti – NaTech" nel Programma nazionale di soccorso rischio sismico. Il Dipartimento della Protezione Civile fra le attività da svolgere nel 2022 ha previsto, l'organizzazione di un percorso addestrativo dedicato alla pianificazione ed attuazione di misure di mitigazione rispetto ad un evento Natech su impianti con pericolo di incidente rilevante (PIR) soggetti al D.Lgs. 105/2015, dedicato a favorire le attività di pianificazione e l'incremento di esperienza operativa in questo ambito, anche mediante la verifica di procedure per la gestione degli scenari multirischio connessi a disastri tecnologici innescati, in particolare, da un evento sismico severo. L'iniziativa è stata condotta presso la Raffineria di Milazzo e ad essa hanno partecipato, oltre a rappresentanti del Dipartimento Nazionale della Protezione civile e della Raffineria stessa, anche rappresentati del Corpo Nazionale di Vigili del Fuoco, della Protezione civile della Regione Sicilia, della Capitaneria di Porto. L'attività messa in campo ha avuto come principale scopo quello di testare la possibilità di applicazione di una metodologia sistemica nella gestione degli eventi NaTech che prevede l'attuazione "simulata" di attività integrate tra gestore e sistema di Protezione civile dal livello territoriale al livello nazionale. Obiettivo principale dell'attività è stato quello di poter raccogliere elementi di valutazione in merito all'approccio proposto nell'ottica di una possibile definizione di indicazioni operative per la gestione di scenari Natech nell'ambito di emergenze di rilievo nazionale connesse con eventi calamitosi di origine naturale o derivanti dall'attività dell'uomo che in ragione della loro intensità o estensione debbono, con immediatezza d'intervento, essere fronteggiate con mezzi e poteri straordinari, ai sensi dell'art. 7 Decreto Legislativo n.1 del 2 gennaio 2018 "Codice della Protezione Civile".

3. L'esercitazione nazionale "SISMA DELLO STRETTO 2022"

L'esercitazione nazionale "Exe Sisma dello Stretto 2022" ha avuto come obiettivo principale la verifica della risposta operativa del Servizio nazionale della protezione civile ad un evento sismico simulato, in un'area caratterizzata da una elevata pericolosità sismica. Le regioni coinvolte sono state la Calabria e la Sicilia con uno scenario che riporta i maggiori danni in alcuni comuni della provincia di Reggio Calabria ma con effetti importanti anche nella provincia di Messina. Il coordinamento dell'esercitazione è stato a cura del Dipartimento della protezione civile (DPC), d'intesa con le Regioni Calabria e Siciliana, le Prefetture - UTG di Reggio Calabria e di Messina. Il modello organizzativo per la preparazione delle attività esercitative è stato istituito attraverso il decreto del Capo del Dipartimento della protezione civile di costituzione del Gruppo di lavoro per la "progettazione dell'esercitazione di livello

nazionale per il rischio sismico nell'area dello Stretto di Messina". Al fine di ottenere uno scenario esercitativo realistico per l'area in questione, sia in termini di possibile occorrenza futura che di distribuzione del danneggiamento, si è optato di scegliere come riferimento un terremoto realmente accaduto in tempi recenti, per il quale fossero disponibili parametri epicentrali strumentali e indicazioni macrosismiche attendibili. La scelta è ricaduta sul terremoto verificatosi nell'area dello Stretto di Messina il 16 gennaio 1975 che ebbe un'intensità epicentrale Io = VII-VIII MCS ed una magnitudo oscillante tra un valore strumentale di ML=4.7 ed uno equivalente di Mw =5.3. L'epicentro strumentale fu individuato a circa 5 km dalla costa, nell'entroterra di Reggio Calabria, mentre quello macrosismico coincide con il capoluogo calabrese. La profondità fu stimata a 20 km. Una trentina di paesi subirono effetti di VII-VIII grado MCS, che corrispondono a lesioni gravi a carico del 25%-50% delle abitazioni, e a circa 10% di crolli.

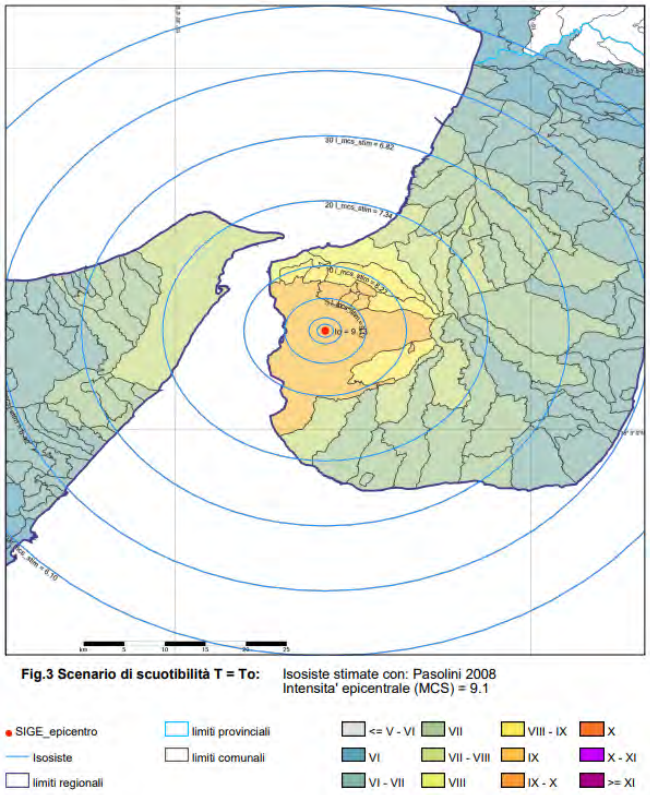


Figura 2. Epicentro e comuni entro 25 km dall'epicentro e scenario di Scuotibilità (tratto da Rapporto SIGE - Sistema Gestione Emergenze del Dipartimento della Protezione civile)

Il terremoto del 1975 simulato per l'esercitazione (ML = 6.0 - Mw = 6.2; profondità ipocentrale
= 20 km) è capace di innescare effetti ambientali a terra come frane e liquefazioni e, potenzialmente, anche eventi di maremoto, per esempio a seguito dell'innesco di frane sottomarine (correnti di torbida). Sulla base delle simulazioni effettuate

nell'ambito del SiAM (Sistema di Allertamento nazionale per i Maremoti generati da terremoti nel Mar Mediterraneo), partendo dai parametri del terremoto dello scenario esercitativo, il potenziale maremoto che potrebbe generarsi avrebbe un livello di allerta Arancione. L'allerta per i maremoti generati da terremoti è gestita a livello nazionale dal "Sistema di Allertamento nazionale per i Maremoti generati da terremoti nel Mar Mediterraneo" (SiAM), ed è composto dal Dipartimento della Protezione Civile, che svolge anche le funzioni di coordinamento, dal Centro Allerta Tsunami dell'INGV - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (CAT-INGV) e dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). Il SiAM è stato istituito formalmente dalla direttiva del PCM del 17 febbraio 2017 che definisce i compiti e le funzioni dei soggetti coinvolti. Nel sistema di allertamento SiAM sono adottati due diversi livelli di allerta in funzione della severità stimata del maremoto sulle coste italiane, il *livello Rosso* (Watch) e il *livello Arancione* (Advisory), che coincidono con gli analoghi livelli di allerta adottati in ambito UNESCO/IOC per il sistema di allertamento maremoto nella regione del Nord Est Atlantico, Mediterraneo e mari collegati (ICG/NEAMTWS). Lo scenario prevede quindi la possibilità che il sisma e lo tsunami coinvolgano siti sensibili sul territorio capaci di innescare fenomeni indotti secondari in grado di generare nuovi pericoli per le persone e per l'ambiente.

3.1 Pianificazione e gestione dell'attività esercitativa per rischio NaTehc da sisma e tsunami generato da sisma: caso di studio presso la Raffineria di Milazzo (ME)

La pianificazione dell'attività addestrativa per la gestione del rischio Natech nell'ambito dell'attività esercitazione nazionale "Sisma dello "Stretto" ha quindi comportato la necessità di pianificare le attività per la doppia forzante *sisma* e *tsunami* generato da sisma presso la Raffineria di Milazzo (ME). Data la complessità del tema, è stato attuato un approccio per step successivi, avviati e condotti tramite riunioni dedicate presso il sito della Raffineria. In particolare:

step 1 – Attività preparatoria: condivisione del percorso di preparazione all'attività esercitativa Natech nell'ambito della più generale attività connessa all'esercitazione Nazionale "Terremoto dello Stretto 2022". Nell'incontro sono stati condivisi gli obiettivi dell'approccio metodologico proposto con le indicazioni di massima per la gestione degli eventi Natech elaborate dal DPC integrate con le procedure interne della Raffineria di Milazzo, oltre che a raccogliere input utili per la sua applicazione della fase di attuazione "simulata" su uno scenario con sisma e successivo tsunami generato da sisma.

step 2 – Condivisione degli obiettivi operativi tra cui:

- simulazione di attività di gestione del rischio Natech a seguito di sisma e tsunami con particolare riferimento alla identificazione dei punti critici di stabilimento, identificazione dei LOC (Loss of containment) ed alla attivazione di squadre miste composte da personale di raffineria e squadra NBCR del CNVVF;

➢ attivazione di tutti i livelli decisionali ed operativi interni alla Raffineria di Milazzo e gestione del collegamento con i centri di coordinamento di Protezione civile attivati sul territorio tramite il funzionario del CNVVF inviato sul posto;
➢ test delle procedure di messa in sicurezza in seguito ad evento sismico e tsunami, con verifica delle condizioni delle apparecchiature critiche d'impianto;
➢ test delle procedure di impiego di squadre miste interne/nucleo NBCR VVF;
➢ test del flusso delle comunicazioni con il sistema di protezione civile attivato sul territorio, unitamente al flusso di comunicazione tra la Capitaneria di Porto di Milazzo e la Raffineria di Milazzo nell'ambito del Sistema di Allertamento nazionale per i Maremoti generati da sisma nel Mar Mediterraneo (SIAM) per la messa in sicurezza interna dello stabilimento;
➢ condivisione del documento di progetto dell'esercitazione Natech e del relativo cronoprogramma delle attività integrate tra gestione interna RAM e modello di intervento del sistema di protezione civile.

Step 3 – Effettuazione delle attività previste nel cronoprogramma di cui allo step 2 nell'ambito della conduzione dell'attività addestrativa nazionale "Esercitazione dello stretto 2022" con "debriefing a caldo" per la verifica degli scostamenti e dei miglioramenti rispetto al documento di progetto condiviso. L'attività ha visto la partecipazione dei rappresentanti dei diversi enti e strutture di riferimento tra cui: Dipartimento della PC nazionale, Raffineria di Milazzo, Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, Protezione civile della Regione Sicilia, Capitaneria di Porto di Milazzo. Hanno inoltre partecipato alla fase di conduzione dell'esercitazione in qualità di osservatori, anche ISPRA e Università di Messina.

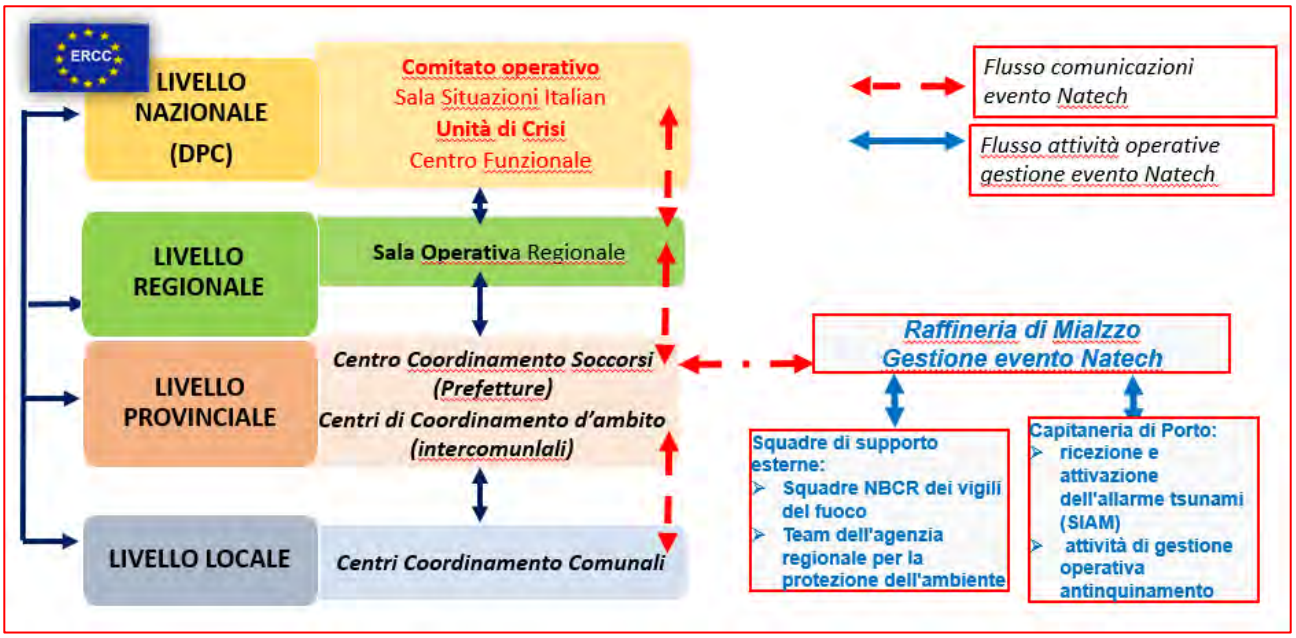


Figura 3. Flusso gestionale evento Natech integrato nel sistema di coordinamento generale nell'ambito dell'esercitazione nazionale "Sisma dello Stretto 2022"

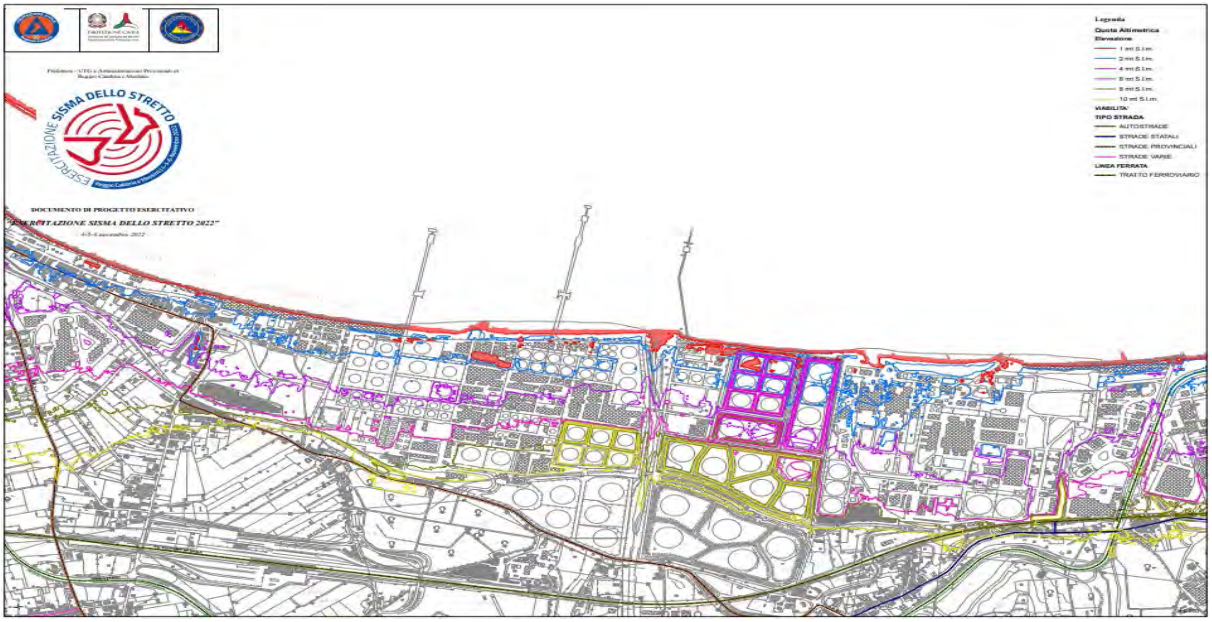


Figura 4. Rappresentazione cartografica della Raffineria di Milazzo con le quote 1, 2, 4, 6, 8, 10 m s.l.m. elaborata dalla Protezione Civile della Regione Sicilia nell'ambito dell'esercitazione Natech

3.2 Principali attivazioni svolte nella fase di conduzione dell'esercitazione il giorno 4 novembre 2022

A seguito della definizione delle procedure integrate tra stabilimento e sistema di protezione civile, nella conduzione della fase esercitativa sono state attuate le seguenti azioni presso la RAM:

1. attivazione su più livelli decisionali interni, secondo quanto previsto dal piano di emergenza interno di Raffineria, con attivazione di:
    a. squadra di emergenza interna
    b. gruppo di coordinamento interno
    c. gruppo di coordinamento esterno
2. identificazione e verifica dei potenziali principali LOC (perdite di contenimento);
3. simulazione del black-out con interruzione rete elettrica Nazionae e attivazione alimentazione prodotta internamente a scala di "isola grande";
4. simulazione team verifica integrati (team interno + squadre esterne VVF comprensive di squadra base e squadra provinciale CBRN);
5. verifica collegamenti radio e telefonici con strutture esterne (CNVVF, Capitaneria di Porto, CCS, DICOMAC);
6. verifica assetto della viabilità esterna mediante PC Regionale Sicilia;
9. Comunicazione Early Warning Tsunami con Capitaneria di Porto e messa in sicurezza personale/impianti in accordo alle procedure previste (in particolare delle squadre interne operanti nella fase di verifica LOC);
10. attività connesse alle disposizioni impartite dalla Capitaneria di Porto a seguito dell'allertamento nazionale maremoti SIAM (attività S.A.R. persone in mare, interruzione delle operazioni di carico da parte di motocisterne, distacco "reale" dei

bracci di carico ed allontanamento “figurato” dal pontile codificato come LOC 2, attivazione da parte di RAM di unità navali antinquinamento e missione antinquinamento effettuata con motovedette CP in ordine al Piano Antinquinamento locale).
Una delle attività ad elevato grado di interazione è stata proprio l’attività di distacco di uno dei nuovi bracci di carico (punto identificato come LOC 2) dotati di sistema di sgancio di emergenza con sistema ERC (Accoppiatore Sblocco di Emergenza). Questo sistema attua lo scollegamento del braccio di carico dalla nave in caso di emergenza. L' ERC è costituito da 2 valvole serrate insieme, che vengono chiuse prima dello scollegamento. In questo modo le fuoriuscite si riducono assolutamente al minimo. La fase di distacco è stata effettuata realmente ed è stata simulato l’allontanamento “figurato” della nave cisterna dal pontile, unitamente all’invio delle unità antinquinamento. Il distacco dei nuovi bracci di carico è avvenuto a seguito della ricezione dell’allarme maremoto attivato nell’ambito del sistema SIAM.



Figura 5. Attività di intercettazione e messa in sicurezza LOC 3 (linea adduzione Serbatoio da 160.000 mc TK530)



Figura 6. Attività congiunta tra squadre di emergenza della Raffineria di Milazzo e squadre NBCR dei Vigili del Fuoco

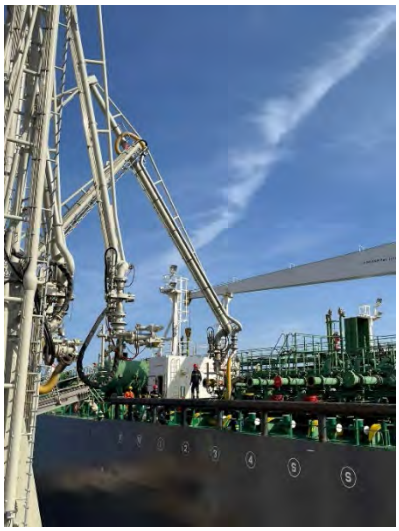


Figura 7. Fase di distacco di braccio di carico greggio da pontile n.1 (gestione LOC 2)

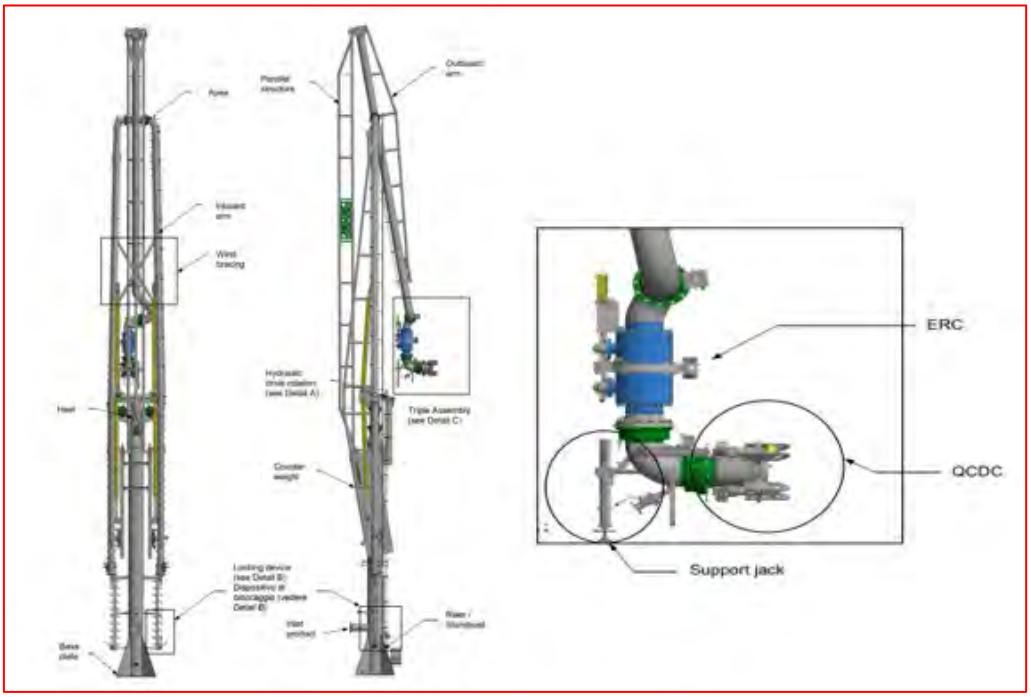


Figura 8. Particolare dei nuovi bracci di carico con sistema ERC di sgancio di emergenza.

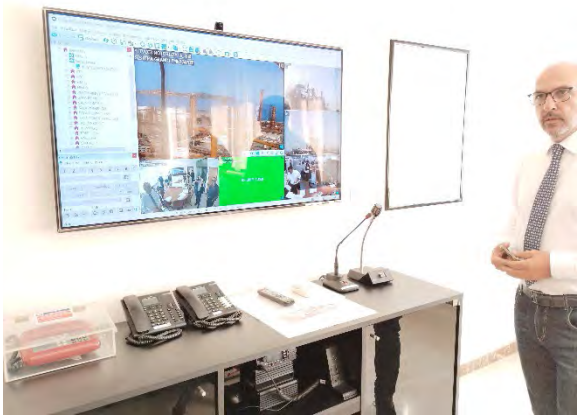


Figura 9. Centro di coordinamento emergenza della raffineria di Milazzo



Figura 10. Debriefing a caldo dell'esercitazione Natech presso la di coordinamento emergenze della raffineria di Milazzo



Figura 11. Gruppo di lavoro per la pianificazione e gestione dell'esercitazione Natech per evento sismico e tsunami generato da sisma

4. CONCLUSIONI

In base all'esperienza acquisita, è possibile identificare alcuni elementi salienti:

- importanza dell'attività di pianificazione integrata dell'esercitazione: valutazione del rischio e valutazione del LOC, predisposizione del cronoprogramma integrato tra attività di stabilimento e attività "esterne" del sistema di risposta della protezione civile)
- importanza di attivare e verificare i flussi di comunicazione tra l'impianto ed il sistema di risposta
- importanza della prova rispetto alla mancanza di energia elettrica, indisponibilità di risorse esterne, indisponibilità di vie di accesso, contemporaneità del danno con perdite di contenimento
- possibile necessità di gestione di LOC (punti con potenziale perdita di contenimento) particolarmente complessi individuati in fase di pianificazione e definizione delle priorità nella gestione degli eventi.

Da quanto sopra declinato, si evince come il passaggio dalla conoscenza (nei suoi vari fattori quali il rischio, le modalità di risposta del territorio, le procedure, ecc.) alla creazione di un percorso esercitativo integrato tra l'impianto e il sistema di risposta esterno è come un salto quantico e richiede necessariamente un approccio graduale e condiviso.

5. Bibliografia

[1] Documento di progetto esercitativo "esercitazione sisma dello stretto 2022" – Dipartimento della Protezione civile – 4,5,6 novembre 2022

[2] Bignami Daniele F., "Protezione civile e riduzione del rischio disastri", Politecnica Maggioli editore, 2011

[3] Geri Francesco, "La pianificazione e la gestione dell'emergenza" – Modulo IV – Lezioni al Master in Ingegneria dell'Emergenza, 2006

[4] Geri Francesco, "L'applicazione del ciclo a sette pasi per la gestione delle criticità" – Modulo IV – Lezioni al Master in Ingegneria dell'Emergenza, 2008

[5] Geri Francesco, Salvatore Monaco, "Il punto di vista dei sistemi complessi nella gestione dell'emergenza" convegno scientifico nazionale - "sicurezza nei sistemi complessi" - bari, 19 - 20 – 21 ottobre 2005

[6] Geri Francesco "Possibili indirizzi per la pianificazione ed attuazione di misure di mitigazione in riferimento ad eventi Na-Tech su impianti a Pericolo di Incidente Rilevante soggetti alla Direttiva Seveso" - convegno scientifico nazionale "Sicurezza sismica degli impianti chimici a rischio di incidente rilevante" – ENEA Roma, 7 febbraio 2013

[7] Geri Francesco: “L’early warning e il ciclo dell’emergenza nella gestione dei rischi indotti da eventi naturali su impianti a rischio di incidente rilevante” – Convegno internazionale SAFE 2005

[8] - Gruppo di lavoro Natech “Metodologie per la gestione di eventi Natech”

VGR 2016 – Istituto Superiore Antincendi – Roma

[9] UNDRR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction “Building Resilience of SMEs – ITALY” in collaboration with Federcasse and Confindustria, 2019

[10] United Nation Office for Disaster Risk Reduction “Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 – 2030”

Valutazione del rischio NaTech di tipo idrogeologico per le condotte di trasporto di sostanze pericolose

S. Campana[1], R. Iovene[2], R. Vasile[2]

[1] Arta Abruzzo
[2] Inail – Uot Pescara

Abstract

Alcuni stabilimenti, soggetti al d.lgs. 105/2015, sono caratterizzati dalla presenza di condotte che uniscono parti di impianto, oggetto di analisi di rischio. Data l'estensione delle tubazioni e le caratteristiche del territorio italiano, è frequente che le stesse insistano su aree a rischio idrogeologico, che, in caso di eventi naturali intensi, possono dare origine a rilasci e conseguenti incidenti ed è pertanto necessario condurre specifici approfondimenti sul rischio NaTech.
Scopo del lavoro è esaminare l'evoluzione dell'analisi del rischio NaTech, in assenza di Linee Guida o regole tecniche di riferimento, adottato nei Rapporti di sicurezza di due stabilimenti ubicati in Abruzzo, mettendo in evidenza criticità e aspetti da approfondire.
L'analisi del rischio idrogeologico si basa sul reperimento di dati storici degli eventi franosi e alluvionali, associati alle informazioni desunte dalle carte di pericolosità redatte dalle Autorità Territoriali, completata con rilievi in campo per ricostruire le caratteristiche idrogeologiche e geomorfologiche delle aree interessate e ad individuare movimenti franosi. Pertanto, ai fini di una migliore valutazione e gestione del rischio, è opportuno che l'analisi del rischio NaTech sia completata con metodologie basate su verifiche di stabilità dei versanti e studi idraulici, che consentano di quantificare il rischio di danneggiamento delle condotte in caso di movimenti franosi ed esondazioni, i conseguenti eventi incidentali credibili e le aree di danno associate.
Data l'importanza e la multidisciplinarietà della tematica, è auspicabile che si pervenga all'emanazione di linee guida che indirizzino Gestori e valutatori sulla corretta analisi e gestione del rischio industriale indotto da dissesti ed alluvioni.

Keywords: NaTech, condotte, rischio idrogeologico.

1. Introduzione

Il Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105 "*Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose*" si applica agli stabilimenti, definiti come (art. 3 c. 1 lettera a) "*tutta l'area sottoposta al controllo di un gestore, nella quale sono presenti sostanze pericolose all'interno di uno o più impianti, comprese le infrastrutture o le attività comuni o connesse*".

Fra le esclusioni indicate all'art. 2 c. 2 lettera d), la norma espressamente stabilisce che il Decreto non si applichi "*al trasporto di sostanze pericolose in condotte, comprese le stazioni di pompaggio al di fuori degli stabilimenti soggetti al presente decreto*".
E' tuttavia, definito impianto (art. 3 c. 1 lettera h): *un'unità tecnica all'interno di uno stabilimento e che si trovi fuori terra o a livello sotterraneo, nel quale sono prodotte, utilizzate, maneggiate o immagazzinate le sostanze pericolose; esso comprende tutte le apparecchiature, le strutture, le condotte, i macchinari, gli utensili, le diramazioni ferroviarie private, le banchine, i pontili che servono l'impianto, i moli, i magazzini e le strutture analoghe, galleggianti o meno, necessari per il funzionamento di tale impianto*.
Inoltre il parere espresso nell'ambito del Coordinamento ex art. 11 del D.lgs. 105/2015 relativo alle condotte (quesito Q2/2016) precisa che: *Il D.Lgs. 105/2015 si applica alle condotte per il trasporto di sostanze pericolose che sono da considerare come facenti parte dello stabilimento in quanto connesse funzionalmente agli impianti dello stesso stabilimento e sottoposte al controllo del medesimo gestore. Fermo restando quanto sopra, le condotte destinate al trasporto di sostanze, in entrata o in uscita, al di fuori dello stabilimento, sono considerate come parte dello stesso stabilimento fino al punto di allaccio alla condotta esterna, univocamente individuato da sezionamenti, valvole od altro.* Pertanto, le condotte che uniscono due impianti di un unico stabilimento sono da intendersi esse stesse parti dello stabilimento, anche se esterne alle aree perimetrate.
Considerato che tali condotte possono estendersi per diversi chilometri e che il territorio italiano è caratterizzato da diffusa pericolosità idrogeologica da frane e alluvioni, non è infrequente che le tubazioni di collegamento attraversino aree a rischio idrogeologico.
L'allegato C "*Criteri, dati e informazioni per la redazione e la valutazione del Rapporto di sicurezza e del Rapporto preliminare di sicurezza*" del d.lgs. 105/15 stabilisce al punto C.4.1 che il Rapporto di Sicurezza deve individuare "*le sequenze incidentali che possono generare un incidente rilevante e gli scenari ragionevolmente prevedibili che ne possono evolvere, in termini di conseguenze e probabilità. Ognuno degli scenari incidentali individuati dovrà essere corredato da una sintesi degli eventi che possono avere un ruolo nel loro innesco, con cause interne o esterne allo stabilimento*". Fra le cause esterne, occorre considerare le "*cause naturali, come terremoti e inondazioni*".
Come previsto al paragrafo 2 ed al punto C.3.2.1 dell'allegato C, per i dati relativi all'idrogeologia il Gestore utilizza i dati disponibili presso le Pubbliche Amministrazioni e fa riferimento alle classificazioni di legge vigenti.
In ultimo, l'allegato C al d.lgs. 105/15 richiede specificatamente al Gestore di indicare nel Rapporto di Sicurezza, al paragrafo C.7.1, quali sono "*le precauzioni e i coefficienti di sicurezza assunti nella progettazione delle strutture con riferimento agli eventi e alle perturbazioni descritte al punto C.3*" e di descrivere "*le precauzioni adottate per resistere ad eventuali spinte idrostatiche sulle apparecchiature e sulle parti d'impianto*".
La disamina normativa fin qui riportata può riassumersi pertanto in questi termini: il Gestore di uno stabilimento a rischio di incidente rilevante deve valutare e gestire,

fra gli altri, anche i rischi indotti da dissesti ed alluvioni che possano interessare le condotte di trasporto di sostanze pericolose che collegano due parti di impianto, anche se esterne al perimetro dello stabilimento. La necessità di approfondimento è tanto più importante, in considerazione dei cambiamenti climatici in atto.
Al momento non sono ancora disponibili linee guida o norme tecniche che indirizzino i Gestori ed i valutatori sulle corrette modalità di esecuzione di tale analisi di rischio, che richiede competenze specialistiche multidisciplinari e può avvantaggiarsi dell'utilizzo di tecnologie di studio avanzate quali immagini satellitari e rilievi mediante droni, oltre a software specialistici.

2. La pericolosità idrogeologica in Italia e in Abruzzo

La Legge n. 183 del 18 maggio 1989 "*Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo"* ha individuato il bacino idrografico come base territoriale di riferimento per la protezione idrogeologica e le Autorità di bacino quali istituzioni responsabili della predisposizione del Piano di Bacino.
Esso è "*lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico-operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni e le norme d'uso finalizzate alla conservazione, alla difesa e alla valorizzazione del suolo e la corretta utilizzazione delle acque, sulla base delle caratteristiche fisiche ed ambientali del territorio interessato*".
Le aree a pericolosità e rischio idrogeologico per frane e alluvioni vengono individuate nei Piani stralcio di bacino per l'Assetto Idrogeologico (PAI), redatti secondo i criteri riportati nel DPCM del 29/09/1998 "*Atto di indirizzo e coordinamento per l'individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all'art. 1, commi 1 e 2, del D.L. 11 giugno 1998, n. 180*". La legge 183/89 è stata successivamente abrogata e sostituita dalla parte III del D. Lgs. 152/2006, che ha sostituito le precedenti Autorità di Bacino con le Autorità di Bacino Distrettuali. Le aree a pericolosità da frana dei Piani di Assetto Idrogeologico includono, oltre alle frane già verificatesi, anche le zone di possibile evoluzione dei fenomeni e le zone potenzialmente suscettibili a nuovi fenomeni franosi.
Secondo il Rapporto ISPRA "*Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio*" [1], come si evince dalla tabella 1, l'Italia presenta una superficie complessiva delle aree a pericolosità da frana pari a 59.981 km^2 (19,9% del territorio nazionale). Sempre secondo il Rapporto ISPRA "*Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio*" [1], il territorio abruzzese è caratterizzato da una percentuale di superficie territoriale con pericolosità di frana superiore rispetto alla media italiana, pari a 23.1% del territorio regionale, con ben il 15,5% di territorio regionale perimetrato a pericolosità elevata e molto elevata, percentuale fra le più alte in Italia.
La Pericolosità è Molto Elevata nelle aree caratterizzate dalla presenza di categorie di dissesto allo stato attivo*: versanti vistosamente interessati da deformazione profonda, versanti interessati da deformazioni superficiali lente attive, corpi di frana per crollo e ribaltamento attivi, corpi di frana di genesi complessa attivi, corpi di frana di colamento*

attivi, corpi di frana di scorrimento traslativo attivi, corpi di frana di scorrimento rotazionale attivi e le superfici a calanchi e forme similari [2].
Nelle aree a Pericolosità elevata e moderata sono comprese "*le Frane quiescenti e inattive secondo la "probabilità" più o meno elevata di riattivazione dei fenomeni, ossia a seconda che i dati sull'acclività e sulla litologia risultino più o meno predisponenti al dissesto. La possibilità di riattivazione delle Frane quiescenti e inattive, e quindi la loro appartenenza alle Pericolosità P2 o P1, è stata stabilita semiquantitativamente sulla base delle distribuzioni dei dati di litologia ed acclività [..]"*. [2]
Le Aree di attenzione corrispondono generalmente a porzioni di territorio ove vi sono informazioni di possibili situazioni di dissesto a cui non è ancora stata associata alcuna classe di pericolosità.

Zona	Area regione	Pericolosità da frana				Area attenzione	Totale area a pericolosità da frana	
		Molto elevata P4	Elevata P3	Media P2	Moderata P1	AA	P4+P3+P2+ P1+AA	
	Km^2	Km^2	Km^2	Km^2	Km^2	Km^2	Km^2	%
Italia	302.066	9.153	16.257	13.836	13.953	6.782	59.981	19,9
Abruzzo	10.831	637,3	1.040,9	11,0	483,8	328,2	2.501,2	23,1

Tabella 1. Aree a pericolosità da frana PAI – confronto situazione italiana e abruzzese – Mosaicatura 2017 [1]

Per quanto riguarda il rischio alluvioni, le mappe di pericolosità del Piano Stralcio Difesa Alluvioni contengono la perimetrazione delle aree che potrebbero essere interessate da alluvioni secondo quattro scenari di probabilità, in funzione dei tempi di ritorno (50, 100 e 200 anni), dei livelli di piena e della velocità.
La mosaicatura di pericolosità è stata realizzata secondo i tre scenari del Decreto Legislativo 23 febbraio 2010, n. 49 "Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni": elevata probabilità con tempo di ritorno fra 20 e 50 anni (alluvioni frequenti), media probabilità con tempo di ritorno fra 100 e 200 anni (alluvioni poco frequenti) e bassa probabilità (scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi).
Come si evince dalla tabella 2, il territorio italiano presenta una superficie complessiva delle aree soggette a pericolosità idraulica di 70.764 km^2 (23.4% del territorio nazionale), mentre il territorio abruzzese è caratterizzato da una percentuale di superficie soggetta a pericolosità idraulica del 4% rispetto alla superficie regionale.
Occorre tuttavia considerare che oltre il 95% del territorio è montuoso o collinare; pertanto, in Abruzzo le zone industriali si concentrano prevalentemente nelle pianure alluvionali, che possono essere soggette a pericolosità idraulica.

Zona	Area regione	Pericolosità idraulica			Totale area a pericolosità idraulica	
		Elevata P3	Media P2	Bassa P1	P3+P2+P1	
	Km^2	Km^2	Km^2	Km^2	Km^2	%
Italia	302.066	12.405	25.398	32.961	70.764	23,4
Abruzzo	10.831	97,1	149,9	179	426	4

Tabella 2. Aree a pericolosità idraulica – confronto situazione italiana e abruzzese – Mosaicatura 2017 [1]

I dati fin qui illustrati danno evidenza della elevata probabilità che lunghe condotte di collegamento fra due parti di impianto possano ricadere su aree a rischio idrogeologico, come infatti avviene negli stabilimenti oggetto del presente lavoro.

3. Approcci metodologici per valutare e gestire il rischio di frana ed alluvione sulle condotte

La valutazione del rischio Natech si è resa necessaria per due stabilimenti di soglia superiore, situati in Abruzzo, caratterizzati dalla presenza di condotte di trasporto di sostanze pericolose che uniscono due parti di impianto che insistono su aree con pericolosità di frana e/o di alluvione.
Le condotte del primo stabilimento si estendono su un vasto territorio prevalentemente collinare, frequentemente interessato da esondazioni e movimenti franosi.
Le condotte del secondo stabilimento sono ubicate in parte ai piedi ed in parte sono interrate entro un versante che è stato storicamente interessato da crolli.
Nei paragrafi seguenti si descriverà l'evoluzione dell'approccio all'analisi del rischio idrogeologico nei due stabilimenti e gli ulteriori approfondimenti che si ritengono opportuni per una più compiuta valutazione e gestione del rischio.

3.1 Analisi del rischio Natech di tubazioni di trasporto poste in parte in aree a rischio di esondazione e in parte soggette a movimenti franosi

Per il primo stabilimento in esame, la necessità di approfondire il rischio idrogeologico è stata determinata dall'effettivo verificarsi di dissesti ed allagamenti, che hanno portato il CTR nel 2010, quindi prima dell'emanazione del D. Lgs. 105/15, a chiedere alla Società di valutare il "*rischio indotto alle tubazioni e strumentazioni da eventuali dissesti idrogeologici o fenomeni di instabilità dei pendii ed eventi sismici*". La Società ha prodotto un corposo studio che è partito dalla ricerca di dati bibliografici e di carte di pericolosità delle aree interessate ed è proseguito con rilievi di campo effettuati da tecnici esperti al fine di geolocalizzare le condotte ed individuare i tratti di tubazione interessati o potenzialmente interessati da dissesti.
Lo studio si è concluso con l'elaborazione di mappe e prospetti riassuntivi per ciascun tratto di tubazione, l'individuazione dei tratti considerati più critici in quanto

effettivamente o potenzialmente interessati da dissesti, e la proposta di attuazione di misure di intervento volte a rinforzare le sponde fluviali e spostare e/o proteggere le condotte. Gli interventi di difesa spondale hanno riguardato diversi tratti di condotta. Lo studio ha altresì individuato le aree critiche presso cui effettuare azioni di monitoraggio dopo ogni evento meteorico intenso.
L'approccio inizialmente adottato di fatto è consistito nella mappatura dei pericoli, nell'attuazione di misure correttive (ripristino/rinforzo dei tratti dissestati) e nella proposta di misure di monitoraggio (verifiche post eventi meteo intensi).
Con l'entrata in vigore del D. Lgs. 105/15, che richiede maggiore attenzione all'analisi del rischio Natech, il CTR ha richiesto ulteriori approfondimenti.
In particolare, per le condotte che insistono nelle aree caratterizzate da movimenti franosi, il CTR ha richiesto al Gestore di effettuare un aggiornamento dello studio già condotto, comprensivo di approfondimenti sulla stabilità dei versanti più critici, allo scopo di valutare se eventuali instabilità possano coinvolgere le condotte e danneggiarle. La Società ha avviato ulteriori approfondimenti di carattere geotecnico e geomorfologico, che al momento sono ancora in corso.
Per quanto riguarda le condotte poste in aree esondabili, il CTR ha prescritto alla Società di effettuare la valutazione del rischio indotto dalle spinte idrostatiche, così come previsto dal D. Lgs. 105/15
Il Gestore ha prodotto uno studio che si è concretizzato nelle seguenti azioni:

- Rilievi mediante volo Lidar e rilievi a terra, per la definizione topografica dell'area di studio;
- Campagna di indagini geognostiche e geofisiche finalizzata alla ricostruzione stratigrafica, idrogeologica e sismica dell'area di studio (sondaggi a carotaggio continuo, prove penetrometiche, realizzazione di piezometri, prove di permeabilità, prove di laboratorio per la caratterizzazione fisica e meccanica dei terreni);
- Rilievi vegetazionali e sviluppo della relativa cartografia, che ha messo in evidenza la stretta relazione che si instaura tra vegetazione, geomorfologia e dinamica fluviale;
- Studi bibliografici dell'assetto geologico, geomorfologico e idrogeologico dell'area di studio, integrato da attività di rilievo idromorfologico in campo ai fini dell'applicazione della metodologia IDRAIM mirata ad una comprensione degli aspetti di dinamica fluviale dei corsi d'acqua in oggetto;
- Studi idrologico-idraulici di dettaglio per gli ambiti idrografici di studio, valutati su tempi di ritorno di 200 anni.

Le attività sopra descritte hanno consentito una visione completa delle criticità idrauliche che potrebbero interessare le tubazioni.
La Società ha quindi analizzato la documentazione as-built, relativa alle aree impiantistiche, con particolare riguardo alle aree da attenzionare, studiando le caratteristiche delle fondazioni, delle apparecchiature presenti e del terreno, nello specifico:

- dimensioni delle fondazioni;
- profondità piano di posa;
- caratteristiche del materiale costituente le fondazioni;
- peso delle apparecchiature;
- diametro e spessore delle tubazioni;
- profondità di interramento;
- caratteristiche del materiale costituente le tubazioni;
- peso delle tubazioni;
- caratteristiche del terreno.

Sono state infine condotte verifiche ed in particolare nei confronti dello Stato Limite Ultimo relative alla perdita di equilibrio della struttura o del terreno, dovuta alla spinta dell'acqua, e relative allo stato limite di resistenza del terreno per le fondazioni delle apparecchiature interessate ed è stata eseguita la verifica al galleggiamento delle condotte soggette a pericolo di inondazione.
Le verifiche sono state portate avanti tenendo presente che la presenza di falda produce effetti sia sul terreno sia sulle tubazioni di collegamento. Riguardo al terreno si ha una variazione dei parametri geotecnici, mentre per il tubo si registra l'insorgenza di sollecitazioni aggiuntive. Nella verifica sono state considerate come forze stabilizzanti:

- peso della condotta;
- peso del volume d'acqua sulla condotta;
- peso del rinterro gravante sul tubo.

Considerato che, in caso di esondazione, la tubazione è sottoposta ad una spinta dal basso verso l'alto, secondo il principio di Archimede, esercitando sul tubo un'azione instabilizzante, la verifica al galleggiamento si è intesa superata quando le forze stabilizzanti sono risultate maggiori della forza instabilizzante.
Lo studio condotto dalla Società per valutare le spinte idrostatiche non ha evidenziato criticità strutturali in caso di esondazione e, nelle more di linee guida di indirizzo nazionali che forniscano indicazioni ai valutatori, lo stesso è stato ritenuto esaustivo.

3.2 Analisi del rischio Natech di condotte in corrispondenza di un versante in frana

Le condotte del secondo stabilimento analizzato sono in parte poste alla base di un versante ad elevata pericolosità secondo il Piano di Assetto idrogeologico (PAI) dell'Autorità di bacino dell'Appennino Centrale e in parte sono interrate all'interno dello stesso versante. Anche in questo caso, dall'esperienza storica si evince l'accadimento di movimenti franosi e caduta di massi.
Una volta evidenziata la problematica da parte del CTR, prima dell'applicazione del D. Lgs. 105/15, la misura proposta ed attuata dal Gestore è stata quella di proteggere le tubazioni fuori terra mediante la realizzazione di una struttura metallica di protezione.

Con l'entrata in vigore del D. Lgs. 105/15, il CTR ha chiesto alla Società di produrre uno studio di approfondimento sul rischio idrogeologico per le condotte e le apparecchiature situate all'interno o in prossimità delle aree a pericolosità elevata, come individuate dal Piano di Assetto idrogeologico dell'Autorità di Bacino dell'Appennino.
Lo studio prodotto dalla Società si è basato sull'analisi delle deformazioni storiche dal 2010 al 2023 rilevate tramite interferometria SAR satellitare avanzata (A-DInSAR). L'obiettivo delle attività è stato quello di acquisire informazioni sul comportamento deformativo storico per la caratterizzazione di eventuali processi di instabilità, tenendo in considerazione il contesto geologico e geomorfologico dell'area.
Lo studio è stato condotto attraverso i seguenti passaggi:

- selezione e acquisizione delle immagini SAR satellitari ed elaborazione attraverso tecniche interferometriche;
- post-elaborazione e validazione dei risultati;
- attività di campo mediante sopralluoghi, tesi a verificare le criticità evidenziate dallo studio A-DInSAR e identificare eventuali problematiche locali.

L'analisi svolta ha consentito di individuare eventuali fenomeni di deformazione estesi e, in funzione della risoluzione delle immagini SAR utilizzate, di oggetti a terra coinvolti in processi deformativi localizzati.
Da un punto di vista geotecnico, è stata consultata la carta geologico-tecnica, per rilevare se l'area è interessata da corpi di frana attivi e con quale tipologia di cinematica di scorrimento; è stato anche consultato l'inventario IFFI [3], che segnala le zone soggette a instabilità.
Lo studio si è concluso valutando, dall'analisi dei dati, se nel periodo analizzato l'area sia risultata o meno stabile e se la stessa sia stata oggetto di spostamenti apprezzabili.
Lo studio effettuato può considerarsi una ricognizione utile e preliminare all'attività di analisi di rischio vera e propria, che dovrà focalizzarsi sulla effettiva pericolosità del versante, che come si evince dalla documentazione prodotta può essere soggetto a crolli/colate detritiche che potrebbero interessare l'infrastruttura.
Per una più compiuta valutazione e gestione del rischio, è opportuno effettuare uno studio che consenta di determinare la probabilità che un eventuale dissesto interessi le condotte e ne provochi il danneggiamento, causando la perdita di contenimento della sostanza pericolosa. Successivamente occorrerà valutare la frequenza di accadimento dei possibili scenari incidentali e, per quelli ragionevolmente credibili, stimarne le conseguenze.
Tali approfondimenti consentiranno di individuare ed adottare eventuali ulteriori misure di prevenzione o di protezione in modo da remotizzare la frequenza di accadimento dell'evento ed attuare monitoraggi puntuali volti a rilevare in anticipo eventuali movimenti, nonché di individuare le modalità di intervento in emergenza, in concorso con gli enti territoriali competenti.

4. Conclusioni

L'articolo ha descritto l'approccio adottato da due Gestori di Stabilimenti a rischio di incidente rilevante in Abruzzo, caratterizzati da condotte di collegamento fra due parti di impianto poste in aree a rischio idrogeologico, per valutare il rischio tecnologico indotto da eventi franosi o alluvioni.
Nella maggior parte dei casi, le analisi condotte sono partite dalle mappe di pericolosità idrogeologica redatte dagli Enti Territoriali competenti come le Autorità di Bacino e dalla ricognizione dell'esperienza storica locale relativa all'accadimento di dissesti ed esondazioni.
Il passaggio successivo è stato la georeferenziazione delle condotte e l'esecuzione di rilievi in campo, utilizzando anche lo studio dei dati di movimenti franosi rilevati dai satelliti. A seguito di queste attività, i Gestori hanno individuato le tubazioni maggiormente esposte a rischio ed hanno proposto misure correttive, di prevenzione e di protezione. Gli studi condotti finora non hanno quantificato le frequenze di accadimento e l'entità degli eventuali scenari incidentali conseguenti ad eventi naturali.
Dalle esperienze maturate nell'esame dei rapporti di sicurezza di stabilimenti di soglia superiore caratterizzati dalla presenza di condotte di collegamento, si è potuto desumere come sia necessario poter disporre di linee guida o regole tecniche che indirizzino i Gestori e i valutatori verso un approccio corretto ed uniforme nei confronti dell'analisi del rischio tecnologico indotto da eventi naturali, stante la complessità della materia, che richiede competenze specialistiche multidisciplinari.
La linea guida dovrebbe indicare se e in quali situazioni è necessario, per una compiuta valutazione del rischio relativa ai tratti di tubazione interessati da rischio idrogeologico elevato o molto elevato, che siano eseguiti rilievi sito-specifici volti a conoscere in dettaglio le informazioni (idrogeologiche, geotecniche, morfologiche, vegetazionali, ecc) necessarie per consentire, sulla base delle caratteristiche costruttive e dello stato di conservazione degli impianti, che si effettui un'approfondita valutazione del rischio.
Nel caso la tubazione sia esposta al rischio di frane, è necessario valutare la stabilità del versante e calcolare la probabilità di accadimento degli eventi franosi, valutando con quale frequenza essi possano danneggiare la condotta.
Nel caso di rischio di alluvione, la valutazione del rischio non può prescindere da uno studio idraulico che consenta di individuare, con idonei tempi di ritorno, la frequenza con cui la tubazione può essere interessata da alluvione e con quale battente idraulico, valutando se la condotta è in grado di resistere alle spinte di galleggiamento e all'onda di piena, adottando le modalità indicate dalle NTC 2018.
In entrambi i casi, valutata la frequenza di danneggiamento delle condotte per cause naturali - frequenza che non può prescindere da una attenta analisi statistica dei cambiamenti climatici registrati negli ultimi anni – è necessario valutare le frequenze dei possibili scenari incidentali e calcolarne le conseguenze.

Gli elementi di cui sopra sono funzionali da un lato a quantificare l'effettivo rischio potenziale legato agli eventi naturali, dall'altro ad individuare le opportune misure di prevenzione e protezione e, non ultimo, a pianificare le azioni in emergenza, tenendo presente che, come per tutti i rischi tecnologici causati da eventi naturali, occorrerà prepararsi a gestire "l'emergenza nell'emergenza".

Bibliografia

[1]. Rapporto ISPRA n. 287/2018 "Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio – Edizione 2018", pagg. 16 e 36

[2] Relazione generale del "Piano Stralcio Di Bacino Per L'assetto Idrogeologico Dei Bacini Di Rilievo Regionale Abruzzesi E Del Bacino Interregionale Del Fiume Sangro", approvato con DCR 29/1/2008, pag. 148

[3] Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia. APAT. 2007

Valutazione e gestione del rischio NaTech da sisma per serbatoi atmosferici a tetto galleggiante in stabilimenti industriali con Pericolo di Incidente Rilevante

M. Salimbeni[1], M. De Angelis[1], V. Vezzari[2], M. Ciucci[3]

[1] Università degli Studi di Roma La Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica.
[2] Global Sensing Srl
[3] Inail - Dit

Abstract

L'interazione tra terremoto e stabilimenti industriali (eventi NaTech - Natural triggering Technological Disasters), in presenza di sostanze pericolose, può condurre ad incidenti rilevanti. Tra le apparecchiature più diffuse all'interno degli stabilimenti con Pericolo di Incidente Rilevante (PIR), i serbatoi atmosferici a tetto galleggiante sono particolarmente vulnerabili al sisma sia per gli elementi strutturali che non strutturali. Oltre alla possibilità di danni al mantello e in corrispondenza del fondo, si possono verificare incidenti legati al moto di sloshing, con conseguenze per il tetto galleggiante e gli accessori ad esso connessi, primo fra tutti il sistema di tenuta. Infatti, spostamenti eccessivi del tetto galleggiante possono generare ripetuti impatti contro il mantello in grado di compromettere la funzionalità del serbatoio, causando sia il rilascio di sostanza pericolosa, che l'innesco un incendio.
In questo lavoro, viene presentata ed applicata una metodologia di valutazione e di gestione del rischio sismico e prevenzione di incidente rilevante per serbatoi con tetto galleggiante. In particolare, vengono suggerite alcuni interventi per la mitigazione del rischio dei danni individuati durante la fase di valutazione della vulnerabilità sismica per un caso studio. L'efficacia di tali proposte viene valutata tramite l'impiego di curve di fragilità analitiche, realizzate *ad hoc* per il caso in esame.
Viene valutata inoltre, la possibilità di impiego di un sistema di monitoraggio strutturale e di assetto del serbatoio basato su sensori industriali in fibra ottica a tecnologia FBG (Fiber Bragg Grating), certificati ATEX, configurato per operazioni di Structural Health Monitoring, Leakage Early Warning e Predictive Maintenance.

Keywords: Rischio NaTech da sisma, serbatoi a tetto galleggiante, curve di fragilità, sensori FBG.

1 Introduzione

Gli stabilimenti industriali con Pericolo di Incidente Rilevante (PIR), soggetti al d.lgs. del 26 giugno 2015, n. 105 in Italia, vengono definiti tali poiché detengono sostanze pericolose in quantità superiori a certe soglie [1]. L'incidente rilevante in presenza di

sostanze pericolose consiste in un evento quale un'emissione, un incendio o un'esplosione, che può verificarsi a seguito di sequenze incidentali in cui i singoli eventi possono essere innescati da cause operative interne allo stabilimento, esterne o naturali. In questo ultimo caso, tali eventi vengono indicati con il termine NaTech (Natural Hazard Triggering Technological Disasters) [2]. In particolare, le analisi storiche evidenziano come l'impatto di un terremoto su uno stabilimento industriale possa generare un incidente rilevante, le cui conseguenze sono amplificate dal possibile contemporaneo fuori servizio di sistemi di sicurezza. Nell'ambito degli eventi NaTech, pertanto, si definisce rischio Natech da sisma in stabilimenti PIR il rischio che si verifichi un incidente rilevante correlato ad un evento sismico.

La valutazione del rischio sismico si compie all'interno della più generale analisi di rischio, che, tramite un approccio probabilistico, per ogni scenario incidentale individuato, permette di definire le cause, stimarne la frequenza di accadimento e proporre eventuali attività di gestione, siano esse di mitigazione e/o di monitoraggio [3]. Nel primo caso, possono essere svolti interventi tradizionali o innovativi di protezione sismica passiva. Gli interventi di tipo innovativo si sono dimostrati nel tempo utili ed efficaci per diversi tipi di costruzioni civili, e negli ultimi anni sono stati applicati anche in campo industriale, a seguito di studi condotti sul tema [4]–[6]. Il monitoraggio strutturale, invece, si avvale di strumenti di misura, come trasduttori di spostamento, estensimetri, inclinometri, accelerometri, sensori per la fuoriuscita di sostanza, misuratori di livello di riempimento. Generalmente, già in condizioni di esercizio le componenti industriali sono monitorate; pertanto, arricchendo la rete sensoristica presente con strumenti SMART [7], [8], è possibile realizzare un monitoraggio della risposta strutturale anche in caso di sisma. Si sta valutando, negli ultimi anni, l'applicazione di sensori in fibra ottica FBG (Fiber Bragg Grating) e FSI (Fiber Segment Interferometry) per il monitoraggio di alcune tipologie di apparecchiature industriali [9], [10]. I sistemi di monitoraggio sismico, se integrati con sistemi automatici di segnalazione del pericolo, consentono la realizzazione in sito di Earthquake Early Warning Systems (EWWS) [11].

Attualmente, i codici normativi e le linee guida in materia di sicurezza [12], [13] pongono maggiore attenzione agli aspetti strutturali delle diverse apparecchiature, trascurando la possibilità di crisi degli elementi non strutturali che pure possono essere coinvolti- se non addirittura causare- un incidente rilevante.

Tra le apparecchiature più diffuse per lo stoccaggio di sostanze pericolose, nonché tra le più vulnerabili al sisma, vi sono i serbatoi atmosferici a tetto galleggiante. Danni strutturali e non strutturali ai serbatoi a tetto galleggiante possono comportare l'innesco di incidenti rilevanti [14]. In generale, il comportamento dinamico di un serbatoio atmosferico soggetto ad azione sismica è essenzialmente riconducibile alla dinamica del fluido indotta dal terremoto; il fluido in moto esercita una sovrappressione idrodinamica sul serbatoio che dipende principalmente da due componenti: una componente impulsiva dovuta all'accelerazione del suolo, considerando rigide le pareti del serbatoio, e una componente convettiva, o di

sloshing, legata al moto oscillatorio della superficie del fluido [15]. In un serbatoio a tetto galleggiante, la componente convettiva del moto del fluido interagisce con la dinamica del tetto: in [16], [17], l'autore fornisce un metodo di valutazione delle sollecitazioni agenti sul tetto dovute alle sovrappressioni dinamiche esercitate dal fluido, considerando sia tetti a doppio pontone che a singolo pontone.
Inoltre, lo spazio vuoto tra tetto galleggiante e mantello del serbatoio, pari circa a 200 mm è chiuso mediante un sistema di tenuta flessibile, la cui integrità è garantita da barre paraurti in acciaio che intervengono nel caso in cui il tetto subisca spostamenti importanti nel proprio piano. Qualora si danneggiasse il sistema di tenuta, si potrebbero verificare la fuoriuscita di vapori, la formazione di scintille e l'innesco di un incendio. In questo caso, la dinamica orizzontale del tetto, con il sistema di tenuta e con le barre paraurti, assume rilievo nell'ambito del comportamento sismico di un serbatoio a tetto galleggiante.
In questo lavoro si intende fornire un approccio completo alla valutazione della vulnerabilità sismica di un componente industriale, nonché avanzare delle proposte in termini di gestione del rischio, sia dal punto di vista della mitigazione che del monitoraggio strutturale.
A seguito di una breve descrizione delle differenti tipologie di danno da sisma per i serbatoi a tetto galleggiante, viene illustrata una modalità di valutazione probabilistica della vulnerabilità sismica fondata sull'utilizzo delle curve di fragilità. Infine, vengono presentate alcune proposte di intervento e/o di monitoraggio strutturale per serbatoi a tetto galleggiante, tenendo in considerazione quanto appreso nella fase di valutazione.

2 Tipologie di danno per serbatoi atmosferici a tetto galleggiante

Le tipologie di danno da sisma a cui è soggetto un serbatoio a tetto galleggiante sono varie e sono legate alle componenti impulsiva e convettiva del moto del fluido.
I danni riconducibili alla componente impulsiva coinvolgono principalmente gli elementi strutturali:

- Instabilità plastica del mantello, o deformazione a zampa d'elefante. Le tensioni circonferenziali, unitamente a quelle verticali di compressione, crescono fino a che, in prossimità del fondo, non si produce una instabilità locale.
- Instabilità elastica del mantello, o deformazione a diamante. La tensione verticale supera il valore critico dello sforzo verticale.
- Sollevamento del fondo e conseguenze, quali rottura del cordone di saldatura tra il fondo ed il mantello in serbatoi non ancorati, rottura in corrispondenza dell'ingresso/uscita di tubazioni.

La componente convettiva è responsabile dei danni alla parte superiore del mantello e al tetto del serbatoio, quali deformazioni eccessive, inclinazione e affondamento del tetto. In particolare, la crisi del tetto galleggiante e, soprattutto, degli elementi non strutturali ad esso connessi può provocare il rilascio di sostanze pericolose-inquinanti ed infiammabili- con possibile innesco di incendi ed esplosioni. Pertanto, i

danni connessi alla componente convettiva del moto del fluido sono quelli maggiormente coinvolti in incidenti che possono divenire rilevanti.
Inoltre, la dinamica del tetto nel proprio piano può essere anch'essa causa di un incidente rilevante: l'impatto puntuale e ripetuto delle barre paraurti o del tetto contro il mantello del serbatoio può generare elevate forze di contatto. Oltre a produrre scintille dovute al contatto tra due materiali metallici, capaci di accendere i vapori, l'impatto può anche causare danni locali al mantello.

3 Valutazione della vulnerabilità sismica

Il rischio è definito come il prodotto di tre fattori: pericolosità, vulnerabilità ed esposizione. L'analisi di rischio si pone l'obiettivo di individuare, valutare e, eventualmente, mitigare, il rischio connesso ai possibili scenari incidentali. L'adeguata valutazione della vulnerabilità sismica delle strutture e delle componenti industriali, pertanto, consente di svolgere una analisi di rischio che tenga conto di scenari incidentali innescati e/o aggravati dalla presenza di un terremoto (fig. 1).

3.1 Modellazione dei serbatoi atmosferici

La progettazione dei serbatoi in Italia fa riferimento alle NTC 2018 ed agli Eurocodici. Per i serbatoi di stoccaggio le verifiche possono essere eseguite secondo l'EC 8-4 o secondo le API Std 650. In particolare, l'EC8-4 propone un modello meccanico a masse concentrate che tiene conto sia della componente impulsiva che convettiva del moto del fluido. La norma fornisce espressioni analitiche per il calcolo della pressione idrodinamica agente sul mantello e sulla base, ed anche un modello semplificato per il calcolo del taglio alla base e del momento ribaltante. Le verifiche di sicurezza riguardano l'instabilità del mantello, lo scorrimento del fondo, il sollevamento del fondo e il superamento del franco libero.
In Matsui [16] il tetto galleggiante a doppio pontone è modellato come una piastra elastica isotropa con massa e rigidezza uniformi. In Matsui [17] il tetto galleggiante a singolo pontone è modellato come una piastra isotropa elastica a massa e rigidezza costanti nella zona centrale e una trave al bordo con rigidezza più elevata. Entrambe le formulazioni proposte si inquadrano nella teoria del potenziale lineare, e consentono di valutare gli spostamenti verticali e le sollecitazioni del tetto.
In [18] viene adottato un approccio semplificato per lo studio della dinamica orizzontale del tetto galleggiante: in ipotesi di piccoli spostamenti, si assume che il moto orizzontale e verticale del tetto siano tra loro disaccoppiati; nel modello agli elementi finiti proposto, pertanto, non viene modellato il fluido. L'impatto tra il tetto e il mantello si considera idealmente rigido elastico.

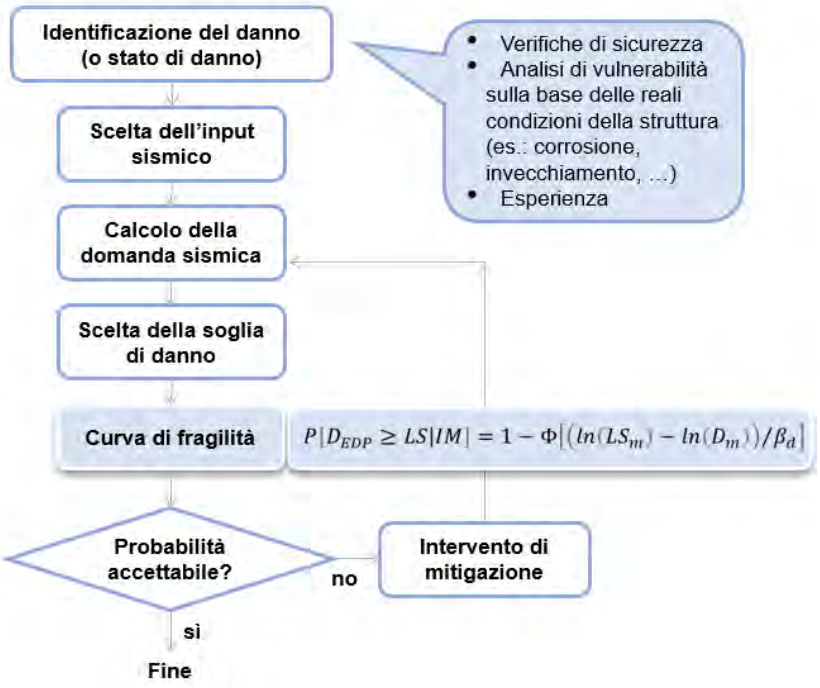


Figura 1. Schema di esempio per una analisi di rischio sismico

3.2 Modello probabilistico della domanda sismica

La funzione di fragilità rappresenta la probabilità che la domanda sismica (EDP - Engineering Demand Parameter) su una struttura superi lo stato limite (LS), inteso come condizione indesiderabile, per una certa misura di intensità (IM) del terremoto [19].

Il modello probabilistico della domanda sismica stabilisce la relazione tra EDP e IM del terremoto. Per definire questa relazione, possono essere utilizzati diversi metodi analitici. Il metodo Cloud è uno dei più comunemente utilizzati, perché, a differenza di altri metodi, adotta in input accelerogrammi non scalati.

Nell'ipotesi di una distribuzione lognormale di probabilità per la EDP, la domanda media D_m dipende da IM secondo una legge di potenza del tipo

$$D_m = a(IM)^b \tag{1}$$

dove a e b sono i coefficienti ottenuti per regressione lineare di D e IM sul piano bi-logaritmico

$$ln(D_m) = b \cdot ln(IM) + ln(a) \tag{2}$$

Il modello di probabilità della domanda sismica assume si scrive come

$$P[D \geq LS|IM] = 1 - \Phi\left(\frac{ln(LS) - ln(D_m)}{\sqrt{{\beta_{D|IM}}^2 + {\beta_{LS}}^2}}\right) \tag{3}$$

con Φ funzione di distribuzione normale cumulativa standard, $\beta_{D|IM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(ln(D_i)-ln(D_m))}{N-2}}$ deviazione standard logaritmica condizionale in funzione della variabilità del set di dati, N è il numero di moti al suolo, D_i(i=1,...,N) è il valore calcolato i-esimo della domanda, β_{LS} è l'incertezza relativa allo stato limite selezionato (in questo lavoro è uguale a 0).

3.3 Descrizione del caso studio

È stata valutata la vulnerabilità sismica di un serbatoio con tetto galleggiante a doppio pontone non ancorato a terra, le cui principali caratteristiche geometriche sono riportate in tab.1.

Raggio del serbatoio [m]	27.43
Altezza del serbatoio [m]	15.60
Altezza del fluido [m]	13.60
Densità di massa del tetto [kg/m^3]	380.00
Spessore del tetto [m]	0.80
Spessore della virola di fondo [m]	0.019

Tabella 1. Caratteristiche geometriche del caso studio

3.4 Selezione del set di accelerogrammi

Un set di 20 accelerogrammi è stato scelto per svolgere le analisi di fragilità. In particolare, sono stati selezionati 6 terremoti di lunga durata, 8 terremoti di tipo near fault e 7 record standard per coprire un adeguato range di valori di PGA.

3.5 Curve di fragilità

Per il caso studio in esame, sono state individuate cinque tipologie di danno: lo scorrimento del fondo, l'instabilità a zampa di elefante, l'instabilità a forma di diamante, il superamento del franco libero, l'impatto del tetto contro il mantello. Le prime tre sono state valutate secondo il modello presente in EC4-8, la quarta tramite il modello in [16], mentre l'ultima in base a [18]. Il ribaltamento del fondo non si verifica per questo tipo di serbatoio (rapporto di forma $s = H/R \cong 0.5$).

In fig.2 sono riportate le curve di fragilità realizzate per la valutazione della vulnerabilità nei confronti delle diverse tipologie di danno individuate. In fig.2a sono mostrate la probabilità che si verifichi lo scorrimento del fondo, ovvero che il taglio alla base del serbatoio superi la forza di attrito offerta dal piano d'appoggio, valutata per un coefficiente di attrito pari a 0.4 (il valore massimo concesso dalle norme). Le fig.2b e 2c rappresentano le curve di fragilità associate alla possibilità che si verifichino, rispettivamente, deformazioni del mantello a zampa di elefante e a diamante. I danni al mantello, generalmente meno coinvolti in incidenti rilevanti, risultano comunque piuttosto frequenti.

La curva di fragilità di fig.2e rappresenta la probabilità che si verifichi almeno un impatto: il serbatoio risulta, in questo caso, particolarmente vulnerabile nei confronti di questo scenario. Infine, le probabilità associate al superamento del franco libero (fig. 2d) risultano poco significative a fronte di un franco libero pari a 2.0 m.

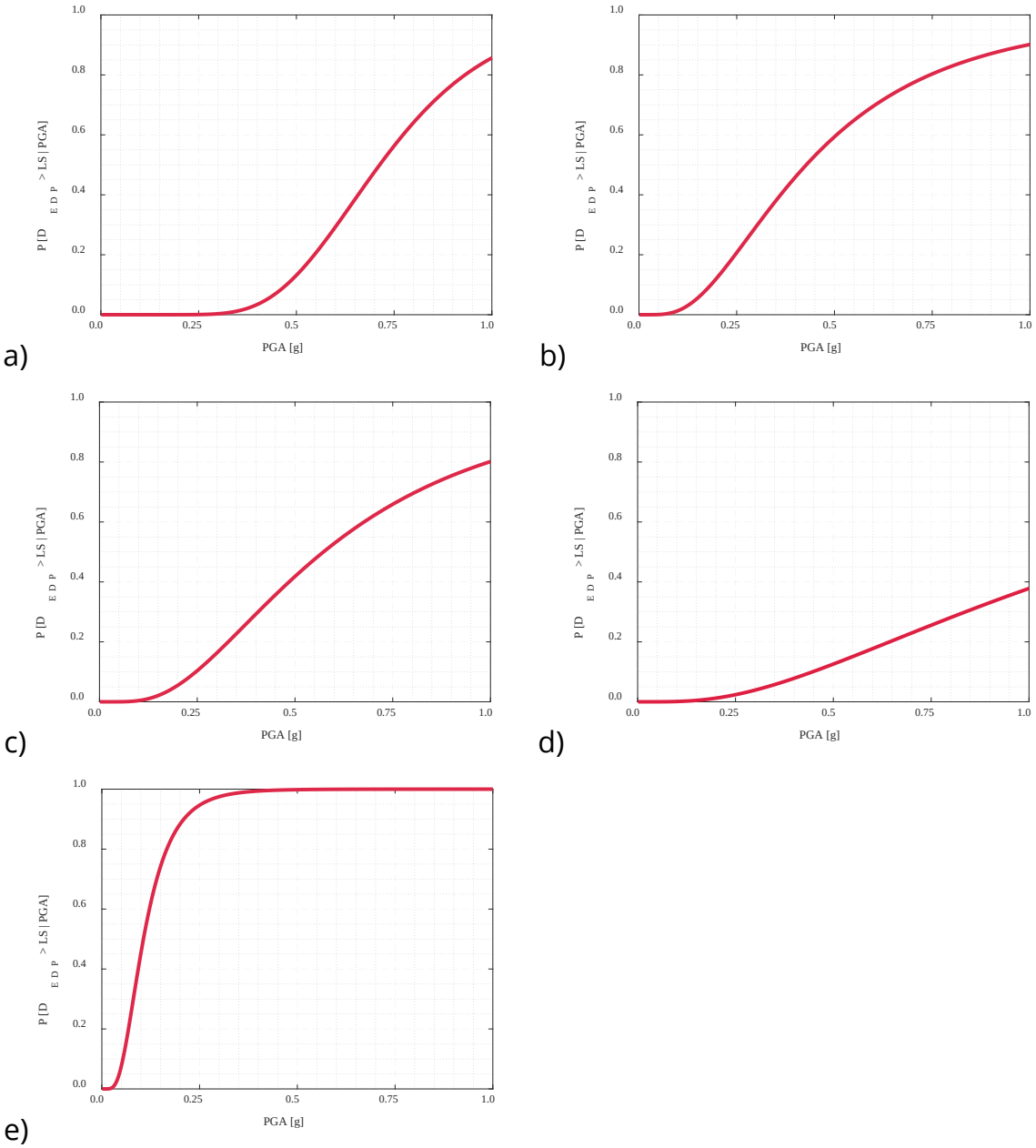


Figura 2. Curve di fragilità per a) scorrimento del fondo, b) instabilità a zampa di elefante, c) instabilità a forma di diamante; d) superamento del franco libero; e) impatto del tetto contro il mantello.

4 Gestione del rischio sismico

4.1 Mitigazione delle oscillazioni del tetto galleggiante

Per ognuna delle tipologie di danno individuate, a meno del superamento del franco libero, sono state proposte delle soluzioni di mitigazione del rischio (tab.2).

Danno	Proposta di mitigazione
Scorrimento del fondo	Riduzione della capacità del 20%
Deformazione a zampa di elefante	Aumento dello spessore del mantello di 2 mm
Deformazione a diamante	Aumento dello spessore del mantello di 2 mm
Impatto tetto-mantello	Aumento della rigidezza del sistema di tenuta

Tabella 2. Soluzioni di mitigazioni proposte

Sulla base di tali soluzioni, è stata nuovamente valutata la vulnerabilità sismica del serbatoio nei confronti delle differenti tipologie di danno (fig.3).
Le curve di fragilità, a valle dell'intervento di mitigazione, permettono di osservare una generale riduzione della probabilità che si verifichi ciascuno scenario di danno.

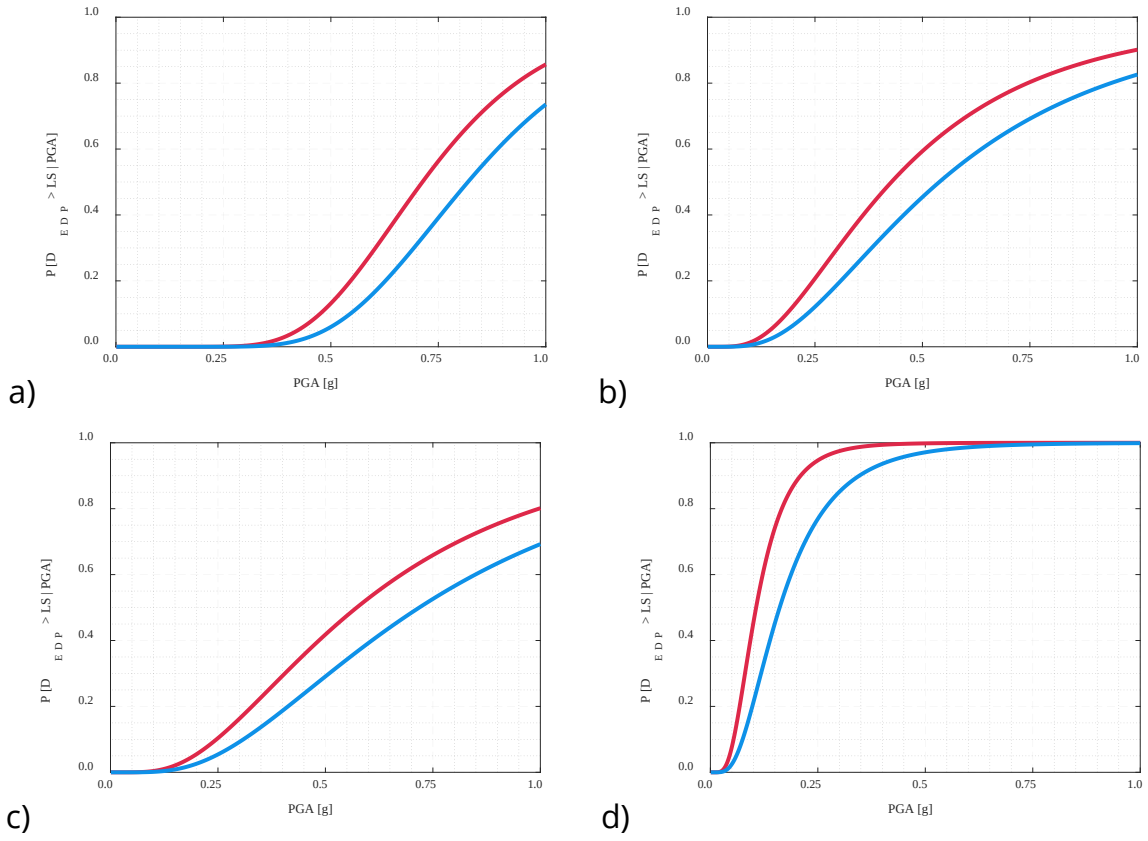
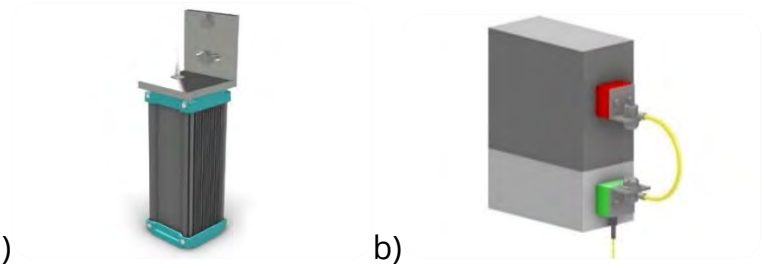


Figura 3. Curve di fragilità pre (linea rossa) e post (linea blu) intervento per a) scorrimento del fondo, instabilità a zampa di elefante e instabilità a forma di diamante; b) sversamento del liquido, impatto contro il mantello.

4.2 Sistemi di monitoraggio con sensori in fibre ottiche

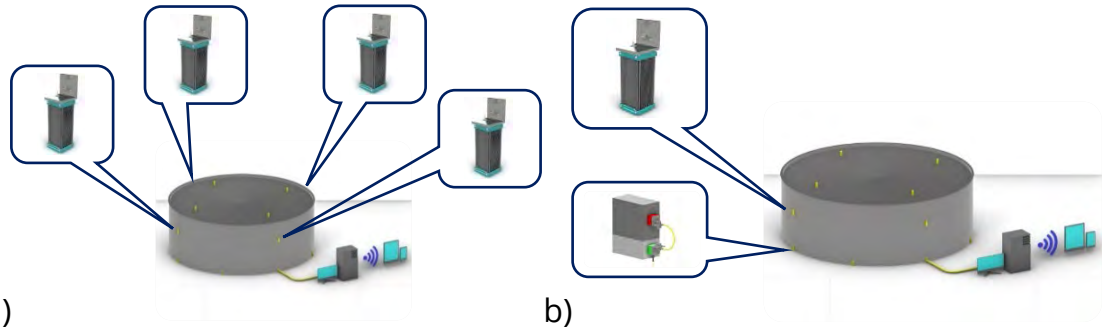
L'ampia varietà delle tipologie di danno da sisma a cui è soggetto un serbatoio a tetto galleggiante, sommate alla particolare condizione ambientale in cui si trova l'apparecchiatura in esercizio e a seguito dell'evento, richiedono un sistema di controllo dinamico-continuo pre e post terremoto, robusto, multifunzionale e remotizzabile. Per caratteristiche metrologiche, funzionali e operative, la tecnologia dei sensori in fibra ottica FBG (Fiber Bragg Grating) e FSI (Fiber Segment Interferometry), risponde a tutte queste esigenze, con l'aggiunta di un aspetto non secondario, che è la sicurezza di esercizio grazie alla caratteristica dielettrica e alla certificazione ATEX; tali sensori sono in grado di operare a chilometri di distanza per la gestione e controllo delle operazioni SHM (Structural Health Monitoring), EW (Early Warning) e PM (Predictive Maintenance).

I sensori in fibra ottica FBG/FSI sono trasduttori multifunzione in grado di rilevare ad alta frequenza di campionamento, con elevata accuratezza e a lunga distanza, vibrazioni, deformazioni, temperature, variazioni di lunghezza, pressioni dinamiche, variazioni di geometria 2D e 3D e accelerazioni, lungo una fibra ottica monomodale opportunamente interfacciata alla struttura o al componente da monitorare [10]. In particolare, una combinazione di inclinometri e fessurimetri 2D/3D a fibre ottiche opportunamente disposti consente la realizzazione di una rete sensoristica adatta al monitoraggio strutturale del serbatoio a tetto galleggiante. Le instabilità elastica ed elasto-plastica del mantello potrebbero essere individuate e tenute sotto controllo, sia a livello qualitativo che quantitativo, attraverso l'uso di inclinometri biassiali installati a mezzo collanti strutturali sui quattro punti cardinali della superficie esterna del mantello a 2/3 dell'altezza da terra. L'entità del sollevamento del fondo di un serbatoio, invece, è dinamicamente quantificabile attraverso l'uso integrato di inclinometri biassiali e di fessurimetri, prevalentemente impiegati per l'individuazione della rottura dell'ancoraggio del serbatoio al suolo. Allo stesso modo è possibile individuare la rottura dell'ancoraggio e l'eventuale quantificare lo sfilamento, lo snervamento o l'entità del cedimento strutturale dell'ancoraggio stesso, attraverso l'uso combinato degli inclinometri con fessurimetri. Gli eventuali danni al sistema di tubazioni a servizio di un serbatoio possono essere rilevati con trasduttori in grado di individuare e localizzare la separazione anomala reciproca delle flange e il distacco del punto di giunzione tra tubazione e serbatoio [9]. Questi speciali sensori sviluppati come flanges leakage detectors, sono costituiti da uno speciale trasduttore anulare strumentato con sensori applicabile attorno ai collari di due flange accoppiate. Il sensore così configurato è in grado di rilevare la perdita di liquido da una flangia su cui è installato mediante un doppio controllo di tipo meccanico e idraulico, che consente di rilevare l'apertura della flangia oltre il valore limite consentito e in contemporanea l'eventuale fuoriuscita di liquido. Infine, l'inclinazione anomala del tetto galleggiante può essere individuata dinamicamente a mezzo di inclinometri biassiali.



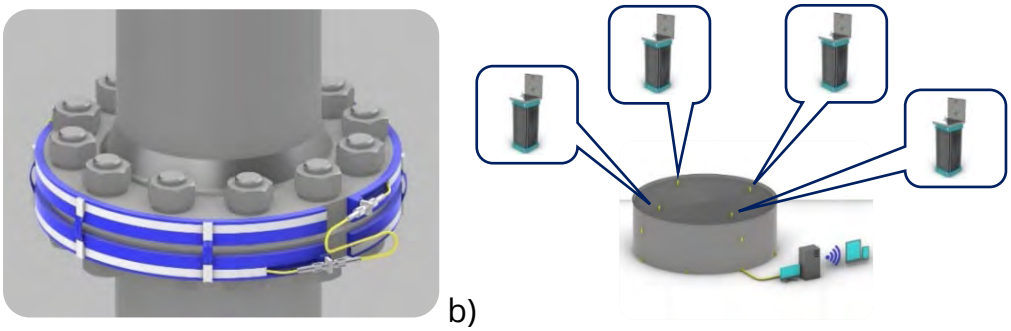
a) b)

Figura 4. a) inclinometro biassiale a fibre ottiche; b) esempio di fessurimetro a fibre ottiche.



a) b)

Figura 5. a) disposizione di installazione di 4 inclinometri dedicati all'instabilità elasto-plastica e elastica; b) inclinometri biassiali e misuratori 2D/3D combinati per il monitoraggio dei danni dovuti al sollevamento del fondo del serbatoio.



a) b)

Figura 6. a) flange a fibre ottiche, rilevatori di perdite installati su collari di una flangia di collegamento del tubo; b) disposizione degli inclinometri biassiali sul tetto galleggiante.

5 Conclusioni

In questo lavoro è stata illustrata una metodologia di analisi di rischio sismico di uno stabilimento PIR, dalla valutazione della vulnerabilità dell'apparecchiatura industriale, alle proposte di gestione del rischio derivante dalle criticità emerse in fase di valutazione. In particolare, è stata affrontata la valutazione della vulnerabilità sismica di un serbatoio atmosferico a tetto galleggiante. Le curve di fragilità, realizzate *ad hoc*

per il caso studio in esame, permettono di ottenere un quadro più ampio, rispetto alle attuali norme, in materia di sicurezza del serbatoio.
Nei confronti delle tipologie di danno più probabili, quali scorrimento del fondo, deformazioni del mantello e impatto tra tetto e mantello, sono state proposte alcune soluzioni di gestione del rischio sismico, sia in termini di interventi di mitigazione strutturali e non strutturali, sia tramite l'utilizzo di sensori dedicati con tecnologia a fibre ottiche.

6 Bibliografia

[1] Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti con- nessi con sostanze pericolose. 2015.
[2] A. Mesa-Gómez, J. Casal, F. Muñoz, Risk analysis in Natech events: State of the art. *J. Loss. Prev. Process. Ind.* 2020; 64.
[3] A. C. Caputo, F. Paolacci, O. S. Bursi, R. Giannini. Problems and Perspectives in Seismic Quantitative Risk Analysis of Chemical Process Plants. *J. Press. Vessel Technol. Trans. ASME*. 2019; 141.
[4] D. Zahedin Labaf, M. De Angelis, M. Basili. Multi-objective optimal design and seismic assessment of an inerter-based hybrid control system for storage tanks. *Bull. Earthq. Eng.* 2023; 21: 1481–1507.
[5] F. Paolacci, R. Giannini, M. De Angelis, M. Ciucci. Experimental investigation on the seismic behaviour of base-isolated steel storage tank. Atti della Conferenza su *Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures,* Guangzhou, China, 17-21 novembre, 2009.
[6] F. Paolacci, R. Giannini, M. De Angelis, M. Ciucci. Seismic vulnerability of major-hazard industrial plants and applicability of innovative seismic protection systems for its reduction. Atti della Conferenza su *Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures,* Guangzhou, China, 17-21 novembre, 2009.
[7] A. Marino, M. Ciucci, F. Paolacci. Smart technologies for integrated natural risk management: Innovative methodologies and remote sensing. Atti della Conferenza su *Pressure Vessels and Piping PVP*, Waikoloa, Hawaii, USA, 16–20 luglio, 2017.
[8] M. Ciucci, A. Marino. Integrated smart seismic risks management. Atti della Conferenza su *Pressure Vessels and Piping PVP*, San Antonio, Texas, 14-19 luglio, 2019.
[9] F. Paolacci, G. Quinci, C. Nardin, V. Vezzari, A. Marino, M. Ciucci. Bolted flange joints equipped with FBG sensors in industrial piping systems subjected to seismic loads. *J. Loss. Prev. Process. Ind*. 2021; 72.
[10] M. Salimbeni, M. De Angelis, M. Ciucci. Earthquake NaTech Risk Assessment in Major-Hazard Industrial Plants, a Case Study: Cylindrical Liquid Storage Tank with Floating Roof. Atti della Conferenza su *Pressure Vessels and Piping PVP*, Las Vegas, Nevada, 17-22 luglio, 2022.
[11] G. Fabbrocino, I. Iervolino, G. Manfredi, E. Salzano. Seismic early warning systems: Some insights for the process industry. Atto di Conferenza su *Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure,* Shenzhen, China, 16-18 novembre, 2005.

[12] API Standard 650 - Welded tanks for oil storage. Eleventh edition. American Petroleum Institute, 2012.
[13] Uni En 1998, Eurocodice 8 Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture Parte 4: Silos, serbatoi e tubazioni. 1994.
[14] P. Moshashaei, S. S. Alizadeh, L. Khazini, M. Asghari-Jafarabadi. Investigate the Causes of Fires and Explosions at External Floating Roof Tanks: A Comprehensive Literature Review. *J. Fail. Anal. Prev.* 2017; 17: 1044–1052.
[15] F. G. Rammerstorfer, K. Scharf, F. D. Fisher. Storage tanks under earthquake loading. *Appl. Mech. Rev.* 1990; 43: 261–282.
[16] T. Matsui. Sloshing in a cylindrical liquid storage tank with a floating roof under seismic excitation. *J. Press. Vessel. Technol.* 2007; 129: 557–566.
[17] T. Matsui. Sloshing in a cylindrical liquid storage tank with a single-deck type floating roof under seismic excitation. *J. Press. Vessel. Technol.* 2009; 131.
[18] M. Salimbeni, M. De Angelis, M. Ciucci. Earthquake NaTech risk: numerical analysis of floating roof and sealing system in cylindrical storage tanks. Atto di Conferenza su *Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Atene, Grecia, 12-14 giugno, 2023.
[19] D. Lallemant, A. S. Kiremidjian, H. Burton. Statistical procedures for developing earthquake damage fragility curves. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 2015.

Navigazione Risk-Aware in impianti industriali PIR a rischio di incidenti NaTech

A. Marino[1], G. J. O'Reilly[2], P. Dubini[3], F. Dacarro[3], S. Mascetti[4]

[1]Inail - Dit
[2]Scuola Universitaria Superiore IUSS Pavia
[3]EUCENTRE
[4]Università degli Studi di Milano

Abstract

Gli stabilimenti industriali con pericolo di incidente rilevante (PIR) sono piuttosto vulnerabili a eventi NaTech da Sisma, provocati da danni ai componenti strutturali e non-strutturali e relativi al potenziale rilascio di sostanze pericolose. Per mitigare e gestire questo rischio è stato realizzato il progetto di ricerca ROSSINI e sono qui descritti i risultati relativi al miglioramento delle condizioni di sicurezza dei lavoratori dello stabilimento e alla navigazione risk-based in situazioni di emergenza. È stato definito un database opportuno di curve di fragilità e vulnerabilità che caratterizzano la risposta sismica dei vari componenti della tipologia impiantistica identificata Il progetto comprende un sistema di acquisizione dati, consistente in una scheda di acquisizione di una configurazione di sensoristica con differenti tecnologie, che processa l'evento sismico e altri dati ambientali prima di inviarli come input verso i moduli di identificazione e valutazione del rischio (RIE). Qui i rischi associati al danno strutturale e non-strutturale, relativi al rilascio di sostanze pericolose, sono valutati e combinati a formare mappa di rischio navigabile. Questa mappa è utilizzata in una app dedicata di navigazione per l'esodo sicuro dei lavoratori da un impianto industriale in caso di incidente. Per dimostrare l'implementazione di questo sistema e stato realizzato, simulato e testato anche su tavola vibrante, un caso di studio consistente in edifici, componenti non strutturali, serbatoi, sistemi di tubazioni e serbatoi di stoccaggio di sostanze chimiche.

Keywords: NaTech, Navigazione risk-aware, Stabilimenti PIR.

1. Introduzione

Gli incidenti provocati da pericoli naturali come i terremoti che innescano disastri tecnologici sono chiamati incidenti NaTech. Quando si verificano negli impianti industriali, questi eventi hanno un alto potenziale di danni e collassi di elementi strutturali e non strutturali, oltre al rilascio di sostanze pericolose nell'ambiente. L'Italia è particolarmente suscettibile agli eventi NaTech, particolarmente dannosi per strutture complesse come impianti industriali costituiti da numerosi edifici e

attrezzature pericolose, il cui danneggiamento potrebbe comportare impatti significativi sulla salute umana. Inoltre, molti processi all'interno degli impianti industriali sono condotti in serie, il che significa che il danneggiamento di un componente potrebbe arrestare l'intero processo con conseguente interruzione dell'attività. Nel corso degli anni, sono state documentate notevoli quantità di guasti che hanno causato vittime negli impianti industriali a seguito di eventi sismici. Il terremoto di Izmit del 1999 in Turchia ha causato danni significativi alla raffineria di Tupras in seguito al crollo strutturale di un camino in cemento e al successivo rilascio di un grande volume di sostanze pericolose nell'ambiente circostante. La vulnerabilità degli impianti PIR è accentuata dal rischio di rilascio di sostanze pericolose a causa della rottura delle condotte o del cedimento dei serbatoi di stoccaggio. Inoltre, il crollo degli edifici all'interno dell'area dell'impianto può portare a danneggiamenti simultanei delle tubazioni amplificando anche le conseguenze del possibile malfunzionamento dei sistemi di sicurezza attraverso catene multiple di incidenti. Si evidenzia inoltre che le conseguenze del danneggiamento dei componenti e del conseguente rilascio di sostanze pericolose possono essere gravi anche nonostante una moderata intensità del terremoto, e quindi non devono essere ignorate. Anche se l'implementazione di adeguati sistemi di sicurezza è di grande importanza, l'esodo sicuro dei lavoratori in situazione di emergenza rimane una priorità. Pertanto, all'interno di questo studio, è stato sviluppato un sistema di navigazione risk-aware con l'obiettivo di gestire e mitigare il rischio sismico negli impianti industriali a seguito di eventi sismici. In questo lavoro, gli obiettivi del progetto ROSSINI sono illustrati insieme alle tecnologie dei sensori utilizzate. La sua implementazione è dettagliata con l'uso di un array multi-sensore per il calcolo integrato del rischio in impianti industriali a rischio di incidenti NaTech. Una parte fondamentale del sistema riguarda i moduli di identificazione e valutazione del rischio (RIE), in cui le metriche di rischio associate al cedimento strutturale e non strutturale sono combinate con i rischi dovuti al rilascio di sostanze. Per un dato scuotimento sismico rilevato in un impianto industriale attraverso l'array multisensore, il sistema fornisce una mappa del rischio in tempo reale che i lavoratori dell'impianto possono utilizzare ed essere guidati per uscire attraverso il percorso più sicuro (cioè a rischio minimo) calcolato automaticamente dal sistema. I rischi associati ai danni a elementi come sistemi di tubazioni, strutture industriali e serbatoi di stoccaggio sono combinati con la probabilità che le sostanze pericolose vengano rilasciate e diffuse nell'ambiente. Le stime del rischio di danneggiamento strutturale e non strutturale si basano su un approccio classico delle curve di fragilità, in cui la probabilità di una determinata soglia di danno, e le successive conseguenze, sono stimate da un database di curve di fragilità. Infine, viene descritta l'architettura computazionale sviluppata per l'identificazione della via di uscita più sicura e la sua implementazione all'interno di un'app mobile. Utilizzando gli strumenti sviluppati, il sistema viene valutato attraverso

la sua applicazione a casi studio considerando scuotimenti del terreno di varie intensità e vari scenari.

2. Panoramica del quadro di riferimento per la valutazione del rischio

La stima del rischio a seguito di un evento sismico richiede la conoscenza dei modelli di fragilità relativi alla probabilità di collasso di componenti strutturali e non strutturali all'interno dell'impianto industriale. L'architettura del framework RIE utilizzata come parte del progetto ROSSINI è illustrata schematicamente nella Figura 1. Una volta rilevato un evento sismico, il segnale grezzo viene elaborato e trasmesso attraverso la scheda di acquisizione dati, dove le misure di intensità del movimento del terreno e altri dati della sensoristica vengono passati ai moduli RIE. Qui, i moduli RIE utilizzano il database analitico composto da funzioni di fragilità e conseguenza e stimano i danni e le dispersioni di sostanze pericolose. Infine, l'output dei rischi viene trasmesso al sistema di navigazione, che mappa i rischi e fornisce il percorso più sicuro per un determinato lavoratore attraverso l'app mobile.

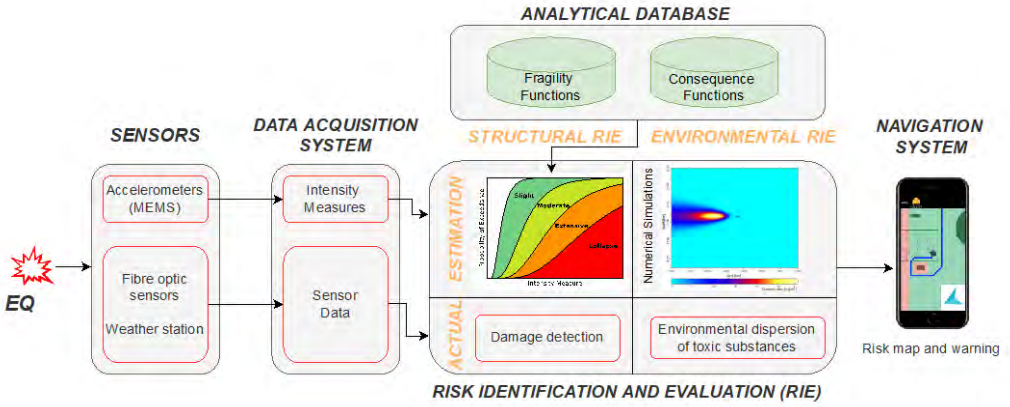


Figura 1. Diagramma di flusso del progetto ROSSINI

3. Tecnologie della sensoristica

La piattaforma utilizzata in ROSSINI integra moduli RIE strutturali e ambientali. I rischi associati ai danni strutturali degli edifici e dei componenti dell'impianto danneggiati, come condotte e serbatoi, sono stimati all'interno del modulo strutturale RIE. Il modulo RIE ambientale invece si basa sulla stima del campo di concentrazione di sostanze chimiche nell'impianto industriale dovuto al rilascio dai componenti dell'impianto e sulla simulazione della sua diffusione spaziale nel tempo. I dati di input per entrambe le RIE sono implementati all'interno della piattaforma ROSSINI, che acquisisce e analizza i dati provenienti da diverse tecnologie si sensoristica, come accelerometri Micro-Electro-Mechanical-System (MEMS), sensori a fibra ottica (FO) (ad esempio, Fiber Bragg Grating, FBG e basato su backscattering distribuito).

3.1 Sistema di acquisizione dati

Come illustrato in Figura 2, il sistema di acquisizione dati è costituito da più sensori installati nell'ambiente locale, unità di elaborazione distribuite (schede di acquisizione dati) e modulo di integrazione e filtraggio dei dati in esecuzione sul server ROSSINI, dove robustezza e ridondanza sono di primaria importanza nella fase di progettazione. Nel campo dell'acquisizione dati, la novità del sistema ROSSINI risiede nella possibilità di sfruttare diverse tecnologie di sensori (accelerometri MEMS, sensori FO) a seconda delle specifiche esigenze dell'impianto e delle strategie prestabilite. L'architettura hardware è progettata per essere robusta e ridondante rispetto ai problemi che possono verificarsi durante i terremoti o ai gravi danni alle strutture che possono compromettere la sicurezza e la funzionalità del sistema di monitoraggio e allarme. Per garantire la corretta funzionalità in caso di guasto dell'impianto elettrico, la scheda di acquisizione è inoltre dotata di una batteria che garantisce 12 ore di servizio e di un pannello solare per ricaricarla durante le ore soleggiate della giornata. Inoltre, l'elettronica della scheda è adeguatamente protetta da urti accidentali o caduta di macerie da una scatola di plastica rigida, consentendo al sistema di funzionare in condizioni avverse e ambienti difficili. Infine, la scheda di acquisizione supporta la connessione Gigabit cablata alla rete locale e il modem wireless 4G/LTE. La connessione fisica è la più affidabile ed efficiente attualmente disponibile e viene utilizzata come connessione principale, mentre quella wireless viene utilizzata come opzione fail-safe. Sebbene secondaria, la connessione wireless consente di condividere i dati in tempo reale con il server ROSSINI con una latenza minima.

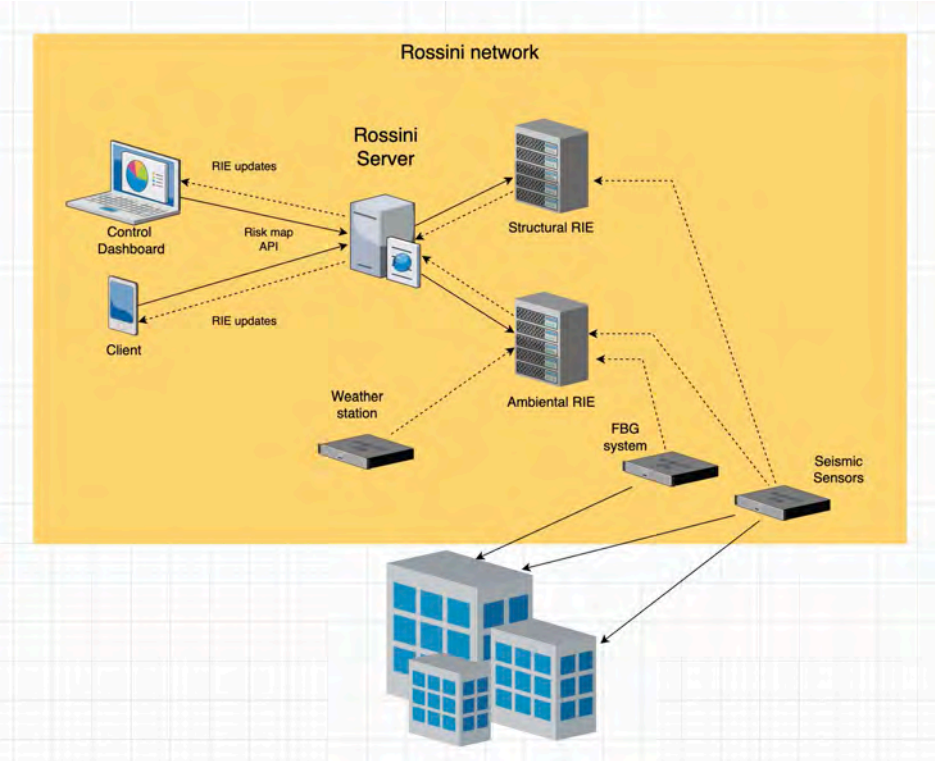


Figura 2. Illustrazione dei sensori e della loro interazione all'interno dei moduli RIE

4. Identificazione e valutazione del rischio (RIE)

4.1 RIE Strutturale

Il modulo RIE strutturale calcola il rischio in base alla probabilità di superamento di specifici DS. Questo è valido sia per i componenti strutturali che non strutturali e viene calcolato per un dato IM ottenuto tramite la sensoristica installata in tutto l'impianto industriale. L'uso di curve di fragilità consente la stima diretta della probabilità di danneggiamento dei componenti e tiene conto delle varie incertezze intrinsecamente presenti (ad esempio, variabilità della registrazione del movimento del terreno, incertezza della modellazione); Pertanto, queste probabilità sono utilizzate per indicare i possibili impatti sul percorso che i lavoratori industriali possono utilizzare come parte del loro esodo in condizioni stabili non di emergenza all'interno dell'area dell'impianto industriale.

4.2 RIE ambientale

I valori di rischio per la salute che descrivono i livelli di contaminazione nell'ambiente locale sono mappati per identificare le aree hot-spot con maggiori rischi per la salute dei lavoratori. I rischi per la salute sono calcolati a partire dal campo di concentrazione spazialmente risolto ottenuto dalla dispersione atmosferica per ricavare il possibile livello di gravità degli impatti sulla salute umana. Questo livello di rischio ambientale viene quindi combinato con i rischi strutturali, per ottenere una mappa unificata dei rischi che fornisce indicazioni per ridurre al minimo il rischio complessivo per la salute dei lavoratori.

4.3 Rischio combinato

Viene quindi calcolato un rischio combinato sulla base dei rischi strutturali e ambientali stimati. Nei casi in cui sono disponibili due valori di rischio sia dalle RIE strutturali che ambientali, il massimo dei due viene utilizzato per realizzare la mappa. Questa mappa combinata viene quindi inserita nel sistema di navigazione e comunicata al dispositivo mobile del lavoratore dell'impianto industriale. È importante sottolineare che i livelli di rischio strutturale e ambientale per la salute non sono necessariamente determinati dagli stessi fattori causali, il che significa che, a seconda del livello di IM del movimento del terreno registrato, il rischio strutturale potrebbe essere stimato al livello 3, mentre a causa dei livelli di concentrazione di sostanze pericolose rilasciate, il rischio per la salute potrebbe essere stimato al livello 7, o viceversa.

5. Implementazione del sistema di navigazione

5.1 Architettura del sistema

Con il rischio stimato dagli approcci definiti in precedenza, il sistema ROSSINI procede a fornire indicazioni per la navigazione degli operai dell'impianto industriale. L'architettura del sistema è illustrata nella Figura 3 e i suoi componenti principali sono:

- Un dispositivo mobile che esegue l'app client che guida il lavoratore durante le emergenze;
- Il server ROSSINI, che acquisisce i dati dei sensori e li utilizza per calcolare la mappa di rischio combinata; la mappa dei rischi viene quindi trasmessa al client;
- Un insieme di sensori che comunicano con il server ROSSINI direttamente o attraverso una scheda di acquisizione dati.

Il server ROSSINI comprende diversi moduli, in particolare:

- Un modulo di integrazione e filtraggio dei dati, che riceve i dati grezzi dai sensori, integra e filtra i dati prima di fornirli ai moduli RIE;
- Il modulo RIE, che integra le RIE strutturali e ambientali (rispettivamente Sezione 4.1 e 4.2) combinando il rischio e creando la mappa dei rischi;
- Il modulo di servizio API, che fornisce la mappa dei rischi al client mobile e genera un avviso quando si verifica una situazione potenzialmente pericolosa.

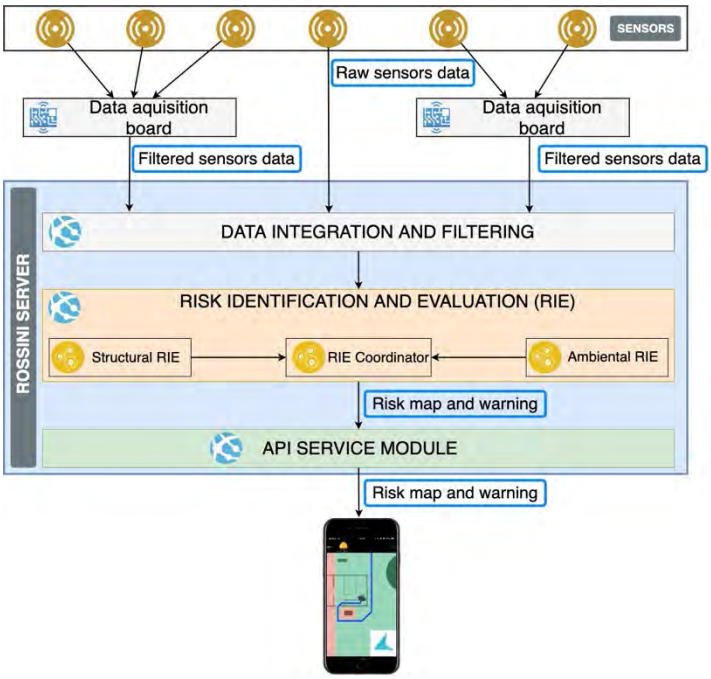


Figura 3. Architettura del sistema ROSSINI

5.2 Applicazione mobile

Durante la creazione dell'app di navigazione, sono emersi due problemi principali: 1) come calcolare in modo affidabile la posizione precisa dell'utente (la localizzazione e l'orientamento); e 2) come interagire con l'utente per guidarlo efficacemente lungo il percorso più sicuro. Dopo aver considerato lo stato dell'arte, ai fini di questo progetto sono state ideate due soluzioni per affrontare questi problemi:

- **Posizionamento**: viene utilizzata una soluzione ibrida basata su una combinazione di tecniche di posizionamento indoor e outdoor. La soluzione esterna utilizza le API del sistema operativo (che combinano GNSS, WiFi e posizionamento cellulare) e la soluzione interna utilizza una soluzione ad hoc basata su marcatori fiduciali e navigazione visuo-inerziale (Figura 4). Questa soluzione offre il vantaggio di evitare l'uso di segnali radio esterni (che potrebbero non essere disponibili in caso di emergenza) e consente di calcolare l'orientamento dell'utente, oltre alla sua posizione. Inoltre, la soluzione si basa sulla realtà aumentata, che viene implementata in librerie stabili e ben mantenute.
- **Istruzioni di navigazione**: una soluzione è stata ideata e illustrata nella Figura 5, che si basa su mappe sia allocentriche che egocentriche. Quando la posizione dell'utente è nota con alta precisione, il sistema mostra le informazioni di navigazione utilizzando una mappa egocentrica e una realtà aumentata per guidare meglio l'utente (Figura 5 sinistra). Nel caso in cui la posizione dell'utente non sia nota con alta precisione, il sistema mostra la mappa con un approccio egocentrico (Figura 5 destra). In entrambi i casi, viene adottato un approccio multimodale, combinando informazioni visive con informazioni audio e tattili. In particolare, l'app adotta tecniche di sonificazione derivate dalla letteratura nel campo delle tecnologie assistive per persone con disabilità visive.



Figura 4. Tecnica di posizionamento indoor tramite soluzione ad-hoc basata su marcatori fiduciali e navigazione visuo-inerziale

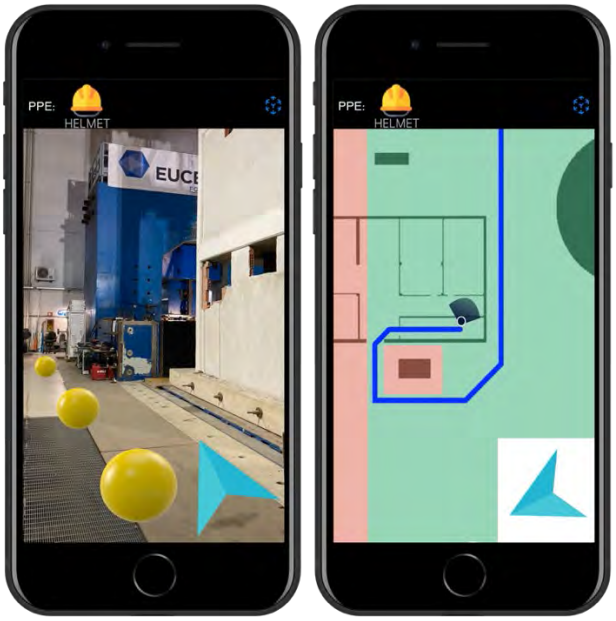


Figura 5. Client mobile ROSSINI. Navigazione egocentrica (a sinistra); Navigazione allocentrica (a destra)

Il percorso risk-aware viene calcolato in base alla posizione di partenza del client da due strutture di dati: la mappa del rischio e il grafico dei percorsi. Quest'ultimo è un grafico diretto che rappresenta tutti i percorsi percorribili. Modella l'area in celle discrete e considera le caratteristiche fisiche dell'ambiente, come le pareti e la porta di emergenza (che può essere attraversata in una sola direzione). Partendo da una planimetria di area, un'app esterna (cioè non mobile) discretizza lo spazio in celle e crea un nodo per ogni cella e le connessioni tra i nodi (ad esempio, due nodi adiacenti sono collegati se non c'è muro tra di loro). La Figura 6 mostra un esempio di mappa discretizzata, dove i pixel neri rappresentano i muri, mentre le frecce verdi partono dal centro di una cella e indicano quali celle adiacenti sono collegate. I segmenti rossi rappresentano le porte di emergenza che possono essere attraversate in una sola direzione, mentre i segmenti grigi rappresentano porte che possono essere attraversate in entrambe le direzioni. Questo grafico viene quindi serializzato come file e trasferito sul dispositivo mobile, dove viene caricato durante l'esecuzione dell'app.

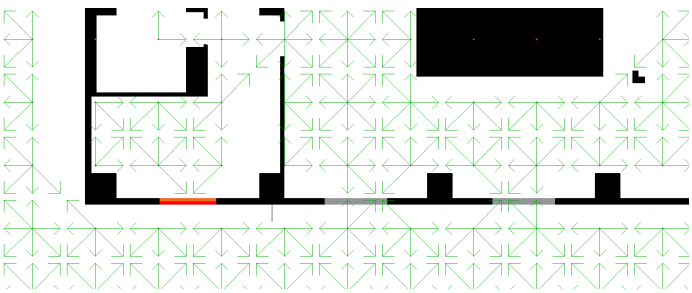


Figura 6. Esempio dell'area discretizzata in celle e delle loro connessioni

Durante il runtime, l'app riceve una nuova mappa dei rischi non appena è disponibile sul server. Una volta ricevuta una mappa di rischio, l'app mobile aggiorna il peso dei nodi nel grafico dei percorsi (ad esempio, se un'area nella mappa del rischio ha un rischio elevato, i nodi nel grafico dei percorsi contenuti in quell'area vengono aggiornati per avere un peso elevato). Quindi, utilizzando un adattamento dell'algoritmo, viene calcolato il percorso migliore dalla posizione dell'utente corrente a ciascuna area sicura e, infine, viene selezionato il percorso migliore tra di loro. Per "percorso migliore" si intende il percorso che minimizza il valore massimo di rischio incontrato. Un esempio è mostrato nella Figura 7. Mentre l'utente è più vicino all'uscita sul lato destro della mappa, il percorso per raggiungere quell'uscita invece fa sì che l'utente eviti un'area con livello di rischio 9 associato al serbatoio (cioè il colore viola). Per questo motivo, l'app suggerisce il percorso (cioè la linea blu) fino all'uscita a sinistra, che è molto più lontana ma richiede al lavoratore di transitare nelle zone con il rischio massimo 3, ed è molto inferiore a 9.

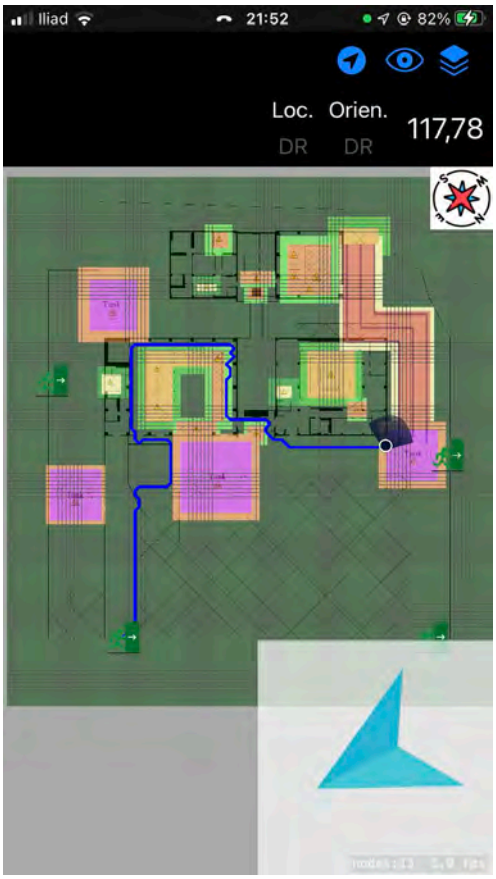


Figura 7. Esempio di illustrazione di come il sistema di navigazione porta il lavoratore dell'impianto industriale lungo il percorso più sicuro e non necessariamente il più vicino

6. Applicazione ad un caso studio

Per l'applicazione del sistema di navigazione risk-aware, è stato identificato un layout di impianto industriale come caso studio. Sulla base della revisione di studi precedenti che analizzano il rischio sismico degli impianti industriali, sono stati identificati diversi processi di impianti industriali rappresentativi per l'ambito del progetto ROSSINI.
Sono stati sviluppati diversi scenari per dimostrare il RIE e le capacità di navigazione del progetto ROSSINI. Gli scenari variavano in termini di tipo di mappa, intensità del terremoto, entità del rilascio della sostanza pericolosa e posizione di partenza di un lavoratore all'interno dell'area della mappa. Lo scuotimento registrato a L'Aquila, in Italia, nel 2009, con un PGA di 0,66 g, è stato selezionato dal database NGA-West2 e utilizzato come input sismico di riferimento innescando una situazione di emergenza.



Figura 8. Test su tavola vibrante

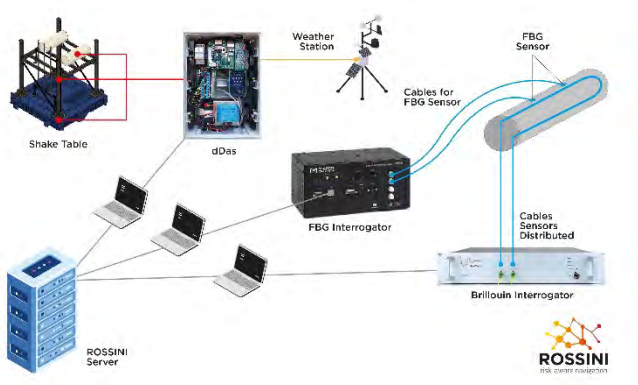


Figura 9. Layout dei sensori e connessione al server ROSSINI

7. Conclusioni

In questo lavoro viene stata presentata una panoramica dello sviluppo del progetto ROSSINI e della sua implementazione nel contesto della navigazione risk-aware per i lavoratori degli impianti PER durante eventi sismici. Per dimostrare le capacità del progetto ROSSINI, il sistema è stato applicato a due layout di impianti come casi di studio. Sono stati impiegati più scenari, in cui il layout dell'impianto è stato variato, insieme a diversi fattori di scala delle registrazioni dello scuotimento, del rilascio di sostanze pericolose e della posizione di partenza di un utente. Gli scenari hanno dimostrato la capacità della piattaforma ROSSINI di generare il percorso a più basso rischio per gli utenti indipendentemente dal fatto che una o entrambe le RE siano state attivate e dal livello di attivazione. Il software di navigazione e le tecniche combinate di calcolo del rischio impiegate possono rappresentare uno strumento efficiente per aumentare la sicurezza dei lavoratori e gestire il rischio negli impianti PIR a seguito di eventi NaTech da Sisma.

8. Bibliografia

[1] eNatech Database. https://enatech.jrc.ec.europa.eu/.
[2] Crowley H, Polidoro B, Pinho R, van Elk J. Framework for Developing Fragility and Consequence Models for Local Personal Risk. *Earthquake Spectra* 2017; **33**(4): 1325–1345. DOI: 10.1193/083116EQS140M.
[3] Barrias A, Casas JR, Villalba S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications. *Sensors (Switzerland)* 2016; **16**(5). DOI: 10.3390/s16050748.
[4] Marino A, Ciucci M. Smart approach to integrated natural risks management for industry 4.0. In: Niezrecki C, Meyendorf NG, Gath K, editors. *Smart Structures and NDE for Energy Systems and Industry 4.0*, SPIE; 2019. DOI: 10.1117/12.2513764.
[5] Paolacci F, Quinci G, Nardin C, Vezzari V, Marino A, Ciucci M. Bolted flange joints equipped with FBG sensors in industrial piping systems subjected to seismic loads. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2021; **72**(March): 104576. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104576.
[6] FEMA. *HAZUS - MH 2.1 Technical manual, Earthquake model, Multi-hazard Loss Estimation Methodology*. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency; 2003.
[7] FEMA. *FEMA P58-3. Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 3 - Performance Assessment Calculation Tool (PACT)*. Washington, D.C.: 2012.
[8] Ahmetovic D, Avanzini F, Barate A, Bernareggi C, Galimberti G, Ludovico LA, *et al.* Sonification of rotation instructions to support navigation of people with visual impairment. *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom 2019* 2019. DOI: 10.1109/PERCOM.2019.8767407.
[9] Presti G, Ahmetovic D, Ducci M, Bernareggi C, Ludovico LA, Baratè A, *et al.* Iterative Design of Sonification Techniques to Support People with Visual Impairments in

Obstacle Avoidance. *ACM Transactions on Accessible Computing* 2021; **14**(4). DOI: 10.1145/3470649.

Analisi NaTech Sisma per impianti a rischio di incidente rilevante: applicazioni operative con il supporto della tecnologia "Scan3D to FEM"

G. Romano[1], S. Colombo[2], F. Chillè[3], D. Ardovino[2]

[1] Tecnologia Ricerca Rischi S.r.l
[2] Romano Safety Management S.t.P.
[3] FC SolutionS

Abstract

La pubblicazione della UNI/TS 11816-1:2021 nonché i più recenti orientamenti del Coordinamento Nazionale Seveso richiedono al Gestore di uno Stabilimento a rischio di incidente rilevante di proseguire il percorso di valutazione sismica sulle strutture attraverso i tradizionali metodi NTC2018 e condurre un'analisi quantitativa del rischio sismico. Le verifiche di vulnerabilità sismica delle apparecchiature critiche e delle strutture che le supportano rappresentano un importante capitolo nel processo di identificazione delle cause e dei meccanismi di generazione di un incidente rilevante. In questo contesto, la caratterizzazione degli scenari incidentali è invece direttamente correlata al grado di dettaglio e di realismo adottato nell'approccio di verifica. La presente pubblicazione propone l'illustrazione di casi operativi di analisi del rischio sismico quantitativa con il supporto di simulazioni strutturali ad elementi finiti (FEM), quali ad esempio il trasporto di sostanze infiammabili in tubazioni di diametri significativi vincolati su piperack metallici. Un particolare aspetto della metodologia riguarda l'utilizzo di tecniche di scansione laser 3D per la costruzione del modello di calcolo, particolarmente utile per l'analisi di impianti esistenti caratterizzati da elevata complessità geometrica. Il modello geometrico 3D viene successivamente elaborato per realizzare un modello FEM che, unitamente ad una attenta caratterizzazione dei vincoli e dei materiali, consente di simulare quantitativamente il comportamento strutturale dell'insieme struttura portante / apparecchiatura, verificandone i livelli di sforzo e/o deformazione, nonché gli spostamenti assoluti e differenziali, consentendo una puntuale verifica delle condizioni di accettabilità individuate nel Rapporto di Sicurezza, nonché la definizione e la verifica di eventuali miglioramenti strutturali.

Keywords: Natech, Sisma, Incidenti Rilevanti, FEM, Seveso.

1. Introduzione

Il quadro generale delle analisi del rischio per eventi di tipo NATECH condotte per la maggior parte degli stabilimenti a rischio di incidente rilevante presenti sul territorio italiano si limitano all'esecuzione delle seguenti fasi:

- analisi statistico-storica ai fini dell'individuazione delle frequenze di accadimento di eventi con intensità simili per l'area di installazione del sito;
- individuazione degli elementi/apparecchiature "critici" definiti in funzione della tipologia e quantitativi di "sostanze pericolose" contenute e/o la capacità di generare effetti domino e/o comportare la mancanza di un servizio essenziale per la conduzione in sicurezza degli impianti;
- la verifica di vulnerabilità sismica ai sensi delle più recenti NTC2018 e alla conseguente individuazione/programmazione delle misure di adeguamento che riconducano le suddette verifiche ad un livello di accettabilità

L'introduzione della UNI/TS 11816-1:2021 ha spinto i gestori dei suddetti Stabilimenti ad inserire tali analisi in un contesto armonizzato con il Sistema di Gestione PIR che consenta la gestione di tali eventi dapprima definendo il sistema di segnalazione/allarme dell'evento NATECH in arrivo/corso denominato "Sistema di Early Warning" e successivamente all'accadimento dell'evento alla definizione di specifiche modalità di ispezione, verifica e monitoraggio degli impianti.

Riassumendo ad oggi il Gestore di uno Stabilimento è in grado di monitorare il proprio Stabilimento sia nelle fasi di pre che di post evento, e di poter mettere in atto apposite misure tecniche/gestionali al fine di evitale il cedimento degli asset "critici" in termini di incidente rilevante e pertanto di poter ricondurre a priori eventuali eventi/scenari incidentali da evento NATECH a quelli già valutati con l'analisi di rischio di processo richiesta dalla normativa Seveso.

Ad oggi l'aspetto della UNI/TS 11816-1:2021 meno approfondito riguarda tuttavia l'analisi quantitativa degli effetti generati da un evento NATECH in quanto tale valutazione comporta nella sostanza l'analisi dell'effetto dinamico generato dall'evento sulle apparecchiature/strutture e tra le interconnessioni delle stesse.

La presente pubblicazione si propone pertanto di fornire una metodologia di analisi quantitativa che permetta di condurre il gestore a valutare se:

- valutare nello specifico l'effetto dell'azione sismica su una determinata struttura individuando i "punti deboli" della stessa e le misure di adeguamento/miglioramento più appropriate.
- è possibile escludere il danneggiamento degli elementi in quanto non vengono raggiunti i limiti di danneggiamento dei materiali;
- è necessario rivalutare ove contrastanti gli accorgimenti già individuati con l'analisi statica di vulnerabilità sismica.
- gli eventuali eventi/scenari incidentali conseguenti ad un evento sismico possano essere effettivamente ricondotti a quelli già valutati con l'analisi di rischio di processo o sussiste la necessità di integrare l'analisi di rischio o di individuare nuovi adeguamenti tecnico/gestionali;

Oggetto della presente sarà l'analisi dinamica della possibile rottura di una tubazione contenente una sostanza pericolosa posta su un piperack soggetto ad un'azione sismica.

2. La ricostruzione 3D di impianti esistenti

Una delle criticità rilevate più frequentemente negli stabilimenti esistenti è che essendo spesso realizzati in epoche nelle quali il disegno tridimensionale non era d'uso nella progettazione risulta mancante il modello tridimensionale necessario per l'analisi FEM oggetto della presente.
Risulta pertanto necessario ricostruire l'assetto impiantistico esistente in un modello 3D che i software di modellazione possano utilizzare per applicare i modelli di calcolo e simulare gli effetti di un'azione sismica.
La metodologia "Scan To FEM" proposta nel seguito considera la ricostruzione tridimensionale degli impianti esistenti mediante una combinazione tecnologica di rilevo tramite tecnologia "laser scanning" e di ricostruzione digitale avanzata mediante appositi software di modellazione che consentano la corretta ed accurata mappatura degli impianti e delle strutture.

2.1 Rilievo 3D con Laser Scanner

Il rilievo mediante tecnologia Laser Scanner permette di coprire grandi spazi con tempistiche notevolmente ridotte rispetto al rilievo tradizionale, senza inoltre intralciare le attività lavorative presenti all'interno degli spazi in oggetto e mantenendo una distanza di sicurezza dalle apparecchiature presenti. La tecnologia laser scanning è ad oggi il metodo più preciso per rilevare forme o assiemi di superfici di qualunque entità e dimensione.
Il laser consente di effettuare una serie di scansioni in successione il cui risultato finale in consiste in una serie di punti molto denso che viene definito "nuvola di punti" (cloud point). Queste "nuvole di punti" sono organizzate in database di coordinate X, Y, Z che una volta registrate possono essere visualizzate in forma tridimensionale.

2.2 Estrazione di elementi dalla nuvola di punti

La tecnologia di ricostruzione digitale avanzata permette di ottenere un modello digitale perfettamente fittato alle nuvole di punti. Questo è possibile attraverso programmi specifici che adottano algoritmi di riconoscimento di sezione degli elementi rilevati.
Il modello finale sarà pertanto costituito in buona parte da elementi direttamente estratti dalla nuvola di punti, ma saranno comunque previste lavorazioni manuali degli elementi estratti, in base alla tipologia e alle necessità del modello da ricostruire.
Tuttavia bisogna sempre tenere in considerazione che più avanzato sarà l'utilizzo di sistemi di fittaggio da nuvola, maggiore sarà l'accuratezza del modello finale.

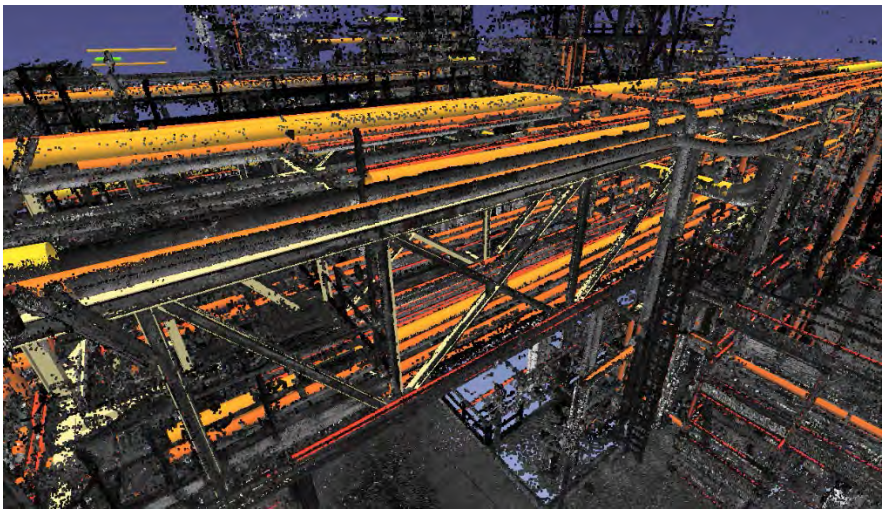


Figura 2-1. Estrazione degli elementi principali tramite fittaggio da nuvola

Il modello così costituito viene definito come l'As Built e verrà implementato e assemblato tramite l'utilizzo di programmi di modellazione 3D freeform.

2.3 Dal 3D al modello FEM

Il modello 3D elaborato secondo la metodologia Scan to Solid dovrà essere ricondotto ad un modello ad elementi finiti FEM. Per far ciò è necessario assicurarsi che il modello elaborato tramite strutture tridimensionali "freeform", sia riconducibile a strutture geometriche solide tridimensionali, bidimensionali o monodimensionali.
Parti massive, caratterizzate da dimensioni nelle tre direzioni paragonabili fra loro, verranno modellate con elementi solidi; setti strutturali o lamiere saranno modellati con elementi strutturali bidimensionali (di tipo "shell"); travi, tiranti e membrature di strutture reticolari saranno modellati con elementi strutturali monodimensionali (di tipo "beam" o "truss/rod").
In una modellazione per elementi massivi l'intera informazione geometrica è insita nel reticolo di calcolo: tutte le dimensioni geometriche che definiscono il corpo in esame sono direttamente restituite dalle coordinate dei nodi del reticolo di calcolo; in questo caso il modello 3D Scan fornisce direttamente le informazioni utili alla definizione del modello FEM.
La modellazione per elementi di tipo strutturale si basa sull'eliminazione di una o due dimensioni geometriche nella definizione del reticolo di calcolo (specificatamente, lo spessore per gli elementi shell e la dimensione e forma della sezione trasversale per gli elementi beam o truss); nella definizione del modello FEM queste informazioni vengono fornite come informazioni integrative al reticolo di calcolo. Poiché tali dimensioni sono per definizione molto minori delle dimensioni delle parti in oggetto, la loro determinazione diretta mediante scansione può risultare difficile o comunque inefficace (richiedendo un grado di risoluzione molto o troppo elevato), se non impossibile (come nel caso della definizione dello spessore di tubi o di sezioni scatolari chiuse); una buona ottimizzazione del processo di definizione del modello FEM

consiste quindi nella generazione del modello 3D Scan per la tracciatura delle varie membrature, i cui dati di spessore e sezione vengono successivamente verificati o assegnati in termini di informazioni integrative al reticolo di calcolo.

3. Approcci modellistici per il calcolo della risposta sismica

3.1 Sensitività dei modelli di calcolo

La risposta strutturale all'azione sismica è governata dall'interazione fra l'ampiezza e contenuto in frequenza della forzante sismica (time history di accelerazione) e la distribuzione di massa e rigidezza nella struttura.
Nel presente studio si sono approfonditi due aspetti generali che concorrono alla definizione dell'approccio modellistico:

- il tipo di analisi sismica condotta:
  - analisi a spettro di risposta (RS);
  - analisi a time-history (TH).
- la modalità di caratterizzazione del piping nella definizione del modello geometrico:
  - solo "Frame" (F) è stata considerata la sola massa del piping caricata sulla struttura;
  - "Frame+Piping"(FP) è stata considerata l'elemento piping al fine di valutare il contributo dello stesso come elemento in termini di rigidezza.

È stata pertanto condotta un'analisi di sensitività dei modelli secondo lo schema in Figura 3-1 al fine di individuare l'approccio più adatto.

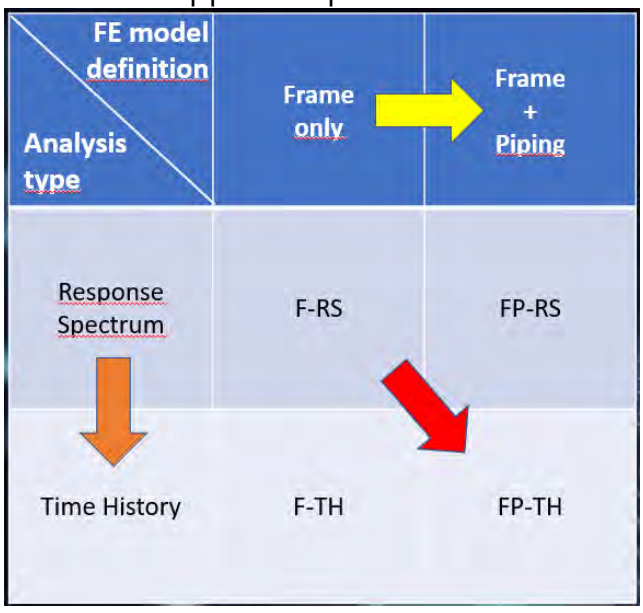


Figura 3-1. Approcci modellistici per il calcolo della risposta sismica

Sono stati pertanto sviluppati due modelli agli elementi finiti (FE), uno comprendente le sole strutture intelaiate portanti, e l'altro includendo anche il piping riportati in Figura 3-2 tenendo in considerazione i seguenti aspetti:

- la modellazione FP consente una definizione più accurata della distribuzione ed entità della rigidezza strutturale (oltre che della massa) rispetto alla modellazione F, e quindi una migliore caratterizzazione del comportamento dinamico (che dipende dalle masse e dalle rigidezze);
- le analisi TH consentono una definizione più accurata della risposta strutturale dinamica sia globale che locale, anche in regime non lineare, rispetto alle analisi RS, consentendo il superamento delle incertezze e inaccuratezze implicite nella forma di composizione modale assunta per la definizione degli effetti (SRSS, CQC,...);
- la combinazione dei due aspetti (passaggio da F-RS a FP-TH) consente una definizione più accurata della distribuzione ed entità della rigidezza strutturale, e quindi della risposta strutturale dinamica sia globale che locale.



Figura 3-2 (a sinistra) Modello FP (frame + piping) – (a destra) Modello F (tradizionale, solo frame)

3.2 Codici di calcolo

Per le analisi non convenzionali (a time history e/o comprendenti aspetti di non-linearità) si è utilizzato il codice Abaqus.

3.3 Caratterizzazione modale

Una caratterizzazione generale dei due modelli F e FP può essere fornita dal profilo di distribuzione delle masse generalizzate in funzione dei periodi propri, ottenibile mediante analisi modali preliminari sui due modelli. I profili ottenuti sono riportati in Figura 3-3.

Da tale immagine è evidente l'effetto di irrigidimento globale offerto dalla messa in conto della rigidezza del piping, che si traduce in una contrazione dei periodi propri (linea in blu).

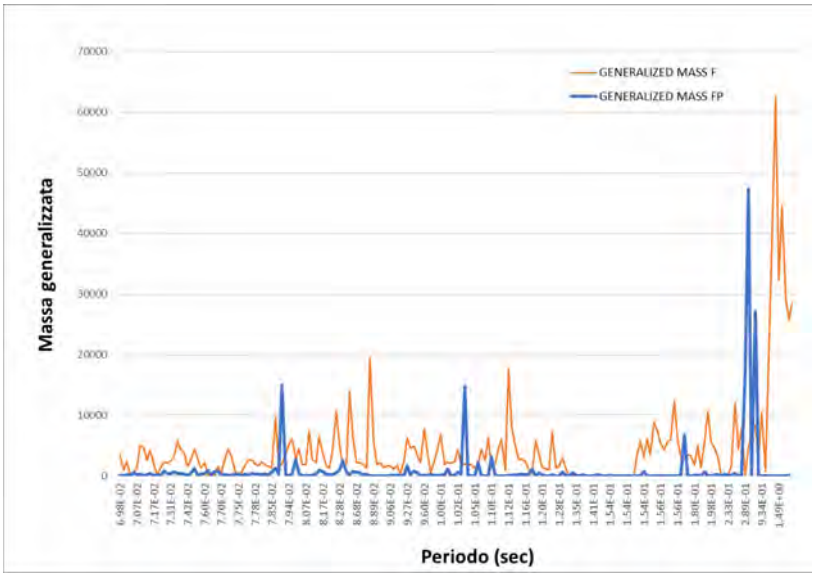


Figura 3-3. Modelli F e FP – caratterizzazione modale

3.4 Effetto della modellazione del piping in analisi a time history

La caratterizzazione dell'azione sismica per analisi "a time history" è stata condotta mediante l'elaborazione di accelerogrammi rappresentativi della sollecitazione sismica definita dallo spettro di risposta indicati dalla normativa vigente.

La terna di accelerazioni utilizzata per le analisi di sensitività è riportata in Figura 3-4, insieme con le corrispettive terne di velocità e di spostamento.

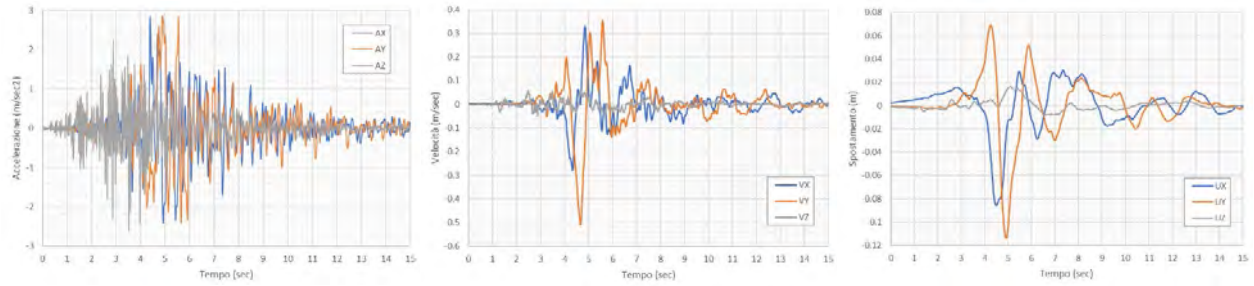


Figura 3-4. Terne di accelerazione, velocità e spostamento assunte per le analisi TH

Per la seguente modellazione sono state eseguite analisi dinamiche transienti per le time history di spostamento alla base, utilizzando entrambi i modelli F e FP e adottando opportune leggi costitutive elastoplastiche per la caratterizzazione dei materiali costitutivi il rack e il piping.
In Figura 3-5 sono riportati gli inviluppi di spostamento massimo ottenuti per i due modelli: è evidente come la messa in conto della rigidezza del piping abbia un non trascurabile effetto in termini di entità e distribuzione degli spostamenti massimi lungo il rack. La stessa osservazione si applica osservando i contour degli sforzi massimi e delle deformazioni plastiche ottenuti per i due modelli, riportati rispettivamente in Figura 3-6 e in Figura 3-7.

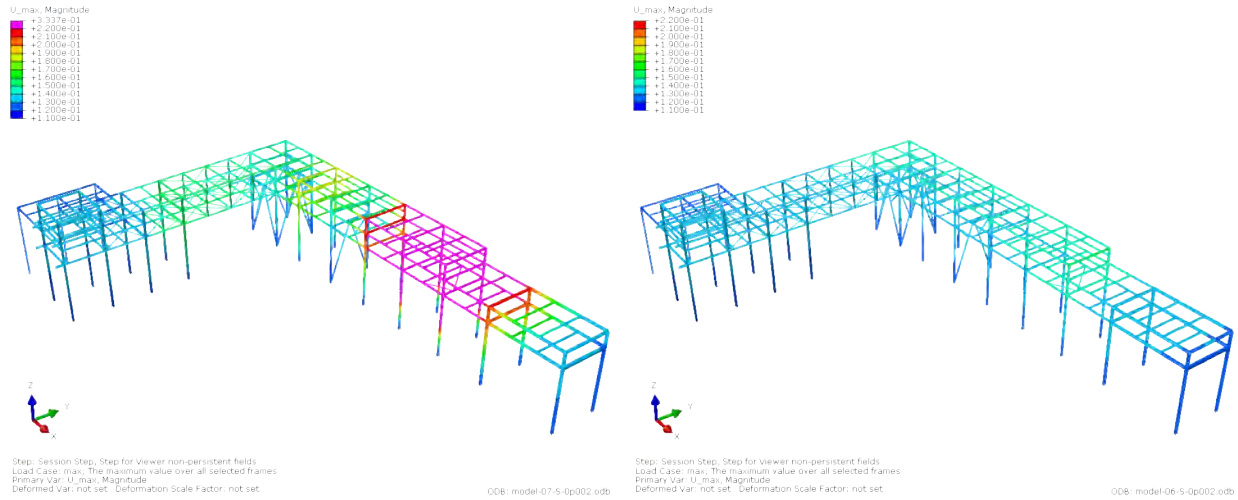


Figura 3-5. Inviluppo degli spostamenti massimi: confronto fra modello F (a sinistra) e modello FP (a destra)

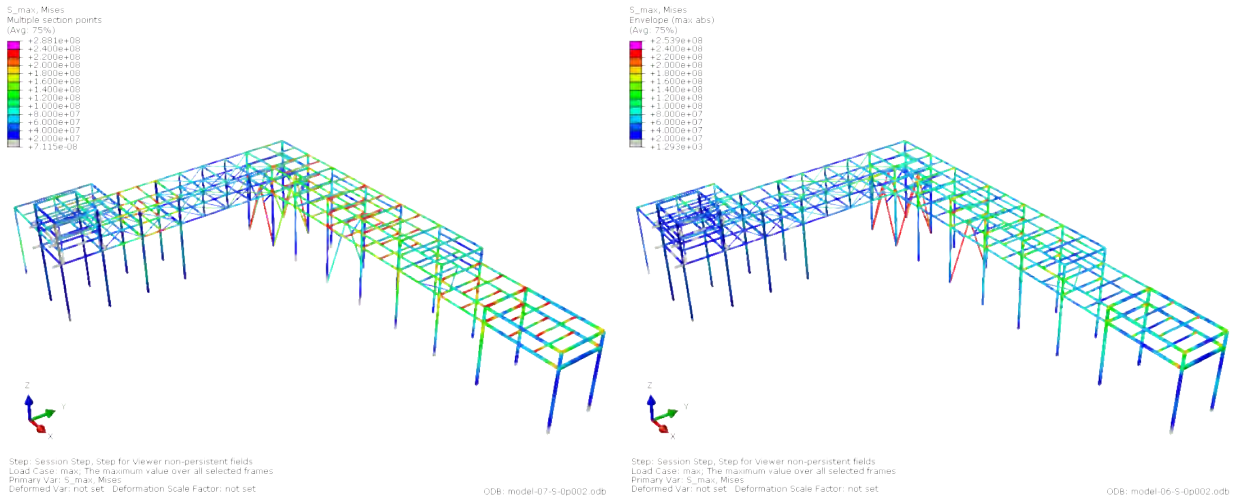


Figura 3-6. Inviluppo degli sforzi massimi: confronto fra modello F (a sinistra) e modello FP (a destra)

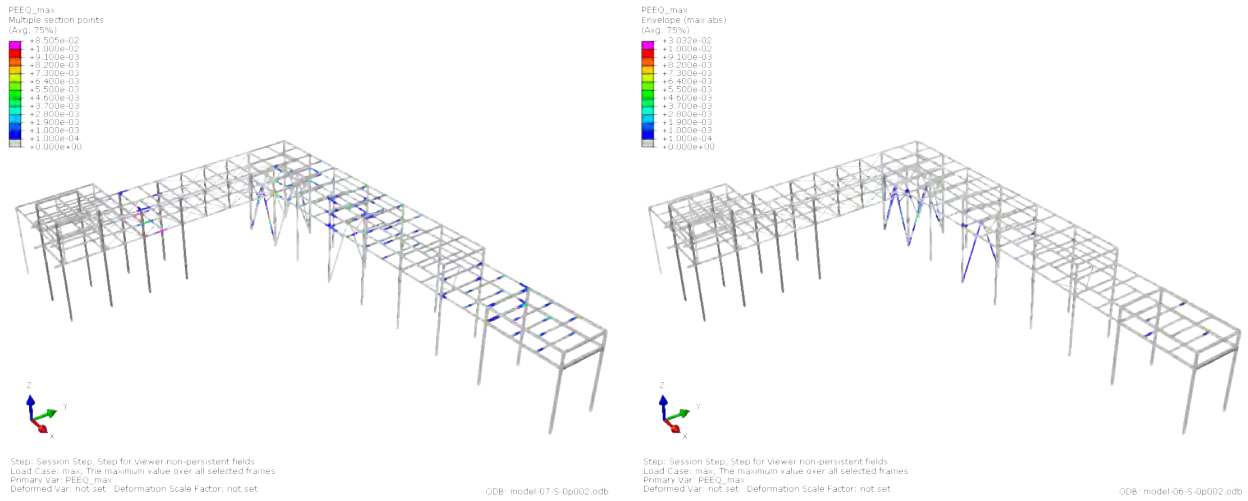


Figura 3-7. Deformazioni plastiche a fine transitorio: confronto fra modello F (a sinistra) e modello FP (a destra)

Gli effetti in termini di sforzi generati sulla tubazione sono riportati nel frame estratto dalla simulazione TH del modo oscillatorio del sistema in Figura 3-8 ove è possibile notare che alcuni tratti di tubazione (aree in viola) sono soggette a sforzi più elevati.

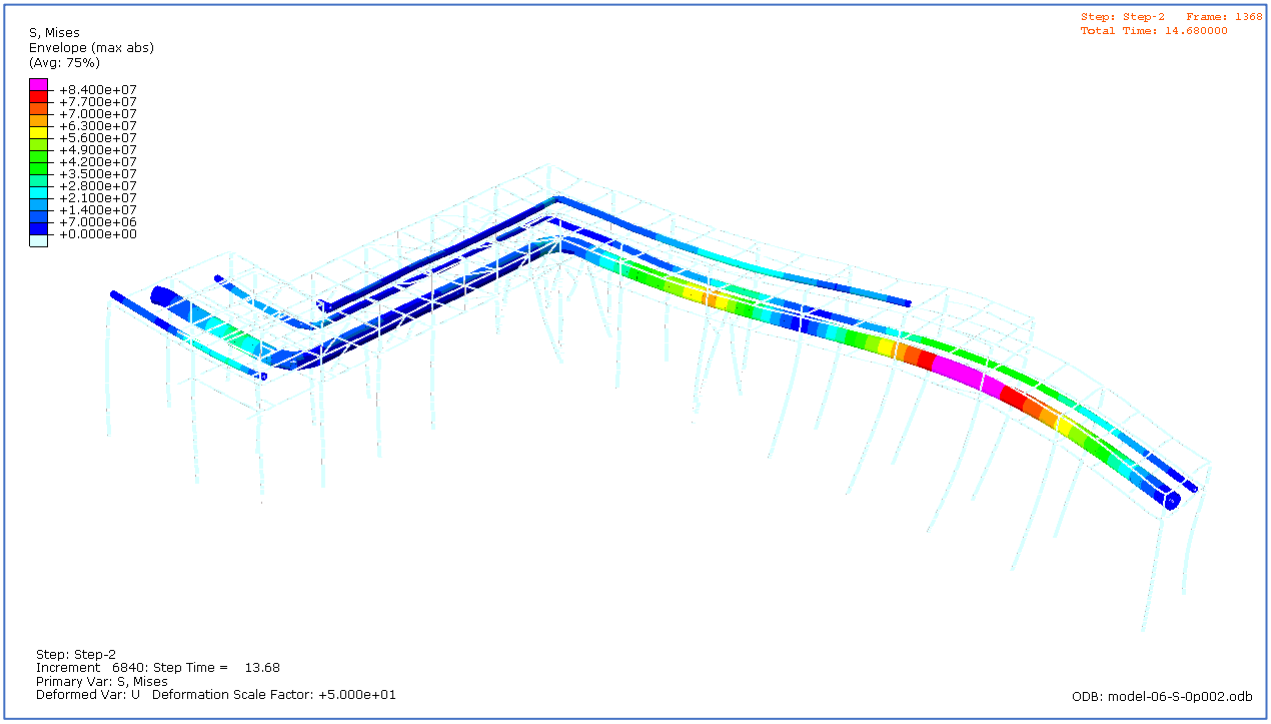


Figura 3-8. Sforzi agenti sul piping durante il moto oscillatorio generato dal sisma

4. Analisi dei risultati e procedura di verifica

Dagli inviluppi degli spostamenti, degli sforzi e dai contour delle defomazioni sul piperack rappresentati in Figura 3-5, Figura 3-6 e Figura 3-7 è possibile individuare gli elementi del piperack sui quali può rendersi necessario intervenire con misure di rinforzamento.
Nello specifico analizzando Figura 3-6 (Sforzi) e Figura 3-7 (Deformazioni) si possono individuare quali elementi critici gli elementi evidenziati (cerchio tratteggiato rosso).

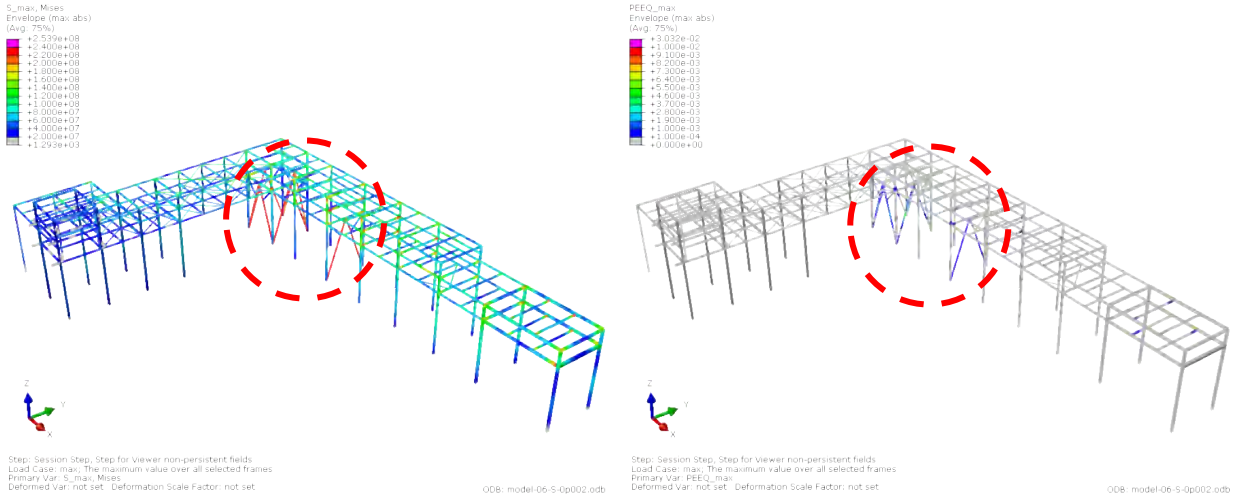


Figura 4-1. Estratti Figura 3-6 e Figura 3-7 con evidenza elementi critici

Individuate le misure da attuare sarà possibile ripetere la simulazione al fine di verificare l'efficacia delle misure individuate e valutare se sussistano ancora criticità per le tubazioni caricate sul piperack.
Qual'ora sussistano ancora criticità per le tubazioni sarà possibile affinare l'analisi riducendo il dominio di calcolo all'area critica ove sussistono i maggiori sforzi, spostamenti e deformazioni e sfruttando quali "boundary condition" nei dati di input i calcoli già effettuati con l'analisi generale del modello FP al fine di approfondire le modalità rottura delle stesse.
L'ammissibilità dello stato tenso-deformativo locale dovrà essere opportunamente verificata in base ad un adeguato criterio di resistenza in base al materiale utilizzato; ad esempio, per profili o tubature metalliche si potrà adottare un criterio di utilizzazione in termini di tasso di sforzo rapportato alla tensione caratteristica di snervamento.

Si lascia tuttavia al normatore fornire le linee guida per l'individuazione del criterio più adatto al fine di fornire una metodologia univoca per chi si appresta a questa tipologia di analisi.

5. Conclusioni

L'utilizzo di tecniche avanzate di laser scanning consente la messa a punto di modelli numerici di elevato livello di dettaglio anche per stabilimenti esistenti non in possesso di ricostruzioni tridimensionali dei propri asset impiantistici.
Considerando strutture complesse, la scelta dell'approccio di analisi (RS o TH) può avere un impatto non trascurabile sui risultati, ancor più qualora si adotti un comportamento non lineare del materiale.
La messa in conto della rigidezza dell'equipment portato (metodo FP), in aggiunta alla sola massa (metodo F), può avere un effetto non trascurabile sull'esito delle verifiche finali.
A valle dell'analisi descritta nel presente documento il Gestore sarà in grado di:

- individuare le tempistiche necessarie per implementare le attività di adeguamento;
- mettere in atto misure tecnico/gestionali da implementare sia nel periodo transitorio necessario per realizzare gli interventi individuati sia nel futuro esercizio qualora dall'analisi emergessero ancora criticità per le tubazioni.
  A tal proposito per caso in esame in conformità all'appendice I.1 della UNI/TS 11816-1:2021 il gestore potrebbe installare isolatori sismici per tubazioni e/o sistemi di shutdown che isolino l'hold up rilasciabile in ambiente in caso di rottura della stessa.
- Individuare nuovi scenari incidentali non attualmente caratterizzati all'interno dell'analisi di rischio di incidente rilevante del proprio stabilimento o ricondurre gli stessi a scenari già individuati.

6. Bibliografia

[1] UNI/TS 11816-1:2021 - Linee guida per la gestione di eventi NaTech nell'ambito degli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Parte 1: Requisiti generali e sisma.

[2] d.lgs. 26 giugno 2015, n. 105 - Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.

[3] decreto 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni G.U. n 42 del 20 febbraio 2018.

Valutazione e gestione del rischio NaTech da Eventi Idrogeologici

A. Marino[1], G. Berardo[2], A.C. Lio[1], Mariano Ciucci[1]

[1] Inail - Dit
[2] dottoranda Inail /" La Sapienza" Università di Roma

Abstract

L'impatto di un disastro naturale su uno stabilimento PIR può provocare il rilascio di sostanze pericolose con possibili gravi conseguenze con scenari di rilasci tossici, incendi o esplosioni. Gli incidenti innescati da un pericolo naturale, che coinvolgono sostanze pericolose, sono detti comunemente eventi NaTech (Natural Hazards triggering a Technological accident) La specificità dell'evento NaTech è che investe tutto lo stabilimento, causando più danni contemporaneamente con conseguenti scenari incidentali simultanei e incremento della frequenza di accadimento degli incidenti rilevanti, Inoltre i sistemi di sicurezza e mitigazione potrebbero essere indisponibili perché danneggiati dall'evento naturale con conseguenze più severe. Occorre anche tenere conto del fatto che un disastro naturale impegna contemporaneamente le risorse preposte alla gestione dell'emergenza su più fronti, con possibili criticità. Gli eventi naturali più impattanti sono, oltre a quelli sismici, quelli idrogeologici (frane e alluvioni). L'incidenza di questi ultimi, in relazione ai cambiamenti climatici, sta aumentando in modo significativo soprattutto a causa degli eventi meteorologici estremi. I fenomeni di dissesto idrogeologico sono fenomeni naturali, legati all'azione di una forzante idraulica, che possono avvenire per cause strutturali e/o occasionali e che determinano in un dato momento l'alterazione degli equilibri esistenti. Il pericolo idrogeologico, nell'ambito del d.lgs. 105/2015, ricomprende in particolare, i pericoli derivanti dalle alluvioni e/o dalle frane. Lo scopo del presente lavoro è quello di fornire ai gestori e alle Autorità Competenti strumenti concreti per la valutazione, prevenzione, gestione e mitigazione del rischio NaTech da Eventi Idrogeologici.

Keywords: NaTech, Rischio idrogeologico; Stabilimenti PIR.

1. Introduzione

In Italia la quasi totalità dei più di 1000 stabilimenti con Pericolo di Incidente Rilevante è esposto al rischio NaTech (Natural hazards triggering a TECHnological accident) che scaturisce dall'interazione tra disastri naturali e rischio industriale (Fig.1). La specificità dell'evento NaTech è che investe tutto lo stabilimento causando più danni

contemporaneamente con conseguenti scenari incidentali simultanei di difficile gestione senza misure di prevenzione adeguate.

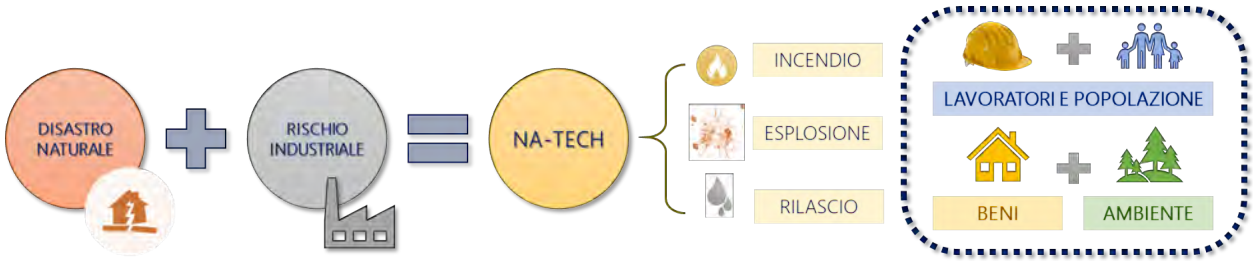


Figura 1. Evento NaTech

Gli eventi naturali più impattanti sono quelli sismici e quelli idrogeologici (frane e alluvioni). L'incidenza di questi ultimi, in relazione ai cambiamenti climatici, sta aumentando in modo significativo soprattutto a causa dell'incremento della frequenza di eventi meteorologici estremi.
Esistono alcune problematiche specifiche correlate agli eventi NaTech:

- Si possono verificare rilasci di sostanze pericolose da una o in più fonti all'interno di un'azienda o di più aziende con incremento della frequenza di accadimento degli incidenti rilevanti
- I sistemi di sicurezza e mitigazione potrebbero essere indisponibili perché danneggiati dal sisma comportando quindi conseguenze più severe.

Occorre anche tenere conto del fatto che un disastro naturale come un evento sismico impegna contemporaneamente le risorse preposte alla gestione dell'emergenza su più fronti con possibili criticità
Il Rischio NaTech può essere rappresentato dalla classica formula:

$$R_N \quad P \times V \times E$$

RISCHIO NATECH = PERICOLOSITÀ x VULNERABILITÀ x ESPOSIZIONE

dove:

- La Pericolosità è indubbiamente legata a dove si trova lo stabilimento.
- La Vulnerabilità si può associare alle caratteristiche strutturali e ai possibili sistemi di mitigazione
- L'Esposizione si valuta in termini di vite umane ma anche di ambiente e di beni.

2. Il Rischio NaTech da Eventi Idrogeologici

2.1 Il pericolo idrogeologico

I fenomeni di dissesto idrogeologico sono fenomeni naturali, legati all'azione di una forzante idraulica, che possono avvenire per cause strutturali e/o occasionali e che determinano in un dato momento l'alterazione degli equilibri esistenti.

Per quanto riguarda il pericolo idrogeologico la pericolosità si evince da mappature realizzate a livello nazionale. Dalle ultime mosaicature nazionali di pericolosità [anno 2021], realizzate sulla base dei Piani di Assetto Idrogeologico – PAI Frane e delle mappe di pericolosità idraulica secondo gli scenari del D. Lgs. 49/2010 di recepimento della Direttiva Alluvioni (2007/60/CE), emerge, rispetto al 2018, un incremento percentuale del 3,8% della superficie classificata a pericolosità da frana elevata e molto elevata e del 18,9% della superficie a pericolosità idraulica media probabilmente anche correlato ad un miglioramento del quadro conoscitivo. Complessivamente il 93,9% dei comuni italiani (7.423) è a rischio per frane, alluvioni e/o erosione costiera.
Il pericolo idrogeologico, nell'ambito del D.Lgs. 105/2015, ricomprende in particolare, i pericoli derivanti dalle alluvioni e/o dalle frane.
L'alluvione può essere provocata dallo straripamento di corpi idrici al di fuori dei loro limiti naturali, o essere il risultato dell'accumulo del deflusso delle acque meteoriche in aree normalmente asciutte.
Le frane possono essere determinate da cause naturali, quali per esempio pioggia o caratteristiche strutturali e geomorfologiche del terreno, e da cause artificiali quali per esempio costruzioni su pendii o disboscamento.
Il pericolo di eventi idrogeologici non può essere mai completamente eliminato quindi è necessario prepararsi in anticipo a limitare l'impatto che un evento idrogeologico potrebbe avere, attraverso uno studio conoscitivo del livello di rischio per l'area in cui è insediato uno stabilimento e una pianificazione che tenga conto che un evento di questo tipo potrebbe innescare o rendere più grave un incidente rilevante, in maniera diretta o indiretta, e quindi preveda, attraverso l'adeguamento del rapporto di sicurezza, dell'analisi di rischio e del SGS-PIR, le misure necessarie per prevenire o limitare le conseguenze per la salute umana e l'ambiente.
Occorre acquisire consapevolezza che gli eventi idrogeologici possono causare gravi danni agli stabilimenti ed innescare il rilascio accidentale di sostanze pericolose nell'ambiente circostante.
L'analisi della pericolosità idrogeologica del territorio in cui uno stabilimento è insediato deriva dall'acquisizione:

- delle mosaicature nazionali di pericolosità realizzate sulla base dei Piani di Assetto Idrogeologico – PAI Frane

e

- delle mappe di pericolosità idraulica secondo gli scenari del D.Lgs. 49/2010 di recepimento della Direttiva Alluvioni (2007/60/CE), in ultimo aggiornamento prodotti dalle Autorità di Bacino Distrettuali.

2.2 Valutazione del Rischio alluvioni

Il d. lgs 23 febbraio 2010, N. 49 disciplina le attività di valutazione e di gestione dei rischi di alluvioni al fine di ridurre le conseguenze negative per la salute umana, per il

territorio, per i beni, per l'ambiente, per il patrimonio culturale e per le attività economiche e sociali derivanti dalle stesse alluvioni.
Definizioni:
a) ALLUVIONE: l'allagamento temporaneo, anche con trasporto ovvero mobilitazione di sedimenti anche ad alta densità, di aree che abitualmente non sono coperte d'acqua. Ciò include le inondazioni causate da laghi, fiumi, torrenti, eventualmente reti di drenaggio artificiale, ogni altro corpo idrico superficiale anche a regime temporaneo, naturale o artificiale, le inondazioni marine delle zone costiere ed esclude gli allagamenti non direttamente imputabili ad eventi meteorologici;
b) PERICOLOSITÀ DA ALLUVIONE: la probabilità di accadimento di un evento alluvionale in un intervallo temporale prefissato e in una certa area;
c) RISCHIO DI ALLUVIONI: la combinazione della probabilità di accadimento di un evento alluvionale e delle potenziali conseguenze negative per la salute umana, il territorio, i beni, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche e sociali derivanti da tale evento.
Lo strumento di valutazione della pericolosità è rappresentato dalle MAPPE DELLA PERICOLOSITÀ DA ALLUVIONE che contengono, fra l'altro, la perimetrazione delle aree geografiche che potrebbero essere interessate da alluvioni secondo i seguenti scenari:
a) alluvioni rare di estrema intensità: tempo di ritorno fino a 500 anni dall'evento (P1 bassa probabilità);
b) alluvioni poco frequenti: tempo di ritorno fra 100 e 200 anni (P2 media probabilità);
c) alluvioni frequenti: tempo di ritorno fra 20 e 50 anni (P3 elevata probabilità).
Per caratterizzare ciascuno scenario devono essere indicati:
a) estensione dell'inondazione e portata della piena;
b) altezza e quota idrica;
c) caratteristiche del deflusso (velocità e portata)
D.Lgs. 49/2010, riprendendo i criteri stabiliti nel DPCM del 29 settembre 1998, stabilisce che la mappatura del rischio preveda, una rappresentazione in termini di classi di rischio (R1 – moderato, R2 – medio, R3 – elevato, R4 – molto elevato), in grado di esprimere sinteticamente, attraverso un'unica mappa, il modo in cui la pericolosità (P1, P2, P3) e il danno potenziale si combinano.
Quindi le MAPPE DEL RISCHIO DI ALLUVIONI sono definite a partire dai livelli di pericolosità interfacciati con quattro livelli di danno che indicano le potenziali conseguenze negative derivanti dalle alluvioni ….:
a) numero indicativo degli abitanti potenzialmente interessati;
b) infrastrutture e strutture strategiche …….
c) beni ambientali, storici e culturali di rilevante interesse …..
d) distribuzione e tipologia delle attività economiche …….;
e) impianti ……che potrebbero provocare inquinamento

le aree soggette ad alluvioni con elevato volume di trasporto solido e colate detritiche o informazioni su fonti rilevanti di inquinamento.

2.3 Classificazione e pericolosità frane

La classificazione della pericolosità da frana in coerenza con i criteri stabiliti nel DPCM del 29 settembre 1998 si articola su quattro classi:

- Pericolosità moderata - P1,
- Pericolosità media - P2,
- Pericolosità elevata - P3,
- Pericolosità molto elevata - P4.

In aggiunta è presente un'ulteriore categoria - Area di Attenzione – porzioni di territorio con possibili situazioni di dissesto a cui non è ancora stata associata una classe di pericolosità.

Nel DPCM 29/09/1998 anche per le frane sono individuate quattro classi di rischio.

La definizione della pericolosità da frana è un processo complesso.

I principali parametri nella definizione della pericolosità di una frana (Fig.2) sono:

- «l'intensità» della frana;
- il tempo di ritorno del fenomeno.

L'intensità della frana dipende dalla velocità di movimento della frana e dal volume di materiale mobilizzato.

Il tempo di ritorno di un fenomeno franoso è definito come il tempo medio (espresso in anni) che intercorre tra il verificarsi di due eventi con caratteristiche simili: esso è pari all'inverso della frequenza probabile di accadimento del fenomeno.

A titolo di esempio una metodologia di valutazione della pericolosità da frana (metodo BUWAL), predisposto nella Confederazione Elvetica prevede i seguenti step:

1) Individuazione e perimetrazione delle aree di frana e delle aree limitrofe che potenzialmente potrebbero essere coinvolte in una riattivazione del fenomeno;

2) Definizione delle caratteristiche del movimento quali tipologia, velocità e volumi e/o spessori.

Pericolosità connessa alla velocità dei fenomeni franosi		Frequenza probabile			
		alta 1 – 30 anni	media 30 – 100 anni	bassa 100 – 300 anni	Frane antiche (> 300 anni) e paleofrane
Intervalli di velocità	3	P4	P4	P3	P1
	2	P3	P3	P2	
	1	P2	P1	P1	

Pericolosità connessa alla magnitudo dei fenomeni franosi		Frequenza probabile			
		alta 1 – 30 anni	media 30 – 100 anni	bassa 100 – 300 anni	Frane antiche (> 300 anni) e paleofrane
Classi di Magnitudo	6 - 9	P4	P4	P3	P1
	3 - 4	P3	P3	P2	
	1 - 2	P2	P1	P1	

Figura 2. Pericolosità da frana

2.4 Rischio, pericolosità e vulnerabilità

Quindi adattando al caso specifico la definizione di Rischio:

Rischio = Pericolosità x Vulnerabilità x Esposizione (Conseguenze)

– la pericolosità esprime l'entità del fenomeno (in questo caso alluvione o frana) e la probabilità che si manifesti in un arco temporale più o meno ampio;
– la vulnerabilità esprime il danno atteso sullo stabilimento; si definisce atteso perché riferito ad un fenomeno la cui intensità e la cui frequenza non è certa, ma legata ad una curva di probabilità;
– le conseguenze si esprimono come il danno atteso sull'ambiente, sul luogo di lavoro e sulla popolazione.
Per ridurre il rischio si deve quindi agire sui tre fattori (pericolosità, vulnerabilità e conseguenze), ricercando, ove possibile, la miglior combinazione in termini di costi/ benefici.

3. Azioni ed effetti di alluvioni sugli impianti PIR

3.1 Azioni ed effetti di alluvioni sugli impianti PIR

Le azioni dell'alluvione sugli impianti a rischio di incidente rilevante sono:

- azioni idrodinamiche;
- azioni idrostatiche;
- azioni di erosione;
- azioni di galleggiamento;
- azioni dei detriti;
- azioni non fisiche (chimiche e biologiche).

Tali azioni possono essere riassunte e ricondotte a due categorie:

a) quelle indotte dalla presenza dell'acqua:

- la spinta idrostatica orizzontale
- la spinta di galleggiamento
- la contaminazione chimica e biologica dovuta all'immersione

b) quelle determinate dalla velocità della corrente:

- la spinta idrodinamica
- l'impatto dei detriti portati dalla piena
- il dilavamento e lo scalzamento delle fondazioni

Le CONSEGUENZE DIRETTE possono consistere:

- nel danneggiamento di strutture ed apparecchiature di stoccaggio e di processo, dovuto alla spinta delle acque ed alla collisione di detriti anche di grosse dimensioni trascinati dall'impeto delle acque, che può indurre perdite di contenimento di sostanze pericolose in grado di determinare:
- la dispersione e il trasporto attraverso l'aria, l'acqua e il suolo di sostanze tossiche per l'uomo e per l'ambiente;
- l'innesco di incendi ed esplosioni, con possibilità di coinvolgimento di altre apparecchiature e serbatoi contenenti sostanze pericolose (effetto domino).
- nella interruzione di servizi necessari alla mitigazione delle conseguenze quali l'alimentazione di energia elettrica;
- nella saturazione della rete di recupero degli effluenti;
- nell'impossibilità di accesso allo stabilimento o parti di esso

Alcune tipologie di danno causate dall'alluvione che possono avere EFFETTI INDIRETTI sullo stabilimento con pericolo di incidente rilevante sono:

- vittime
- edifici distrutti, danneggiati, minacciati
- tronco stradale e/o ferroviario distrutto, danneggiato, minacciato
- opere idrauliche distrutte, danneggiate, minacciate
- opere di attraversamento distrutte, danneggiate, minacciate
- coltivi distrutti, danneggiati, minacciati
- infrastrutture distrutte, danneggiate, minacciate quali: ponti, viabilità comunale, provinciale, statale, autostradale, linee ferroviarie, ecc.

3.2 Definizione degli scenari incidentali dovuti ad eventi idraulici/idrogeologici

Per la definizione degli scenari incidentali dovuti a eventi idraulici/idrogeologici è necessario partire dalla perdita di contenimento (LOC, Loss of Containment) di sostanze pericolose (tossiche, eco-tossiche, infiammabili). Le conseguenze principali di un LOC sono gli incendi, le esplosioni e la dispersione di sostanze tossiche

L'esperienza consente di rinvenire le seguenti due principali modalità

- danni strutturali, come spostamento, impatto con oggetti galleggianti, cedimento di strutture di supporto, cedimento di flange e connessioni, e simili;
- guasti a carico delle apparecchiature elettriche e meccaniche.

I serbatoi di stoccaggio risultano i più vulnerabili, seguiti dalle condutture di trasporto e dalle tubazioni. Le cisterne atmosferiche appaiono più vulnerabili di quelle a pressione, a causa della loro minore resistenza strutturale, che favorisce il collasso o il cedimento dell'involucro del serbatoio o induce il galleggiamento o il ribaltamento dello stesso.
Il collasso del serbatoio può provocare il rilascio istantaneo di tutto il contenuto. Tuttavia, la causa principale della perdita di contenimento osservata durante le alluvioni è il cedimento di connessioni e valvole, il distacco di tubazioni e il cedimento di condotte.
I serbatoi atmosferici a tetto galleggiante sono quindi particolarmente vulnerabili rispetto al rischio idrogeologico (Fig.3).



Figura 3. Vulnerabilità dei serbatoi atmosferici rispetto al rischio idrogeologico

4. Valutazione quantitativa del rischio NaTech da eventi idrogeologici

La procedura per la valutazione quantitativa del rischio deve essere estesa per includere la valutazione degli eventi Na-Tech da eventi idrogeologici.
Fase 1: caratterizzazione dell'evento esterno attraverso parametri che ne rappresentino l'impatto (es. per l'alluvione massimo battente di acqua previsto nel sito e/o la massima velocità dell'acqua).
Fase 2: identificazione degli elementi critici che possono causare uno scenario grave a causa dell'azione innescata dall'evento naturale.
Fase 3: identificazione di possibili modalità di danneggiamento con definizione degli stati di danno.
Fase 4: Stima della probabilità di danno attraverso specifici modelli di vulnerabilità o fragilità

Fase 5: individuazione degli scenari incidentali di riferimento. In questa fase, si dovrebbe considerare il verificarsi simultaneo degli scenari di riferimento, dovuti al danneggiamento di più unità.
Fase 6: valutazione delle conseguenze di ciascuna combinazione credibile di rilasci di riferimento.

5. Mitigazione delle conseguenze di eventi alluvionali

Nella localizzazione, progettazione e realizzazione di nuovi stabilimenti occorre tenere conto della pericolosità idraulica del sito.
Nella gestione degli stabilimenti esistenti devono essere intraprese una serie di azioni di miglioramento:
Misure di tipo strutturale comprendono a titolo di esempio:

- la costruzione di opere di difesa;
- la chiusura di aperture e punti di ingresso delle acque e l'impermeabilizzazione dei muri;
- l'installazione di pompe per la raccolta e rimozione delle acque (idrovore);
- rafforzamento dei punti di ancoraggio di serbatoi e tubazioni per evitare il loro galleggiamento o dislocazione in caso di inondazione;
- posizionamento di serbatoi, contenitori mobili e fusti ad una quota superiore a quella della massima piena stimata;
- dotazione di recinzioni e cancelli per evitare la dispersione di contenitori mobili e fusti in caso di allagamento;
- costruzione o adeguamento del sistema fognario;
- posizionamento in quota di motori, pompe e pannelli di controllo per evitare danni a causa dell'acqua;
- posizionamento di sale controllo e di sistemi di sicurezza in zona sicura e rafforzamento della loro protezione per migliorare la resistenza agli urti da parte di detriti galleggianti;
- installazione di generatori di emergenza in grado di mantenere apparecchiature contenenti sostanze pericolose funzionanti in condizioni di sicurezza per prolungati periodo di tempo.

misure non strutturali di carattere gestionale quali ad es.:

- possibilità di isolamento o interruzione in condizioni di sicurezza delle forniture di elettricità, gas, vapore, riscaldamento ed idriche;
- intensificazione dei controlli e delle manutenzioni di componenti critici per la loro esposizione per verificare il loro deterioramento o eventuali fenomeni corrosivi;
- verifica delle tenute dei serbatoi fuori terra, dei silos e dei serbatoi interrati;
- predisposizione di sistemi di tenuta (cinghie, catene, ecc.) per fusti e recipienti;
- disposizione opportuna dei contenitori di sostanze incompatibili all'interno dell'impianto;

- confezionamento delle sostanze pericolose con imballaggi ed etichette resistenti all'acqua.
- sviluppo ed adozione di sistemi di allerta preventivi (Early Warning) per i pericoli di inondazione in collegamento con il sistema di allertamento nazionale allo scopo di mitigare gli effetti dell'evento anche attraverso l'attivazione dei sistemi di sicurezza.

6. Sistemi di Early Warning

Gli obiettivi principali che si possono perseguire attraverso l'adozione di un sistema di Early Warning locale, o l'integrazione nel sistema di Early Warning predisposto dalle pubbliche Autorità sono:

- riduzione delle conseguenze sia interne che esterne;
- preallarme dei lavoratori dello stabilimento e della popolazione nelle aree limitrofe allo stabilimento;
- eventuale interruzione e messa in sicurezza dei processi industriali pericolosi.

Negli impianti industriali tali obiettivi possono essere raggiunti attraverso l'installazione di sistemi che, sulla base delle segnalazioni di allerta preventiva, entrino in azione:

- per ridurre i danni in caso di rilascio di sostanze pericolose, mettendo in sicurezza l'area dello stabilimento e l'area circostante attraverso:
- segnali di allarme acustico/visivo per il personale di stabilimento per avviare l'intervento dei servizi di emergenza e mettere in atto le misure di autoprotezione del personale previste;
- messa in atto di azioni per la protezione di edifici strategici dello stabilimento, impedendo l'ingresso di acque e detriti;

per prevenire i rilasci di sostanze pericolose attraverso:

- lo spostamento di contenitori di sostanze pericolose;
- la disattivazione di parti o di sottosistemi dell'impianto mettendo in sicurezza con valvole e sistemi di blocco automatico o di shut-off attrezzature, macchinari ed apparecchiature critici per i pericoli di incidente rilevante.

6.1 Sistemi di Early Warning per la mitigazione del Rischio NaTech da fenomeni alluvionali

Per quanto riguarda l'utilizzazione di sistemi di Early Warning per i fenomeni alluvionali l'elemento chiave per una corretta individuazione delle azioni che possono essere previste per aumentare la resilienza rispetto ai pericoli, è la conoscenza dell'intervallo di tempo che il sistema di early warning concede tra il momento in cui si ha la ragionevole certezza del verificarsi dell'evento in grado di provocare l'inondazione in una data località e il momento in cui l'evento avviene (Fig.4).

Tipologie e caratteristiche delle inondazioni (fonte: FM Global Property Loss Prevention Data Sheets 1-40 – Flood October 2016)			
Tipologie di inondazione	Velocità	Intervallo di allerta	Durata
fiumi lunghi e con letto ampio	bassa: la velocità non dovrebbe aumentare i danni	fino a 2 settimane o più	giorni o settimane
fiumi di minori dimensioni	-elevata nei tratti più ripidi del corso d'acqua: sono possibili danni dovuti alla velocità - bassa nelle aree piane - bassa nelle aree di espansione	breve; molto breve in aree scoscese	breve: da meno di 1 giorno a diversi giorni flash flood (alluvione improvvisa) in aree ripide: < 3 ore
letti asciutti di corsi d'acqua	elevata: sono possibili danni dovuti alla velocità	breve (poche ore al massimo)	breve: da meno di 1 giorno a diversi giorni.
riflusso interno dietro le protezioni dalla piena	bassa: la velocità non dovrebbe aumentare i danni	breve, ma variabile con il tipo di piena	più lunga: varia con il tipo di piena
costiera	elevata vicino alla costa; sono possibili danni dovuti alla velocità	-formazione della tempesta: fino ad 1 settimana; -fase di azione per lo stabilimento: da 2 a 3 giorni prima dell'arrivo a terra; -1 giorno per ordinare l'evacuazione	breve: ore
cono alluvionale	elevata; sono possibili danni dovuti alla velocità	breve: < 3 ore	breve: < 3 ore
sessa	elevata; sono possibili danni dovuti alla velocità	breve: ore	breve: ore
piogge torrenziali	-potenzialmente elevata nelle aree in pendenza - bassa nelle aree di espansione	breve: da minuti ad ore	breve: da minuti ad ore
innalzamento falda	bassa: la velocità non dovrebbe aumentare i danni	lungo: da 1 giorno a diversi giorni	lungo: da 1 giorno a diversi giorni
sistemi fognari	bassa: la velocità non dovrebbe aumentare i danni	breve: da minuti ad ore	breve: da minuti ad ore

Figura 4. Caratteristiche degli eventi alluvionali

6.2 Sistemi di Early Warning per la mitigazione del rischio NaTech da Frane

L'efficacia dei sistemi di Early warning per la mitigazione del Rischio NaTech da frane dipende molto dalla tipologia, dalla velocità del fenomeno considerato e dalle possibili cause di innesco (Fig.5). Se si prendono in considerazione fenomeni lenti è possibile prevedere sistemi di monitoraggio dei versanti che, integrando informazioni sulla possibile forzante idraulica, consentano l'attivazione di allarmi e misure di mitigazione. Se invece si prende a riferimento fenomeni veloci come le colate detritico-fangose il tempo intercorrente tra l'innesco del fenomeno ed il suo impatto sugli elementi l'intervallo temporale è tipicamente dell'ordine delle decine di secondi. Quindi, in questo caso, l'implementazione di un sistema Early Warning efficace, finalizzato alla mitigazione del rischio è complessa anche perch l'innesco del meccanismo di collasso può avvenire in un qualunque punto ed evolversi in porzioni di territorio nelle quali non era stata disposta alcuna strumentazione di controllo o questa potrebbe essere non più disponibile in quanto distrutta dall'evento stesso. Tale condizione, pertanto, suggerisce di un approccio di tipo preventivo piuttosto che mitigativo.

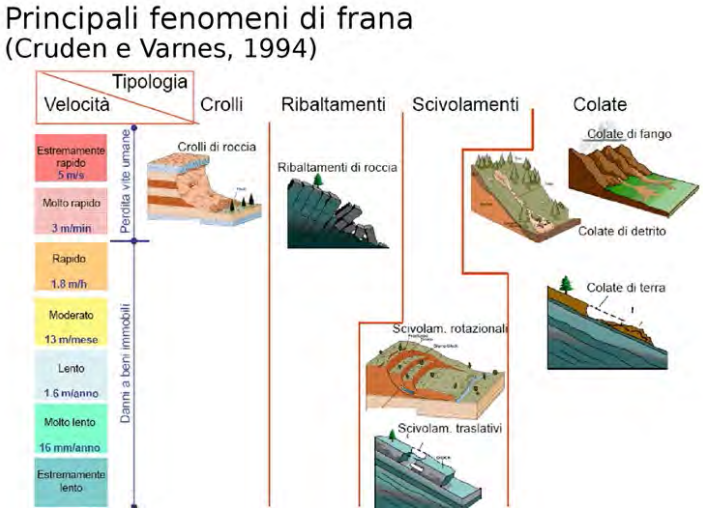


Figura 4. Caratteristiche degli eventi franosi

7. Conclusioni

Questo lavoro propone un approccio innovativo alla gestione del rischio NaTech da eventi idrogeologici che, a partire da una opportuna valutazione della pericolosità idrogeologica e del relativo rischio nonché dei possibili scenari incidentali fornisca indicazioni per la realizzazione di efficaci sistemi di prevenzione e mitigazione delle conseguenze di un incidente rilevante, dove strategie passive (sistemi di early warning) e attive (sistemi di protezione attiva) possono essere utilizzate. Tali metodologie sono già utilizzate nella gestione dei rischi territoriali da parte delle Autorità Competenti. È auspicabile che tali approcci siano integrati, a livello "on-site", nei sistemi di gestione della sicurezza negli stabilimenti PIR.

8. Bibliografia

[1] D.Lgs. 23/02/2010, n. 49 – "Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni"

[2] Mosaicatura delle aree a pericolosità idraulica perimetrate dalle Autorità di Bacino, Regioni e Province Autonome ai sensi del D. Lgs. 49/2010, ISPRA, 2015, reperibile, all'indirizzo:http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/download-mais/mosaicature-nazionali-ispra-pericolosita-frane-alluvioni/

[3] Mosaicatura per il pericolo frane, estratta dalle mappe dei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI), ISPRA, 2015, reperibile all'indirizzo http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/download-mais/mosaicature-nazionali-ispra-pericolosita-frane-alluvioni/

[4] Mappe di pericolosità predisposte dalle Autorità di bacino per il territorio nazionale, reperibili all'indirizzo: http://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/idro/Mappe_peric.html

[5] Marino Alessandra, Ciucci Mariano (2019). Smart approach to integrated natural risks management for Industry 4.0. Presentazione al Convegno a SPIE Smart Structures + Nondestructive Evaluation 2019, 3-7 marzo, 2019 Denver (CO, USA). Proc. SPIE 10973, Smart Structures and NDE for Energy Systems and Industry 4.0, 1097306 (18 March 2019); doi: 10.1117/12.2513764

Metodo ad indice per la stima del rischio alluvioni per le attrezzature a pressione

A. Muratore[1], V. Nastasi[2], C. Delle Site[3], G. Grillone[2], G. Giannelli[1]

[1] Inail - Uot di Como
[2] Inail - Uot di Palermo
[3] Inail - Dit

Abstract

L'aumento degli insediamenti umani insieme ai cambiamenti climatici contribuiscono ad aumentare la probabilità e l'intensità delle alluvioni. Alla luce dei recenti fenomeni di dissesto idrogeologico in tutta Europa, abbiamo condotto un approfondimento sugli aspetti legati alla gestione del rischio alluvione nei luoghi di lavoro con presenza di attrezzature a pressione. Per queste ultime, il rischio alluvione può comportare il rilascio di sostanze pericolose ed altri eventi concomitanti quali incendi, esplosioni, dispersioni tossiche, inquinamento superficiale di corpi idrici e falde acquifere. Per una corretta valutazione del rischio alluvionale, abbiamo considerato tre fattori:
H (Pericolosità, Hazard): probabilità di accadimento di un evento alluvionale in un determinato intervallo di tempo e in una determinata area;
V (Vulnerabilità, Vulnerability): probabilità di danno alle apparecchiature in relazione alla massima velocità dell'acqua (v) e alla massima altezza dell'acqua (h);
E (Esposizione, Exposure): entità e gravità del danno ai ricettori (persone, beni, infrastrutture, servizi) potenzialmente interessati dagli effetti provocati dall'evento alluvionale.
Le attrezzature a pressione sono spesso installate in stabilimenti a rischio di incidente rilevante, in questi casi si possono avere effetti negativi anche all'esterno dello stabilimento.
Lo scopo di questo lavoro è quello di proporre un metodo ad indice per una valutazione preliminare del rischio di alluvione per le apparecchiature a pressione (Generatori di Vapore, Reattori, Recipienti a Pressione, Tubazioni, ecc.) presenti negli impianti industriali. Definito il livello di rischio, se non accettabile, vengono proposte le principali azioni correttive.

Keywords: rischio di alluvione, sicurezza sul lavoro, valutazione dei rischi, mitigazione del rischio, attrezzature a pressione.

1. Introduzione

In Europa, le perdite economiche dovute alle alluvioni sono costantemente aumentate negli ultimi anni. Molte attività industriali sono vulnerabili rispetto a condizioni meteorologiche avverse. Il pericolo di allagamento non è mai eliminabile e pertanto ogni datore di lavoro che utilizzi attrezzature a pressione (Generatori di Vapore, Reattori, Recipienti a Pressione, Tubazioni, ecc.) deve prepararsi preventivamente a limitare l'impatto che un'alluvione può avere sulle proprie attività attraverso una serie di azioni di prevenzione e/o protezione. In riferimento a ciò per dette attrezzature oltre al rischio per cause operative bisogna considerare il rischio da eventi naturali; nel nostro caso il rischio da alluvioni. Lo scopo di questo lavoro è quello di proporre un metodo ad indice per una valutazione preliminare del rischio di alluvione per le apparecchiature a pressione presenti negli impianti industriali. Definito il livello di rischio, se non accettabile, vengono proposte le principali azioni correttive. Gli autori, essendo esperti di sicurezza delle attrezzature a pressione, hanno scelto di analizzare gli impatti delle inondazioni sulle attrezzature a pressione e non su altri tipi di attrezzature, inclusi ad esempio i serbatoi atmosferici di stoccaggio. Si vuole evidenziare che il presente studio ha come obiettivo le apparecchiature a pressione, poiché queste ultime, in caso di rottura, comportano perdite sia di prodotto che di energia. Ad esempio: un deflusso di gas porta alla formazione di una nube, che sarà soggetta a un fenomeno di trasporto e diffusione dipendente dalle caratteristiche meteorologiche locali. Le sostanze tossiche possono essere trasportate molto lontano dalla fonte di rilascio, così come la nube può incendiarsi ed eventualmente esplodere a distanza dalla fonte di rilascio, con danni alle persone e all'ambiente anche al di fuori del perimetro dell'impianto industriale.

Inoltre, alcune delle attività che contengono attrezzature a pressione rientrano nell'ambito di applicazione della direttiva 2012/18/UE. In relazione a quest'ultimo aspetto, il gestore di un impianto a rischio di incidente rilevante deve provvedere anche all'adeguamento del proprio Sistema di Gestione della Sicurezza – Politica di Prevenzione degli Incidenti Rilevanti (SGS-PIR), per prevenire o limitare le conseguenze per la salute umana e per l'ambiente. Secondo la ISO 31000:2018 il “rischio” è “l'effetto dell'incertezza sugli obiettivi”. “La valutazione del rischio è il processo complessivo di identificazione del rischio, analisi del rischio e valutazione del rischio”. Per “livello di rischio” consideriamo “la dimensione (misurazione) di un rischio in termini di combinazione di conseguenze e probabilità”. Il livello di rischio alluvione è una combinazione di tre fattori fondamentali:

H (Pericolosità, Hazard): probabilità di accadimento di un evento di piena in un determinato intervallo di tempo e in una certa area;

V (Vulnerabilità, Vulnerability): probabilità di danni alle apparecchiature in relazione alla massima velocità dell'acqua (v) e alla massima altezza dell'acqua (h);

E (Esposizione, Exposure): entità e gravità del danno ai ricettori (persone, beni, infrastrutture, servizi) potenzialmente interessati dagli effetti provocati dall'evento alluvionale.
Di solito si esprime:

$$\text{Rischio alluvione} = f(H, V, E) \qquad (1)$$

L'espressione (1) non è facile da calcolare, perché le sue tre variabili sono caratterizzate da altre variabili. Gli autori propongono un metodo di indice semplificato basato sull'espressione (2). Tale metodo può essere applicato alle singole apparecchiature a pressione presenti all'interno dello stesso stabilimento:

$$I_{RF} = I_H * I_V * I_E \qquad (2)$$

Dove I_{RF} è l'Indice di Rischio Alluvione che dipende da I_H: Indice di Pericolosità del luogo in cui si trova l'attrezzatura a pressione, I_V: Indice di Vulnerabilità dell'attrezzatura a pressione e I_E: Indice di Esposizione. Nei paragrafi successivi verrà descritto come determinare I_H, I_V, I_E. Dal punto di vista grafico il tutto può essere rappresentato da una matrice tridimensionale ad assi ortogonali I_H, I_V, I_E, dando a ciascuno dei tre indici valori numerici compresi tra 1 e 4.

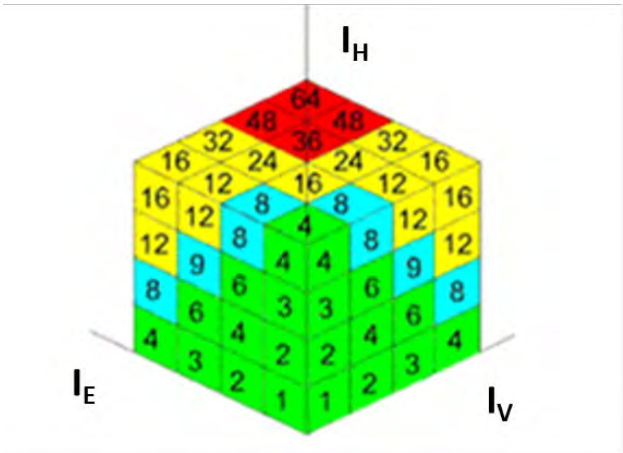


Figura 1. Matrice tridimensionale del rischio di alluvione per attrezzature a pressione

2. Azioni ed effetti delle alluvioni su attrezzature a pressione e impianti industriali

Si evidenzia che gli eventi alluvionali raggruppano diversi fenomeni, quali: piene fluviali, flash floods, acqua alta, colate di fango, colate detritiche.
Il datore di lavoro di un impianto industriale sulla base delle informazioni acquisite sui pericoli di eventi alluvioni e frane nell'area in cui è ubicato l'impianto deve integrare la valutazione dei rischi con particolare riferimento alle attrezzature a pressione presenti. Le azioni delle piene sulle attrezzature a pressione possono essere idrodinamiche, idrostatiche, di erosione, di galleggiamento, ecc. Tali azioni possono essere suddivise in due categorie (Muratore A., et al.):
• indotte dall'acqua (spinta idrostatica orizzontale, spinta di galleggiamento, ecc.);

• determinate dalla velocità della corrente (spinta idrodinamica, impatto detriti portati dall'alluvione, dilavamento e scalzamento di fondazioni/ancoraggi, ecc.).
Il datore di lavoro deve essere consapevole che gli eventi alluvionali possono causare gravi danni agli impianti industriali e innescare il rilascio accidentale di sostanze pericolose nell'ambiente circostante. Le conseguenze dirette possono consistere in:
(i) danni agli edifici e alle apparecchiature di stoccaggio e processo (ove spesso sono presenti attrezzature a pressione), dovuti alla spinta dell'acqua e all'impatto con le strutture di detriti, anche di grandi dimensioni, trascinati dalla forza dell'acqua, che possono indurre perdite di contenimento di sostanze pericolose in grado di determinare:

(a) dispersione e trasporto nell'aria (in caso di formazione di una nube tossica), nelle acque e nel suolo di sostanze pericolose per l'uomo e per l'ambiente;

(b) sviluppo di reazioni violente dovute al contatto tra acqua e composti chimici che possono generare gas tossici;

(c) innesco di incendi ed esplosioni, con possibilità di coinvolgere altre apparecchiature e serbatoi contenenti sostanze pericolose (effetto domino).

(ii) nell'interruzione di servizi vitali come la fornitura di energia elettrica;
(iii) nella saturazione della rete di recupero degli effluenti;
(iv) nell'impossibilità di accedere allo stabilimento o a parti di esso.

3. Indice di pericolosità del luogo in cui è ubicata l'attrezzatura a pressione (I_H)

La Direttiva 2007/60/CE (Direttiva Alluvioni) relativa alla valutazione e gestione del rischio di alluvione con l'obiettivo di ridurre i rischi di conseguenze negative derivanti dalle alluvioni, prevede una valutazione preliminare del rischio di alluvioni, l'elaborazione di mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni e la predisposizione e attuazione di piani di gestione del rischio di alluvioni. In Italia, l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), ha pubblicato nel 2021 la Mosaicatura (Trigila A. et al.) che definisce l'estensione delle aree allagabili su tutto il territorio italiano per ciascuno degli scenari probabilistici previsti dall'art. 6 della Direttiva Alluvioni:

- High Probability Hazard (HPH): alta probabilità di inondazioni;
- Medium Probability Hazard (MPH): media probabilità di inondazioni;
- Low Probability Hazard (LPH): bassa probabilità di inondazioni.

Questi scenari corrispondono alle aree allagabili a seguito di eventi di piena con tempi di ritorno. Alla mappatura delle aree di pericolo idraulico sul territorio nazionale corrispondono tre scenari di pericolo:

- HPH con tempo di ritorno compreso tra 20 e 50 anni (alta probabilità di alluvioni);

- MPH con tempo di ritorno compreso tra 100 e 200 anni (media probabilità di alluvioni);
- LPH con tempo di ritorno 500 anni o massimo storico registrato (bassa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi).

Oltre all'estensione della piena, le mappe della pericolosità di piena dovrebbero indicare, per ciascuno dei tre scenari sopra evidenziati, l'altezza (altezza rispetto al livello medio del mare) o la profondità della piena (altezza rispetto al suolo) (h) e la velocità del flusso (v). Nella tabella 1 sono riportati i valori di I_H (indice di pericolosità) suddivisi in tre livelli legati al periodo di ritorno della piena.

I_H	Livelli legati al periodo di ritorno dell'inondazione
1	Ubicazione stabilimento contenente le unità bersaglio (attrezzature a pressione) in area di pericolosità idraulica Low Probability Hazard "LPH" - bassa probabilità di alluvioni
3	Ubicazione stabilimento contenente le unità bersaglio (attrezzature a pressione) in area di pericolosità idraulica Medium Probability Hazard "MPH" - media probabilità di alluvioni
4	Ubicazione stabilimento contenente le unità bersaglio (attrezzature a pressione) in area di pericolosità idraulica High Probability Hazard "HPH" - elevata probabilità di alluvioni

Tabella 1. Indice di pericolosità

Da quanto sopra evidenziato, in Italia è possibile stabilire l'indice di pericolosità di alluvione (I_H) in funzione dell'ubicazione dell'impianto che contiene le attrezzature a pressione; oltre a questo si possono avere informazioni sull'altezza (h) della piena sopra definita ed eventualmente sulla velocità del flusso (v). Se la velocità del flusso non è mostrata nelle mappe, si può fare riferimento alla formula di Manning (3):

$$v = \frac{1}{n}\left(\frac{A}{p}\right)^{\frac{2}{3}} s^{\frac{1}{2}} \qquad (3)$$

Dove:
v è la velocità media trasversale (L/T; m/s);
n è il coefficiente di Manning. Le unità di misura di n sono spesso omesse, tuttavia n non è adimensionale, avendo unità di: (T/[L1/3]; s/[m1/3]).
A è l'area della sezione trasversale del flusso (L2; m2);
p è il perimetro bagnato (L; m);
s è la pendenza del corso d'acqua o gradiente idraulico, la perdita di carico idraulico lineare (L/L); è uguale alla pendenza del letto del canale quando la profondità dell'acqua è costante. (s = hf/L).

La Figura 2 è una rappresentazione dell'Italia con le aree allagabili per scenario di pericolosità di alluvione: alta (High Probability Hazard - HPH) e media (Medium Probability Hazard - MPH), Mosaicatura ISPRA, 2020 (Trigila A. et al. ISPRA 2021).

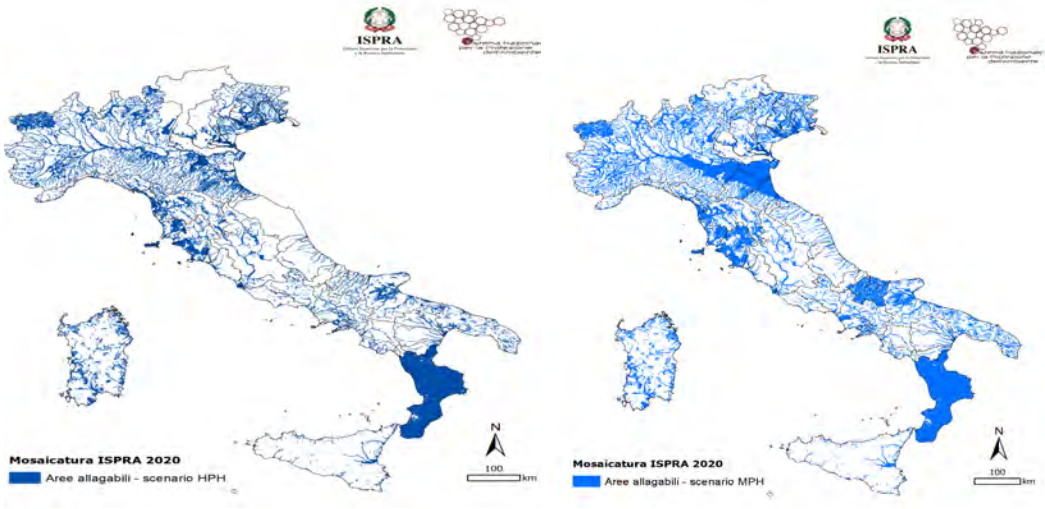


Figura 2. Mosaicatura ISPRA 2020 per scenari di pericolosità alta (HPH) (a sinistra) e media (MPH) (a destra)

4. Indice di vulnerabilità delle singole attrezzature a pressione (I_V)

L'indice di vulnerabilità (I_V) che gli autori propongono in questo lavoro dipende da:

- Tipologia di guasto che interessa un determinato rilascio (R1, R2, R3);
- Categoria di rischio PED delle attrezzature a pressione (Categoria di rischio I, II, III, IV).

Per R1 si definisce una rottura che si traduce nel rilascio istantaneo dell'intero contenuto (in meno di 2 minuti). Per R2 si definisce una rottura che provoca il rilascio continuo dell'intero contenuto (in più di 10 minuti). Per R3 si definisce una rottura che comporta il rilascio continuo da un foro di diametro equivalente 10 mm.

4.1. Determinazione del tipo di rottura

Nel paragrafo precedente abbiamo visto che le mappe di pericolosità contengono anche i valori di quota (h) e velocità del flusso alluvionale (v). Questi valori verranno utilizzati per determinare la stima dei danni alle apparecchiature. Nel caso di alluvioni non sono disponibili in letteratura modelli semplificati e consolidati per la stima dei danni alle apparecchiature. Pertanto, partendo dall'analisi dei pochi dati disponibili, è stato sviluppato un modello di danno semplificato, che collega la velocità massima dell'acqua (v) e l'altezza massima dell'acqua (h) alla probabilità di danno alle apparecchiature (Antonioni G., et al.):

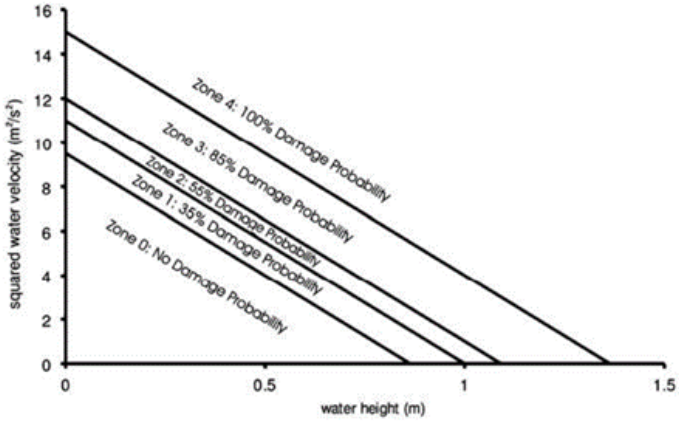


Figura 3. Probabilità di danno dell'evento di piena in funzione del livello dell'acqua e del quadrato della velocità dell'acqua

La Figura 3 mostra le regioni associate a diversi valori di probabilità di danno. Una volta stimate queste probabilità di danno (vedi Fig. 3: Zona 0, Zona 1, Zona 2, Zona 3, Zona 4), gli autori associano queste probabilità di danno a: Modalità di impatto, Danni strutturali e Categorie di rischio (R1, R2, R3) come mostrato nella Tabella 2.

Probabilità danno	Modalità di impatto	Possibili Danni strutturali	Categorie di Rilascio
Zona 0 e Zona 1	Sommersione Lenta	Cedimento flange e connessioni	R3
Zona 2	Onda a bassa velocità	Cedimento flange e connessioni Frattura Mantello	R3 R2
Zona 3 e Zona 4	Onda ad alta velocità	Cedimento flange e connessioni Frattura del mantello Impatto con strutture adiacenti	R3 R2 R1

Tabella 2. Correlazione tra modalità di impatto dell'alluvione, danni strutturali alle attrezzature e categoria di rischio R1, R2, R3

4.2. Determinazione della categoria di rischio PED per ogni attrezzatura a pressione

Utilizzando la direttiva di prodotto 2014/68/UE (PED – Pressure Equipment Directive), relativa alle attrezzature a pressione e/o insiemi, è possibile determinare la categoria di rischio PED: I, II, III, IV (passando da I a IV il rischio aumenta). La Direttiva contiene apposite tabelle dalle quali ricavare la categoria di rischio PED in funzione dell'energia di pressione contenuta e della pericolosità del fluido.

4.3. Determinazione dell'indice di vulnerabilità (I_V)

La tabella 3 mostra i valori dell'indice di vulnerabilità per ogni tipo di attrezzatura a pressione. I valori dipendono dal tipo di rilascio, che a sua volta dipende dalla probabilità di danno (Fig. 3) oltre che dalla categoria di rischio PED (vedi par. 4.2).

	Tubazione	Tubazione	Tubazione	Attrezzatura a pressione snella (*)	Attrezzatura a pressione snella (*)	Attrezzatura a pressione snella (*)	Attrezzatura a pressione tozza (**)	Attrezzatura a pressione tozza (**)	Attrezzatura a pressione tozza (**)
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Cat. PED: IV	Non Applicabile	Non Applicabile	Non Applicabile	4	4	4	3	3	2
Cat. PED: III	3	3	2	3	3	3	2	2	2
Cat. PED: II	3	2	2	3	2	2	2	1	1
Cat. PED: I	1	1	1	2	2	2	1	1	1

Tabella 3. Indice di vulnerabilità per diversi tipi di attrezzature a pressione (I_V)
(*) Attrezzatura in cui altezza (h)/raggio (r) è maggiore di 4 (h/r>4)
(**) Attrezzatura in cui altezza (h)/raggio (r) è inferiore a 4 (h/r<4)

5. Indice di esposizione (I_E)

L'esposizione tiene conto di vite umane, danni ambientali, danni economici, ecc. Per determinare l'esposizione derivante da alluvioni che coinvolgono attrezzature a pressione, si deve partire dalla tipologia di sostanze pericolose presenti, dal loro stato fisico, dal tipo di lavorazione (processo, stoccaggio, ecc.), dal tipo di evento atteso (esplosione, rilascio tossico, incendio, dispersione di fumi tossici a seguito di incendio), dalla quantità di sostanze pericolose. Per la stima dell'esposizione in questo articolo si propone un metodo qualitativo basato sul giudizio di esperti, attribuendo un peso crescente da 1 a 4 secondo l'importanza della classe di uso del suolo circostante. Pesi maggiori sono stati assegnati alle classi residenziali che comportano una presenza antropica costante e pesi decrescenti a diverse tipologie di attività produttive, privilegiando le attività più concentrate (attività industriali), rispetto alle attività estensive (attività agricole). La tabella 4 mostra una correlazione tra l'indice di esposizione (I_E) e le classi d'uso del suolo circostante lo stabilimento contenente attrezzature a pressione.

I_E	Classi d'uso del suolo circostante lo stabilimento
1	Scenari credibili a seguito di impatto di un evento alluvionale su attrezzature a pressione che hanno ricadute sia all'interno dello stabilimento che all'esterno dello stabilimento su zone con suolo incolto
2	Scenari credibili a seguito di impatto di un evento alluvionale su attrezzature a pressione che hanno ricadute all'esterno dello stabilimento su zone agricole estensive (attività agricole)
3	Scenari credibili a seguito di impatto di un evento alluvionale su attrezzature a pressione che hanno ricadute all'esterno dello stabilimento su zone industriali
4	Scenari credibili a seguito di impatto di un evento alluvionale su attrezzature a pressione che hanno ricadute all'esterno dello stabilimento su zone interessate da attività produttive e commerciali che comportano una presenza antropica costante
4	Scenari credibili a seguito di impatto di un evento alluvionale su attrezzature a pressione che hanno ricadute all'esterno dello stabilimento su zone con abitazioni residenziali e zone di sicuro impatto (edifici strategici)

Tabella 4. Relazione tra indice di esposizione (I_E) e classi d'uso del suolo

Nell'ultimo scenario, per edifici strategici si intendono le sale di controllo, gli uffici di gestione delle emergenze, il pronto soccorso, i capannoni antincendio, ecc.

6. Indice di rischio di alluvione (I_{RF}) per attrezzature a pressione e trattamento del rischio

Applicando quanto indicato nei paragrafi precedenti, è possibile ottenere i valori numerici (da 1 a 4) per I_H, I_V e I_E. Utilizzando quindi l'espressione (2) si può ottenere un valore numerico per l'Indice di Rischio Alluvione (I_{RF}), che varia per ogni unità target critica (attrezzatura a pressione) all'interno dello stesso sito industriale. La tabella 5, basata sul valore numerico dell'I_{RF} per le varie apparecchiature bersaglio, mostra diverse accettabilità del rischio, priorità di intervento e azioni correttive per la prevenzione e la mitigazione. Il paragrafo 7 dettaglia le azioni correttive di prevenzione e mitigazione.

I_{RF}	Accettabilità del rischio	Priorità di intervento delle azioni correttive	Azioni correttive di prevenzione e mitigazione
$I_{RF} > 32$	Non tollerabile	Priorità di intervento 1	Interventi permanenti: (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i), (j). Interventi temporanei: (k), (l), (m), (n), (o), (p), (q) Resilienza organizzativa: (r)
$12 \leq I_{RF} \leq 32$	Migliorabile	Azioni Correttive indilazionabili	Interventi permanenti: (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i), (j). Interventi temporanei: (k), (l), (m), (n), (o), (p), (q) Resilienza organizzativa: (r)
$I_{RF} < 12$	Tollerabile	Priorità di intervento 2	Interventi temporanei: (k), (l), (m), (n), (o), (p), (q) Resilienza organizzativa: (r)

Tabella 5. I_{RF}, Accettabilità del rischio

7. Azioni correttive di prevenzione e mitigazione per eventi da alluvioni su attrezzature a pressione

Come azioni correttive per prevenire e/o proteggere da potenziali eventi indotti da fenomeni alluvionali, è necessaria una pianificazione dell'emergenza che includa il miglioramento delle misure di mitigazione al fine di ridurre i danni alle attrezzature a pressione. Tra gli interventi finalizzati a tale scopo possiamo distinguere due classi: interventi permanenti e interventi temporanei (Muratore A. et al.).

(I) Interventi permanenti, finalizzati ad aumentare la resistenza delle infrastrutture industriali con opportune scelte di materiali e soluzioni progettuali:

(a) ancoraggio a livello delle fondazioni delle attrezzature a pressione in modo che non galleggino o subiscano fenomeni di ribaltamento;

(b) costruzione e/o rafforzamento di barriere di contenimento o sponde di protezione di corsi d'acqua;

(c) sviluppo e realizzazione di un efficace sistema di drenaggio che contrasti l'innalzamento del livello idrometrico;

(d) posizionamento di sistemi di stoccaggio pressurizzati e/o criogenici al di sopra del livello idrometrico massimo previsto;

(e) costruzione di recinzioni protettive per attrezzature e macchinari;

(f) movimento di macchine elettriche, impianti antincendio, sistemi informatici e di distribuzione dell'energia al di sopra del livello idrometrico massimo previsto;

(g) predisposizione della segnalazione delle vie di evacuazione in presenza di piene;
(h) tubi e raccordi di rinforzo;
(i) fornire collegamenti flessibili per i tubi ove possibile;
(j) stoccaggio strategico e posizionamento di sostanze pericolose per evitare l'incompatibilità chimica.

(II) Interventi temporanei strettamente legati ai tempi con cui le Autorità sono in grado di diffondere la fase di possibile alluvione con allerta (preallerta pubblica). L'allerta precoce consiste nell'insieme delle azioni, attuabili tra il momento in cui vi è una ragionevole certezza del verificarsi di un evento alluvionale in una data località e, il momento in cui l'evento si verifica (nel caso di eventi meteorologici tale intervallo può raggiungere le 24/48 ore a differenza del terremoto che può durare solo pochi secondi). Queste azioni consistono in misure da adottare in caso di pericolo imminente, tra cui:

(k) interruzione e messa in sicurezza di processi industriali pericolosi; disattivare parti o sottosistemi dell'impianto (valvole automatiche di blocco o intercettazione) per impedire il rilascio di sostanze pericolose;
(l) ancoraggio delle strutture più a rischio e strutturalmente più fragili con funi di acciaio o similari;
(m) verifica della tenuta dei serbatoi di stoccaggio, mediante chiusura ermetica dei silos e dei serbatoi di stoccaggio interrati;
(n) delocalizzazione e stoccaggio di sostanze chimiche reattive e materiali pericolosi in aree ad altitudini più elevate e più sicure;
(o) attivare la produzione autonoma di energia elettrica o il risparmio energetico, in modo che i sistemi di controllo siano disponibili anche durante l'evento;
(p) evacuazione del personale non indispensabile per le operazioni di emergenza;
(q) piani di emergenza interni (PEI), al fine di tenere conto di eventuali sistemi di allerta preventiva eventualmente presenti nell'impianto o nell'area in cui esso è ubicato e di assicurare che le azioni da porre in essere in risposta alle adozioni anticipate siano state individuate e chiaramente indicate nella suddetta documentazione di allerta emessa da tali sistemi.

(III) Oltre alle due classi di interventi (permanenti e temporanei) sopra individuate ai punti (I) e (II), è ora indispensabile aggiungere un ulteriore punto (III):

(r) sviluppare la resilienza organizzativa negli stabilimenti (compresi quelli contenenti attrezzature a pressione) coinvolgendo tutti gli attori della sicurezza (in primo luogo i lavoratori che si interfacciano con gli impianti).

Fornire una formazione specifica e continua che mira a creare un'organizzazione resiliente in grado di rispondere agli eventi, monitorare ciò che accade, sapere come anticipare i rischi e, infine, imparare dalle esperienze passate (Poljanšek K., et al.).

8. Conclusioni

Lo scopo di questo lavoro è sviluppare una valutazione preliminare del rischio di alluvione, secondo lo standard ISO 31000:2018 "Gestione del rischio - Principi e linee guida", basata su un metodo ad indice per le singole apparecchiature a pressione (generatori di vapore, reattori, recipienti, scambiatori, tubazioni, ecc.) presenti negli impianti industriali.
Una volta definito il livello di rischio, se non accettabile, gli autori propongono alcune delle principali azioni correttive, al fine di facilitare i processi decisionali del datore di lavoro in merito alle misure di prevenzione e/o protezione da attuare con le relative priorità di intervento (Risk Treatment). Inoltre, alcune delle attività che contengono attrezzature a pressione rientrano nell'ambito di applicazione della direttiva 2012/18/UE. In relazione a quest'ultimo aspetto, il gestore di un impianto a rischio di incidente rilevante deve provvedere anche all'adeguamento del proprio Sistema di Gestione della Sicurezza – Politica di Prevenzione degli Incidenti Rilevanti (SGS-PIR), per prevenire o limitare le conseguenze per la salute umana e per l'ambiente.
Si vuole infine evidenziare che il presente studio ha come obiettivo le attrezzature a pressione, poiché queste ultime, in caso di rottura, comportano perdite sia di prodotto che di energia. Ad esempio: un deflusso di gas porta alla formazione di una nube, che sarà soggetta a un fenomeno di trasporto e diffusione dipendente dalle caratteristiche meteorologiche locali. In riferimento a ciò, le sostanze tossiche possono essere trasportate molto lontano dalla fonte di rilascio, così come la nube può incendiarsi ed eventualmente esplodere a distanza dalla fonte di rilascio, con danni alle persone e all'ambiente anche al di fuori dello stabilimento.

9. Bibliografia

[1] Antonioni G., Bonvicini S., Spadoni G., Cozzani V., Development of a framework for the risk assessment of Na-Tech accidental events, Reliability Engineering and System Safety, 94, 1442-1450, 2009. DOI: 10.1016/j.ress.2009.02.026.

[2] European Union (2007). Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. Official Journal of the European Union L 288, 6.11.2007, p. 27–34.

[3] Geri F. et al., (2016), Metodologie per la gestione di eventi Natech, VGR2016.

[4] Muratore A., Giannelli G., Nastasi V., Sferruzza G., Grillone G., Delle Site C. (2022). Flood risk identification and analysis for pressure equipment. Proceedings of the 32nd European Safety and Reliability Conference, Dublin, Ireland, 28 August - 1 September 2022, ESREL2022 Organizers, pp. 885-890. Published by Research Publishing, Singapore. ISBN: 978-981-18-5183-4, DOI: 10.3850/978-981-18-5183-4_R17-03-059-cd.

[5] Poljanšek K., Casajus Valles A., Marín Ferrer M., etc. (2019). Recommendations for National Risk Assessment for Disaster Risk Management in EU. Publications Office of

the European Union, Luxembourg, 2019. JRC 114650. ISBN 978-92-79-98366-5. ISSN 1831-9424. DOI:10.2760/084707.

[6] Poljanšek K., MarinFerrer M., DeGroeve T., Clark I., (2017). Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less. EUR28034EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, JCR number: JCR102482. ISBN 978-92-79-60679-3. Doi: 10.2788/842809.

[7] Trigila A., Iadanza C., Lastoria B., Bussettini M., Barbano A. (2021) Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio - Edizione 2021. ISPRA. Rapporti 356/2021.

[8] Zuffellato P., (2011) Definizione di un approccio semplificato per la valutazione del rischio natech determinato da alluvioni, Politecnico di Milano.

Approccio basato sull'entropia del segnale per la stima dei tempi di arrivo delle emissioni acustiche nel monitoraggio delle apparecchiature a pressione

D. Bogomolov[1,2], E. Burda[3], S. Mariani[2], M. G. Gaeta[2], N. Testoni[1], C. Mennuti[4], G. Augugliaro[4], A. Marzani[2]

[1] Advanced Research Center on Electronic Systems (ARCES), Università di Bologna
[2] Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, DICAM, Università di Bologna
[3] Omsk State Technical University, Russia
[4] Inail - Dit

Abstract

Negli ultimi anni il metodo delle emissioni acustiche (EA) è stato utilizzato con successo per valutare l'integrità delle attrezzature a pressione e delle strutture civili. Per localizzare le sorgenti di EA attive, che generalmente indicano la presenza di danneggiamento, occorre stimare il tempo di arrivo (ToA) dei segnali ricevuti dai sensori dislocati sulla struttura. La presenza di rumore ambientale e operativo sui segnali, sempre presente negli impianti industriali, rende difficile la corretta stima del ToA. Il presente lavoro propone un approccio basato sul calcolo dell'entropia dei segnali per la riduzione dell'effetto del rumore sul calcolo della ToA. In particolare, il metodo proposto prevede il calcolo dell'entropia locale (istantanea) dei segnali ricevuti ai sensori, e la successiva stima del ToA tra due segnali in base al criterio di informazione di Akaike (AIC). Il metodo è validato sperimentalmente mediante prove su una conduttura per il trasporto acqua in pressione a 5 bar con sorgenti EA simulate. In particolare, le EA sono state generate mediante la procedura di Hsu-Nielsen e successivamente contaminate aggiungendo rumore gaussiano di vari livelli. Il metodo di riduzione del rumore proposto ha migliorato significativamente l'accuratezza e la riproducibilità della localizzazione degli eventi EA per valori critici di segnale-rumore (da 12 dB a 1 dB). Nel complesso, il metodo proposto ha il potenziale per migliorare il rilevamento e la localizzazione dei danni attraverso l'elaborazione dei segnali EA in applicazioni industriali e civili.

Keywords: emissione acustica, filtraggio rumore, localizzazione, filtraggio entropia, processamento segnali.

1. Introduzione

La metodica delle emissioni acustiche (EA) è ampiamente utilizzata per valutare lo stato di integrità di infrastrutture e strutture civili e industriali. Uno dei principali

vantaggi dell'EA è la capacità di rilevare sorgenti attive di degrado, catturando passivamente la risposta acustica della struttura, come pure di stimarne la posizione. Nell'approccio diagnostico mediante le EA, il metodo prevede di svolgere misure aumentando deliberatamente il carico meccanico applicato alla struttura [1]. Questo consente generalmente un livello del segnale utile ben distinguibile dal rumore di fondo. Tuttavia, nel crescente panorama del monitoraggio di EA, che utilizza sistemi di misura installati in modo permanente per misurare in tempo reale e continuo le emissioni della struttura di interesse, sorgono nuove sfide tecniche. Tra queste, quella di rilevare segnali deboli in ambienti rumorosi, specialmente nelle prime fasi della crescita del difetto [2], e quella di inferire la localizzazione della sorgente EA a partire da detti segnali. La localizzazione, in particolare, richiede di rilevare con precisione l'inizio della parte informativa del segnale rispetto alla componente di rumore di fondo, il cosiddetto tempo di arrivo (ToA). I ToA stimati a differenti trasduttori vengono poi utilizzati per stimare la differenza di tempo di arrivo (TDoA) tra i segnali, che vengono comunemente utilizzati nei modelli di localizzazione [3].
Come discusso da Barat, et al. in [4], la natura del rumore di fondo dei segnali EA reali può essere diversa; gli autori hanno identificato tre principali gruppi di fonti di rumore negli scenari EA: i) picchi (impulsi brevi), rumore armonico, rumore ad alta frequenza e bassa frequenza causati da disturbi elettrici ed elettromagnetici; ii) rumore bianco stazionario dovuto al rumore del sistema EA (rumore dei componenti elettronici); iii) rumore non stazionario causato dal rumore di attrito, disturbi idrodinamici e cavitazione.
Insieme ai progressi tecnologici, sono state introdotte anche tecniche di filtraggio tempo-frequenza per la scelta del ToA in segnali rumorosi. Ad esempio, Zhange [5], Karamzadeh [6] e Gaci [7] hanno proposto vari approcci basati sulla trasformata wavelet per ottenere serie temporali ripulite dal rumore di fondo a diverse scale. Tuttavia, la complessità computazionale della trasformata wavelet, così come il fattore di rumore dei segnali EA descritto in precedenza, spingono i ricercatori a cercare nuovi modi efficaci di elaborazione dei segnali EA negli scenari di monitoraggio reale in quanto la componente di rumore può mascherare le EA generate da difetti attivi.
In un precedente lavoro [8] gli autori hanno proposto un metodo basato sull'entropia del segnale per ridurre il livello di rumore e comprovato con successo la sua applicabilità in condizioni di laboratorio su una lastra di alluminio. Il presente lavoro si concentra sulla sperimentazione dell'algoritmo su segnali rilevati in un tratto di conduttura in un ambiente quasi industriale con rumore gaussiano aggiunto nella fase di post-elaborazione dei segnali registrati. Tra i vantaggi dell'approccio proposto sono una facile implementazione algoritmica e una minima potenza di calcolo, che lo rendono adatto a sistemi di monitoraggio in tempo reale. I risultati del presente lavoro sia numerici che sperimentali confermano l'importanza pratica dello studio.

2. Metodologia e contesto teorico

Ad oggi, sono stati proposti e presentati molti algoritmi automatici di stima del ToA. Tra i vari, il criterio di informazione di Akaike (AIC) è uno dei più usati [9] e può essere utilizzato anche per valutare le prestazioni delle tecniche di riduzione del rumore. In particolare, il AIC sarà utilizzato per stimare i ToA sia per i segnali rumorosi sia per gli stessi segnali una volta filtrati tramite l'approccio proposto.
È inoltre importante tenere conto del fatto che la stima del ToA può essere caratterizzata sia da errori sistematici che da errori non sistematici. Gli errori sistematici possono di solito essere compensati dal calcolo dei TDoA, poiché spesso si annullano quando si mettono a sistema le differenze. Al contrario, gli errori casuali non si annullano nel calcolo del TDoA e rendono la localizzazione della sorgente EA incerta, riducendo quindi l'affidabilità dell'ispezione mediante EA. Di conseguenza, per effettuare una valutazione più obiettiva dell'algoritmo proposto, questo lavoro si concentra sulla valutazione dell'errore di localizzazione anziché sull'errore di stima del ToA. In particolare, nel seguito di questo lavoro, la precisione della localizzazione è stimata sulla base della elaborazione di segnali di EA grezzi, registrati da tre sensori posizionati lungo una tubazione in pressione, generati mediante pencil break in posizioni note.

2.1 Teoria dell'entropia dell'informazione

Shannon ha proposto una misura dell'informatività media di una prova (l'imprevedibilità dei suoi risultati), tenendo conto delle probabilità dei singoli risultati [10]. Espressa in bit, questo valore è dato dalla formula:

$$H = -\sum_{i=1}^{n} P_i log_2(P_i). \quad (1)$$

dove H è l'entropia dello schema di probabilità finito espressa in bit, n è il numero di campioni del segnale e P_i è la probabilità dell'esito i-esimo. L'algoritmo di riduzione del rumore proposto si basa sul concetto di entropia locale h_i [11], che secondo le conoscenze degli autori non è mai stato utilizzato negli studi dedicati al filtraggio dei segnali di EA. I valori h_i e H possono essere interpretati come valori di entropia istantanea e media del campione. La formulazione matematica di h_i fa uso di una distribuzione di probabilità empirica derivata direttamente dai campioni del segnale in esame:

$$h_i = -log_2(P_{ie}) \quad (2)$$

dove h_i è l'entropia locale espressa in bit dell'i-esimo campione del segnale, e P_{ie} è la probabilità empirica di occorrenza dell'i-esimo campione nella serie di campioni che compongono il segnale. Per ottenere una stima dell'entropia locale h_i, i campioni di segnale devono essere rappresentati tramite un istogramma costituito su un opportuno numero m di intervalli di pari ampiezza. I valori delle probabilità empiriche

P_{ie} di occorrenza dei campioni sono determinati dalla legge di distribuzione empirica di un tale istogramma.

2.2. Calcolo dell'entropia dell'informazione

Per stimare il numero di intervalli *m*, vengono utilizzati alcuni metodi proposti in [12], tenendo in considerazione le seguenti condizioni:

1) poiché la legge della distribuzione dell'entropia istantanea per i segnali oggetto di studio è sconosciuta e la sua determinazione esula dallo scopo del problema in discussione, il numero di intervalli *m* deve soddisfare i requisiti fondamentali per la costruzione di tali distribuzioni, tenendo conto della possibilità di utilizzare sia intervalli di uguale lunghezza che intervalli di uguale probabilità;

2) solitamente il numero di intervalli è determinato in modo da smussare i valori anomali nei valori analizzati, a tal fine il numero di intervalli può essere ridotto. Nel caso in questione, sono gli outlier che hanno la maggiore entropia, quindi sono di notevole interesse. Pertanto, per determinare il numero di intervalli *m* è necessario selezionare un metodo ottimale per l'implementazione in forma algoritmica.

Infine, per semplificare l'algoritmo di analisi del segnale, è stato proposto di suddividere i segnali in intervalli m_{round} di uguale lunghezza includendo campioni ravvicinati. Al fine di preparare i dati per il partizionamento a intervalli viene utilizzato il metodo proposto da Crutchfield e Packard [13] che prevede di creare un array di campioni generati dal segnale di ingresso secondo la seguente regola:

$$c_i = c_0 + \mathrm{int}(x_i/\Delta) \tag{3}$$

dove c_i è il valore approssimato del *i*-esimo campione nel segnale; c_0 è l'offset iniziale; x_i è il valore del *i*-esimo campione nel segnale; Δ è un parametro chiamato passo di quantizzazione; int(·) è l'operazione di arrotondamento di un numero, scartando la parte frazionaria.

Basandosi sull'idea del metodo Crutchfield--Packard e sull'incertezza della legge di distribuzione dell'entropia istantanea per i segnali EA studiati, nonché per semplificare l'algoritmo finale di elaborazione dei dati, gli autori hanno proposto [8] un metodo di campionamento dei segnali in intervalli arrotondandoli per includere campioni vicini in intervalli di uguale lunghezza:

$$c_i = \mathrm{round}(x_i, d) = \mathrm{sgn}(x_i)\mathrm{floor}(\mathrm{abs}(x_i)10^{-d} + 1/2)10^{d} \tag{4}$$

dove *d* è la cifra decimale a cui viene arrotondata la lettura *i*-esima, «sgn» - restituisce il segno di un numero reale, «floor» - fornisce il numero intero più vicino al basso, «abs» -il valore assoluto o il modulo.

Sulla base di un'analisi preliminare dei segnali EA, in questo studio la cifra decimale per *i*-esimo è stato impostato a *d* =-1 come parametro ottimale. Pertanto, i campioni del segnale EA c_i sono suddivisi in intervalli con passo di arrotondamento m_{round}.

2.3. Formulazione dell'algoritmo di denoising basato sull'entropia

I valori più alti dell'entropia dell'informazione saranno ottenuti per i segnali di EA meno frequenti. Tali letture riflettono in generale anomalie e cambiamenti nei processi oggetto di monitoraggio. Le letture dei segnali con i valori più bassi dell'entropia dell'informazione si riferiranno invece a fenomeni regolari e prevedibili. Ad esempio, saranno associati a segnali periodici generati nei sistemi di processo, così come a componenti di rumore che presentano caratteristiche di similitudine rispetto agli scenari oggetto di monitoraggio.

Sulla base di queste considerazioni, viene proposto un principio del filtraggio entropico, che consiste nell'azzerare tutte le letture di un segnale la cui entropia informativa è inferiore a una determinata soglia di filtraggio *k*. In questo modo, il rumore e le componenti periodiche, che hanno un basso valore informativo, vengono eliminati ed esclusi dal segnale. Per utilizzare il filtraggio entropico è necessario determinare il valore della soglia di filtraggio *k*. A tal fine, viene proposto un metodo di stima del valore della soglia di filtraggio k che prevede le seguenti operazioni:

1) calcolo dell'entropia dell'informazione h_i per i campioni del segnale;
2) filtraggio tramite il meccanismo illustrato in precedenza, con l'applicazione di una soglia *k* che varia dal valore minimo al valore massimo di h_i calcolata nella prima fase, e calcolo dell'informatività media dei campioni rimanenti;
3) determinazione del valore della soglia *k* utilizzata per il filtraggio dell'entropia del segnale in base al grafico dell'informatività media ottenuto.

Il calcolo dell'entropia informativa h_i dei campioni di segnali è stato eseguito secondo il metodo sopra indicato. Il calcolo dell'informatività media h_{av} presuppone l'azzeramento dei valori h_i inferiori alla soglia *k* e la determinazione del valore medio dell'entropia informativa dei rimanenti dopo il filtraggio dei campioni di un segnale. Dopo aver selezionato la soglia di filtraggio k mostrata sopra, viene eseguito il filtraggio entropico del segnale in esame.

3. Validazione sperimentale

Per verificare quantitativamente l'efficacia dell'algoritmo proposto, basato sull'analisi dell'entropia dei segnali EA, è stata progettata una sperimentazione ad-hoc presso il circuito idraulico dell'Università di Bologna. Il circuito, la cui foto è riportata nella Figura 1, è costituito da un serie di tubi in acciaio al carbonio zincato e poi verniciato, e consente di pressurizzare indipendentemente due serbatoi da 1000 litri per mezzo di un sistema di pompaggio. Può essere controllato sia direttamente dalla "sala di controllo" sia da remoto attraverso un apposito cruscotto sviluppato in Labview. La sezione di tubazione oggetto della sperimentazione, lunga 1,7 metri, con uno spessore di 5 mm e un diametro di 100 mm, è stata equipaggiata con una rete di tre sensori EA (S1, S2 e S3). In particolare, la rete consiste in un sistema di acquisizione delle EA miniaturizzato, in grado di acquisire, pre-elaborare e caratterizzare i segnali di EA in tempo reale ed in continuo da tre sensori piezoelettrici, prestandosi così alle operazioni di monitoraggio [14]. La risposta in frequenza del dispositivo offre un

comportamento stabile da 10 kHz a 600 kHz, con un'attenuazione massima di 3 dB. In questa applicazione sono stati utilizzati tre sensori piezoelettrici G10 forniti dall'Istituto Qing Cheng AE.

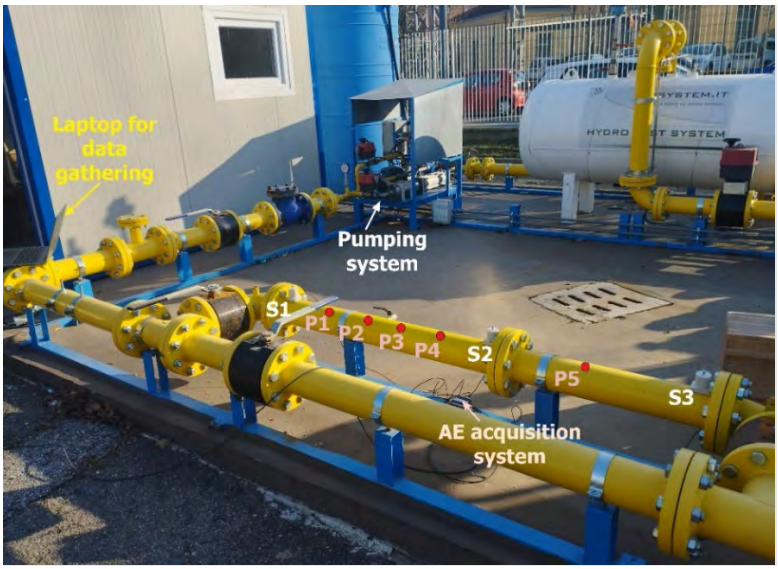


Figura 1. Foto del setup sperimentale, dove S1-S3 si riferiscono alla posizione dei tre sensori per EA, P1-P5 sono i cinque target del test ovvero le posizioni di generazione delle EA mediante Hsu-Nielsen test.

La sperimentazione verte sulla localizzazione delle sorgenti acustiche, caratterizzate da una frequenza predominante superiore ai 20 kHz, tipicamente associate a fenomeni di corrosione o di frattura del metallo. Al fine di riprodurre queste EA di tipo discontinuo, si è impiegato un approccio consolidato nel campo dell'emissione acustica: il test di Hsu-Nielsen, comunemente noto come "pencil lead break". Questa procedura implica la rottura di una mina di matita da 0,5 mm di diametro, posizionata a circa 3 mm dalla punta e inclinata a un angolo di 30° sulla superficie esterna della condotta. Tale operazione genera un impulso acustico intenso, analogo a una sorgente naturale di EA, che si propaga lungo la tubazione sotto forma di onde meccaniche e che i sensori sono in grado di rilevare. Nel corso dell'esperimento, si è fatto uso di una matita professionale fornita dalla Vallen Systeme GmbH, conforme alla norma ASTM E976. Le posizioni dei bersagli (ovvero le posizioni delle sorgenti Hsu-Nielsen) in relazione alla posizione dei sensori di EA dislocati sul tubo, come pure un'immagine del test Hsu-Nielsen, sono illustrati in Figura 2.

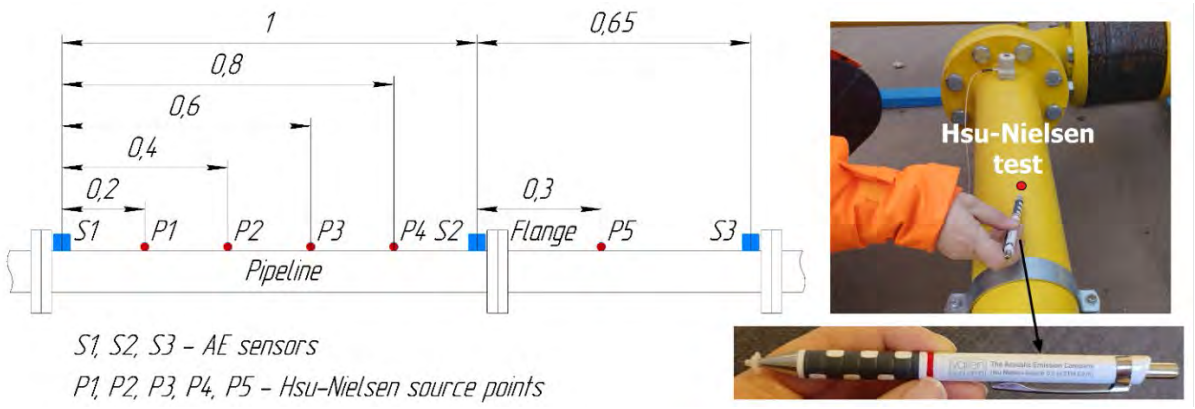


Figura 2. Layout delle posizioni della sorgente Hsu-Nielsen e dei sensori di EA sul tubo (a sinistra) e foto del test Hsu-Nielsen (a destra).

Come si può vedere dalla Figura 2, i target P1-P4 sono situati su una parte continua del tubo, dove i sensori EA S1 e S2 sono posizionati. Il target P5 si trova sulla seconda sezione del tubo, collegata alla prima da una flangia, dove è posizionato il sensore EA S3. Il sistema di pompaggio dell'acqua mostrato nella Figura 1 è stato utilizzato per pressurizzare il circuito a 5 bar. I segnali EA grezzi sono stati acquisiti dal sistema EA e poi memorizzati ed elaborati su un computer portatile utilizzando il software MATLAB. Per ciascun target, ovvero i punti P1-P5 rappresentati in Figura 2, gli esperimenti sono stati ripetuti dieci volte, con una finestra costante di 5000 campioni, un pre-trigger di 1500 campioni e una frequenza di campionamento pari a 2 MHz. Tutti e tre i canali EA del sistema di acquisizione erano sincronizzati nel tempo.

Per valutare l'efficacia del metodo di filtraggio proposto, per ogni segnale è stato stimato il ToA mediante l'Akaike Information Criterion (AIC) prima e dopo il filtraggio. Successivamente è stata stimata la differenza nei tempi di arrivo dei segnali ricevuti e, sulla base di queste informazioni, è stato utilizzato l'algoritmo di localizzazione monodimensionale di una sorgente EA vista la geometria del caso di interesse. Pertanto, nella localizzazione si presuppone che il segnale di un evento acustico causato da un potenziale guasto, come un processo di corrosione o una perdita di fluido, si propaghi in linea retta lungo l'asse della tubazione e si trascura l'effetto della propagazione in direzione radiale. Il posizionamento assiale viene eseguito stimando la differenza di ToAs (TDoAs) del segnale a due sensori e la velocità del segnale V, come descritto in dettaglio in [17]. Questo approccio non considera volutamente lo scenario multimodale e dispersivo di propagazione delle onde guidate al fine di limitare la complessità legata alla propagazione guidata con l'intento di fornire un approccio per la localizzazione di largo utilizzo.

4. Risultati e discussioni

4.1 Analisi della velocità

L'impianto sperimentale in questione lungo il tracciato del tubo presenta flange e curve che influenzano la propagazione delle onde meccaniche in termini di modo e

velocità, complicando la stima della posizione della sorgente. Di conseguenza, al fine di valutare la velocità di propagazione delle onde, si sono adottate le velocità in modo empirico. Dopo aver raccolto tutti i dati con i 3 sensori EA dispiegati sulla tratta del tubo, è stata stimata la velocità media mediana $\bar{V}$ di propagazione delle onde. Poiché il problema della localizzazione può essere risolto matematicamente solo nella zona tra due sensori, la stima è stata eseguita per la coppia di sensori S1-S2 (target P1-P4) e S1-S3 (target P1-P5). Inoltre, la stima della velocità è stata eseguita separatamente per i segnali filtrati con entropia.
Di conseguenza, secondo la formula 5, per ciascuna misura è stata stimata la velocità V_i di propagazione delle onde:

$$V_i = \frac{L - 2 \cdot X_{P_j}}{\Delta t} \tag{5}$$

dove L è distanza tra due sensori, X_{P_j} è la distanza tra la sorgente e il sensore più vicino e Δt è la differenza di ToAs (TDoAs) tra due sensori in base all'algoritmo AIC.
Pertanto, le velocità calcolate in ambiente MATLAB (funzione mediana ([V])) sono riportate nella Tabella 1.

$\bar{V}_{s1-s2}$ per i sensori S1-S2, m/s		$\bar{V}_{s1-s3}$ per i sensori S1-S3, m/s	
Senza filtraggio	Filtraggio entropico	Senza filtraggio	Filtraggio entropico
6743	2636	3975	3539

Tabella 1. Stima delle velocità mediane

Come si può vedere dalla Tabella 1, le velocità prima e dopo il filtraggio differiscono in modo significativo per i sensori S1-S2. La velocità varia perché in assenza di filtraggio, l'AIC rileva la modalità delle onde più veloce, che viene filtrata durante il calcolo dell'entropia. Tuttavia, ciò rende il risultato più stabile e ripetibile rispetto al segnale non filtrato, poiché questa forma d'onda più veloce non appare in tutti gli esperimenti.

4.2 Analisi dell'efficienza del metodo di filtraggio entropico

La Figura 3 mostra un esempio del funzionamento dell'algoritmo di cancellazione del rumore proposto applicato ad un segnale con un rapporto segnale/rumore di 1 dB. In particolare, il grafico superiore della Fig. 3 illustra il segnale (curva blu) registrato dal sistema EA registrato a valle della rottura di una mina con metodo Hsu-Nielsen. Come si può osservare, l'insorgenza del segnale visibile è stata rilevata in modo automatico dal metodo AIC (stella rossa). Il grafico centrale illustra lo stesso segnale dopo l'aggiunta di rumore sintetico, mantenendo la differenza tra il rumore e il segnale utile a solo 1 dB. Si può notare che l'inizio del segnale rilevato con il metodo AIC è spostato nel tempo. La figura inferiore illustra il grafico dell'entropia locale dello stesso segnale. Come si può notare nell'ultimo grafico, l'entropia locale enfatizza la comparsa del segnale e consente quindi all'AIC di rilevare correttamente l'inizio del segnale.

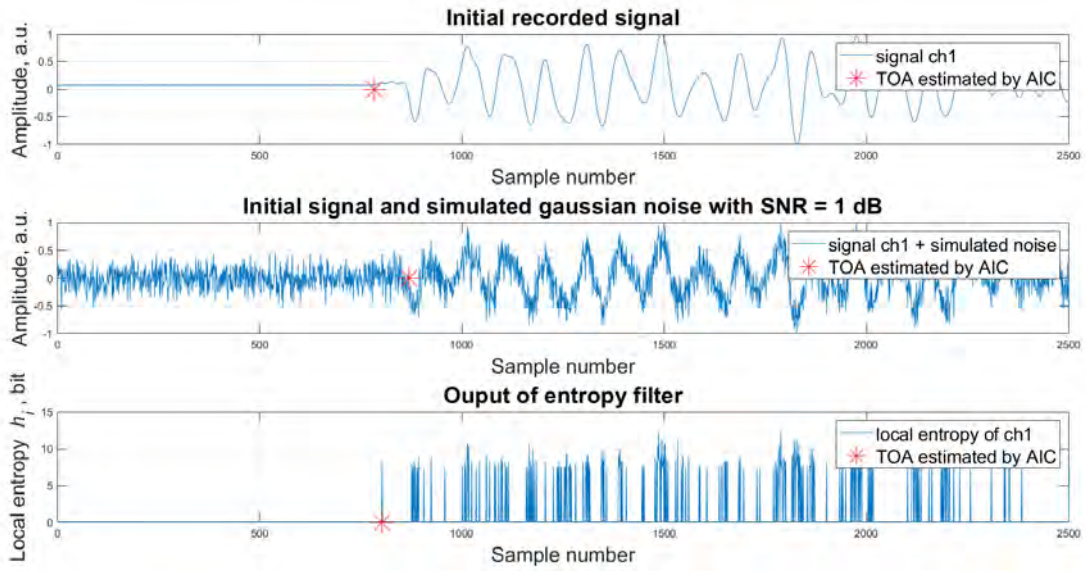


Figura 3. Soppressione del rumore mediante l'utilizzo del filtro entropico.

Partendo dall'analisi dei risultati ottenuti dalla coppia di sensori S1-S2, Figura 4 mostra l'errore medio nel calcolo della localizzazione delle sorgenti prima e dopo il filtraggio proposto, mentre Figura 5 mostra la varianza dell'errore. Entrambi i grafici si concentrano sui target P1-P4 situati tra i sensori S1 e S2.

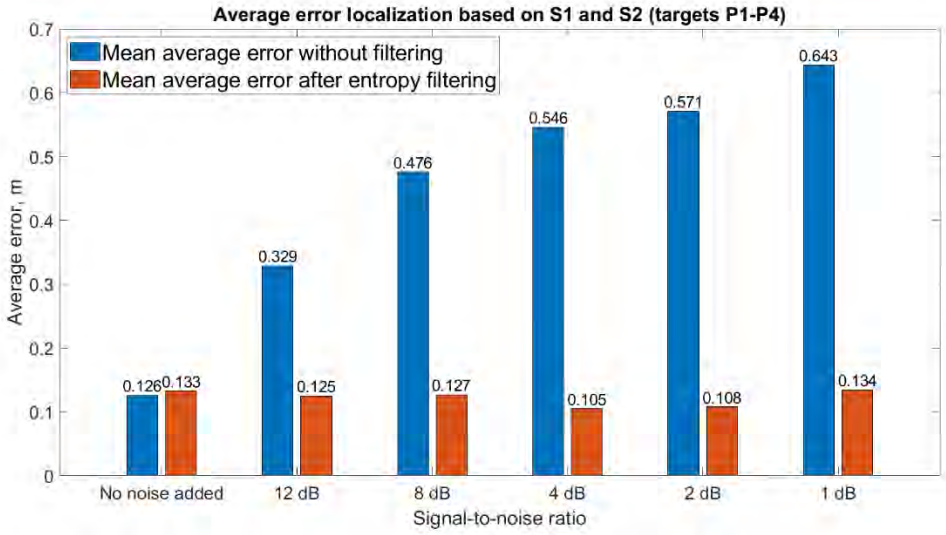


Figura 4. Grafico a barre dell'errore di localizzazione stimato per i sensori S1-S2.

Dalla Figura 4 si può osservare come l'errore di calcolo della localizzazione in assenza di filtraggio aumenti di un fattore 6 quando il rapporto segnale/rumore si riduce a 1 dB, mentre dopo il filtraggio l'errore rimane costante. La Figura 5 illustra anche la stabilizzazione della varianza dell'errore dopo l'applicazione della riduzione del rumore.

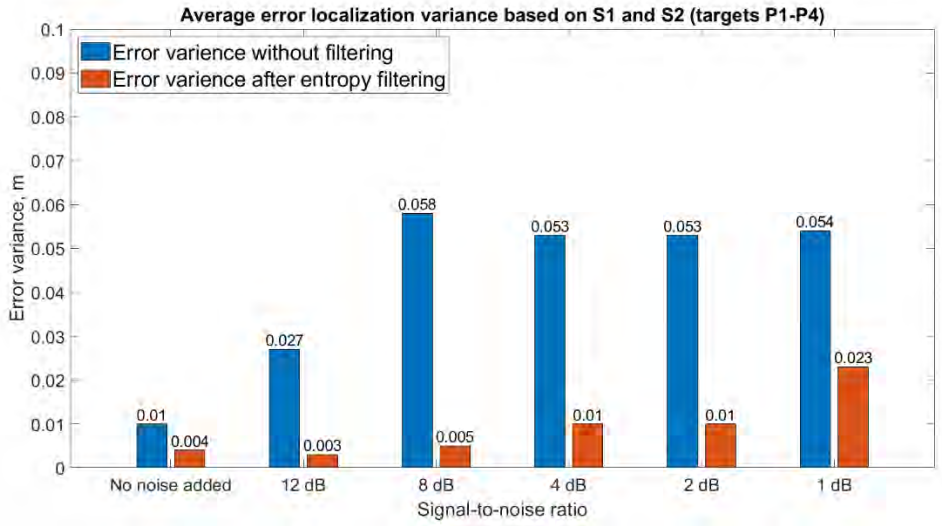


Figura 5. Grafico a barre della varianza stimata dell'errore di localizzazione per i sensori S1-S2.

Spostando l'attenzione sui risultati della coppia di sensori S1-S3, la Figura 6 mostra l'errore medio di calcolo della posizione prima e dopo il filtraggio proposto mentre la Figura 7 mostra la varianza dell'errore. Entrambi i grafici si concentrano sui target P1-P5 situati tra i sensori S1 e S3.

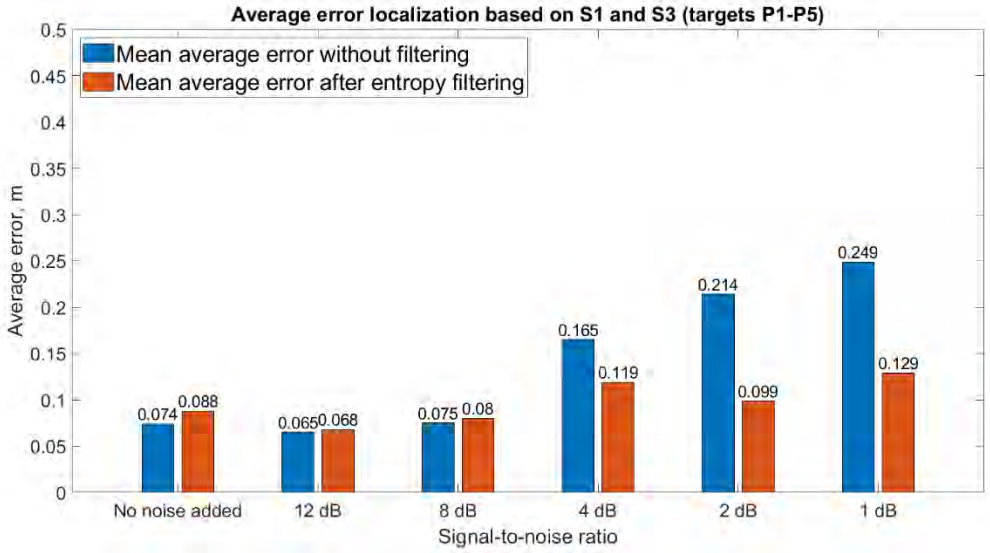


Figura 6. Grafico a barre dell'errore di localizzazione stimato per i sensori S1-S3.

Dalla Figura 6 si può osservare che la coppia di sensori S1-S3 è caratterizzata da un errore medio di localizzazione inferiore, dovuto alla maggiore ripetibilità del ToA rilevato, e a seguito di una stima più accurata della velocità di propagazione. Questo effetto potrebbe essere dovuto alla presenza di una flangia tra i sensori S1-S3, che funge da filtro meccanico per la propagazione di parte delle onde meccaniche. Tuttavia, anche in questo caso, possiamo osservare un aumento della precisione fino a 2 volte con un rapporto segnale/rumore estremamente basso. La Figura 7 illustra

inoltre come la varianza dell'errore aumenta con il rumore per un'analisi non filtrata e come viene ridotta a pochi millimetri dopo il filtraggio.

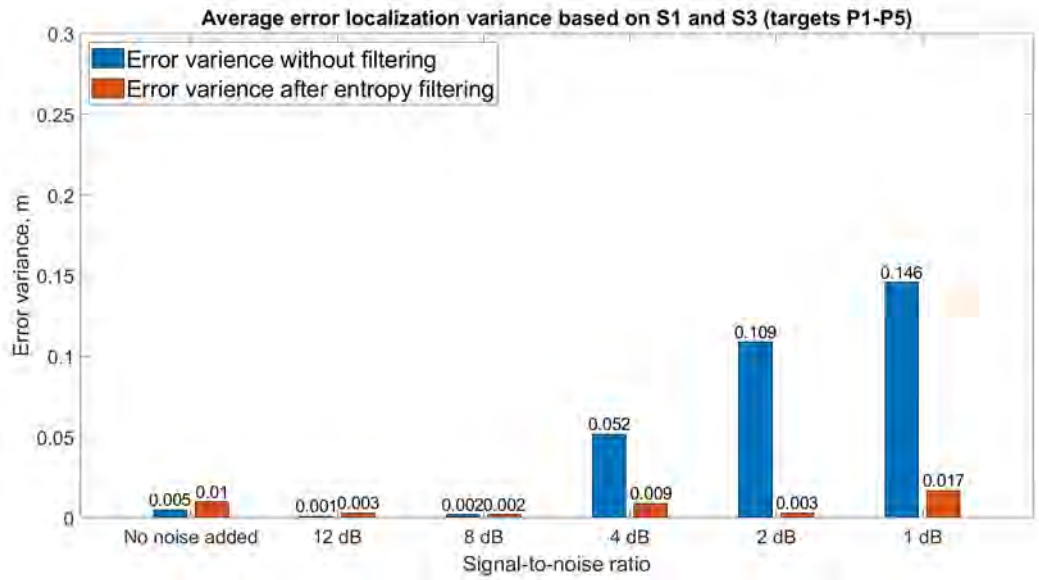


Figura 7. Grafico a barre della varianza stimata dell'errore di localizzazione per i sensori S1-S3.

5. Conclusioni

La necessità di trovare semplici soluzioni matematiche volte a filtrare i segnali con bassi valori SNR è un compito urgente nelle applicazioni di monitoraggio di EA. Questo lavoro presenta un algoritmo di soppressione del rumore per il monitoraggio degli eventi di emissione acustica (EA) in condizioni simili a quelle industriali. A seconda della configurazione dei sensori, i risultati ottenuti dall'applicazione dell'algoritmo proposto hanno dimostrato un aumento significativo della precisione nella determinazione della posizione della sorgente EA con incrementi che variano da 2 a 6 volte, soprattutto in condizioni critiche di rumore. Inoltre, l'utilizzo del filtro proposto ha contribuito ad aumentare la stabilità statistica della localizzazione Hsu-Nielsen attraverso ripetizioni multiple, come confermato dalla bassa varianza dell'errore medio. L'efficacia notevole dell'algoritmo, combinata con i costi computazionali ridotti, rende questa metodologia promettente per l'applicazione nei sistemi di monitoraggio dell'EA.

Bibliografia

[1] Vallen, H. EA testing fundamentals, equipment, applications; Vol. 7, 2002; pp. 1–30.

[2] Wirtz, S.F.; Söffker, D. Improved signal processing of acoustic emission for structural health monitoring using a data-driven approach. In proceedings of the 9th European Workshop on Structural Health Monitoring, Manchester, UK, 2018.

[3] Jiang, Y.; Xu, F. Research on source location from acoustic emission tomography. In Proceedings of the 30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission, Granada, Spain, 2012.]

[4] Barat, V.; Borodin, Y.; Kuzmin, A. Intelligent EA signal filtering methods. Journal of Acoustic Emission 2010, 28, 109–119.

[5] Zhang, H.; Thurber, C.; Rowe, C. Automatic P-wave arrival detection and picking with multiscale wavelet analysis for single- component recordings. In Proceedings of the Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, Vol. 93, pp. 1904–1912

[6] Karamzadeh, N.; Javan Doloei, G.; Reza, A.M. Automatic Earthquake Signal Onset Picking Based on the Continuous Wavelet Transform. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2013, 51, 2666–2674.

[7] Gaci, S. The Use of Wavelet-Based Denoising Techniques to Enhance the First-Arrival Picking on Seismic Traces. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2014, 52, 4558–456.

[8] Bogomolov, D.; Burda, E.; Testoni, N.; Kudryavtseva, I.; De Marchi, L.; Naumenko, A.; Marzani, A. Entropy-Based Technique for Denoising of Acoustic Emission Signals. In Proceedings of the European Workshop on Structural Health Monitoring, Eds. Springer International Publishing, 2023, pp. 630–639.

[9] Zhou, Z.; Cheng, R.; Rui, Y.; Zhou, J.; Wang, H. An Improved Automatic Picking Method for Arrival Time of Acoustic Emission Signals. IEEE Access 2019, 7, 75568–75576.

[10] Shannon, C. A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal 1948, 27, 379–423.

[11] Martin, N.; England, J.; Baker, G. Mathematical Theory of Entropy. Encyclopedia of Mathematics and Its Applications; Vol. 12, 2013.

[12] Novitskiy, P.; Zograf, I. Estimation of errors in measurement results; Energoatomizdat, 1991; p. 304.

[13] Crutchfield, J.; Packard, N. Symbolic dynamics of noisy chaos. Physica D: Nonlinear Phenomena 1983, 7, Issues 1–3, 201–223.

[14] Testoni, N.; De Marchi, L.; Marzani, A. A stamp size, 40mA, 5 grams sensor node for impact detection and location. In Proceedings of the European Workshop on SHM, 2016.

[15] St-Onge, A. Akaike information criterion applied to detecting first arrival times on microseismic data. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011; Society of Exploration Geophysicists, 2011; pp. 1658–1662.

[16] Carotenuto, R.; Merenda, M.; Iero, D.; Della Corte, F.G. An indoor ultrasonic system for autonomous 3-D positioning. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 2018, 68, 2507–2518.

[17] Hongyu, L.; Lei, G.; Lu, Z.; Yajun, S. The Acoustic Emission Source Localization in the Pipeline Network with consideration of Radial Position of Defect. In Proceedings of the Journal of Physics, International Conference on Advanced Technologies and Applications of Modern Industry (ATAMI 2021) 19-21 November 2021, Wuhan, China, 2021, pp. 1904–1912.

La nuova UNI EN ISO 9712:2022 – Prove non distruttive – Cosa è cambiato?

M. Reggiani

CICPND-AIPnD

Abstract

La nuova UNI EN ISO 9712:2022 – Prove non distruttive – cambia in modo sostanziale le abitudini ormai consolidate nell'utilizzo della versione del 2012, puntando sulla valorizzazione della verifica dei requisiti e sul mantenimento delle competenze.
Questa memoria ha lo scopo di presentare per macro-argomenti le principali modifiche introdotte, senza però entrarne nel dettaglio specifico, per il quale consigliamo un'attenta analisi della norma.
Si tratta di una versione presentata da ISO nel dicembre 2021 e recepita da UNI ed EN nel primo semestre del 2022, avviando di conseguenza il periodo di transizione con l'ormai consolidata edizione del 2012.
Già dal 2021, Il Gruppo di Lavoro 9712 CICPND ha effettuato diversi incontri al fine di analizzare ogni singolo dettaglio della norma, condividendoli al mercato in concomitanza del Webinar gratuito organizzato con il patrocinio di UNI e ACCREDIA lo scorso 18 Luglio ed al change board pianificato per integrare tali modifiche all'attuale Regolamento CICPND 60/A in fase di revisione.
Tra le principali modifiche introdotte nella nuova UNI EN ISO 9712:2022 – Prove non distruttive:

- Referee: Chi è e qual è il suo compito?
- Requisiti di addestramento
- Requisiti di esperienza
- Requisiti di idoneità visiva
- Contenuti degli esami (quiz-campioni per la prova pratica)
- Modalità di rinnovo
- Nuove tecniche e metodi di indagine

Keyword: Certificazione del personale, competenze, prove non distruttive.

1. La figura del Referee

L'introduzione di questa nuova figura viene applicata dalla norma nei casi in cui si rendesse necessario confermare l'esperienza industriale negli NDT per quei casi ove il datore di lavoro sia anche il candidato richiedente la certificazione (es. lavoratore autonomo).

Tale figura deve avere le seguenti caratteristiche:

a) certificato al livello 2 o 3 in qualsiasi metodo NDT;

oppure

b) personale non certificato che, approvato dall'ente di certificazione, possiede le conoscenze, le competenze, la formazione e l'esperienza necessarie per attestare l'esperienza industriale del candidato.
La figura del Referee si rende pertanto necessaria per evitare l'utilizzo di autodichiarazioni, difficilmente verificabili dall'Organismo di certificazione.

2. Formazione

Nel paragrafo della norma dove si parla di Formazione, sono stati introdotti i principali cambiamenti rispetto all'edizione precedente, richiamando diverse modalità di gestione dell'apprendimento e diverse durate.
Nello specifico è stata introdotta la possibilità di effettuare lezioni a distanza per la sola parte teorica, la quale secondo i requisiti della ISO/TS 25108 dovrebbe avere un peso del 50% della durata complessiva ±10%.
Tra le modalità introdotte c'è anche l'autoapprendimento, senza alcuna definizione dei requisiti e/o delle modalità necessarie per documentare l'avvenuta esecuzione. Per questo punto, all'interno di un tavolo tecnico composto dagli ODC e ACCREDIA, è stata aperta una richiesta formale all'organo Europeo per avere maggiori delucidazioni sulle modalità di applicazione, in quanto si ritiene che tale requisito sia molto importante ed allo stesso tempo molto critico se applicato in modo non corretto.
Anche le durate complessive minime per i vari metodi di prova sono state revisionate, riportando come unità di misura i giorni (nell'edizione precedente erano in ore) ove si definisce che un giorno è composto di almeno 7h, inoltre anche la suddivisione tra le ore per il primo livello e per il livello 2 sono state modificate, potenziando le attività di formazione per i livelli 1.
Sono state aumentate le ore minime per il passaggio diretto al livello 2 per il metodo ad ultrasuoni e diminuite quelle relative al metodo radiografico.

3. Esperienza Industriale NDT

Anche i requisiti di esperienza industriale sono stati revisionati, richiedendo che almeno una parte di tale esperienza sia stata svolta prima dell'esame di certificazione e che la durata complessiva sia conforme ai nuovi requisiti espressi in giorni e non più in mesi come nell'edizione della norma precedente.
Per i livelli 3 è stata effettuata una suddivisione più specifica che comprende varie situazioni, in funzione al livello di istruzione e/o alla presenza di una qualifica di livello 2.

4. Requisiti di Visione

Nella verifica dei requisiti di visione sono rimaste invariate le modalità richieste per confermare la corretta visione del candidato (contrasto di colore e percezione visiva) ma sono stati introdotti alcuni importanti concetti relativi alla ripetizione del test, che per il contrasto di colore deve essere effettuato ogni 5 anni (e non più ogni anno). Inoltre sono stati introdotti maggiori dettagli sulle figure professionali che possono effettuare i test di acuità visiva, di cui, un medico, un infermiere, un oftalmologo, un optometrista autorizzato o altro professionista qualificato che è approvato da un personale di livello 3 che agisce per conto del datore di lavoro.
Per quest'ultimo dettaglio si riporta anche al requisito della ISO 18490 dove anche un livello 3 potrebbe svolgere tale verifica se opportunamente qualificato.

5. Modalità di svolgimento degli esami

La struttura e la forma degli esami teorici e pratici non hanno avuto variazioni significative, se non per alcuni macro-dettagli che si riportano di seguito: tutti i quiz di carattere generale sono stati innalzati a 40 domande, mentre per i quiz specifici è stata mantenuta la regola precedente definita, relativa la numero del/i settore/i richiesti (20 quiz per un settore/prodotto, 30 quiz per due o più settori/prodotti).
Sono state introdotte alcune variazioni sulla modalità di valutazione degli esami pratici, riportando alcune tabelle che permettono di utilizzare una suddivisione ponderata del punteggio sulla base di alcuni contenuti specifici, ed infine è stato modificato il numero di campioni necessari per la prova pratica. Quest'ultimo si può considerare una variazione significativa soprattutto per i candidati che richiedono una certificazione che comprende svariati settori di prodotto/settori industriali.
Su questo aspetto ci sono ancora alcuni dubbi interpretativi, per i quali il gruppo di lavoro degli ODC capitanato da ACCREDIA ha analizzato ed espresso una richiesta formale all'organo Europeo per valutare in modo corretto ed univoco quanto riportato dalla norma.

6. Rinnovo

Questo paragrafo richiama una delle modifiche di principale importanza ed impatto sul mercato.
Nello specifico, per tutti i livelli il candidato, oltre a dover presentare i requisiti presenti anche nella precedente edizione della norma, di cui continuità lavorativa e idoneità visiva, deve:

a) completare con successo un esame pratico, strutturato con almeno il 50 % dei campioni d'esame effettuati e prescritti per la prima certificazione;

oppure

b) soddisfare con successo i requisiti del sistema di credito a punteggio.
In sostanza il candidato dovrà effettuare una parte di esame pratico, limitata ad uno o più campioni, oppure raccogliere e consegnare all'ODC una serie di evidenze che possono confermare il punteggio minimo richiesto (100 punti suddivisi nei 5 anni) sulla base di alcune tabelle che presentano punteggi per ogni tipologia di attività svolta. La modalità a punteggio è simile per concetto e per forma all'attuale modalità di ricertificazione utilizzata dai livelli 3.

7. Requisiti di formazione per le tecniche

Sono stati inseriti i requisiti per alcune tecniche particolari che precedentemente erano regolamentate in modo autonomo dai vari ODC, e nel dettaglio sono stati i seguenti aspetti:

- Migliore suddivisione dei requisiti per la tecnica LT
- Inserimento del Flusso disperso MT-FL come tecnica del controllo MT
- Inserimento delle tecniche TOFD e Phased Array come requisiti aggiuntivi al metodo UT
- Suddivisione delle tecniche radiografiche FILM e no FILM, per la tecnica classica (RT-F, RT-D) e per la lettura delle immagini (RT-ID, RT-IDE)
- Inserimento della Tomografia RT-CT

8. Conclusioni

La nuova norma richiama anche tante altre piccole modifiche che per praticità non sono state riportate nel presente articolo; pertanto, si consiglia di effettuare una valutazione ed un'analisi completa al fine di rilevare ogni variazione che possa modificare l'attuale processo di certificazione del personale che svolge controlli non distruttivi.
Alcune variazioni andranno ad impattare sulle procedure utilizzate dai vari Organismi di Certificazione e dai relativi Centri di esame; pertanto, sarà utile valutare l'approccio che utilizzerà ogni Ente, nella speranza che non vi siano variazioni significative sulle modalità applicate.

9. Considerazioni finali

Dal 1° Ottobre 2023, tali variazioni si renderanno cogenti su tutto il territorio Nazionale Italiano e porteranno nuovi approcci tendenti alla specificità delle certificazioni ed alla verticalizzazione delle competenze.

La gestione documentale e le evidenze da produrre in fase di esame e rinnovo con sistema a credito, potrebbero generare un surplus di materiale da visionare ed analizzare, per ogni singola pratica.

Si resterà in attesa di eventuali linee guida della EFNDT (Federazione Europea dei Controlli Non Distruttivi) al fine di uniformare maggiormente questo importantissimo settore nei paesi Europei e nel resto del Mondo.

10. Bibliografia

[1] Reggiani Michael. La nuova UNI EN ISO 9712:2022 – Prove non distruttive – Cosa è cambiato? AIPnD Luglio 2023
[2] UNI EN ISO 9712:2022 Qualificazione e Certificazione del personale che svolge controlli non distruttivi

Detezione di difetti artificiali in tubazioni in polietilene ad alta densità

G. Augugliaro[1], F. Brini[1], L. Bruzzo[2], C. Mennuti[1], P. Quaresima[1]

[1] Inail - Dit, Centro Ricerche Monte Porzio Catone (RM)
[2] Inail - Uot di Livorno

Abstract

Il polietilene (PE) è un materiale formato dalla polimerizzazione dell'etilene (C_2H_4), un derivato del petrolio, e costituisce il 40% del volume totale della produzione mondiale delle materie plastiche. Il PoliEtilene ad Alta Densità (PEAD o HDPE dall'inglese *high-density polyethylene*), è anche detto polietilene lineare perché la sua struttura chimica, a differenza di quella del polietilene, non ha ramificazioni.
Per le loro caratteristiche di buona resistenza a trazione, pieghevolezza e possibilità di utilizzo nel campo di temperatura -40 ÷ +60°C, le tubazioni in polietilene ad alta densità hanno molteplici utilizzi, quali: acquedotti, gas, fognature, irrigazione, antincendio, termoidraulica, trasporto fluidi derivati da prodotti chimici e petrolchimici, fessurati per drenaggi e captazione biogas. Le tubazioni DCR+RC (*Dioxide Chlorine Resistant* + *Resistant to Crack*) hanno una resistenza maggiorata a disinfettanti a base di cloro e a carichi puntuali e incisioni, e rappresentano il più elevato standard qualitativo delle tubazioni classe PE100 oggi disponibili sul mercato. Il massimo valore standardizzato di pressione nominale è PN 25.
Il controllo non distruttivo in tubazioni di HDPE, con particolare riferimento alla saldatura, è un argomento rilevante per il settore ed è regolato dalle normative della serie UNI EN 13100 "Prove non distruttive di giunti saldati di prodotti semifiniti di materiale termoplastico", con normative specifiche su esame visivo (VT), controllo radiografico a raggi X (RT) e controllo per mezzo di ultrasuoni (UT).
Un problema significativo nel controllo mediante UT di prodotti in HDPE è il rilevamento di echi di difetti in presenza di rumore strutturale dovuto alla diffusione delle onde ultrasoniche e all'elevata attenuazione del segnale ultrasonico.
In questo lavoro sono stati effettuati dei controlli mediante ultrasuoni, utilizzando sonde piane, con la finalità di valutare la probabilità di detezione di difetti artificialmente prodotti in tubazioni DCR+RC con l'approccio "*hit/miss data*" attraverso la costruzione di curve di Probabilità di Detezione (POD, *Probability Of Detection*).

Keywords: HDPE, PEAD, controllo per ultrasuoni, controllo radiografico a raggi X, PoD.

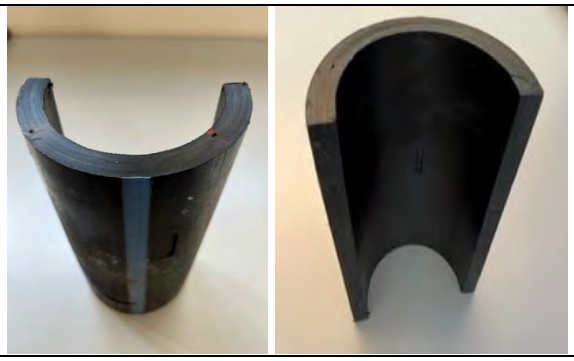
1. Introduzione

Il controllo difettoscopico UT delle tubazioni in HDPE è a oggi utilizzato in particolar modo per la verifica delle saldature, ma può anche essere utilizzato per l'analisi dello stato di

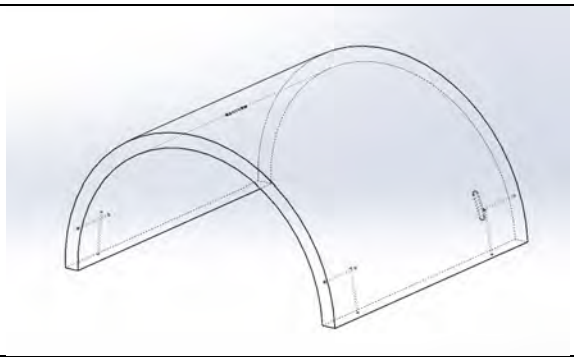
conservazione e di efficienza della tubazione; in entrambi i casi si devono tenere in conto le complicazioni dovute all'attenuazione del materiale da attraversare e, nel caso della saldatura, alla geometria della saldatura stessa. In questo lavoro è presentato uno studio preliminare per proporre una metodologia di realizzazione di curve POD tramite simulazione di difetti artificiali. In particolare, è stato realizzato un blocco campione con difetti standard (fori laterali paralleli all'asse, in inglese SDH, *side drilled holes*) sul quale sono state effettuate delle prove UT sperimentali con sonda piana; i risultati delle prove sono stati utilizzati per validare le simulazioni effettuate con il software $CIVA_{NDE}$, tramite il quale è stato realizzato un modello in 3D del blocco campione con difetti tipo SDH per le calibrazioni del caso. Mediante il confronto con il blocco campione reale, sono stati poi modellati difetti lineari che simulassero indicazioni planari; infine sono state realizzate delle simulazioni di controllo UT variando il tipo e il numero dei difetti.
I risultati delle simulazioni, considerando un errore di misura per tener conto del fattore umano presente quando il controllo viene effettuato da differenti operatori, sono stati quindi utilizzati come input per creare le curve POD.

2. Realizzazione del blocco campione

La norma UNI 13100–3:2005 tratta il controllo con ultrasuoni di giunti saldati di prodotti semifiniti di materiale termoplastico e nel paragrafo 10.2 "*reference level*" indica, per le onde con incidenza normale, di utilizzare un foro laterale di 3 mm come riferimento per costruire la curva DAC. La ASME V articolo V "metodo ultrasonoro per i materiali", nella appendice X "Esame ultrasonoro del HDPE", nel paragrafo X.434 "Blocchi campione", specifica nel sottoparagrafo X.434.1.1 che il riflettore di riferimento deve essere un foro laterale di diametro 2 mm e nel sottoparagrafo X.434.3 "blocco campione per tubi" che devono essere realizzati almeno 3 fori, uno a ¼ dello spessore (¼ T) il secondo a metà dello spessore (½ T) e l'ultimo a ¾ T (anche se poi specifica che per spessori minori di 19 mm è sufficiente un solo SDH a metà spessore).
Per questo lavoro è stato utilizzato un tubo in HDPE DCR+RC di diametro esterno 280 mm e spessore 14 mm. Il blocco campione è stato realizzato con una porzione di tubo di lunghezza 250 mm, tagliandolo a metà in direzione longitudinale per poter creare i SDH.
Visto lo spessore del tubo utilizzato e la sensibilità attesa, è stato scelto di utilizzare i tre fori da 2 mm prescritti dalla ASME che permettono poi di "calibrare" la simulazione. Inoltre sono stati realizzati anche tutti gli altri riflettori di riferimento prescritti dalla normativa anche per sonde angolate, phased array e TOFD. In figura 1 si può vedere una foto del blocco campione (figura 1a) e uno schema dei riflettori (figura 1b, come riferimento è stata utilizzata la figura T-434.3-2 della ASME V "blocco di calibrazione alternativo per tubi"); infine in figura 1c) e 1d) si possono vedere degli ingrandimenti dei SDH a ½ T e a ¾ T.



a) Foto del blocco campione



b) Schema del blocco campione realizzato



c) Foto del foro laterale a metà spessore



d) Foto del foro laterale a ¾ dello spessore

Figura 1. Blocco campione

3. Set-up sperimentale

Il trasduttore utilizzato per questo lavoro ha frequenza 2,25 MHz e diametro ½ pollice; nella norma UNI EN 13100-3 viene indicato che per le ispezioni delle termoplastiche deve essere utilizzato un trasduttore con frequenza tra 1 MHz e 5 MHz. Nei controlli UT di tubazioni HDPE può essere utilizzata anche una frequenza di 0,5 MHz per superare l'alta attenuazione del materiale, soprattutto in grossi spessori, anche se questa frequenza non è tra quelle prescritte dalla normativa.

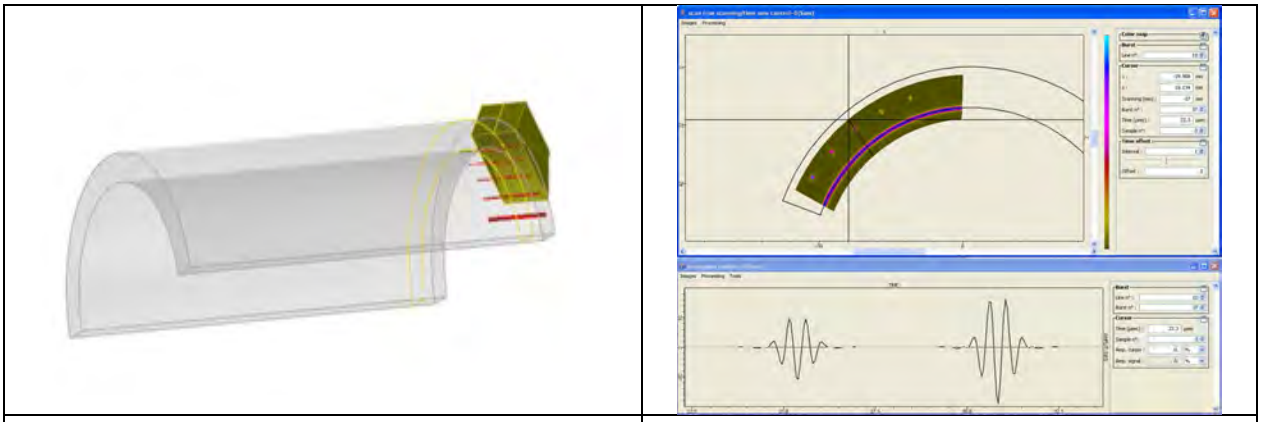
Per quanto riguarda l'utilizzo di uno zoccolo sotto la sonda, la ASME V articolo V al capitolo T-434 "blocchi di calibrazione", paragrafo T-434.2, prescrive l'utilizzo di uno zoccolo sagomato per diametri minori di 350 mm, mentre la UNI 13100-3 al paragrafo 7.3.5 considera una formula per comprendere quando utilizzare uno zoccolo sagomato o piano: il diametro del tubo deve essere maggiore o uguale a 15 volte la dimensione dello zoccolo in direzione dell'esame. Seguendo la UNI 13100-3 nel nostro caso, ovvero tubo di diametro 280 mm e sonda di 12.7 mm, la condizione è verificata, in quanto per soddisfare la formula non c'è bisogno di uno zoccolo sagomato se la dimensione dello zoccolo non supera i 18,66 mm.

Per scegliere il materiale con cui realizzare lo zoccolo, la UNI EN 13100-3 nel paragrafo 7.3.4 "*wedge material*" afferma che lo zoccolo può essere realizzato in PTFE, ovvero teflon.

Come strumento a ultrasuoni è stato utilizzato il Sonic 1200-S della Olympus.

4. Simulazione

Per la modellazione e la simulazione del controllo ultrasonoro del giunto saldato ci si è avvalsi del codice CIVA$_{NDE}$, prodotto multi–piattaforma validato per innumerevoli applicazioni pratiche della software house CEDRAT Group di Meylan (Francia).
L'operatore può impostare i vari parametri sia dell'oggetto da analizzare (geometria, materiali, ecc.) sia dell'esame (caratteristiche trasduttori, tecniche di esame, ecc.). La definizione della geometria del pezzo oggetto di studio può essere realizzata con l'apposito tool grafico oppure si può importare (seppur con delle limitazioni) una geometria creata in ambiente CAD. Una volta definita la geometria del pezzo da esaminare, si definiscono le caratteristiche del materiale, la posizione dei difetti che si vogliono indagare e la loro tipologia, scegliendo tra difetti planari o volumetrici. La fase successiva è quella della impostazione dei parametri relativi al trasduttore (tipo, dimensioni, frequenza, ecc.) ed infine il setup del controllo da simulare (caratteristiche accoppiante, velocità onde acustiche nel materiale, step di scansione, incrementi, ecc.).
Nel caso specifico il *set* di discontinuità iniziale è costituito da SDH di dimensioni variabili da 0,1 a 2 mm di lunghezza con un incremento di 0,1 mm e in aggiunta il diametro di 0,45 per infittire la curva in un punto importante per la curva POD per il foro a ¼ T; I fori sono stati simulati ad una profondità di ¼ T, ½ T e ¾ T, per un totale di 63 discontinuità.
Per ogni indicazione è stato simulato il segnale UT come evidenziato in figura 2.

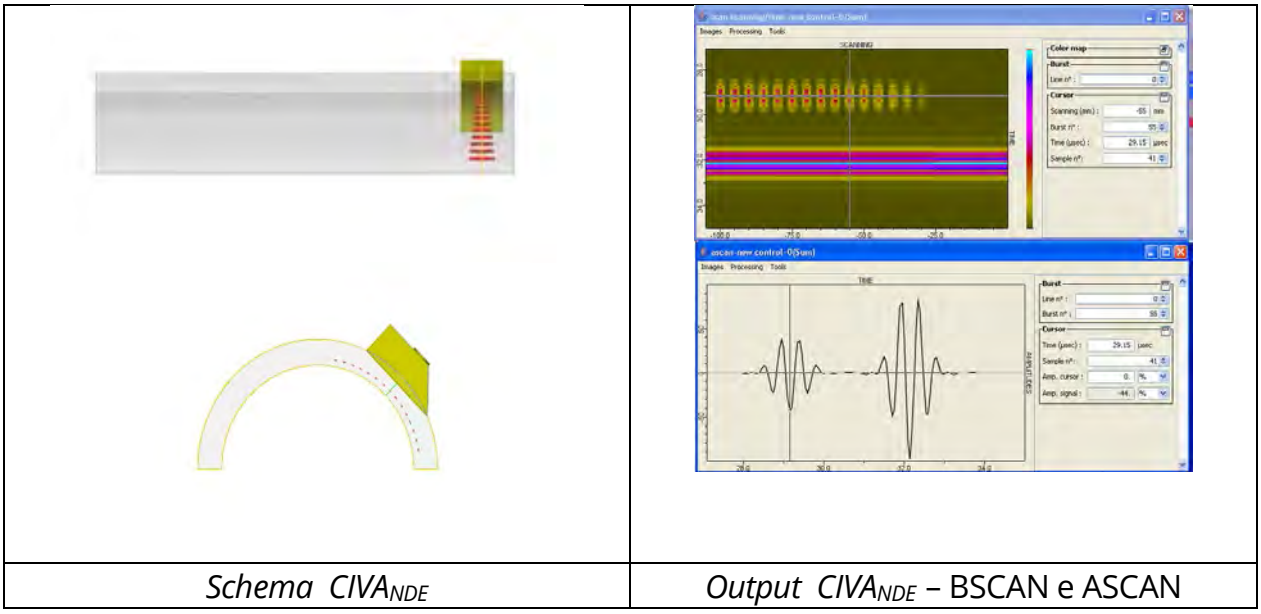


Schema CIVA$_{NDE}$	*Output CIVA$_{NDE}$* – BSCAN e ASCAN

Figura 2. Esempio di simulazione di 5 SDH a metà dello spessore

Dopo aver validato il modello di simulazione tramite i SDH, sono stati simulati, sempre nel software CIVA$_{NDE}$ difetti rettangolari monodimensionali, in direzione circonferenziale, come rappresentati in figura 3.
Dette indicazioni planari hanno una larghezza di 2 mm e una lunghezza variabile da 1 a 15 mm, con incremento di 1 mm, e sono state simulate a metà dello spessore e a ¾ dello spessore, per comprendere come varia la probabilità di detezione con la profondità dell'indicazione stessa.

Per ogni indicazione è stato simulato il segnale UT come evidenziato in figura 3.



Schema CIVA$_{NDE}$	*Output CIVA$_{NDE}$* – BSCAN e ASCAN

Figura 3. Esempio di simulazione di indicazioni planari a ¾ dello spessore

5. Curve POD

Poiché la costruzione delle curve POD è basata su analisi di tipo probabilistico, è di fondamentale importanza avere a disposizione i risultati di un numero elevato di controlli per la stessa discontinuità. Dal punto di vista pratico è molto dispendioso (in termini di risorse umane e di tempo) realizzare un data-set che abbia una sufficiente "massa critica". Il codice CIVA$_{NDE}$, simulando l'effettuazione del controllo UT, permette di superare agevolmente questi ostacoli di carattere pratico. Questo approccio tramite simulazioni numeriche basate su modelli fisici per la determinazione delle curve POD si chiama approccio MAPOD, "Model-Assisted Probability of Detection" [1-2].

I primi studi sulla *Non Destructive Evaluation* (NDE) e sull'utilizzo delle curve POD per la valutazione dell'affidabilità di un sistema *Non Destructive Testing* (NDT) sono stati condotti nell'industria aerospaziale negli anni Sessanta. Molto spesso le curve POD vengono utilizzate per studiare l'affidabilità di un sistema che, nelle sue caratteristiche intrinseche (metodo, tecnica, scopo, efficacia, operatore, ecc.) presenta sensibili scostamenti dalle condizioni imposte nella costruzione delle curve stesse. Per esempio, una curva POD costruita per un determinato spessore di un dato materiale viene utilizzata anche per tutta una gamma di spessori; oppure, una curva POD costruita per una tubazione viene utilizzata anche per le lamiere; o ancora, una curva POD costruita per un particolare tipo di giunto saldato viene utilizzata per giunti saldati realizzati con tecniche o modalità differenti. Ciò premesso le curve POD sono senz'altro un valido strumento di supporto per lo studio dell'affidabilità di un sistema NDT, è importante tuttavia conoscerne i vantaggi e limitazioni che le caratterizzano.

Esistono sostanzialmente due metodologie di analisi probabilistica per generare le curve POD. Un primo metodo chiamato *hit/miss data* è basato esclusivamente sul rilevamento

o meno della discontinuità, mentre il secondo metodo denominato *â data* si basa sull'analisi della risposta del segnale della discontinuità [3]. L'analisi *hit/miss data* è appropriata quando si vuole studiare l'affidabilità di quelle tecniche NDT che non forniscono molte informazioni sulle discontinuità rilevate, come per esempio i liquidi penetranti (PT) o le particelle magnetiche (MT). L'analisi di tipo *â data*, al contrario è indicata per lo studio di quelle tecniche NDT che, in termini di segnale, alla rilevazione delle discontinuità associano molte informazioni (per esempio tensione di picco, ampiezza, ecc.) come avviene in tecniche quali le correnti indotte (ET), gli ultrasuoni (UT), l'emissione acustica (AT).
In questo lavoro, pur trattando di controlli basati sul metodo UT, si è fatto riferimento all'analisi *hit/miss data*, e quindi a prescindere dall'informazione contenuta nel segnale, sostanzialmente per due ragioni fondamentali:

- l'obiettivo del lavoro è verificare se l'indicazione viene rilevata prescindendo dal segnale; vengono quindi registrate informazioni binarie dal sistema di ispezione, indicando se si è individuato o meno un difetto presente nel campione: i dati che si trovano al di sopra di una determinata soglia sono dichiarati *hit* (1), mentre gli altri sono dichiarati *miss* (0). In questo caso un'analisi fondata sulla risposta del segnale accrescerebbe le difficoltà interpretative senza apportare miglioramenti significativi in termini di valutazione dell'affidabilità;
- una delle maggiori complicazioni nel caso di *hit/miss data* è dovuta al fatto che i dati contengono meno informazioni (relative alla correlazione tra dimensione della cricca e la potenza del segnale o "facilità di rilevamento") e quindi sono necessari più campioni per una determinazione affidabile del POD (almeno 60 per ogni indicazione) [4]. Avendo a disposizione un approccio MAPOD questo è un problema facilmente risolvibile.

Nell'approccio *hit/miss data*, vale la correlazione [5, 6]:

$$PoD(a) = \left\{1 + e^{-\left[\frac{\pi}{\sqrt{3}}\left(\frac{\ln(a)-\mu}{\sigma}\right)\right]}\right\}^{-1} \quad (3)$$

Dove:

$$\mu = \ln\,(a)_{50}$$

Con $(a)_{50}$ che rappresenta la discontinuità rilevata il 50% delle volte.
Il parametro σ è un parametro di scala che determina la planarità della funzione POD [7]. Per la stima dei parametri μ e σ si ricorre alla massimizzazione della *likelihood function*. Assumendo di aver eseguito *k* ispezioni per ogni *n* difetti, la *likelihood function* si esprime come:

$$L(\mu,\sigma) = \prod_{i=1}^{n}\prod_{J=1}^{k}[p_i^{Z_{ij}} * (1-p_i)^{1-Z_{ij}}] \qquad (5)$$

Laddove Z_{ij} è il risultato della j^{esima} ispezione, 1 oppure 0, dell' i^{esimo} difetto rilevato o non rilevato rispettivamente, la Probabilità di Detezione della discontinuità (a) è:

$$p_i = \frac{h(a)}{1 + h(a)} \qquad (6)$$

dove

$$h(a) = \exp\left[\frac{\pi}{\sqrt{3}}\left(\frac{\ln(a_i) - \mu}{\sigma}\right)\right] \qquad (7)$$

L'equazione (5) si può esprimere anche come:

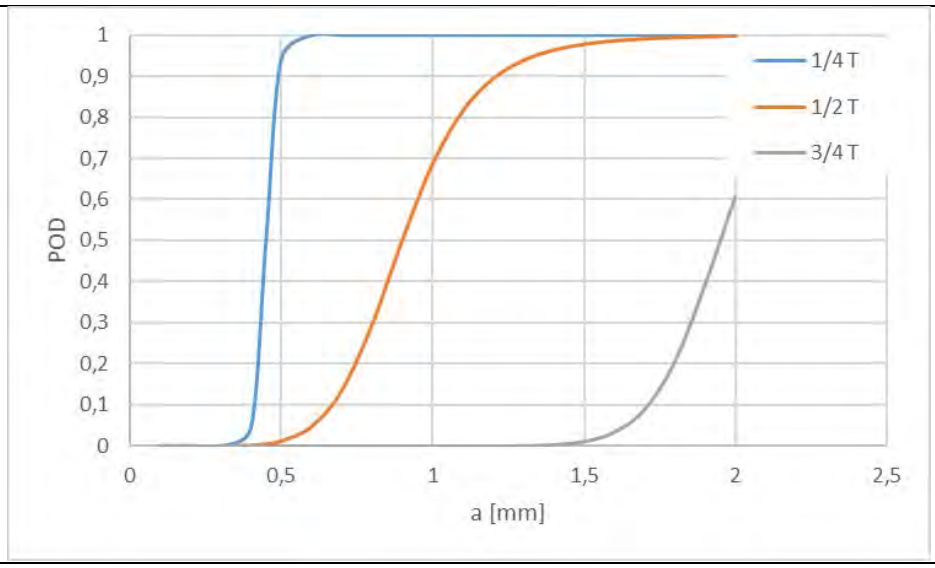
$$\ln L(\mu, \sigma) = \sum_i \sum_j [Z_{ij} \ln(p_i) + (1 - Z_{ij}) \ln(1 - p_i)] \qquad (8)$$

dalla quale, derivando rispetto a μ e σ e massimizzando, si ottengono i valori degli stessi parametri.

I dati di partenza per la costruzione della curva POD sono i valori simulati con le modalità specificate nel paragrafo precedente.

Per ogni misura simulata è stato valutato l'errore dovuto all'operatore generando un numero casuale tra zero e il 20% della misura e sottraendo l'errore così generato alla misura stessa. Per ogni valore di "a" (diametro del foro) sono state simulate 60 misure differenti. Sono state quindi simulate 1260 scansioni per ogni curva POD, in totale 3780 scansioni.

Per quanto riguarda i *SDH*, simulati a ¼ T, ½ T e ¾ T, utilizzando le formule sopra richiamate, si è pervenuti alla costruzione delle curve POD riportate in figura 4. Si ricorda che affinché le curve POD siano attendibili si richiede che il limite inferiore dell'intervallo di confidenza sia pari al 95%; mentre la discontinuità significativa è quella che corrisponde al 90% di Probabilità di Detezione $(a)_{90}$.



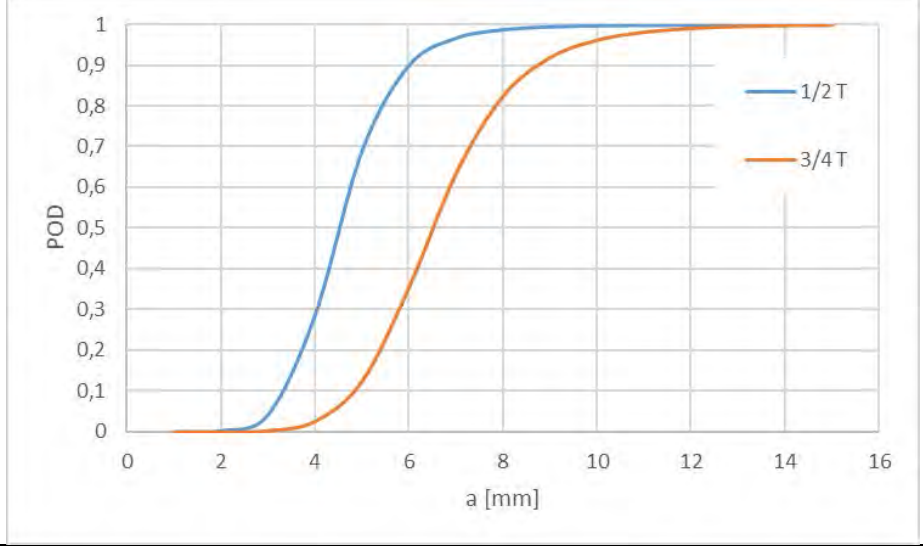
POD al variare del diametro del foro laterale per profondità del foro ¼, ½, ¾ T

Figura 4. Curve POD per SDH

Dall'analisi della curva POD ottenuta per i *SDH* si può dedurre che:

- per i fori a ¼ T, quindi vicini alla superficie di scansione, si raggiunge il 90% della POD quando il foro è di 0,5 mm di diametro e la curva scende molto ripida verso valori più bassi;
- per i fori a ½ T si raggiunge il 90% della POD quando il foro è di 1,2 mm;
- per i fori a ¾ T non si raggiunge il 90% della POD per diametri fino a 2 mm di diametro (si raggiungerebbe a 2,2 mm);

Per quanto riguarda le indicazioni planari, simulate a metà dello spessore e a ¾ dello spessore, per verificare la variazione della probabilità di detezione con la profondità dell'indicazione stessa, si è considerato un errore di misura come con i *SDH*; per ogni valore di "a" (lunghezza indicazione) e sono state simulate 60 misure differenti per ogni valore della indicazione. Sono state quindi simulate 900 scansioni per ogni curva POD, per un totale di 1800 scansioni.



POD al variare della lunghezza della indicazione planare a profondità ½ T, ¾ T

Figura 5. Curve POD per indicazioni planari

Dall'analisi delle curve POD ottenute per questa tipologia di indicazione, riportate in figura 5, si può dedurre che:

- per le indicazioni planari posizionate a metà dello spessore si raggiunge il 90% della POD quando la dimensione caratteristica "a", ovvero la sua lunghezza, è di 6 mm di diametro;
- per i fori a ¾ T si raggiunge il 90% della POD quando "a" è di 9 mm, e la curva è meno ripida della precedente.

6. Conclusioni

In questo lavoro è stato presentato uno studio preliminare di una metodologia di realizzazione di curve POD tramite simulazione di difetti artificiali in tubazioni di polietilene ad alta densità. In particolare, è stato realizzato un blocco campione con difetti

standard sul quale sono state effettuate delle prove sperimentali con sonda piana i cui risultati sono stati quindi utilizzati per validare le simulazioni effettuate con il software $CIVA_{NDE}$. Le simulazioni effettuate hanno permesso la costruzione delle curve POD e quindi la valutazione della Probabilità di Detezione delle discontinuità al variare della loro morfologia e dimensione. La MAPOD ottenuta permette di calcolare la probabilità di detezione delle indicazioni presenti nella tubazione oggetto di studio (SDH e indicazioni planari). Il codice di modellazione utilizzato si è mostrato attendibile nella descrizione qualitativa delle discontinuità indagate con il metodo ultrasonoro. Pertanto, le curve POD ottenute assolvono egregiamente il compito di stabilire, in via preliminare, l'efficacia di una tecnica di controllo basata sul metodo UT di tubazioni in PEAD. Ciò evidentemente a tutto vantaggio dei tempi di messa a punto di procedure e specifiche tecniche di controllo.

7. Bibliografia

[1] https://static.cnde.iastate.edu/mapod/Reference%20Documents.htm

[2] J.S. Knopp, J.C. Aldrin, E. Lindgren, C. Annis, "Investigation of a model-assisted approach to probability of detection evaluation", AFRL-ML-WP-TP-2006-494 Report, AIR FORCE RESEARCH LABORATORY, 2006.

[3] "Comparison of â Versus a and Hit/Miss POD-Estimation Methods: A European Viewpoint", Iikka Virkkunen, Tuomas Koskinen, Suvi Papula, Teemu Sarikka, Hannu Hänninen, Journal of Nondestructive Evaluation (2019) 38:89

[4] MIL-HDBK-1823A – Nondestructive evaluation system reliability assessment, US Dept of Defense, 2009.

[5] C. De Petris, C. Mennuti, "L'affidabilità dei sistemi NDE: problematiche ed esempi applicativi". Giornata di studio Fitness for service (FFS), "Valutazione d'idoneità al servizio di componenti eserciti" Centro CESI - Milano 2022

[6] C. Mennuti, G. Augugliaro, C. De Petris, F. Brini, P. Quaresima, "Approccio alla modellazione del controllo dei giunti saldati a sovrapposizione con tecnica basata sul metodo ad ultrasuoni" . XIII Conferenza Nazionale AIPND – Roma 2009.

[7] Evaluation of POD Curves Based on Simulation Results, F. Jenson, E. Iakovleva and C. Reboud, CEA, France, 2009, https://www.ndt.net/article/jrc-nde2009/papers/27.pdf

Tecnologia a raggi cosmici per la ricerca perdite di idrocarburi da condotte interrate

L. Ricciardi[1], R. Marchetto[2], E. Schiesaro[2]

[1]Inail – Dit
[2]Neptune S.r.l.

Abstract

I raggi cosmici provenienti dallo spazio vengono già efficacemente utilizzati per la ricerca di perdite idriche dalle condotte interrate, in quanto risultano in grado di interagire con l'idrogeno contenuto nella molecola d'acqua. Attualmente è in atto la sperimentazione della stessa tecnologia per la ricerca di perdite di tutti i tipi di idrocarburi. La tecnologia sfrutta la caratteristica dei raggi cosmici di venire assorbiti dall'idrogeno presente nella molecola di idrocarburo rilasciata nel terreno. Il rilevamento tempestivo e puntuale della perdita consente di procedere rapidamente con gli interventi di riparazione o di sostituzione della parte di condotta danneggiata, evitando così possibili incidenti e inquinamenti ambientali, oltreché danni economici. Il metodo di ricerca utilizza un apposito dispositivo rivelatore delle perdite che conta i raggi cosmici in una certa banda energetica. Tale dispositivo può essere installato su qualsiasi mezzo mobile, terrestre o aereo (drone), consentendo così di ispezionare, in tempi brevi, ampie porzioni di territorio e quindi migliaia di tubazioni e condotte. La metodologia proposta è in grado, una volta elaborati i dati acquisiti, di localizzare la perdita e restituire una mappa digitale georeferenziata che indichi i cosiddetti *Point Of Interest* (POI), cioè i punti in cui si sospetta una perdita. Il presente lavoro intende illustrare le potenzialità della tecnologia proposta, mettendole a confronto con quelle delle tecniche più comunemente utilizzate per l'identificazione delle perdite di idrocarburi.

Keywords: tubazioni, ricerca perdite, raggi cosmici.

1. Introduzione

Le reti di condutture per il trasporto degli idrocarburi, costituite prevalentemente da oleodotti e gasdotti, collocati sopra o sottoterra, sono costruite da tratti di diversa lunghezza, lineari o ramificati, che attraversano i suoli terrestri per centinaia di migliaia di chilometri. Le perdite di idrocarburi liquidi o gassosi (fughe di gas) da una rete di distribuzione, soprattutto lungo percorsi non presidiati o non ispezionabili, possono provocare incendi, esplosioni e inquinamento ambientale, con danni a persone e cose. Tali perdite, oltre a determinare seri problemi per la sicurezza della collettività e per la stabilità di strutture e impianti adiacenti alle tubazioni

danneggiate, comportano un danno economico, sia per la perdita di prodotto, sia per le conseguenti operazioni di bonifica e di ripristino della conduttura stessa. Una perdita di idrocarburi può avere diverse cause, come ad esempio un foro in una tubazione, un danno alla camera di decompressione, la rottura di un giunto di connessione tra tubazioni, un evento doloso. Le verifiche dell'integrità della rete di distribuzione risultano fondamentali, non solo per la prevenzione, ma anche per la mitigazione del rischio e la limitazione della magnitudo del danno. Per garantire la sicurezza di tali strutture è importante mantenerle in ottimo stato di conservazione tramite manutenzioni periodiche. Tuttavia, anche con manutenzioni correttamente programmate ed eseguite, l'eventualità di una perdita non è comunque scongiurata, in quanto possono verificarsi eventi accidentali, sottrazioni dolose, cedimenti del terreno. Anche piccole fuoriuscite di fluido possono condurre a scenari incidentali importanti, quali incendi ed esplosioni, o a dispersioni nel terreno che, nel tempo, diventano notevoli; tale dispersione può comportare anche la diffusione dell'idrocarburo fino alla falda. Pertanto, il tempestino rilevamento delle perdite può consentire immediate azioni di risoluzione del guasto, limitando i quantitativi rilasciati e le possibili conseguenze. Le piccole perdite di idrocarburo risultano, però, più difficili da rilevare, poiché non comportano smottamento del terreno, cadute di pressione della rete o formazione di pozze di liquido. La memoria proposta illustra una metodica, derivante da una tecnologia ad uso spaziale e già utilizzata per la ricerca di perdite idriche, che permette di rilevare tempestivamente perdite di idrocarburi da condotte.

2. Principio di funzionamento della tecnologia

La tecnologia proposta consente di individuare le perdite dalle reti per trasporto e/o la distribuzione e/o il convogliamento di idrocarburi liquidi e gassosi sulla base di misure di radiazione cosmica secondaria.
I raggi cosmici sono particelle e nuclei atomici ad alta energia che, muovendosi quasi alla velocità della luce, colpiscono la Terra da ogni direzione. Contrariamente ai fotoni, che si propagano in linea retta, i raggi cosmici, essendo particelle cariche, vengono deviati nella loro traiettoria dai campi magnetici presenti nello spazio e finiscono per descrivere un moto caotico. La maggior parte dei raggi cosmici che arriva sulla Terra è un prodotto secondario di sciami formati nell'atmosfera dai raggi cosmici primari, con interazioni che tipicamente producono una cascata di particelle secondarie, a partire da una singola particella energetica. I raggi cosmici che entrano nell'atmosfera collidono con i nuclei di particelle di cui essa è composta. In queste collisioni vengono prodotte un gran numero di particelle che, a loro volta, interagiscono e decadono creandone altre. Molte di esse arrivano fino alla superficie terrestre; queste costituiscono i raggi cosmici secondari. Si tratta di particelle non dannose, poiché filtrate dalla nostra atmosfera, che ne riduce l'energia. Le particelle che compongono i raggi cosmici secondari sono di vario tipo e, tra queste, ci sono i neutroni, I neutroni hanno il compito di tenere unite le particelle cariche

elettricamente (protoni) all'interno dell'atomo. I neutroni, che arrivano a grande velocità sulla Terra, penetrano in profondità nel terreno, passando tra un atomo e l'altro. Alcuni di questi neutroni centrano il nucleo di un atomo; se questo nucleo è quello di un atomo pesante, rimbalzano indietro, se, viceversa, colpiscono un nucleo di idrogeno, molto leggero, vengono assorbiti. I neutroni, dunque, neutralizzano gli ioni idrogeno delle sostanze le cui molecole contengono idrogeno, come l'acqua o gli idrocarburi. Questi ultimi, infatti, sono composti organici formati prevalentemente da atomi di idrogeno e atomi di carbonio. Le interazioni tra l'idrogeno e le particelle della radiazione cosmica secondaria avvengono sia quando l'idrogeno si trova sulla superficie del terreno, sia quando è al di sotto di essa. Il numero di neutroni complessivamente misurati in una certa porzione di terreno risulta, quindi, inversamente proporzionale alla quantità di idrogeno neutralizzata dalle molecole di acqua o di idrocarburo in esso contenute; dove è presente una perdita, il numero di neutroni si riduce progressivamente finché non è assorbito da tutto l'idrogeno presente nella massa fluida.
La Figura 1 illustra schematicamente un esempio di principio di funzionamento utilizzabile per stimare il contenuto di idrogeno nel terreno sulla base di misure di radiazione cosmica secondaria.

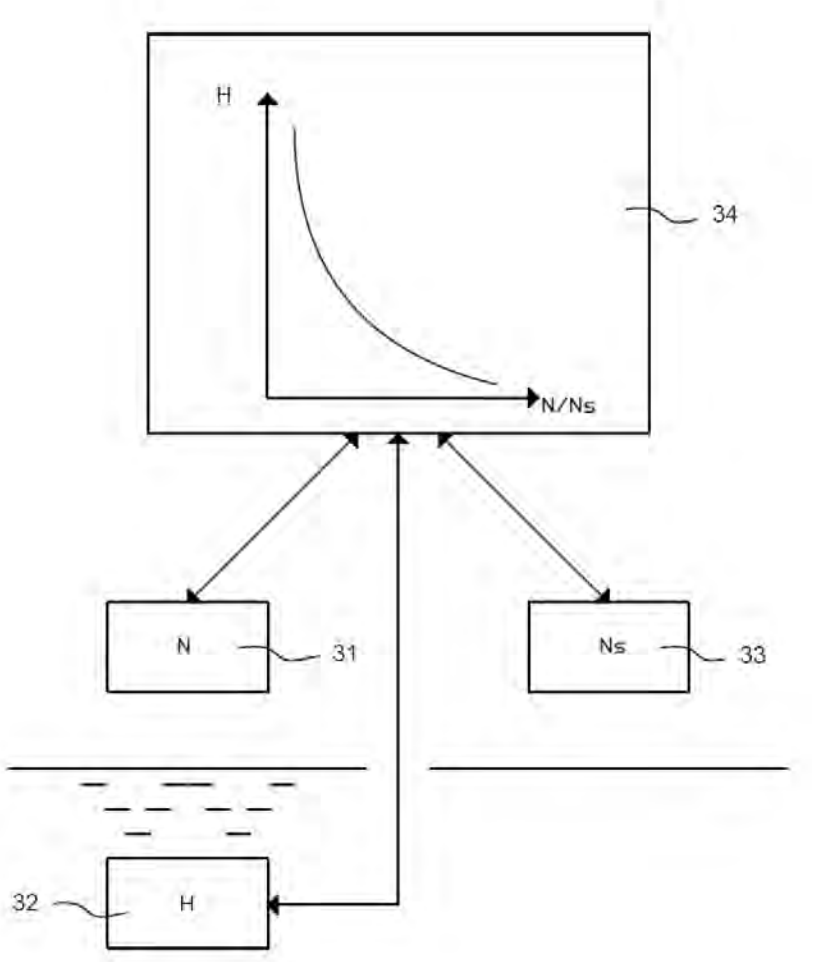


Figura 1. Schema del principio di funzionamento della tecnologia

In Figura 1 il valore N (indicato con 31) di particelle atomiche e/o subatomiche di raggi cosmici secondari, che è misurato in prossimità di un terreno contenente una certa quantità di Idrogeno H (indicata con 32), normalizzato rispetto ad un valore Ns (indicato con 33) di particelle atomiche e/o subatomiche di raggi cosmici secondari, misurato in presenza di terreno senza idrogeno, è legato al valore di saturazione dell'idrogeno nel terreno U 32 secondo una certa relazione che può tener conto di uno o più parametri, e che in Figura 1 è rappresentata, a mero titolo di esempio, come una relazione di proporzionalità inversa (indicata nel complesso con 34).
La Neptune, attraverso la sua start up Cosmic, ha progettato e realizzato un sensore in grado di monitorare e misurare la presenza di neutroni nel terreno. Il sistema proposto è analogo a quello che gli astronauti utilizzano per cercare eventuali risorse d'acqua su Marte. La tecnologia è già stata efficacemente utilizzata, oltre che per la ricerca di perdite idriche, anche per diverse altre applicazioni, quali le previsioni meteorologiche, la programmazione di pratiche di irrigazione, il monitoraggio dei cambiamenti climatici, il monitoraggio della neve al suolo e il monitoraggio di biomasse.
La tecnologia ha il vantaggio di utilizzare un mezzo di ricerca sempre disponibile, i neutroni derivati dai raggi cosmici secondari. Infatti, ogni minuto, la Terra è investita da migliaia di queste particelle che provengono dallo spazio. La modalità di rilevazione delle perdite è relativamente semplice: uno strumento, in grado di misurare costantemente il numero di neutroni presenti nel terreno, è montato su un mezzo mobile ed è condotto sopra le aree dove corrono le reti. Le possibili modalità di rilevazione sono due: *real time* o in differita. La ricerca può avvenire mediante identificazione *real time*, ossia con il solo passaggio dello strumento sopra la conduttura e la verifica immediata della perdita, non appena il sensore segnala una diminuzione del numero di neutroni, oppure tramite ricerca differita. In questo caso il sensore, montato su un mezzo mobile, compie diversi passaggi sull'area da ispezionare.

3. Metodologia di ricerca delle perdite

Il metodo di ricerca perdite, già implementato, comprende diverse attività:

- acquisizione dei dati di georeferenziazione di una rete di idrocarburi o di un gasdotto;
- misurazione georeferenziata della radiazione cosmica secondaria nella porzione di superficie terrestre in cui si estende detta rete;
- elaborazione dei dati acquisiti, finalizzata a stimare il contenuto di idrogeno del terreno nella regione in cui si estende la rete, sulla base delle misure georeferenziate di radiazione cosmica secondaria eseguite in detta regione, utilizzando fattori di correzione delle misure che tengano conto sia degli effetti di sensibilità radiale e di anisotropia delle misure, sia dei valori di umidità dell'aria, pressione atmosferica e intensità della radiazione cosmica secondaria incidente, rilevati contestualmente all'esecuzione di dette misure;

- creazione di una mappa digitale georeferenziata che rappresenti la rete ispezionata, nonché il contenuto di idrogeno presente nel terreno in cui si estende la rete stessa;
- localizzazione sulla mappa della posizione dei *Point Of Interest* (POI), cioè i punti in cui si sospetta una perdita.

La metodologia è applicabile a qualsiasi tipo di idrocarburo e può essere adottata in sinergia con altre metodologie/tecniche di ricerca di perdite di idrocarburi.
Le misure possono essere eseguite per mezzo di dispositivi di misura fissi o installati su veicoli che si muovono nella regione in cui si estende la rete. Le misure di radiazione cosmica secondaria vanno eseguite preferibilmente in prossimità del suolo, e dunque a piedi o su veicoli terrestri, in quanto, all'aumentare dell'altezza dal suolo, diminuisce la precisione di rilevamento del contenuto di idrogeno nel o sul terreno, ovvero l'affidabilità e la precisione di accertamento delle perdite di idrocarburi. In futuro si prevede di eseguire le misure anche per mezzo di droni in volo a bassa quota.

4. Strumentazione e attrezzature utilizzate

Il dispositivo è costituito da un rilevatore che misura i raggi cosmici in una determinata banda energetica. L'energia di una radiazione ionizzante si converte in luce, detta luce di scintillazione, con lunghezze d'onda comprese tra il visibile e l'UV. Nel caso specifico dei neutroni, l'energia cinetica dei prodotti d'interazione è convertita in un segnale luminoso. Il sensore, di cui il dispositivo è equipaggiato, tipicamente un tubo fotomoltiplicatore, raccoglie la luce di scintillazione e la converte in un segnale elettrico.
I dati raccolti sono registrati, processati e poi associati a un posizionatore satellitare.
Il *software* per l'elaborazione dei dati raccolti consiste in un algoritmo in grado di calibrarsi autonomamente, in modo da correggere i dati acquisiti, in funzione delle caratteristiche della zona da investigare, in funzione di valori come la pressione atmosferica e l'umidità dell'aria.
L'apparecchiatura base (Figura 2) per la raccolta dei dati è costituita da una sorta di "trolley" che contiene i seguenti dispositivi:

- Batteria;
- Sensore;
- Data logger con sistema operativo UNIX;
- Modulo trasmissione dati tipo LTE TX+RX;
- Ricevitore GNSS;
- Regolatore di tensione e batteria tampone;
- Equipaggiamento elettrico.

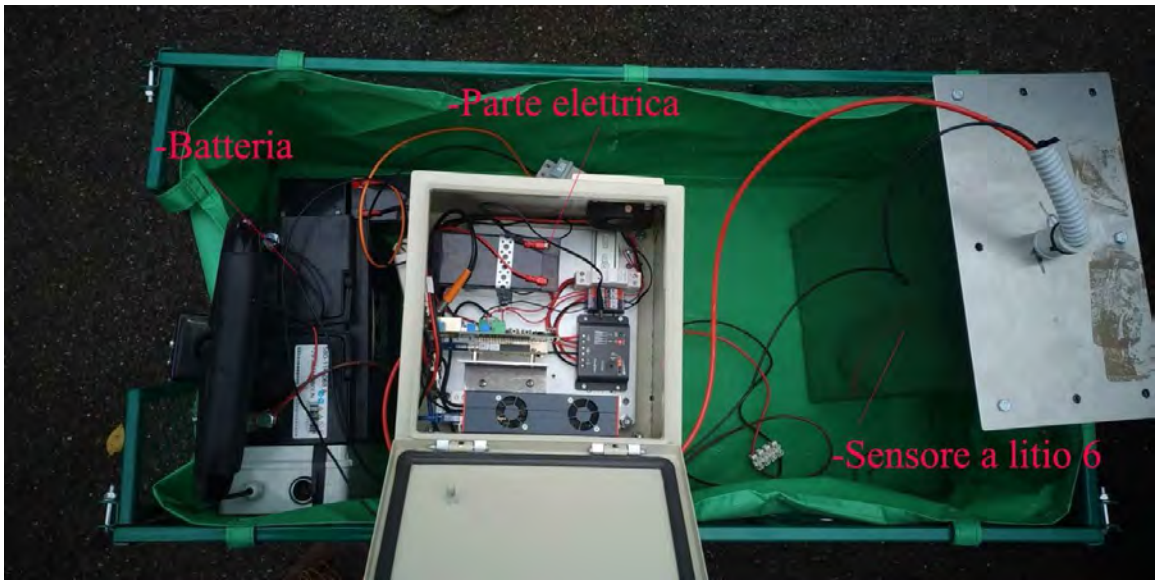


Figura 2. Strumentazione per raggi cosmici in versione “trolley”

A questi si possono aggiungere diverse tipologie di sensori, come:

- sensore di pressione atmosferica;
- sensore di umidità dell’aria.

Lo strumento registra tutti i dati ricevuti tramite un *data logger*. Questi vengono costantemente inviati al server, per l'elaborazione in tempo reale, e associati a una posizione GNSS (Figura 2). I dati sono ritrasmessi a un’applicazione per smartphone o tablet per consentirne la lettura da parte dell’operatore. La strumentazione, come già detto, può essere condotta a mano da un operatore, mediante carrello, o trasportata su di un mezzo che può viaggiare fino alla velocità di circa 30-40 Km/h.

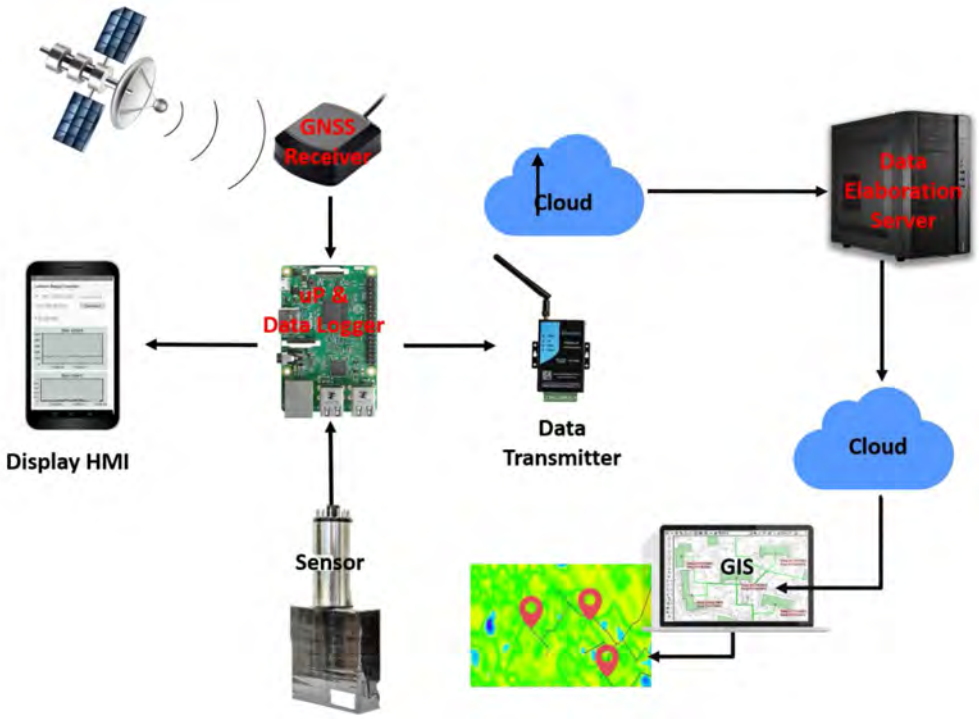


Figura 2. Schema di funzionamento della trasmissione dei dati

5. Tecnologie a confronto

Nel caso delle perdite idriche, la tecnologia Cosmic ha ricevuto fin da subito l'attenzione degli operatori del settore delle municipalizzate, con cui sono stati siglati diversi contratti, dapprima per sperimentare la tecnologia, oggi per l'erogazione del servizio. Sono state ispezionate decine di migliaia di km di condotte, con un rateo di rilevamento equiparabile a quello ottenuto utilizzando la tecnica tradizionale (geofono), con la differenza che il nuovo sistema risulta molto più veloce. Il metodo consueto, infatti, permette di controllare circa 5 chilometri al giorno, mentre il mezzo equipaggiato con rilevatore Cosmic può monitorarne oltre 300.
Per quanto riguarda le perdite di idrocarburi, sia da gasdotti che da oleodotti, esistono diversi metodi di ricerca delle perdite o di controllo di integrità della rete.
Di seguito si riporta una lista delle metodologie di monitoraggio delle perdite da pipeline maggiormente diffuse:

- camminatori;
- misure di pressione o portata;
- fili conduttori;
- controllo aereo (aerei, elicotteri, droni);
- controllo satellitare.

Il monitoraggio classico, utilizzato prima dell'avvento di tecnologie più avanzate e ancora oggi in uso, è quello con ispezione visiva effettuata da camminatori. Essi hanno il compito di perlustrare aree scelte in base ad un'analisi statistica che determina i tratti di tubazione con maggiore probabilità di perdita, con la conseguenza che alcune zone non sono mai ispezionate. Inoltre, l'ispezione visiva risulta molto lunga e non ha la possibilità di evidenziare perdite dalle condotte interrate. A tal fine si possono utilizzare appositi strumenti. Nel caso specifico della ricerca di gas metano si usa un "naso elettronico" che rileva l'odorizzante in esso contenuto. Tale tecnica risulta, però, non utilizzabile nel caso di manto stradale con superfici ermetiche, come quelle di basolato cementato. Nel caso di olio combustibile o di carburanti, per i quali non è prevista l'aggiunta dell'agente odorizzante usato per il metano, si misura il "rumore" generato dalla perdita attraverso strumenti chiamati geofoni. Questa tipologia di ricerca è puntuale e si può usare anche a valle di una prelocalizzazione della perdita evidenziata da altri sistemi di ricerca in continuo, come quelli che utilizzano sensori di pressione o misuratori di portata posti sulla condotta. Alcuni test di ricerca perdite, i cosiddetti "step test", sono eseguiti soprattutto di notte e prevedono la ricerca selettiva di perdite su singoli settori della rete, intercettati da valvole.
Il sistema di monitoraggio della pressione prevede una serie di misuratori posti a una distanza prestabilita lungo la linea, in modo da registrare l'andamento della pressione lungo la stessa e segnalare tempestivamente eventuali diminuzioni dal valore previsto che potrebbero indicare una perdita di fluido.

Il monitoraggio tramite rilevatori di portata ad ultrasuoni o basati sull'effetto di *Coriolis* si effettua misurando, in diversi punti della rete, la portata di fluido che attraversa la tubazione, rilevando eventuali differenziali di portata e, dunque, la presenza di una perdita sulla linea.
Un ulteriore metodo di monitoraggio delle perdite prevede l'utilizzo di fili conduttori rivestiti (generalmente in materiale plastico), posti lungo la conduttura. Il funzionamento si basa sul fatto che gli idrocarburi sono ottimi solventi organici e, in caso di sversamenti, sciolgono il rivestimento del cavo, mandando in corto circuito i conduttori interni. La mancanza di segnale elettrico in un dato tratto di filo consente di localizzare la perdita. Il principale vantaggio del monitoraggio tramite fili conduttori risiede nella possibilità di individuare tempestivamente sia perdite che principi di incendi. Tuttavia, per avere una copertura totale della tubazione, è necessario avvolgere i cavi lungo l'intera circonferenza del tubo e questo comporta un costo molto elevato, in considerazione dell'elevata lunghezza delle tubazioni.
In conclusione, i vantaggi del monitoraggio di parametri misurati direttamente su tutta la linea (pressione, portata, segnale elettrico) sono dati principalmente dalla continuità nel tempo della misura e dall'indicazione esatta del tratto di tubazione (seppure non breve) oggetto della perdita. Il limite di tutte le suddette modalità di rilevamento perdite consiste nel difficile accertamento di rilasci di piccola entità, essendo la misura della portata del rilascio funzione della sensibilità dello strumento di misura utilizzato o della possibilità del fluido di raggiungere le zone dove è presente il cavo elettrico. Altro limite delle tecnologie a monitoraggio costante risiede sicuramente nel costo, per l'elevato numero di strumenti di misura necessari, il loro cablaggio e la loro manutenzione nel tempo, oppure per la necessità di avvolgere il cavo conduttore attorno a tutta la linea della rete. Inoltre, considerato il fatto che tali sistemi non sono in grado di localizzare esattamente la perdita, essa andrà comunque ricercata ulteriormente con altri sistemi, come i traccianti.
Il monitoraggio delle condutture, soprattutto se interrate e notevolmente estese, può essere effettuato tramite sorvolo con elicottero, aereo o altro mezzo in grado di volare sopra l'area, ad esempio un drone. La capacità di trasporto dei primi due mezzi consente di equipaggiarli con una serie di strumenti e sensori diversi, anche di notevole peso e combinati fra loro, come misuratori di radiazione o georadar per analizzare la struttura sottostante alla superficie del terreno. La possibilità di un sorvolo ad alta quota permette di analizzare una più vasta area ma, allo stesso tempo, comporta una riduzione della risoluzione. Questo determina una mancata individuazione di perdite di piccola entità che, invece, un sorvolo ravvicinato consentirebbe di rilevare. I limiti principali risiedono nell'impatto economico del monitoraggio: l'utilizzo di un mezzo di tali dimensioni, oltre al capitale di investimento, richiede una notevole quantità di carburante anche per il sorvolo di zone non eccessivamente estese.
Vi sono, poi, i sistemi che acquisiscono i dati a quote maggiori rispetto a quelle del sorvolo aereo: i satelliti. I satelliti artificiali che orbitano attorno alla Terra possono

essere equipaggiati con camere ad elevata risoluzione, sia nel visibile che nell'infrarosso, o con camere iperspettrali o multispettrali, che permettono l'analisi di precise bande di spettro. Il vantaggio del metodo è dato dalla possibilità di utilizzo di diversi sensori specifici, anche di elevato peso, e dalla rapida scansione di aree di suolo elevatissime. Lo svantaggio è rappresentato dalla bassa risoluzione delle immagini riprese e dalla bassa sensibilità di alcuni strumenti a distanze elevate dalla Terra.
Anche la tecnologia di ricerca perdite a raggi cosmici consente di monitorare da remoto grandi porzioni di rete in tempi notevolmente ridotti rispetto a quelli necessari per la ricerca sul campo effettuata dai camminatori. In questo caso l'impiego dei camminatori si limiterebbe all'ultima fase, quella di individuazione e riparazione delle perdite in corrispondenza delle posizioni geografiche indicate dalla mappa digitale georeferenziata. Altri vantaggi della tecnologia a raggi cosmici e che la rendono competitiva rispetto alle tecnologie summenzionate sono la maggiore precisione nell'individuazione e localizzazione delle perdite rispetto ai sistemi aerei e satellitari (con conseguente riduzione dei costi di manodopera necessari per la seguente esatta localizzazione della perdita), la possibilità di stimare la portata della perdita, l'alta risoluzione (circa 5 m) della mappa, la possibilità di utilizzo del dispositivo in modalità fissa o mobile su qualsiasi mezzo di trasporto, senza rischi per gli operatori, in quanto i neutroni provengono dalla radiazione cosmica secondaria e non da sorgenti radioattive. Altro vantaggio della tecnologia è che essa risulta applicabile a tutti i tipi di idrocarburi. Un limite risiede, invece, nell'altezza dal suolo a cui il sistema è in grado di rilevare la perdita.

6. Conclusioni

Dalla disamina dell'innovativa tecnologia a raggi cosmici per la ricerca di perdite di fluido dalle reti di distribuzione degli idrocarburi, emerge come essa, una volta validata, possa efficacemente rappresentare una valida alternativa alle altre metodologie già in uso per questa attività. Peraltro, la metodologia rappresenta una nuova applicazione di una tecnologia già consolidata e ampiamente utilizzata in campo spaziale e terrestre. Essa, pur utilizzando i neutroni, non espone i lavoratori a rischi connessi con le radiazioni ionizzanti. Infatti, a differenza di altri sistemi in cui i neutroni sono generati attivamente da sorgenti radioattive, la tecnologia sfrutta la radiazione cosmica secondaria, per natura, sempre presente sulla superficie terrestre.
Il metodo proposto parrebbe ridurre tempi e costi di manodopera e manutenzione straordinaria, grazie alla precisione e alla velocità di rilevazione, limitando drasticamente il ricorso alle metodologie classiche, più lente, basate sull'uso di "nasi elettronici", geofoni, gas traccianti, step test.
Inoltre, la tecnologia potrebbe anche essere vantaggiosamente sfruttata in sinergia con altre metodologie di ricerca di perdite, in modo da sfruttare i diversi vantaggi offerti.

Un interessante progetto per l'ulteriore abbattimento dei costi della tecnologia è rappresentato dalla possibilità di collocare la strumentazione a bordo di veicoli dedicati ad altri servizi (ad esempio raccolta dei rifiuti, trasporto pubblico, soccorso stradale, ecc.) o di velivoli, come i droni, in grado di perlustrare le aree volando a bassa quota.
Con l'avanzare dell'innovazione nella sensoristica, in un futuro prossimo, l'altezza dal suolo a cui poter effettuare le misure di radiazione cosmica secondaria potrebbe aumentare, consentendo di ottenere mappe con stesso livello di affidabilità e precisione, ma in tempi più rapidi.

7. Sitografia e bibliografia

[1] https://cosmicwaterleaks.space/

[2] www.hse.gov.uk/comah/sragtech/techmeasleakgas.htm

[3] www.pipelineandgasjournal.com

[4] M. O. Köhli et al. "Footprint Characteristics Revised for Field-Scale Soil Moisture Monitoring with Cosmic-Ray Neutrons". Water Resources Research. 2015; 51; DOI: 10.1002/2015WR017169

[5] Gómez C., Green D.R., Small-Scale Airborne Platforms for Oil and Gas Pipeline Monitoring and Mapping, AICSM – UCEMM – University of Aberdeen, 2015.

[6] HSE, Pipeline Leak Detection Study – Offshore Technology Report, Health & Safety Executive, 1996.

Economizzatore a bassa temperatura (LLTE), una soluzione flessibile nella transizione energetica

D. Sallustio[1], E. Mazzi[2], S. Larghi[2]

[1] Inail – Uot di Bari
[2] Nooter Eriksen S.r.l.

Abstract

Il risparmio energetico e l'efficienza sono fattori chiave negli impianti di processo e nell'industria moderna. I generatori di vapore a recupero (HRSG) producono vapore surriscaldato utilizzando il calore recuperato dai gas di scarico di una turbina a gas, attraverso moduli di scambio volti a preriscaldare l'acqua all'ingresso (economizzatori), trasformare l'acqua in vapore saturo (evaporatori) e surriscaldare il vapore prodotto (surriscaldatori).
Gli economizzatori recuperano il calore dei gas alla più bassa temperatura dei fumi preriscaldando l'acqua a valori di temperatura prossimi alla saturazione, e ottimizzando così l'efficienza complessiva dell'impianto in modo da garantire il massimo della compattezza e della redditività.
Il limite al recupero di calore nella parte fredda dei fumi è dato dalla possibilità di condense corrosive a bassa temperatura: pertanto, l'utilizzo di un ulteriore economizzatore adatto ad operare a bassa temperatura e a sostenere condizioni di condensazione corrosiva (LLTE = Low Low Temperature Economizer) consente di recuperare ulteriore calore dai gas di scarico prima di essere inviati nel camino migliorando così l'efficienza complessiva dell'impianto, aumentando la produzione di vapore o fornendo riscaldamento ad altri fluidi di processo nell'impianto o generando applicazioni di teleriscaldamento, senza compromettere l'integrità meccanica del sistema dalla corrosione.

Keywords: transizione energetica, LTTE, resistenza alla corrosione.

1. Introduzione

I fumi di scarico provenienti dalla turbina a gas (TG) in un ciclo combinato (CCPP) vengono di prassi raffreddati da un generatore di vapore e recupero collocato a valle della turbina a gas e quindi convogliati attraverso un condotto di uscita verso il camino.
La temperatura cui i fumi vengono rilasciati in atmosfera si trova normalmente nei seguenti intervalli:

- 90÷110 °C nel caso di TG operante con gas naturale (privo di zolfo);
- 130÷200 °C nel caso di TG operante con gas di processo o combustibili liquidi con significativo contenuto di zolfo.

È evidente come, in entrambi i casi, il contenuto di calore nei fumi esausti al camino sia significativo, costituendo così una perdita energetica secca.
Consideriamo infatti per un attimo l'equazione di bilancio energetico di un tipico sistema di recupero di calore:

$$Qfum = Qabs + Qstack + Qrl$$

dove:

- *Qfum* è il contenuto di calore dei gas all'ingresso del GVR;
- *Qabs* è il calore trasferito al sistema acqua/vapore;
- *Qrl* è il calore perso per irraggiamento;
- *Qstack* è il calore sensibile perso al camino.

È chiaro che, a parità di calore in ingresso al GVR, il calore assorbito dal sistema acqua/vapore può essere massimizzato riducendo la quantità di calore persa al camino (e dunque la temperatura di scarico).
Ma, allo scopo di ridurre la temperatura dei fumi al camino, è necessario che l'acqua entri nell'economizzatore più freddo alla più bassa temperatura possibile, cioè quella del condensato (normalmente nell'intervallo 25÷40°C).
Tuttavia, ciò non è normalmente possibile perché, se l'acqua entrasse negli economizzatori a queste basse temperature, sulla superficie esterna dei tubi percorsi dall'acqua più fredda, avverrebbe un fenomeno di condensazione corrosiva di:

- vapore acqueo nel caso di TG operante con gas naturale;
- vapore acqueo e acido solforico nel caso di TG operante con combustibili contenenti zolfo.

In entrambi i casi, la condensazione sarebbe corrosiva per i componenti metallici come tubi, alette, collettori e condotto fumi, inficiando così la vita utile dell'impianto.
Allo scopo di evitare questo fenomeno corrosivo (cioè di garantite l'integrità meccanica del generatore di vapore lungo la sua vita utile) la temperatura dell'acqua all'ingresso dell'economizzatore più freddo viene sempre mantenuta superiore al valore di condensazione (chiamato "dew point" o "punto di rugiada") limitando così il potenziale recupero di calore dai fumi.
Vi sono fondamentalmente due temperature di condensazione.

- **Punto di rugiada del gas naturale (assenza di zolfo)**

Questo è il caso in cui la condensazione può avvenire per la sola presenza del vapore acqueo nei fumi.
Ricordiamo infatti che i prodotti di combustione sono: H_2O, CO_2, N_2, O_2 e Ar.
Considerando i fumi al camino alla stregua di un gas ideale a pressione atmosferica, la pressione parziale dei singoli componenti è legata alla loro frazione volumetrica dalla legge di Dalton. In particolare, per il vapore acqueo:

$$Ph2o = Xvh2o * Patm$$

Poiché *Patm=1barg*, la temperatura di saturazione alla pressione del vapore è direttamente legata alla frazione volumetrica del vapore stesso nei fumi.
Tipicamente tale valore si colloca nell'intervallo (40÷60°C) mentre la temperatura dell'acqua di ritorno dal condensatore nell'intervallo (25÷40°C) e deve essere così

preriscaldata prima di entrare nel generatore attraverso un sistema di ricircolo sull'economizzatore tramite pompe dedicate oppure riscaldata da uno scambiatore esterno allo scopo di raggiungere un valore superiore al punto di rugiada, operazioni che in ogni caso producono una chiara perdita energetica.

- **Punto di rugiada dello zolfo**

Nel caso in cui il combustibile utilizzato nel TG contenga anche zolfo (e.g. olio, gas di sintesi, gas di raffineria, ecc.) la temperatura minima dell'acqua di alimento deve crescere a valori sufficientemente alti da evitare la possibilità di condensazione di acido solforico, che avviene a temperature più elevate di quelle del punto di rugiada del vapore, comportando così una penalizzazione ancora più significativa del recupero energetico.

La presenza di tracce di zolfo nel combustibile comporta la generazione nel processo di combustione di diossido di zolfo (SO_2), che si converte (tra il 2% e il 6%) in triossido di zolfo (SO_3) a temperature dei fumi inferiori a circa 400 °C.

SO_3 reagisce con il vapore acqueo presente nei fumi per formare acido solforico:

$$H_2O + SO_3 = H_2SO_4$$

L'acido solforico condensa a basse temperature sulla parete esterna dei tubi più freddi generandone la corrosione.

La temperatura di condensazione dell'acido solforico, chiamata anche "punto di rugiada acida", può essere calcolata sulla base di molte relazioni empiriche; qui ricordiamo soltanto la formula di Otsuka:

$$Tdp = 20 * \log(\%volSO3) + a$$

dove "a" è un parametro dipendente dalla percentuale volumetrica di H_2O presente nei fumi.

2. Descrizione della soluzione N/E (LLTE) per incremento del recupero di calore

Da quanto sopra esposto, risulta evidente che un banco economizzatore progettato per lavorare con temperature inferiori al punto di rugiada, quindi in condensazione e senza problematiche di corrosione, per esempio accettando direttamente l'acqua di ritorno dal condensatore (25÷40°C), porterebbe un incremento netto nel recupero energetico dai fumi. Infatti considerando un GVR installato a valle di una TG da 250 MWe, cioè in un ciclo combinato da circa 400 MWe, operante con solo gas naturale privo di zolfo, con acqua di ritorno dal condensato a 30°C e temperature di rugiada di 55°C, la prassi normale prevederebbe di riscaldare l'acqua prima dell'ingresso nel GVR con acqua calda proveniente dal GVR stesso da 30°C ad almeno 55°C per evitare corrosione nei tubi metallici, con chiara perdita di energia. In fig. 1 è riportato un esempio che utilizza la pompa di ricircolo.

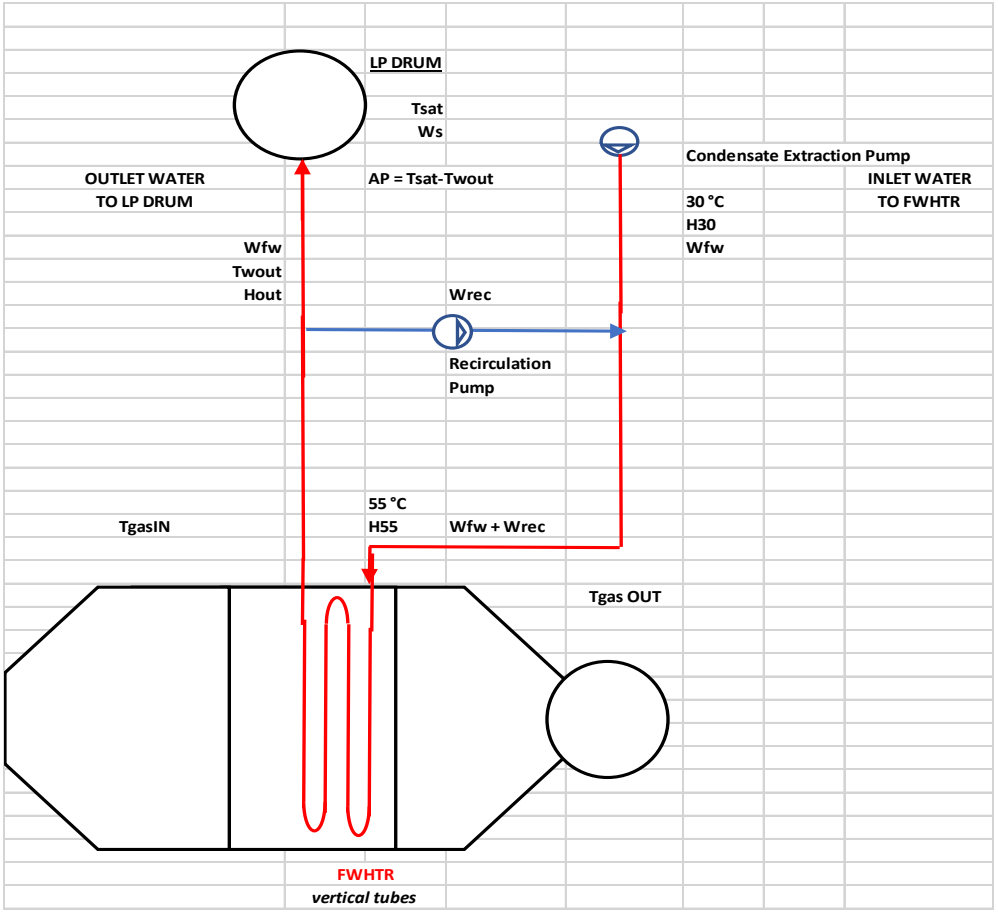


Figura 1. Esempio con utilizzo pompa di ricircolo

Il progetto innovativo oggetto di questa memoria consente invece di entrare direttamente nell'economizzatore più freddo di caldaia a 30°C, accettando una condensazione in un banco particolare dove essa non produce effetti corrosivi.
In tal caso il recupero aggiuntivo di calore è pari all'energia recuperata direttamente dai fumi per riscaldare l'acqua da 30°C a 55°C, cioè circa 10MW termici stimabili in circa 3 MWe nella turbina a vapore, legati alla maggior produzione del vapore di bassa pressione.
L'approach point (AP) del livello di bassa pressione (cioè la differenza fra la temperatura di saturazione nel corpo cilindrico e la temperatura dell'acqua in ingresso al corpo stesso), infatti, tende a ridursi grazie all'inserimento del LLTE e quindi, una minor quantità di vapore di bassa pressione è consumata per saturare l'acqua nel corpo con conseguente maggior portata di vapore resa disponibile per la turbina a vapore (fig. 2).

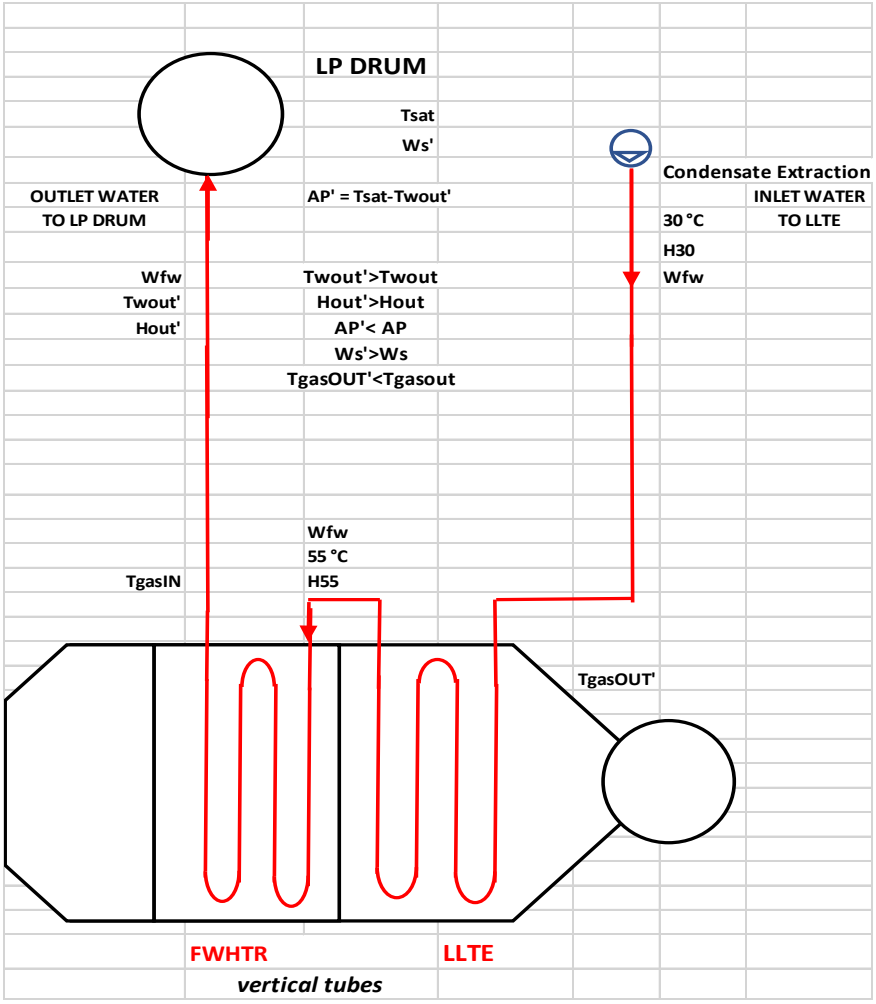


Figura 2. Inserimento LLTE

Essenzialmente sono due gli utilizzi del banco LLTE:

1) per incremento di potenza elettrica dell'impianto, attraverso l'incrementata produzione di vapore di bassa pressione;
2) per trasferimento del calore recuperato ad un fluido termovettore per utilizzi di impianto o esterni (ad es. vapore o acqua di processo, teleriscaldamento, ecc.).

3. Utilizzo di materiali termoplastici quale soluzione innovativa

3.1 Inopportunità di utilizzare acciai sotto il punto di rugiada

L'acciaio al carbonio normalmente utilizzato nei banchi economizzatori dei GVR non può operare a valori di temperatura inferiori al punto di rugiada perché non idoneo a sopportare la corrosione a lungo termine, anche qualora dotato di sovraspessore.
Sono stati effettuate prove di laboratorio su altri acciai debolmente legati o alto legati per dimostrare la resistenza alla corrosione da condensazione ed essi, pur dimostrando un comportamento superiore a quello dell'acciaio al carbonio, non hanno permesso di provare tassi di corrosione compatibili con la vita utile tipica dell'impianto (ad es. 25÷30 anni).

Occorre inoltre tenere presente che le condizioni controllate di prove di laboratorio non possono rappresentare in modo sempre affidabile le condizioni reali in cui l'impianto si troverà ad operare.
Anche l'aggiunta dei cosiddetti sovraspessori di corrosione non comporta alcuna garanzia di integrità meccanica del banco a lungo termine.
Per poter operare in maniera affidabile a valore di temperatura inferiori alla condensazione occorre allora utilizzare materiali con caratteristiche diverse dagli acciai, materiali che dimostrino resistenza alla corrosione, affidabilità e durabilità lungo la vita attesa dell'impianto.

3.2 Utilizzo di materiali termoplastici nella parte fredda del GVR

È stata quindi brevettata una soluzione per un economizzatore (LLTE) adatto ad operare al di sotto del punto di rugiada utilizzando tubi e collettori in materiali polimerici ad alta resistenza chimica, insensibili sia alla corrosione da condensazione di acqua, sia alla corrosione da condensazione di acido solforico.
Tali materiali (alcune sigle commerciali sono: PP-GR, PPS-GR), sottoposti a prove certificate, dimostrano di resistere al fenomeno corrosivo per la vita attesa del GVR.
L'applicazione del brevetto LLTE (Low Low Temperature Economizer) con tale tipologia di materiali è dunque affidabile e garantisce l'integrità meccanica a lungo termine del GVR, considerando le seguenti limitazioni di impiego:

- la conducibilità termica è più bassa dell'acciaio al carbonio, quindi è necessaria una maggiore superficie di scambio termico. Tale riduzione è compensata dalla presenza nel materiale di fibre di carbonio che garantiscono, comunque, un miglioramento dello scambio termico;
- I limiti sulla temperatura e sulla pressione dell'acqua:
  - ✓ la temperatura massima del materiale è limitata a 100°C a pressione di progetto (al massimo 45barg) e può giungere fino a 250°C (valore comunque compatibile con la temperatura massima dei fumi nella parte fredda del GVR), in assenza di pressione interna;
  - ✓ la massima pressione di progetto è limitata a 45barg (valore normalmente superiore alle pressioni di progetto degli economizzatori di bassa pressione).

Come detto, i tubi (che sono lisci) sono composti da polimeri termoplastici innervati con fibre di grafite che, incrementa la conducibilità termica.

Si riporta in fig.3 la connessione tubo-collettori, effettuata con doppio O-Ring,

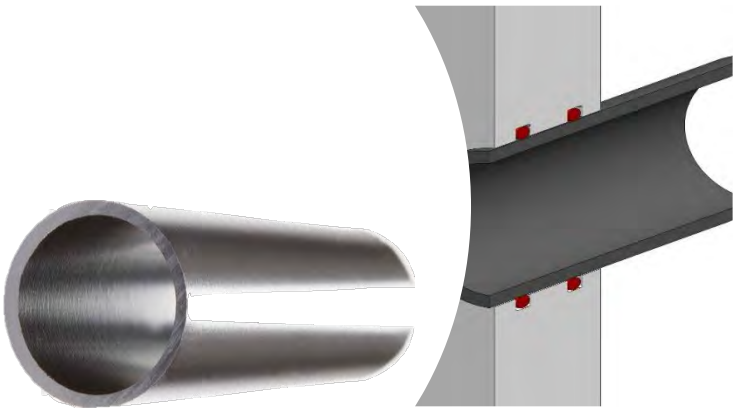


Figura 3. Connessione tubo-collettori

I tubi sono leggeri e semplice da installare, mantengono una eccellente qualità superficiale che ne rende semplice la pulizia con i sistemi a getto già presenti in impianto.
La connessione tubo-collettore li rende poi adatti ad assorbire le vibrazioni. I materiali, certificati TÜV, sono stati anche depositati in ASME con le relative proprietà termo-meccaniche, fino alla registrazione in un apposito Code Case nella Sect. VIII, div. 1, part. UIG.
Le prove di resistenza alla corrosione effettuate su questi materiali, riguardanti la resistenza chimica in ambienti fortemente acidi, sono le seguenti: immersione prolungata in acido solforico (H_2SO_4), in acido fosforico (H_3PO_4), in acido cloridrico (HCl) ed in acido flluoridrico (HF).
La prova di maggior interesse per tale specifica applicazione è indubbiamente quella in ambiente di acido solforico che ha fornito i risultati certificati in fig. 4 e fig. 5 (immersione in concentrazione acida al 60%, temperatura 160°C, durata 6 mesi):

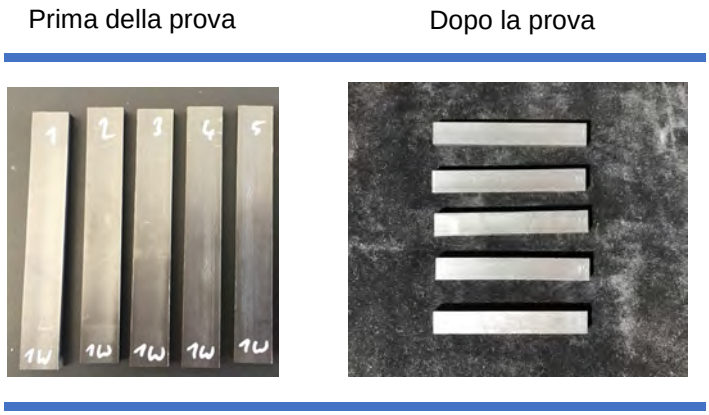


Figura 3. Nessun difetto visibile dopo la prova

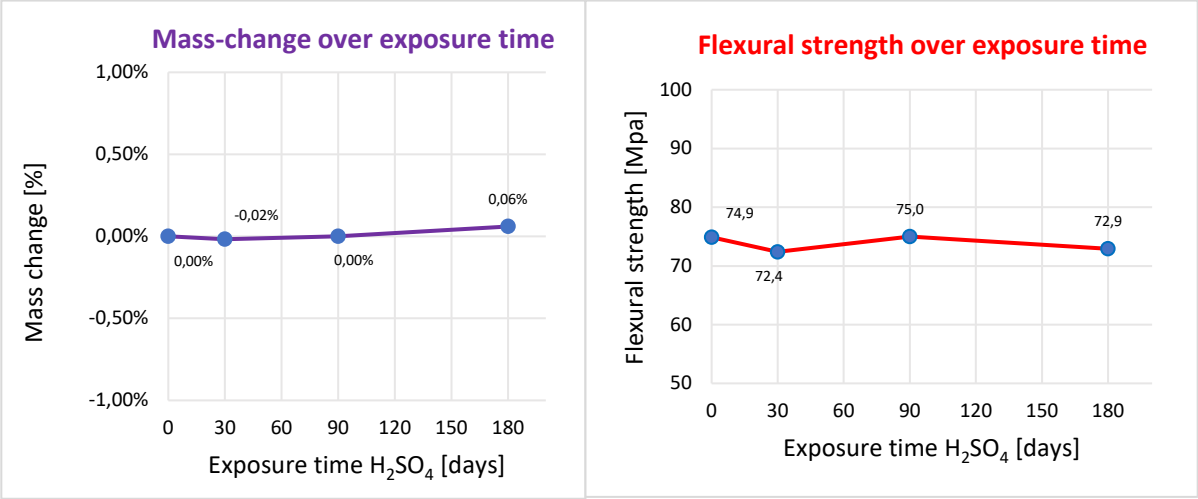


Figura 4. Nessuna variazione nella massa e nelle caratteristiche meccaniche

3.3 Caratteristiche geometriche

Il banco economizzatore LLTE, progettato e brevettato, si presenta con geometria a tubi verticali appesi (fig. 5), connessi a collettori superiori, inferiori ed intermedi. Il collettore intermedio, a causa di limiti produttivi nella lunghezza massima dei tubi, è collocato all'interno del condotto di uscita del GVR, immediatamente a monte del camino. È installato dal lato del condotto e supportato dalla struttura superiore del condotto stesso. Tutti i materiali in pressione, esposti alla possibilità di condensazione, cioè i tubi e i collettori, sono costituiti da materiale termoplastico. Sui collettori sono presenti connessioni forgiate per permettere il collegamento lato acqua alle tubazioni in acciaio esistenti nell'impianto.

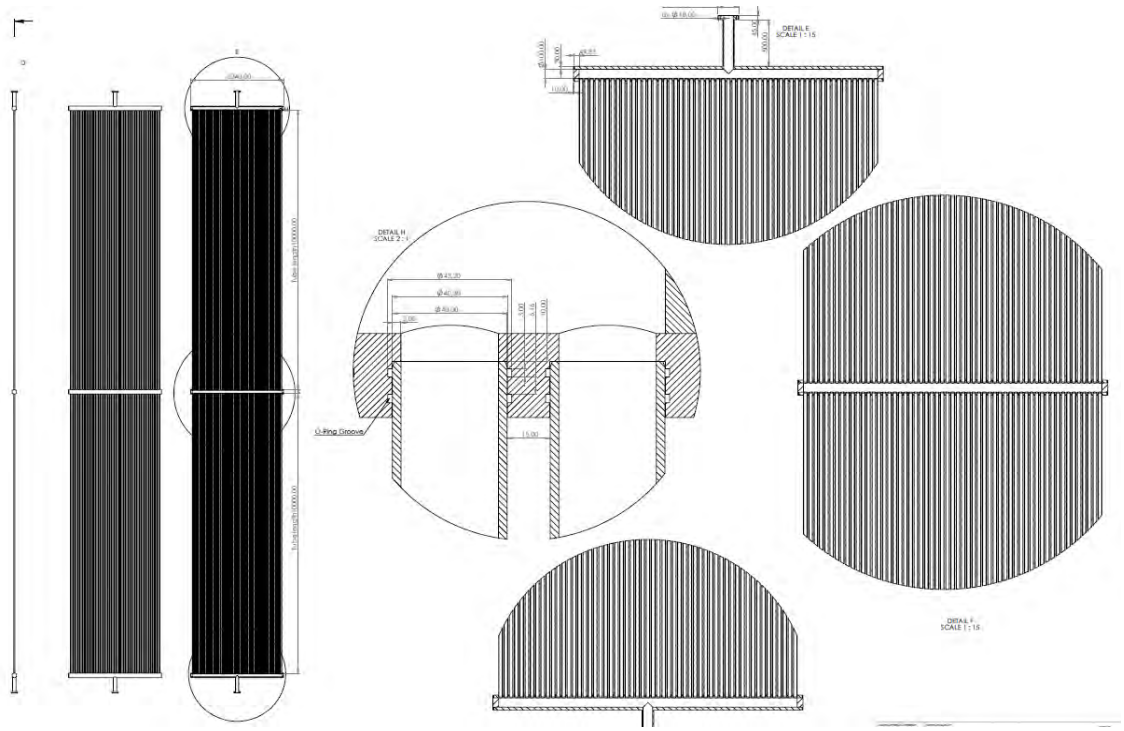


Figura 5. Geometria a tubi verticali appesi

La disponibilità al funzionamento dell'impianto è sempre assicurata anche in caso di guasto temporaneo dell'LLTE poiché il sistema può essere, se necessario, completamente by-passato (Fig. 6)

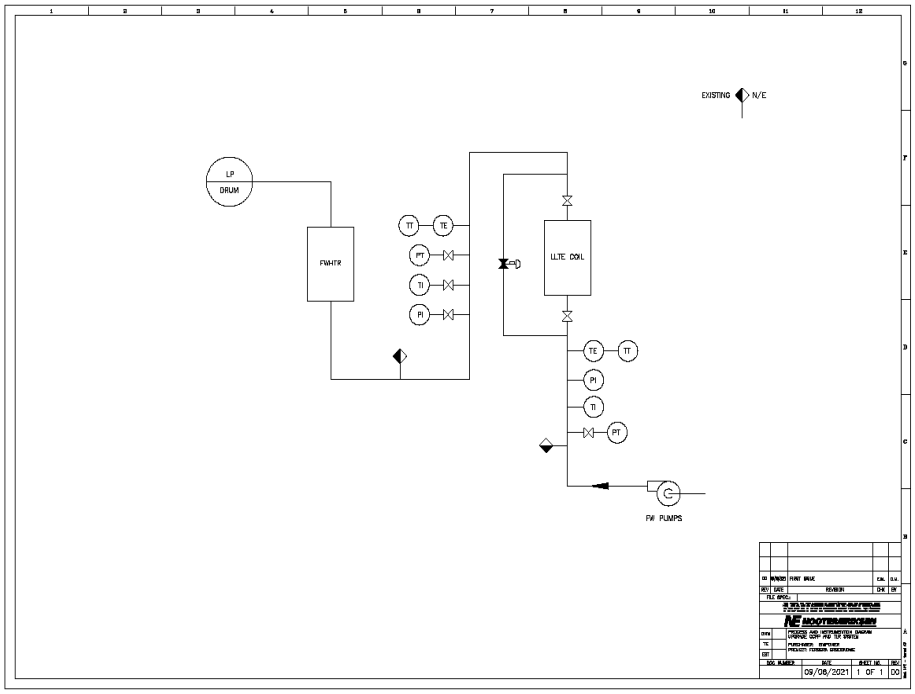


Figura 6. By-pass LTTE

4. Prototipo e test

È stato costruito un prototipo (fig. 7) di LLTE in dimensioni scalate rispetto all'originale (ma con le medesime caratteristiche geometriche) allo scopo di dimostrare la stabilità meccanica e la resistenza a lungo termine del banco.



Figura 7. Prototipo LTTE

Il modello è stato sottoposto a prove meccaniche testimoniate e certificate da un ente terzo (nello specifico TÜV).
Nonostante i singoli componenti (tubi e collettori) fossero già meccanicamente provati e certificati, sono state eseguite e certificate le seguenti prove sul modello completamente assiemato:

- prova a pressione a freddo (35 barg@, 20°C per 4 ore);
- prova a pressione a caldo, considerando le condizioni operative normali per la pressione e la temperatura massima di progetto del materiale (100°C per 5 ore);
- prova a lungo termine alle massime condizioni operative previste (25barg@, 80°C), per una durata di 1500 ore, allo scopo di dimostrare l'adeguato comportamento del banco quando soggetto per lungo tempo alle più severe condizioni operative continue.

Considerato poi il fatto che normalmente i GVR operano in modalità fortemente ciclica (con avviamenti e spegnimenti frequenti e impegnativi gradienti di avviamento), è stata anche simulata una prova di resistenza ai carichi ciclici, legata all'espansione termica differenziale dei tubi rispetto ai collettori, considerando 2000 cicli con il banco alla pressione di progetto.
Tutte le prove effettuate hanno dato riscontro positivo.

5. Conclusioni

Il sistema LLTE, (progettato e brevettato) è una soluzione per l'incremento dell'efficienza energetica dei cicli combinati che aumenta il recupero di calore e quindi la disponibilità di potenza elettrica dell'impianto senza incrementare le emissioni in atmosfera. Gli esiti positivi dei test condotti hanno confermato l'affidabilità della progettazione e di ottenere HRSG e CCPP sempre più sostenibili per l'ambiente.

6. Bibliografia

[1] E. Mazzi, United States Patent Publication, US 2023/0243499A1, August 3rd, 2023
[2] E. Pedrocchi, M. Silvestri, "Fenomeni di trasporto", 1987, ed. Clup
[3] D. Annaratone, "Steam Generators, Description and Design", 2008, ed. Springer

Criteri di applicabilità di metodologie alternative o complementari alla prova idraulica su attrezzature a pressione

C. Di Girolamo[1], S. Carra[2], L. Monica[2], A. Tonti[2]

[1] Inail - Uot di Piacenza
[2] Inail - Dit

Abstract

Le verifica di integrità svolte dal personale tecnico dell'INAIL sulle attrezzature a pressione vengono effettuate, come stabilito dall'art. 12 del d.m. 329/2004, attraverso rilievi visivi e indagini strumentali eventualmente integrati, laddove necessario, da una prova di pressione idraulica. Quest'ultima è standardizzata e generalmente a contenuto livello di rischio, ma ci possono essere situazioni in cui non è attuabile. È allora possibile eseguire una prova pneumatica, ritenuta a più alto rischio di incidente e di infortunio e per la quale oggi non sono presenti linee-guida riconosciute a livello internazionale.
Già dagli anni '80-'90 vi sono evidenze di prove eseguite su attrezzature a pressione mediante tecniche basate sul metodo di emissione acustica (EA), dalle quali si ottengono informazioni sulla presenza di difetti, come cricche che possono attivarsi e propagarsi con l'aumento della pressione di prova.
Il presente lavoro si propone di porre i fondamenti per identificare criteri di applicabilità delle suddette metodologie (o loro combinazioni) per la verifica in sicurezza delle attrezzature a pressione, sulla scia di quanto già in atto in altri Paesi europei, fornendo un'analisi approfondita delle proposte avanzate dalla recente letteratura scientifica. Vengono fornite indicazioni per l'applicazione delle varie metodologie, anche in accordo con linee-guida, standard e buone pratiche esistenti.

Keywords: attrezzature a pressione, prova idraulica, prova pneumatica, emissioni acustiche, sicurezza.

1. Introduzione e quadro tecnico-normativo

In base all'art. 12 del d.m. 329/2004, quando un'attrezzatura in pressione ha caratteristiche tali da non consentire adeguate condizioni di accessibilità all'interno, o risulta comunque non ispezionabile in modo esaustivo, l'ispezione è integrata, limitatamente alle camere non ispezionabili, da una prova in pressione ad un valore pressorio pari a 1.125 volte quello di progetto. Tale prova può essere effettuata utilizzando un fluido allo stato liquido ed eventualmente essere accompagnata da altri test non-distruttivi finalizzati ad analizzare le aree più critiche, come saldature o zone affette da corrosione.

Esiste anche la possibilità di effettuare prove pneumatiche (quando la prova idraulica è irrealizzabile), ritenute però a più alto rischio di incidente e di infortunio e per le quali oggi – nonostante il loro utilizzo industriale piuttosto diffuso - non sono presenti linee-guida riconosciute a pieno a livello internazionale, per esempio in merito a tempo di stabilizzazione, valutazione del test e criteri di accettabilità delle prove [1].
Sono note comunque altre metodologie che possono andare ad integrare le prove in pressione, riducendone anche il grado di pericolosità, come le tecniche basate sul metodo di emissione acustica (EA). Esse, introdotti negli anni '80, sono ormai comunemente applicate in Italia nel settore delle verifiche di integrità dei serbatoi per GPL per volumi non superiori a 13 m^3 (procedura ISPESL aggiornata al 2008 [2]); un'altra procedura INAIL è stata pubblicata nel 2020 per volumi superiori a 13 m^3 [3]. Le tecniche basate sul metodo di EA negli ultimi anni sono stati applicate, anche all'estero, come possibile metodologia adatta ad integrare la prova pneumatica, fornendo in tempo reale dati di ispezione [4], in termini di cricche e difetti di saldatura attivati progressivamente dalla prova stessa [5] e rappresentando quindi uno strumento non invasivo di *early warning*, capace di evitare la progressione del danno verso veri e propri eventi catastrofici ed eventualmente applicabile anche a superfici molto estese. In particolare, le norme UNI EN 14584:2013 e UNI EN 15495:2008 specificano le procedure per condurre prove di emissione acustica di attrezzature a pressione metalliche durante la prova di accettazione utilizzando, rispettivamente, un metodo a localizzazione planare ed un metodo a localizzazione a zona.
I test in pressione, sia con fluidi che con gas, presentano dei rischi, seppur diversi da quelli potenzialmente connessi alle ispezioni vere e proprie (come il soffocamento), e sono dunque necessarie misure di sicurezza adeguate. Una recente pubblicazione INAIL [6] riassume in modo organico i principali accorgimenti necessari per l'esecuzione in sicurezza di prove di pressione idrauliche e pneumatiche, come l'attenzione alla temperatura del fluido di prova, che non dovrà mai essere talmente bassa da andare a facilitare la frattura fragile dell'apparecchiatura, particolarmente pericolosa per chi si trovasse nelle vicinanze. Molta attenzione va anche posta all'energia immagazzinata, che dovrà essere minimizzata riducendo, laddove possibile, i volumi tramite isolamento di determinate sezioni; in alternativa, dovranno essere predisposte barriere o spazi protetti in cui il personale si trovi in condizioni di sicurezza.
In Italia, in buona parte dei casi della pratica comune di costruzione e di verifica delle attrezzature in esame, i test in pressione vengono svolti in condizioni di idrostaticità. Tale metodologia è considerata semplice, di implementazione storicamente assodata e a ridotto livello di rischio. Essa non è comunque esente da problematiche: (i) umidità residua e rischio di contaminazione del prodotto; (ii) rischio di innesco di cricche nelle attrezzature più datate: (iii) tempi lunghi per la preparazione della prova; (iv) peso del fluido gravante sui supporti dell'attrezzatura; (v) smaltimento

delle acque reflue e rischio di inquinamento ambientale. Per alcune attrezzature che possono essere danneggiate dai liquidi, si utilizzano i gas, con una prova di pressione pneumatica. L'art.12 del d.m. 329/2004 specifica infatti che la prova idraulica può essere sostituita, in caso di necessità e previa predisposizione da parte dell'utente di opportuni provvedimenti di cautela, con una prova di pressione con gas (aria o gas inerte) ad un valore di 1.1 volte la pressione massima ammissibile. In tale caso dovranno essere prese tutte le misure previste dal d.lgs. 81/2008 e s.m.i. per tale tipo di collaudo e la prova dovrà avere una durata minima di due ore durante le quali dovrà essere verificata l'assenza della caduta di pressione. Similmente, anche per pressioni elevate al di sopra dei 5.000 bar sono spesso impiegati gas, in quanto molti liquidi solidificano.

A livello europeo, vige inoltre la più recente Direttiva PED (Pressure Equipment Directive) 2014/68/EU, che è guida nella progettazione e produzione di attrezzature a pressione come prerequisito per la marcatura CE e si applica a serbatoi, caldaie a vapore, tubazioni, scambiatori di calore, serbatoi di stoccaggio, dispositivi di sovrappressione, valvole, regolatori e altre attrezzature a pressione con una pressione massima ammissibile superiore a 0,5 bar. La PED è stata recepita in Italia con il D.lgs. 15 febbraio 2016. Un precedente studio del 2006 [5] dettagliò analogie e differenze tra i principali codici utilizzati a livello europeo, mettendo in evidenza come la norma più completa, in tema di sicurezza della prova in pressione, apparisse essere la EN 13445, ossia lo standard europeo su recipienti a pressione non esposti a fiamma, nella parte relativa a controlli e prove (attualmente in vigore nella versione del 2021). In particolare, tale standard a tutt'oggi fornisce dettagliate indicazioni sulle modalità di effettuazione delle prove sia idrostatiche che pneumatiche, evidenziando anche le corrette modalità di contenimento del rischio in queste ultime (barriere, camere speciali, segnalazioni di pericolo, accesso limitato e così via).

Per quanto attiene le prove, in Europa esiste comunque ancora un'ampia disparità in merito alla tipologia di test utilizzato per la riqualificazione periodica delle attrezzature, con conseguente disparità anche in termini di efficienza e di costi. Nei primi anni 2000, diversi paesi europei hanno aggiornato la propria legislazione nazionale per consentire l'applicazione dei test con emissioni acustiche, tra cui Italia, Portogallo e Spagna. Si procede in genere facendo semplicemente ricorso alle metodologie più applicate storicamente, ma ancora manca un approccio critico completo che aiuti la scelta ed una sufficiente cultura in merito alle prerogative di ciascuna tecnica.

La più recente letteratura scientifica internazionale mette in evidenza alcune tematiche, correlate alle prove in pressione, sulle quali si sta concentrando l'interesse dei ricercatori a livello mondiale. La sezione seguente riporta i risultati di un'approfondita analisi bibliografica degli studi svolti in ambito internazionale, al fine di illustrare le principali novità ed i risultati ad oggi raggiunti dalla ricerca scientifica, sia di base che applicata, ad integrazione di quanto già previsto in Italia nella legislazione vigente, nelle normative tecniche e nella prassi industriale.

2. Le prove in pressione in letteratura scientifica internazionale

Negli ultimi 20 anni, la letteratura scientifica ha ulteriormente analizzato i possibili metodi di esecuzione delle prove di pressione su apparecchiature, in parallelo all'evoluzione avuta dalle normative nazionali e da direttive e standard tecnici a livello europeo. In particolare, l'ultima decade appare come la più interessante dal punto di vista degli apporti forniti dalla ricerca sia di base che applicata.
Date le ormai diffuse e storicamente accettate modalità di realizzazione della prova idrostatica standard, la letteratura recente è maggiormente concentrata su fattibilità e mantenimento delle condizioni di sicurezza delle prove pneumatiche mediante il ricorso a opportune misure di cautela. La prova idrostatica viene comunque ancora considerata negli studi in cui vengono proposte tecniche di monitoraggio (in particolare, le misure realizzate tramite tecniche basate sul metodo di EA) a supporto dell'una o dell'altra metodologia di test in pressione.

2.1 Prove pneumatiche

Una prova pneumatica può creare pericoli estremi per un impianto e per il personale nelle vicinanze; essa ha quindi bisogno di una valutazione attenta prima di essere avviata su una qualsiasi apparecchiatura.
Il test in pressione può essere richiesto, in base ai codici di progettazione delle apparecchiature pressurizzate, sia per apparecchiature di nuova fabbricazione che per apparecchiature in servizio modificate, per verificare che la loro integrità non sia stata compromessa.
Nel mondo il numero di esplosioni di recipienti a pressione è diminuito dagli anni '90 grazie all'introduzione di molte norme e regolamenti [7]. Tuttavia, si verificano frequentemente incidenti durante le prove pneumatiche, a prova del fatto che evidentemente linee-guida esaustive in merito alla sicurezza di tali test ancora non sono universalmente note e applicate.
I metodi di valutazione dei rischi nelle prove pneumatiche sono già da tempo oggetto di attenzione da parte della ricerca scientifica, come dimostra già nel 2012 il lavoro di Edwards et al. [8], principalmente dedicato al caso di tubazioni di ampio diametro, in cui risulta impraticabile la suddivisione in volumi per ridurre l'energia immagazzinata. Viene particolarmente posto l'accento sul ruolo del personale in loco, che dovrà (i) essere adeguatamente formato; (ii) sapere a priori esattamente quando eventualmente sia necessario uscire dalle aree protette ed accedere all'area di esclusione e (iii) verificare tramite check-list che tutte le attività preparatorie siano state svolte. L'accesso all'area più a rischio potrebbe, per esempio, essere necessario dopo che, in fase di depressurizzazione, la pressione viene fermata sotto al 10% della pressione massima ammissibile per eseguire prove integrative come il "leak test", il controllo con i liquidi penetranti o simili, col rischio di contatto con sottili getti di fluido che possono fuoriuscire da eventuali cricche. In ogni caso, anche bassi valori di energia immagazzinata possono causare proiezioni di piccoli frammenti in grado di provocare gravi infortuni, così come onde d'urto [5].

Sulla stessa scia, Shin et al. [7] hanno proposto, nel 2022, una nuova modalità di calcolo delle distanze di sicurezza per i supervisori alla sicurezza, utilizzando forma del serbatoio cilindrico (rapporto lunghezza/diametro), volume e sovrappressione ante-scoppio come variabili da utilizzarsi – anche in questo caso - qualora l'uso di grandi volumi sia inevitabile. L'equazione proposta da Shin è specifica per i casi di "pressure vessel burst" (PVB), cioè un'esplosione che comporta lo scoppio di un recipiente a pressione contenente gas a pressione elevata, generalmente inerte (da non confondersi con i BLEVE o con le esplosioni delle nubi di vapore). In questo caso, la metodologia è pensata anche come potenzialmente applicabile alla prevenzione dell'effetto domino ed è stata validata tramite confronto con dati di danneggiamenti conseguenti ad un incidente reale avvenuto in uno stabilimento americano.
Analogamente - ed ancora in contesto statunitense - anche Miller et al. nel 2019 [1] hanno approfondito la tematica delle distanze di sicurezza, nell'ipotesi di frattura duttile, caratterizzata da una distorsione del metallo che porta ad una rottura locale, senza una frammentazione generale. Essi si sono concentrati però in questo caso su stabilimenti di gas industriale e gas naturale liquefatto (GNL), in cui vengono eseguite di routine prove di pressione pneumatiche, anziché idrauliche, a causa della necessità di mantenere a secco sia tubazioni che attrezzature. In questo caso, sono stati proposti criteri applicativi per l'utilizzo di metodi consolidati di modellazione dell'esplosione (modelli di Baum e Baker), validati tramite analisi di precedenti dati indipendenti e nuovi dati. Sono state inoltre presentate nuove formule di correlazione per il calcolo delle distanze di sicurezza, confrontati con tre metodi già noti (ASME, NASA, INERIS). Questi ultimi sono stati considerati validi nel caso di sorgenti altamente esplosive o di detonazione di nubi di vapore, ma possono sottostimare le distanze di sicurezza nel caso in cui siano significative le pressioni anche in campo lontano. È stato quindi evidenziato come le nuove correlazioni garantiscano un maggior grado di sicurezza nel caso di PVB e quindi, in generale, nei casi di test in pressione con inerti.
Un successivo lavoro di Li et al. del 2020 [9] fornisce una valutazione del tempo minimo di stabilizzazione nelle prove pneumatiche (a fine iniezione gas), limitandosi però al caso delle tubazioni in pressione, simulate parametricamente per varie dimensioni e lunghezze. I tempi di stabilizzazione risultano maggiori per tubi più grandi e più lunghi; inoltre, il tempo di stabilizzazione dovuto alla temperatura del gas è maggiore di quello dovuto alla pressione del gas. Lo studio afferma inoltre che la massa del gas dovrebbe essere utilizzata come principale criterio di valutazione e soprattutto introduce inoltre un *indice di accettabilità* che, se mantenuto entro un certo range, permette di ritenere la prova accettabile. Esso è definito come il rapporto tra la massa di gas calcolata e la massa di gas media (o reale) in assenza di perdite. La metodologia è validata tramite tre casi studio applicati a reti di gas naturale testate pneumaticamente con azoto. Viene comunque osservato che, in caso di variazione progressiva e/o brusca della temperatura ambiente, la metodologia non consente di ritenere accettabile la prova, in quanto essa

presuppone che il gas all'interno della condotta sia in quasi-equilibrio. In questo caso, viene quindi consigliato di ripetere il test in condizioni ambientali più adeguate.
Ebrahimi e Mofrad, in uno studio del 2018 [10], descrivono le modalità di realizzazione del test in pressione combinato idrostatico-pneumatico, in cui il volume del serbatoio viene diviso in due zone: una riempita con liquido e l'altra con gas (aria o azoto). Tale metodologia consente di avere una minore energia immagazzinata rispetto al caso di test pneumatico completo. Parallelamente, essa risulta utile quando le fondazioni dell'attrezzatura non sono progettate per sostenere l'attrezzatura interamente riempita d'acqua (test idrostatico completo), ma sono invece in grado di sopportare il peso dell'attrezzatura parzialmente riempita. Anche in assenza di problemi per le fondazioni, una metodologia simile è applicata in Italia nel caso delle prove su serbatoi in pressione contenenti GPL, che vengono eseguite prelevando una piccola quantità di gas liquefatto, successivamente fatto evaporare e reimmesso nel serbatoio per aumentarne gradualmente la pressione.

2.2 Prove pneumatiche e/o idrostatiche supportate da monitoraggio realizzato mediante tecniche basate sul metodo di emissione acustica

Fin dagli anni '80-'90, era già metodica nota quella che prevedeva l'associazione di tecniche basate sul metodo di EA alle prove di pressione idrostatica, come riportato dai primi studi scientifici che trattarono il tema [11].
Col tempo, però, è emersa sempre più la necessità di integrare non solo la prova idrostatica, bensì soprattutto quella pneumatica, con procedure addizionali, al fine di ridurre i rischi, ritenuti ben maggiori nel caso dell'utilizzo di gas. Il monitoraggio in linea della pressurizzazione realizzato mediante tecniche basate sul metodo di EA consente di identificare la crescita di difetti in real-time durante le prove in pressione, salvaguardando l'integrità strutturale. In genere inoltre tali misure non richiedono di pulire il serbatoio e, al termine della prova, esso è immediatamente disponibile all'uso.
Alla luce di queste potenzialità, anche la ricerca scientifica si è interessata a tali tecniche, fornendo alcuni contributi importanti. Anche in anni abbastanza recenti, tecniche basate sul metodo di EA appaiono applicate ancora ad entrambi i tipi di prove in pressione, sia idrauliche che pneumatiche.
Già nel 2012, Cherfaoui [12] presentò uno studio relativo alla verifica delle condizioni di un serbatoio sferico di stoccaggio GPL, partendo da una prova idraulica con monitoraggio tramite tecniche basate sul metodo di EA e applicando successivamente anche altre tipologie di controlli non distruttivi (NDT). Purtroppo però non vengono forniti molti dettagli in merito al test in pressione, trattandosi di uno studio maggiormente dedicato ad altri tipi di tecniche (ultrasuoni, liquidi penetranti, etc.).
Più specifici appaiono invece i dati forniti da Lackner e Tscheliesnig che, in una ricerca pubblicata nel 2016 [4], trattano espressamente la tematica dell'utilizzo del monitoraggio realizzato tramite tecniche basate sul metodo di EA per la

riqualificazione di serbatoi per GPL, segnalando peraltro che le norme EN 12817 (per serbatoi fino a 13 m^3) e EN 12819 (per serbatoi oltre i 13 m^3), relative alla riqualificazione dei serbatoi di GPL, sono state via via migliorate introducendo espressamente tali tecniche. In particolare, in Austria dai primi anni 2000 è applicata una specifica procedura per la riqualificazione di serbatoi per GPL. In Italia l'ex Ispesl (oggi INAIL), a valle di un'estesa campagna sperimentale, ha pubblicato nel 2005 una specifica procedura per la riqualificazione dei serbatoi per GPL interrati con capacità non superiore a 13 m^3 [2]. Dal punto di vista tecnico, si evince che il vantaggio principale della prova realizzata tramite tecniche basate sul metodo di EA rispetto alla prova idrostatica è che, mentre in quest'ultima il risultato è binario (prova superata o non superata senza ulteriori informazioni), l'altra metodologia fornisce comunque molti dati in merito allo stato dell'attrezzatura in prova e vengono individuate casistiche "intermedie" caratterizzate da problematiche ancora in fase iniziale e quindi potenzialmente risolvibili.

Ulteriori applicazioni delle tecniche basate sul metodo di EA in abbinamento alle prove idrostatiche si sono avute anche nel settore del nucleare, dove - come riportato da Zhang et al. nel 2020 [13] – è fondamentale verificare la capacità di carico in pressione e la tenuta del recipiente in pressione del reattore. Dal punto di vista pratico, sia la pressurizzazione che l'applicazione di tale metodologia sono più complesse che negli impianti classici. È necessario testare infatti una pluralità di sistemi (circuito primario, secondario, tubazioni, valvole, serbatoio); inoltre, il posizionamento della sensoristica deve tener conto del livello di radiazioni e deve essere garantito un corretto campionamento del segnale anche ad una distanza significativa. L'abbinamento tra prova in pressione idrostatica e tecniche basate sul metodo di EA ha mostrato un'ottima efficacia, grazie alla flessibilità d'uso ed alla precisione nel rilevamento dati.

Similarmente, già Mahmoud et al. nel 2015 [14] avevano studiato l'applicazione della metodologia nel settore nucleare, seppur solo tramite test e simulazioni in laboratorio applicate a provini in acciaio a struttura bainitica come la lega Cr-Ni-Mo-V (noto come 15Ch2NMFA), andando a simulare il carico dinamico applicato durante le prove in pressione. Anche in questo caso, le tecniche basate sul metodo di EA sono apparse efficaci nell'individuazione di varie tipologie di danni e nella previsione della formazione e propagazione dei difetti.

L'importanza della possibilità di effettuare un controllo da remoto tramite tale metodologia è poi evidenziata anche dal lavoro di Cui et al., che nel 2018 presentarono lo sviluppo di un dispositivo innovativo sperimentale NDT completo e funzionante da remoto da utilizzarsi in laboratorio [15]. Tale strumento sfrutta il proprio elevato grado di automazione per monitorare da remoto tramite tecniche basate sul metodo di EA (ma anche attraverso altre tecniche NDT) i cambiamenti occorsi in difetti appositamente inseriti in un recipiente in pressione prefabbricato, esclusivamente per fini sperimentali e didattici, durante appositi test in pressione idrostatici. L'intero setup può essere controllato a distanza e visualizzato dal vivo

utilizzando una fotocamera connessa a Internet per migliorarne il senso di realisticità.
Un'altra casistica piuttosto particolare è quella analizzata da Wuriti et al. nel 2022, relativa alla verifica di integrità di serbatoi realizzati in acciai Maraging ad alta resistenza ad uso aerospaziale [16]. In tali tipi di materiali, in fase di fabbricazione, la probabilità che si sviluppino micro-cricche è molto alta e quindi, a maggior ragione, essi richiedono controlli e verifiche accurate. Wuriti et al. riferiscono come le tecniche basate sul metodo di EA consentano di monitorare i difetti in modo dinamico ed in tempo reale. In particolare, viene effettuata una prova idrostatica su un serbatoio cilindrico con cupole terminali emisferiche, col supporto del monitoraggio tramite tali tecniche, arrivando a determinare opportuni criteri di accettabilità della prova, al fine di un loro specifico utilizzo nell'ambito dell'industria aerospaziale.

3. Discussione

L'importanza di effettuare test di verifica dell'integrità dei serbatoi e delle attrezzature in pressione non può essere mai sottovalutata, neppure per tipologie di serbatoi che si suppone abbiano in genere una vita utile molto lunga, perché – in ogni caso - gravi condizioni operative, difetti di fabbricazione non identificati o guasti non rilevati dei sistemi di protezione potrebbero influire sulla loro integrità strutturale [4]. Da ciò nasce la necessità di identificare criteri applicativi delle varie metodologie di verifica esistenti, che ne ottimizzino l'utilizzo in termini di efficacia e fattibilità, garantendo contemporaneamente adeguate condizioni di sicurezza per l'ambiente circostante e per i lavoratori coinvolti.
L'analisi dei dati riportati dalla recente letteratura scientifica ha messo in evidenza come ad oggi sia ancora importante ragionare sulla sicurezza della pura prova pneumatica (specie quando realizzata senza monitoraggi addizionali), non ritenuta sufficientemente normata a livello internazionale, essendo essa correlata a maggior rischio di conseguenze catastrofiche e di infortuni mortali rispetto alla più tradizionale prova idrostatica.
In particolare, in letteratura emerge l'importanza del tema del calcolo della distanza di sicurezza, per la quale vengono proposte nuove formulazioni, laddove invece la normativa tecnica ad oggi pone maggiormente l'accento sul dimensionamento delle barriere di protezione. Si evidenzia, in particolare, l'importanza di valutare le distanze per ciascun caso specifico (per esempio quello di pressure vessel burst), escludendo formulazioni già note per altre casistiche ma che potrebbero sottostimare il rischio. L'approccio scientifico consente infatti di rimarcare l'importanza delle ipotesi sottese all'utilizzo di qualsiasi equazione o modello di calcolo, andando quindi a specificare sotto quali condizioni (per esempio ambientali, in termini di temperature) il loro uso sia valido oppure no.
Un'altra evidenza è la sempre maggior diffusione delle verifiche strutturali dinamiche svolte mediante tecniche basate sul metodo di emissione acustica, poste a supporto delle prove in pressione. In Italia, negli anni più recenti, tale metodo è stato applicato

anche a serbatoi GPL di grandi dimensioni [17], oltre che ad altre tipologie di attrezzature in pressione, in aggiunta alle prove svolte secondo quanto stabilito dal d.m. 329/2004. La letteratura internazionale conferma la necessità di approfondire ulteriormente le modalità di utilizzo delle tecniche basate sul metodo di EA nelle prove in pressione, andando ad indagare anche casistiche molto particolari (come il contesto degli impianti nucleari), che richiedono valutazioni specifiche anche in merito agli effettivi criteri di accettabilità dei test. In molti casi (come osservato peraltro anche in merito alla prova pneumatica semplice) sono stati definiti dei veri e propri indici di accettabilità. Alcune ricerche hanno analizzato le potenzialità di tali tecniche su materiali particolari, per esempio quelli utilizzati espressamente in settori industriali specifici come l'aeronautica, evidenziandone i criteri di utilizzo in tali contesti.
Sicuramente tutti gli studi mostrano come il monitoraggio di un dato materiale tramite tecniche basate sul metodo di EA consenta di ottenere una grande quantità di dati sperimentali, ampiamente distribuiti sia nello spazio che nel tempo di durata delle prove, così da permettere di avere un quadro dinamico real-time delle condizioni delle attrezzature ed intervenire prontamente prima di aver raggiunto una vera e propria condizione critica. Ciò non può essere ottenuto con le prove standard (idrostatica e pneumatica), per le quali i criteri di accettabilità forniscono una risposta chiusa: accettato o non accettato.
Allo stesso tempo, tale capacità descrittiva delle misure realizzate tramite tecniche basate sul metodo di EA, per essere ritenuta affidabile, richiede molte competenze ed esperienza nel garantire la necessaria qualità della sensoristica utilizzata e delle comunicazioni in remoto. Per questo motivo, alcune ricerche si sono concentrate sulla realizzazione e gestione del sistema di controllo di tali misure tramite modelli sperimentali in laboratorio, così da poter approfondire negli anni gli aspetti più critici; i risultati ottenuti sono stati utili anche a fini formativi e didattici.
Il monitoraggio tramite tecniche basate sul metodo di EA, specie quando consente di lavorare su serbatoi senza necessità di svuotamento (come nel caso dell'applicazione della procedura ISPESL [2] per i serbatoi GPL di piccole dimensioni), mostra una particolare semplicità d'uso e questo - a detta di operatori del settore - sembra incentivare la richiesta di verifiche di integrità da parte dei gestori delle apparecchiature, con conseguente aumento del livello di sicurezza degli impianti sul territorio italiano.

4. Conclusioni

Si ritiene che i dati raccolti dal presente studio abbiano confermato la fattiva efficacia dell'applicazione di tecniche basate sul metodo di emissione acustica a supporto delle prove in pressione, ai fini di un incremento della sicurezza. Se ne auspica quindi in futuro ulteriore diffusione, in particolare applicando apposite procedure a tipologie di attrezzature diverse da quelle dei serbatoi contenenti GPL di capacità non superiore a 13 m^3. L'obiettivo è inoltre quello di promuovere la discussione sui

requisiti della metodologia tra esperti, tecnici e legislatori, sia a livello nazionale che europeo.

5. Bibliografia

[1] Miller D., Jallais S., Pham-Huy M., Geng J. New criteria for safety distances during pneumatic pressure testing of vessels and pipes. *Process Saf. Prog*. 2019; 38(3): article number 2025.

[2] ISPESL. Procedura per il controllo di serbatoi interrati per GPL di capacità non superiore a 13 m^3 con tecnica basata sul metodo di Emissione Acustica ai fini della verifica di integrità. Rev.2, dicembre 2008.

[3] INAIL. Procedura per il controllo di serbatoi per GPL interrati, tumulati (o ricoperti) e fuori terra di capacità maggiore di 13 m^3 con tecnica basata sul metodo di Emissione Acustica ai fini della verifica di integrità. Rev.0, novembre 2020.

[4] Lackner G., Tscheliesnig P. Requalification of LPG tanks in Europe: verifying the structural integrity by monitoring the pressure test with acoustic emission. *Insight: Non-Destr. Test. Cond. Monit*. 2016; 58(8): 443-447.

[5] Gurnari G., Mulè G., Palumbo N. La valutazione del rischio nella prova a pressione di attrezzature metalliche. Atti del Convegno *SAFAP 2006 Sicurezza ed affidabilità delle attrezzature a pressione. Roma, 5-6 aprile 2006*.

[6] Mennuti C., Augugliaro G. L'esecuzione in sicurezza delle prove di pressione condotte su attrezzature in esercizio. INAIL. Milano, 2020.

[7] Shin S., Kim E.S., Kang C., Jung S. Safety distance for pressure-resistance tests of cylindrical pressure vessels in the industrial field. *Energy Sci. Eng*. 2022; 10(8): 2850-2857.

[8] Edwards V.H., Sanford D., Bonstead B., Skoda L. Evaluating and reducing the risks of pneumatic pressure testing. *Chem. Eng.* 2011; 118(2).

[9] Li G., Tupper M., Wei H.-C., House R., Bidmus H. Evaluation and acceptability criteria for pneumatic pressure tests. Proceedings of the *Biennial International Pipeline Conference IPC2020. Calgary, Canada, 28 settembre - 2 ottobre 2020*.

[10] Ebrahimi K., Mofrad S.R. Pneumatic test of pressurised equipment: its hazards and alternatives. American Society of Mechanical Engineers, *Pressure Vessels and Piping Division (Publication) P.V.P*. 2018; 7: code 141606.

[11] Morgner W., Theis K. Non destructive damage control by means of multiple parameter acoustic emission analysis. *Brit. J. Nondestr. Test*. 1991; 33(1): 19-20.

[12] Cherfaoui M. Innovative techniques in non-destructive testing and industrial applications on pressure equipment. *Procedia Eng.* 2012; 46: 266 – 278.

[13] Zhang Z., Feng H., Zhao W., Li M. Application of acoustic emission technology in hydraulic pressure test of nuclear power plant. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020; 514(4): article number 042039.

[14] Mahmoud H., Vlasic F., Mazal P. Simulation of operational loading of pressure equipment by means of non-destructive testing. Proceedings of the *24th International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2015*. *Brno, Repubblica Ceca, 3-5 giugno 2015*.

[15] Cui W., Wang K., Zhang P., Zhang Q. Design of a comprehensive pressure vessel experimental device. *Wirel. Pers. Commun.* 2018; 102(2): 783-798.

[16] Wuriti G.S., Chattopadhyaya S., Thomas T. Acoustic emission signal characteristics of maraging steel 250 pressure vessel during a hydraulic qualification test. *Nondestruct. Test. Evaluation* 2022; 37(1):100–114.

[17] Altamura N., De Gennaro G., Di Fratta C., Ferraro A., De Sandre A., De Musso M.F.S. Emissione Acustica: soluzione altamente tecnologica ad impatto zero. Atti del Convegno *VGR 2016 Valutazione e Gestione del Rischio negli Insediamenti Civili ed Industriali. Roma, 13-15 Settembre 2016*.

Le principali forme di danno nei forni di steam reforming: caratterizzazione e metodologie diagnostiche

A. Fiodo[1], A. Alvino[1], E. Di Ponzio[2], D. Lega[1], A. Antonini[1]

[1] Inail – Dit
[2] Inail – Uot di Taranto

Abstract

Il processo di steam reforming viene utilizzato negli impianti petrolchimici per la produzione di idrogeno. Le fornaci in cui avviene la reazione presentano batterie di tubi che lavorano in condizioni di esercizio severe, con temperature superiori ad 800 °C e pressioni anche di 30-35 bar, in atmosfera ossidante e con fluidi di processo ricchi di carbonio e zolfo. Gli acciai ASTM A 297 grado HK e HP figurano tra i materiali più utilizzati per la fabbricazione di questi tubi, la cui vita di progetto nelle condizioni di esercizio è tipicamente 100.000 ore, ma la durata effettiva in servizio, può oscillare tra le 150,000 e le 30,000 ore. La variabilità delle performances di questi componenti è legata alle condizioni di servizio, decisamente drastiche, che possono far insorgere e/o aggravare numerose forme di degrado a carico dei materiali costituenti.
In questo lavoro saranno descritte le principali forme di danno che colpiscono i tubi catalitici delle fornaci di reforming, illustrando parimenti le metodologie adottate dagli addetti ai lavori per la individuazione e valutazione dello stato di danneggiamento e della vita spesa.

Keywords: steam reforming, danneggiamento, esercizio.

1. Introduzione

Con il termine di steam reforming si definisce un processo industriale utilizzato per la produzione di syngas a partire da idrocarburi leggeri e vapore acqueo [1]. Tale processo è di norma articolato in due step: il primo di essi (detto reforming primario) vede reagire il metano (o gli idrocarburi leggeri) col vapor d'acqua, per dare idrogeno e monossido di carbonio:

$$C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (m/2 + n)H_2$$

La miscela di gas ottenuta con il reforming primario contiene per buona parte monossido di carbonio e idrogeno, tuttavia percentuali non trascurabili di idrocarburi ed acqua sono ancora presenti. Lo step successivo (reforming secondario) permette di eliminare i reagenti residui, facendoli reagire con l'ossigeno dell'aria, producendo altro idrogeno e monossido di carbonio. Nel bilancio energetico del processo, la reazione più delicata è quella di reforming primario, poiché si tratta di una reazione endotermica e perché richiede la presenza di un catalizzatore al

nichel. Il reforming secondario avviene invece senza dover ulteriormente somministrare energia né usare catalizzatori.
L'intero processo si fa avvenire in apposite fornaci contenenti grandi batterie di tubi [2-3]: la miscela di reagenti fluisce attraverso ciascun tubo e viene a contatto con il catalizzatore lì presente. I tubi sono mantenuti a temperature superiori agli 800-900°C mediante riscaldamento con appositi bruciatori (figura 1).
Alla luce di queste premesse, risulta evidente che i tubi catalitici delle fornaci siano componenti fortemente soggetti a danneggiamento, in quanto operano a temperature superiori agli 800 °C, con pressioni tra i 25 ed i 35 bar in atmosfera ossidante e con fluidi di processo ricchi di carbonio (e talvolta anche zolfo). Particolare influenza sui fenomeni di danno hanno anche la geometria costruttiva quale la SIDE WALL, con bruciatori disposti ortogonalmente all'asse dei tubi catalitici, sia le variabili del processo di combustione (P del combustibile, composizione chimica del combustibile, portata dell'aria comburente). Per la fabbricazione dei tubi catalitici ci si orienta su leghe che garantiscano prestazioni elevate in condizioni estreme. Tra i materiali più utilizzati figurano le leghe in Fe-Ni-Cr classificate come ASTM A 297 grado HK (25Cr20Ni0,4C) e HP (26Cr35Ni0,4C), ad elevato tenore di nichel e cromo, con aggiunte di elementi carburigeni come niobio e titanio [4-7]. Dal punto di vista metallurgico, nichel e cromo conferiscono adeguata resistenza alla corrosione, tenacità e stabilità della fase austenitica. L'elevato contenuto di carbonio rafforza la soluzione solida e promuove la formazione di una rete di carburi interdendritici e secondari di struttura e composizione diversa in funzione degli elementi presenti (Nb, Ti, W, Cr). L'insieme di questi precipitati migliora la resistenza alle alte temperature inibendo il movimento delle dislocazioni e lo scorrimento dei bordi di grano [8-11].
La vita di progetto dei tubi catalitici viene generalmente fissata a 100.000 ore [12]. L'effettiva durata in servizio di tali componenti presenta tuttavia ampie oscillazioni: sono noti in letteratura casi di tubi che hanno lavorato anche 180000 ore, come pure alcuni casi in cui la vita in servizio si è limitata a sole 30.000 ore [13].

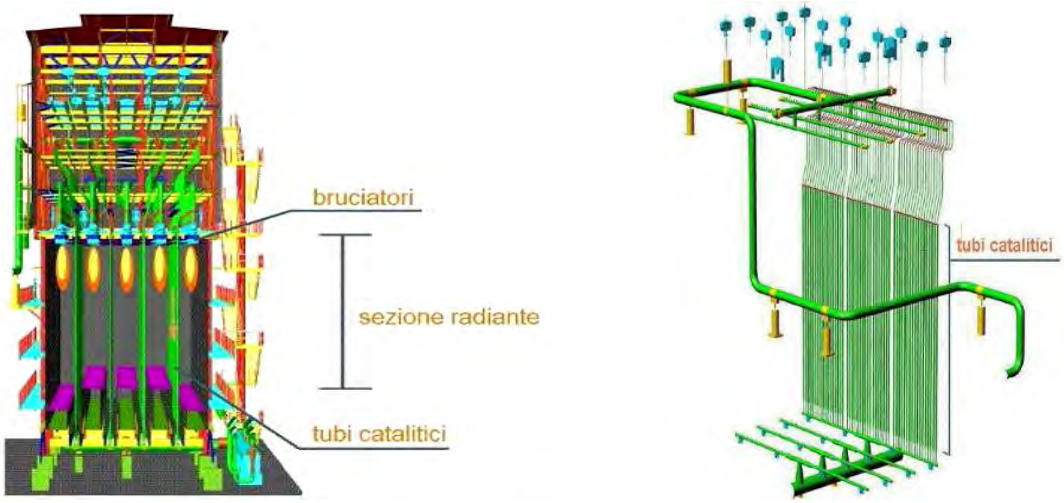
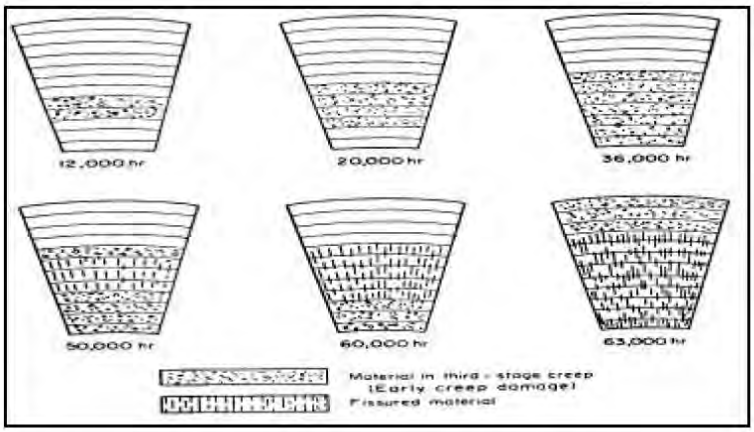


Figura 1. A sinistra: vista della sezione radiante di un forno di reforming; a destra: assonometrico di tubi catalici e pigtails [14].

Viste le drastiche condizioni in cui operano, i tubi catalitici sono particolarmente soggetti allo scorrimento viscoso [5,7,15]. L'esercizio prolungato provoca inoltre una naturale evoluzione microstrutturale, attraverso reazioni chimiche di precipitazione e trasformazione a carico delle fasi presenti [16-19]. Infine, può manifestarsi la carburizzazione [18-21], che impoverisce la matrice, riducendone il tenore di cromo, rendendola vulnerabile al creep e parimenti suscettibile alla corrosione.
In questa memoria vengono presentate e caratterizzate le forme di degrado cui sono soggetti i tubi di reforming, sono illustrate alcune tecniche diagnostiche adoperate per quantificare il danno e le attività dell'Istituto a livello autorizzativo e di ricerca.

2. Scorrimento viscoso

A differenza di quanto concerne gli acciai ferritici e ferritico-bainitici (ASTM A 335 grado 11 e grado 22), per i quali l'evoluzione del danno da creep è tematica nota e consolidata da criteri di valutazione e di stima della vita residua [22-23], il meccanismo di formazione e propagazione del creep non è stato ancora del tutto definito per le leghe usate nelle fornaci di reforming e non è stata ancora sviluppata una metodica universale per la valutazione del danno. In letteratura alcuni autori [13,24] riportano che esso nasce e si propaga a partire dalle pareti interne dei tubi catalitici. E' stato anche proposto [13] un criterio di valutazione del danno sulla falsariga di quello di Neubauer: come si vede in figura 2, assegnato al materiale integro il grado A, il fenomeno si manifesta all'inizio con cavità isolate (grado B) che compaiono dapprima nel primo terzo del tubo (a partire dalla superficie interna), per poi estendersi anche al 50% della sezione (grado C); la comparsa di microcricche radiali nel primo terzo implica un aggravarsi della situazione (grado D), che infine si esacerba con formazione di vere e proprie cricche (grado E), che possono interessare fino ai due terzi dello spessore.
Altri autori [25-26] hanno riscontrato sperimentalmente un andamento simile, mostrato in figura 3. Le cavità iniziano a comparire vicino alla superficie interna, ma senza interessare la fascia di materiale proprio a ridosso di essa, per poi propagarsi in maniera omogenea sia verso la parete interna che verso quella esterna; gli autori



hanno individuato microcricche a partire dalle 50000 ore di servizio, mentre una volta superate le 65000 ore di vita spesa il tubo in esame risultava oramai fortemente danneggiato, con microcricche sui due terzi dello spessore.
Figura 2. Criterio di valutazione del danno da creep per gli acciai ASTM A 297 grado HK, HP e simili [13].

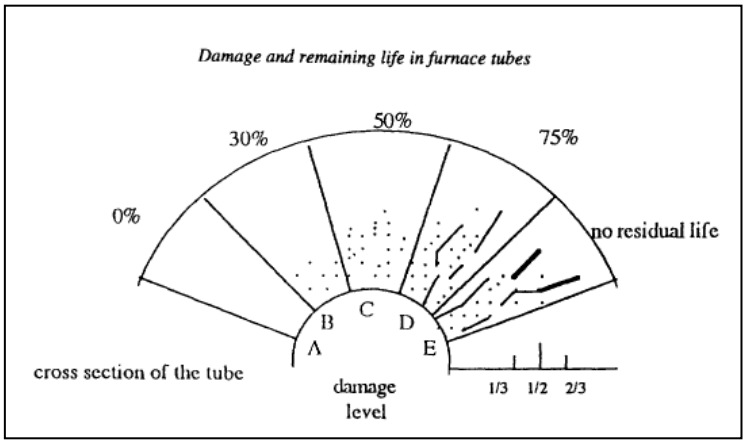


Figura 3. Criterio alternativo di valutazione del danno da scorrimento viscoso per gli acciai ASTM A 297 grado HK, HP e simili [25].

Una caratteristica importante dello scorrimento viscoso sui tubi catalitici è che può interessare porzioni limitate di materiale: questo fa sì che non sia sempre facilmente individuabile a meno di non eseguire un'indagine accurata. A volte le aree surriscaldate (hot spots) sono riconoscibili per via della loro caratteristica colorazione rossastra [27].
Quando il danno da creep è invece più avanzato, solitamente dopo le 60000 ore di servizio, si può riscontrare un'apprezzabile deformazione dei tubi, che possono arcuarsi notevolmente per tutta la loro lunghezza, oppure rigonfiarsi localmente, a volte presentando anche micro e macro-cricche o vere e proprie spaccature nelle zone maggiormente deformate [27].

3. Evoluzione microstrutturale

La prolungata attività in esercizio provoca una graduale evoluzione della microstruttura attraverso reazioni chimiche di precipitazione e trasformazione a carico delle seconde fasi originariamente presenti nella matrice [18-21]. Ciò comporta un graduale abbassamento delle caratteristiche fisiche e meccaniche del materiale [13]. Di tale comportamento viene tuttavia tenuto conto in fase di progettazione, cosicché l'invecchiamento in sé non è considerato un danno grave. D'altra parte, poiché altera la composizione chimica e la distribuzione degli elementi di lega nella matrice, essa può rendere più vulnerabile il materiale ad altri fenomeni di danneggiamento, come lo scorrimento viscoso, la corrosione e la carburizzazione [19-20, 28-30].

In figura 4 sono riportate alcune micrografie - eseguite presso il laboratorio III del DIT in occasione di studi di ricerca e failure analysis - di sezioni radiali di tubi catalitici in cui si può osservare il materiale a differenti stadi di evoluzione microstrutturale.

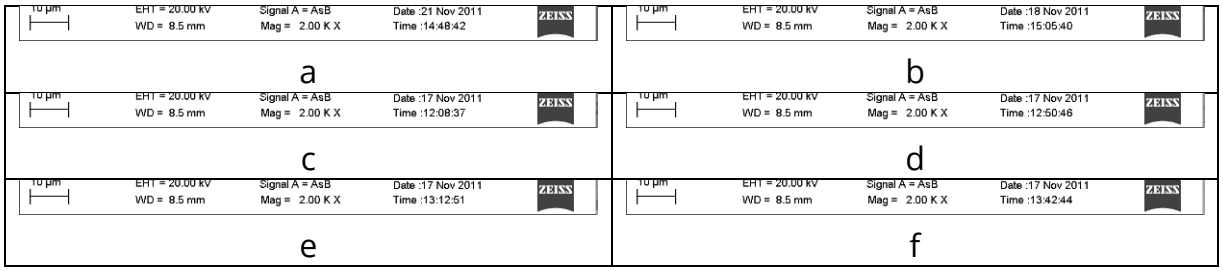


Figura 4. L'evoluzione della microstruttura in alcuni campioni provenienti da tubi catalitici: (a) stadio I; (b) stadio II (c) stadio III; (d) stadio III-IV; (e) stadio V; (f) stadio VI. Sezioni radiali, micrografie SEM su provini as polished.
Materiale proveniente da studi condotti dagli autori presso Inail - DIT - Laboratorio III.

Studi mirati, effettuati su campioni metallici invecchiati artificialmente, hanno permesso di delineare [13] con ragionevoli approssimazioni i vari fenomeni di invecchiamento e degrado microstrutturale a cui possono andare incontro le leghe usate per i tubi catalitici: precipitazione di carburi secondari di cromo, ingrossamento delle seconde fasi preesistenti e precipitazione di nuove fasi (G-phase) a spese del carburo di niobio [18-20]. Il ruolo principale nel quadro di evoluzione della microstruttura è rivestito dalla temperatura, mentre il tempo risulta meno influente, pertanto, a determinare l'invecchiamento del materiale non sarà tanto la lunghezza dell'esposizione ma più che altro il livello raggiunto dalla temperatura in esercizio.
Per temperature di parete inferiori a 600°C (stadio I) non si assiste ad alterazione della morfologia delle seconde fasi. Fra 600°C e 700°C (stadio II) i carburi primari (interdendritici) si aggregano e si ha una precipitazione di carburi secondari (di forma sferica o aghiforme) all'interno del grano. Nell'intervallo 700-800°C (stadio III) l'evoluzione si fa più accentuata: si registra infatti un forte ingrossamento dello scheletro di carburi primari, accompagnato dalla trasformazione del carburo di Nb in G-phase, mentre prosegue la precipitazione dei carburi secondari, che però rimangono di piccole dimensioni e finemente dispersi all'interno del grano.
Fra 800°C e 900°C (stadio IV) la morfologia dei carburi primari non varia rispetto allo stadio precedente, mentre i carburi secondari si aggregano tra loro diminuendo di numero, ma aumentando di dimensioni. Questa tendenza diviene ancora più accentuata (stadio V) se il materiale è esposto a temperature tra 900°C e 1000°C, mentre sopra i 1000°C (stadio VI) i carburi secondari scompaiono disciogliendosi nella matrice e la G-phase si decompone in carburo di Nb e restituisce Ni e Si alla matrice, cosicché la microstruttura ricorda molto il materiale non esercito.

4. Carburizzazione

Durante il processo di steam reforming è possibile avere un deposito di carbonio (coking) sulla superficie interna dei tubi (figura 5); ciò può accadere in seguito a piccole oscillazioni rispetto alle esatte concentrazioni dei reagenti o in seguito ad avvelenamento del catalizzatore [2,31].

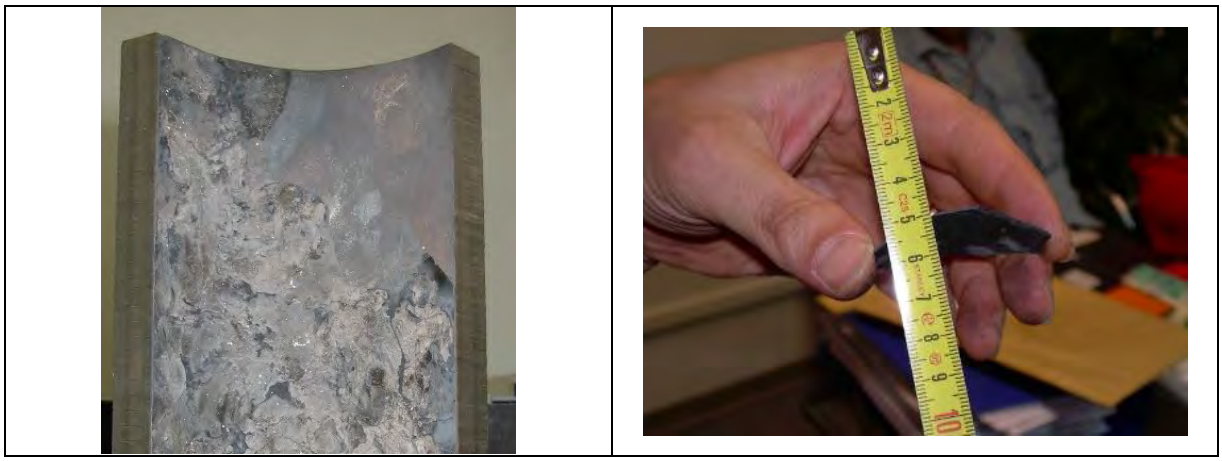
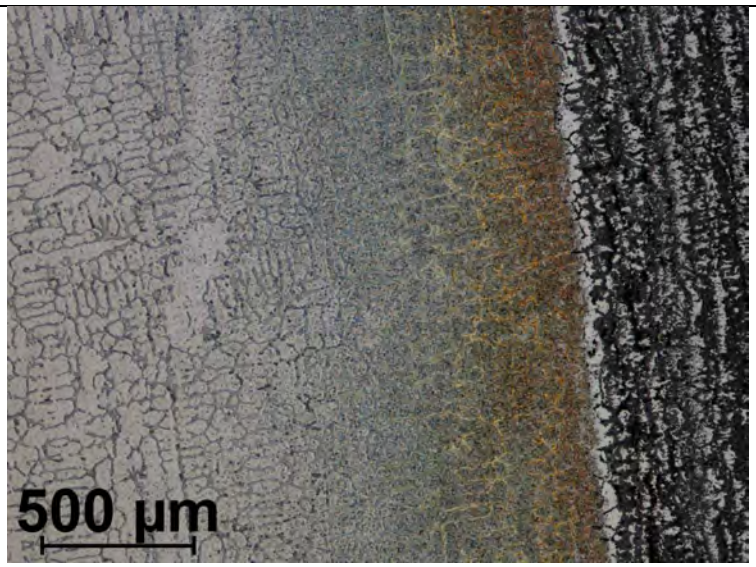


Figura 5. A sinistra: tubo catalitico con depositi di coke sulla superficie interna. A destra: scaglia di coke recuperata dai depositi lungo le pareti del tubo. Materiale proveniente da studi condotti dagli autori presso Inail - DIT - Laboratorio III. [14,19-20]

La presenza di depositi di coke sulla superficie interna influisce negativamente sulle prestazioni del tubo in quanto comporta la disattivazione del catalizzatore, causa una riduzione dello scambio termico tra metallo e fluido di processo riducendo le rese, fa innalzare la temperatura di pelle dei tubi causando locali surriscaldamenti ed infine favorisce la penetrazione del carbonio nella matrice metallica, ove tale elemento si combina con gli elementi di lega (soprattutto il cromo), causando massiccia precipitazione, impoverendo la matrice stessa e rendendola estremamente vulnerabile ad attacchi corrosivi ed allo scorrimento viscoso. In casi di forte attacco, il tenore di cromo che rimane dissolto nella matrice si riduce a tal punto che il materiale, da paramagnetico, diviene ferromagnetico, trasformandosi grossomodo in una lega ferro-nichel al cui interno sono dispersi abbondantissimi carburi di cromo [19-21].

Basandosi sulla microstruttura, alcuni autori hanno proposto una classificazione del danno da carburizzazione in base alla densità e alle dimensioni dei precipitati osservabili su campioni metallografici [21]. Partendo dal grado A (materiale non carburizzato) vengono descritti tre livelli di danno crescente: carburizzazione moderata (livello B) in cui si nota una leggera coalescenza dei carburi primari e un gradiente dimensionale che aumenta lievemente man mano che ci si avvicina alla superficie interna dei tubi (che, essendo a contatto coi fluidi di processo, è solitamente l'area di accesso del carbonio nel materiale); carburizzazione intensa (livello C), in cui l'ingrossamento dei carburi presso la superficie interna è

accompagnato da un cambio di morfologia degli stessi, e si assiste anche ad una evidente precipitazione di carburi secondari; carburizzazione estrema (livello D) in cui lungo tutto lo spessore del tubo si registra una precipitazione massiccia, ed in cui, presso la superficie interna, il materiale, assume l'aspetto di un sistema bifasico, costituito da una matrice a base Fe-Ni, e da carburi di Cr fortemente ingrossati ed aggregati.
In figura 6 è riportata una panoramica a bassi ingrandimenti della sezione radiale di un tubo che ha sofferto evidente carburizzazione [19]: a sinistra (lato bulk) la microstruttura è ancora riconoscibile, con la matrice austenitica solcata da numerosi e grossi precipitati interdendritici e punteggiata da carburi secondari. Avvicinandosi alla superficie interna (a destra nella micrografia) i precipitati si fanno sempre più grossolani e la matrice tende a scomparire fino a quando, presso la superficie interna (estrema destra), il materiale cambia radicalmente microstruttura e si presenta come un sistema bifasico in cui abbondano cricche e fessurazioni. Secondo il criterio descritto in [21] si può parlare di carburizzazione estrema (livello D).



a

Figura 6. Carburizzazione su acciaio HP di un tubo catalitico: sezione radiale, provino attaccato con reagente di Groesbeck. Micrografia LOM eseguita presso Inail - DIT - Laboratorio III [19].

La figura 7 riporta un secondo esempio di materiale carburizzato, col danno che parte sempre dalla superficie interna e penetra nel materiale sotto forma di cricche e cavità sviluppatesi lungo le catene di carburi.

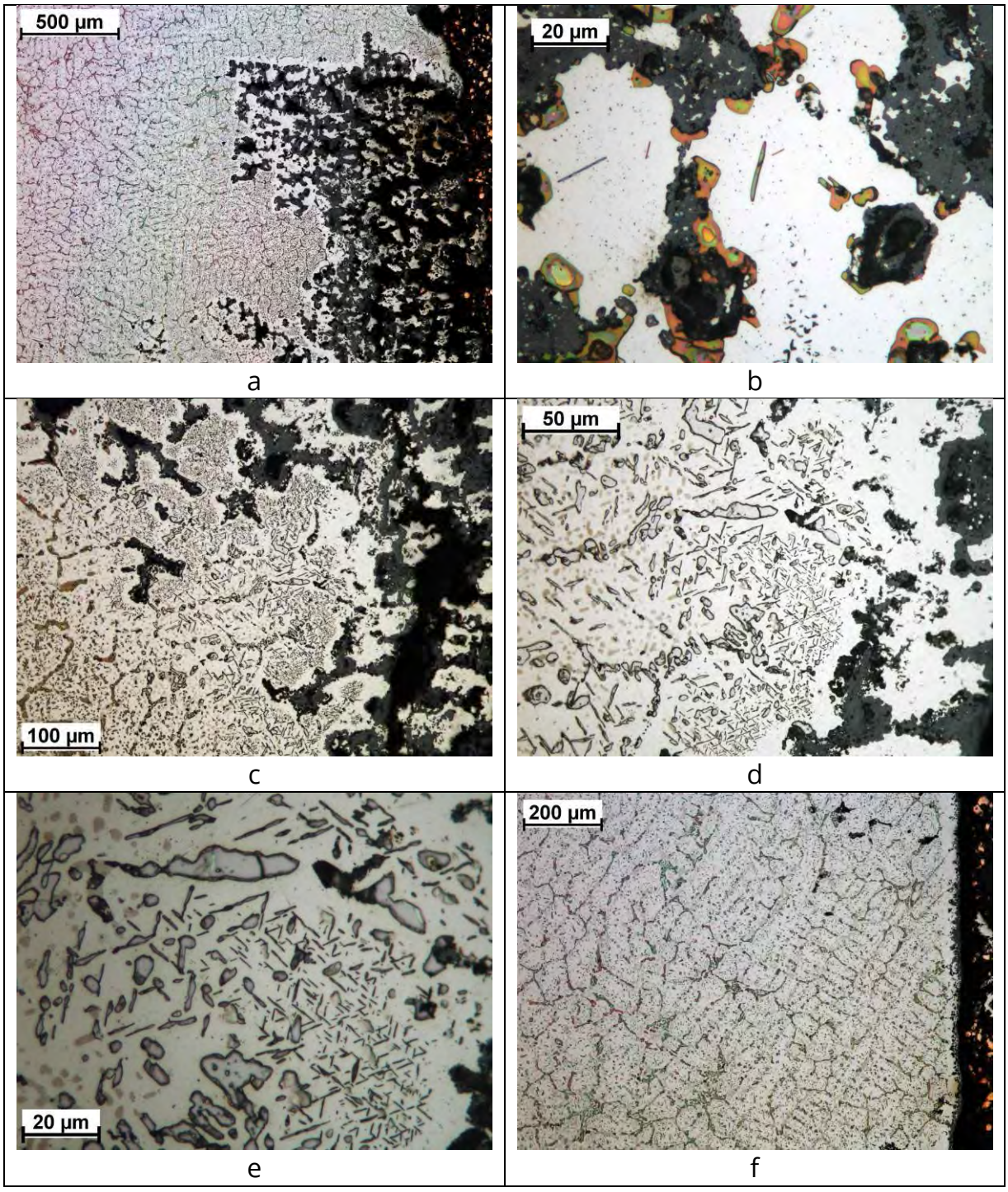


Figura 7. Carburizzazione su tubo catalitico in acciaio HP: (a) panoramica dal lato superficie interna (a destra); (b) carburizzazione avanzata sulla superficie interna; (c) (d) dettagli dei precipitati e del danno che penetra nella matrice; (e) carburi secondari aghiformi nelle zone maggiormente colpite; (f) superficie interna in una zona non danneggiata dello stesso tubo.

Micrografie LOM di sezioni radiali. Provini attaccati con reagente di Groesbeck

Eseguite presso Inail - DIT - Laboratorio III [32].

Sono evidenti gli effetti della precipitazione del cromo sulla resistenza a corrosione della matrice e sulla formazione di cavità e cricche che penetrano nel materiale. Si notano inoltre numerosi precipitati aghiformi (carburi secondari di cromo) localizzati nelle aree danneggiate. Il danno su questo tubo è presente soltanto in alcune zone, dove penetra a fondo nel materiale, mentre in altre è del tutto assente [32].

5. Metodiche di valutazione del danno

Generalmente, le condizioni effettive in cui versa un tubo di reforming durante la sua vita in servizio saranno funzione di una combinazione delle forme di danno precedentemente descritte: creep, carburizzazione, evoluzione microstrutturale. Si tratta di fenomeni di degrado che possono insorgere sia indipendentemente l'uno dall'altro, sia contemporaneamente. Non è raro che una singola forma di danno favorisca l'attacco di altre tipologie [14,19,32]: ad esempio, modifiche nella microstruttura, dovute alla precipitazione di seconde fasi, possono promuovere lo scorrimento viscoso, fungendo da centri di nucleazione delle cavità. La carburizzazione esacerba il danno da creep, ma favorisce anche la corrosione, dato che impoverisce la matrice di cromo e distrugge il film protettivo di ossido. Solitamente, quindi, le tecniche diagnostiche utilizzate per valutare le condizioni in cui versano i tubi di reforming finiscono per valutare non una specifica forma di danno, ma l'insieme e la combinazione di più forme, in cui generalmente lo scorrimento viscoso è quella più evidente e dagli effetti più pronunciati.
Tra le varie tecniche diagnostiche a disposizione degli addetti ai controlli, l'esame metallografico garantisce un'elevata affidabilità e riproducibilità sia nell'individuare la tipologia di danno, sia nel valutare il livello di degrado subito dal materiale (e la conseguente vita spesa). Alla base dei vari criteri di quantificazione del danno vi è infatti generalmente l'esame della microstruttura, come è stato illustrato nei paragrafi precedenti. Se si sceglie questo approccio investigativo, va prestata particolare attenzione al campionamento, che deve essere quanto più accurato e rappresentativo del componente nella sua interezza ed in tutto il suo sviluppo dimensionale [13,16]. Non è infatti raro che le forme più pericolose di danno limitino la propria presenza a porzioni ristrette di un componente, di solito quelle più sollecitate fisicamente o termicamente: nel caso dei tubi di reforming, dovranno scegliersi le aree in prossimità di bruciatori, le saldature e in genere tutte le zone sottoposte ai maggiori stress termici e meccanici. La preparazione del campione è un secondo aspetto critico: alcuni dettagli strutturali come cavità o precipitati molto fini possono essere rilevati in maniera chiara solo dopo accurati (e a volte ripetuti) cicli di lucidatura ed attacco metallografico [33]. Le loro dimensioni nei primi stadi di danno, peraltro, li rendono difficili da osservare in microscopia ottica cosicché l'esame al SEM si rende, se non indispensabile, almeno fortemente raccomandato.
L'esame metallografico risente purtroppo di una forte limitazione, dovuta all'impossibilità di avvalersi della metodica della replicazione. Quest'ultima, infatti, non può infatti essere applicata perché i segni di danneggiamento sulla superficie

esterna (l'unica raggiungibile per un prelievo) compaiono soltanto quando il componente è giunto a fine vita, o poco prima [13,16]. Per questa ragione, dunque, quantificare la vita spesa di una batteria di tubi di reforming mediante esame della microstruttura implicherà necessariamente un approccio distruttivo, poiché richiederà di sacrificare almeno un tubo su cui operare le varie analisi ed osservazioni microscopiche. Non è tuttavia infrequente che, in occasione di fermate, vengano rimossi due o tre tubi da destinare ad un esame approfondito delle loro condizioni: su di essi è generalmente eseguito anche l'esame metallografico, che diviene quindi parte integrante del pool di controlli effettuati su tali componenti di impianto. Solitamente, ciascun tubo sacrificato verrà campionato in più punti (per avere un quadro quanto più dettagliato su tutta la lunghezza del tubo) e si preleveranno provini dell'intera sezione trasversale, per avere contezza dello stato del materiale sia in corrispondenza della superficie, sia nel cuore del pezzo. Un approccio distruttivo di questo tipo consente inoltre di effettuare altre misure come ad esempio l'esame della durezza, indicato per evidenziare eventuali siti di carburizzazione o massiva precipitazione. Quando possibile, è inoltre vantaggioso sottoporre il tubo sacrificato anche ad un esame preliminare con i liquidi penetranti, al fine di effettuare una mappatura estesa del componente [13] ed individuare le aree maggiormente danneggiate da sottoporre ad approfondite analisi metallografiche. Le indicazioni fornite dall'esame del componente sacrificato potranno quindi essere utilizzate per migliorare le prestazioni dei componenti suoi omologhi presenti nell'impianto, adottando se necessario, le opportune strategie di prevenzione o limitazione del danno.

Notevolmente apprezzate e largamente impiegate sui tubi delle fornaci sono anche le indagini non distruttive (CND). Esse hanno l'innegabile vantaggio di non sacrificare i componenti d'impianto [24-25,34-35]. Tra i metodi più largamente usati per monitorare il danno subito dai tubi ci sono le correnti indotte e la profilometria, di cui verrà fatta una breve descrizione; altre valide tecniche adoperate sono le radiografie e gli ultrasuoni. In determinate situazioni possono essere usati anche i controlli magnetoscopici.

Il controllo a correnti indotte (eddy current) è un metodo non distruttivo basato sul principio fisico dell'elettromagnetismo [36]. Una sonda, solitamente una bobina alimentata a corrente alternata, posta in prossimità o a diretto contatto col pezzo da esaminare, genera un campo magnetico che investe il pezzo stesso. Il materiale del pezzo reagisce a sua volta al campo, generando una corrente elettrica detta corrente indotta o corrente parassita. La bobina risente dell'effetto della corrente indotta e registra una risposta a livello di impedenza del circuito, che, in assenza di difetti, farà registrare un determinato valore. Eventuali discontinuità presenti, sulla superficie del pezzo o al suo interno, influenzano l'intensità ed il percorso delle correnti indotte e conseguentemente vanno a modificare l'impedenza del circuito, la cui variazione sarà misurabile e associabile quindi alla presenza di difettosità.

Riguardo alle ispezioni sui tubi catalitici, questo metodo risulta particolarmente valido e versatile per individuare discontinuità associate in particolare alla geometria del componente, come cricche, deformazioni, inclusioni o variazioni dello spessore. Più in generale il metodo a correnti indotte permette di rilevare anche la minima disomogeneità di un materiale conduttore, sia essa determinata da variazione di tipo geometrico, elettrico o magnetico. In condizioni ottimali è possibile rilevare difetti fino a 30 μm. Un vantaggio della tecnica è che non prevede contatto, per cui non è richiesta una preparazione preliminare delle superfici e dei componenti da monitorare. Un'ulteriore caratteristica del metodo a correnti indotte, che ne rende molto vantaggioso l'utilizzo è la sua relativa economicità (strumenti poco costosi e manutenzioni ridotte).

Un'altra promettente strategia di valutazione del danno sui tubi di reforming mediante CND prende spunto dalla loro deformazione: le alte temperature a cui sono sottoposti possono comportare infatti un fenomeno di ovalizzazione dei tubi, che viene monitorato mediante lettura in continuo a mezzo laser del diametro interno (Laser Optic Tube Inspection System, o metodo LOTIS). Una sonda laser rotante (1500 rpm) viene inserita all'interno di un tubo catalitico e percorrendolo genera una mappa della superficie interna, misurando il diametro interno (D_{in}) del tubo stesso, con un'elevata risoluzione (si parla di valori intorno a 0.5 μm). Noto il diametro nominale (D_{out}), la deformazione (ε) può essere misurata con una precisione inferiore allo 0,5% e viene calcolata con una formula semplice [37]:

$$\varepsilon = (D_{in} - D_{out}) / D_{out}$$

Si sceglie quindi un valore soglia di deformazione, di solito in base all'esperienza già accumulata sull'impianto: se un tubo presenta ε superiore a tale soglia viene dismesso, altrimenti resta in servizio fino al successivo ciclo di controlli.

Quando un componente viene dismesso in seguito all'esito di CND, può essere vantaggioso eseguire su di esso un'analisi con le consuete tecniche distruttive (prove meccaniche ed analisi metallografiche) [19-20, 37-38]. I riscontri ottenuti con queste analisi sono in grado di definire con grande accuratezza lo stato del materiale e consentono di stimare con ragionevole fiducia la vita residua del componente.

L'impego sinergico di più tecniche è senza dubbio la strategia più promettente: solitamente si esegue un primo esame sui tubi mediante controlli non distruttivi e in funzione delle evidenze risultanti si fornisce una stima del danno e della vita residua. I componenti che risultano danneggiati vengono rimossi e analizzati con tecniche distruttive, in modo da identificare e caratterizzare il danno. I risultati delle prove distruttive sono poi utilizzati per corroborare e/o validare il criterio di selezione sviluppato col metodo non distruttivo e concorrono al suo continuo sviluppo ed affinamento.

L'insieme dei dati ottenuti dalle varie metodologie di indagine viene quindi usato per implementare programmi di gestione dell'impianto, in grado di elaborare analisi statistiche. Vengono monitorate le proprietà del materiale, insieme con i parametri di processo e si effettua in parallelo la stress analysis; si ottengono infine risultati che

forniscono con buon grado di confidenza le probabilità di rottura dei tubi dopo un determinato numero di ore in servizio [25].

6. Le attività di ricerca e verifica dei laboratori Inail nel settore

Da quando sono state installate e attivate le prime fornaci di steam reforming sul territorio italiano, Inail (e prima ancora Ispesl) non ha fatto mancare il suo supporto a livello di autorizzazione all'esercizio, fitness for service, analisi dei guasti e ricerca applicata. Il personale del DIT effettua collaudi presso gli stabilimenti di produzione esteri in cui vengono fabbricate membrature e pezzi di ricambio per forni di cracking e di reforming, come ad esempio tubi centrifugati, curve fuse, pezzi a Y fusi, coni, flange e pezzi a T centrifugati in verticale, collettori.
Da un punto di vista formale, non essendo i materiali in questione compresi nella Raccolta M, il fabbricante procede con una richiesta di autorizzazione all'impiego presso L'Inail; l'autorizzazione viene discussa all'interno del Comitato Tecnico Materiali e Collegamenti delle Attrezzature a Pressione, previo invio di scheda di accettazione. Per valutare la conformità al processo di fabbricazione della ditta l'ispettore Inail in primis controlla presso il laboratorio del fabbricante che i risultati delle prove meccaniche eseguite sui provini abbiano valori accettabili. Successivamente esegue il controllo visivo, dimensionale, la lettura radiografica delle saldature, procede col test dei liquidi penetranti sulle saldature e presenzia alla prova idraulica finale in pressione sulle componenti da esaminare. In ultimo, se ogni test ha successo, appone data e punzone Inail sulle membrature dei pezzi di ricambio, che possono quindi venire utilizzate.
Per quanto concerne le riparazioni e quant'altro si rende necessario durante la vita in servizio di un impianto, le unità territoriali hanno fornito (e continuano tutt'ora a fornire) il loro supporto alle realtà industriali valutando studi di fitness for service.
L'attività di ricerca dell'Istituto, inoltre, si è spesso concentrata sullo studio dei materiali impiegati per la costruzione di tubi di reforming. Sono stati effettuati dei case studies su alcuni componenti eserciti, dismessi in occasione di fermate di impianto, che hanno consentito di determinare le cause di rottura o di riduzione delle prestazioni che avevano portato alla loro dismissione [14,19,32]. In altre occasioni sono stati studiati materiali, sia nuovi che eserciti, per caratterizzarli dal punto di vista chimico e metallurgico, studiando come la struttura e le proprietà meccaniche variassero in funzione della vita spesa e della composizione chimica [20]. Esaminando i parametri di processo e le procedure di manutenzione/pulizia fornite dagli impianti è stato inoltre possibile determinare quali condizioni fossero più conservative e quali pratiche più vantaggiose nel mantenere i tubi in condizioni di efficienza e sicurezza per lungo tempo [14,19].

Bibliografia

[1] Larsen J.; Radtke K.; Ruthardt K. "Hydrogen Trends" Hydrocarbon Engineering,November 2005, pp. 41-46.

[2] De Silveira, T.L.; Le May, I. "Reformer furnaces: materials, damage mechanisms, and assessment" *The Arabian Journal for Science and Engineering* 31, 2006, vol.31, 99-119.

[3] Ruthardt, K.; Smith, M.; von Trotha, T. "Reliability and Availability-Integrated hydrogen production schemes for refineries" 2nd Iran Oil Refining Forum Tehran, Iran 11 – 12 October 2008.

[4] ASM Handbook N° 9 "Metallography and Microstructures" 2004 ASM International

[5] Schillmoller, C.M. "Solving high temperature problems in oil refineries and petrochemical plants" *Chemical Engineering*, 1986 vol. 93. p 83-87.

[6] Schillmoller, C.M; Van Der Bruck, U.W. "Furnace alloys update" *Hydrocarbon Proc*. 1984 vol. 63 p. 55-59.

[7] Parks, S.B.; Schillmoller, C.M "Use alloys to improve ethylene production" *Hydrocarbon Proc*. 1996 vol. 75 p. 53-60.

[8] De Almeida, L.H.; Ribeiro, A.F.; Le May, I. "Microstructural characterization of modified 25Cr-35Ni centrifugally cast steel furnace tubes" *Mater. Charact.* 2003 vol. 49 p. 219-229.

[9] Barbabela, G.D.; De Almeida, L.H.; Da Silveira, T.L.; Le May, I. "Role of Nb in modifying the microstructure of heat-resistant cast HP steel" *Mater. char.* 1991; vol. 26 p. 193-197.

[10] De Almeida Soares, G.D.; De Almeida, L.H.; Da Silveira, T.L.; Le May, I. "Niobium addition in HP heat resistant cast stainless steels" *Mater. Charact.* 1992 vol. 29 p. 387-396.

[11] Ibañez, R.A.P.; De Almeida Soares, G.D.; De Almeida, L.H.; Le May, I. "Effects of Si content on the microstructure of modified-HP austenitic steels" *Mater. Charact.* 1993 vol. 30 p. 243-249.

[12] "Calculation of Heater-Tube Thickness in Petroleum Refineries", API Recommended Practice 530, 3rd Edition, American Petroleum Institute, Washington, DC, 1988.

[13] Le May, I.; Da Silveira, T.L.; Vianna, C.H. "Criteria for the evaluation of damage and remaining life in reformer furnace tubes". *Int. J. Pres. Ves. & Piping.* 1996 vol. 66 p. 233-241.

[14] Alvino, A.; Mazzocchi, V.; Delle Site, C.; Giacobbe, F.; "Influenza delle condizioni di esercizio sul degrado di tubi in acciaio per impieghi ad alte temperature nell'industria petrolchimica" Giornate Nazionali sulla Corrosione e Protezione, Udine 24-26 giugno 2009.

[15] Hendrix, D.E. "Cast tube alloy performance in an ethylene pyrolisis test heater" *Mater. Perform.* 1999, vol. 38, p. 66-71.

[16] Swaminathan, J.; Guguloth, K.; Gunjan, M.; Roy, P.; Ghosh, R. “Failure analysis and remaining life assessment of service exposed primary reformer heater tubes” *Eng. Fail. Anal*. 2008, vol. 15, p.311-331.

[17] Voicu, R.; Andrieu, E.; Poquillon, D.; Furtado, J. ; Lacaze, J. “Microstructure evolution of HP40-Nb alloys during aging under air at 1000 °C” *Mater. Charact.* 2009 vol. 60 p. 1020-1027.

[18] Ribeiro, A.F.; Tavares Borges, R.M.; De Almeida, L.H. “Phase transformation in heat resistant steels observed by Stem. (NbTi)C – NiNbSi (G-Phase)” *Acta Microscopica* 2002 vol. 11 p. 59-63.

[19] Alvino, A.; Lega, D.; Giacobbe, F.; Mazzocchi, V.; Rinaldi, A. “Damage characterization in two reformer heater tubes after nearly 10 years of service at different operative and maintenance conditions” *Eng. Fail. Anal.* 2010, vol. 17, p. 1526-1541.

[20] Alvino, A.; Ramires, D.; Tonti, A.; Lega, D. “Influence of chemical composition on microstructure and phase evolution of two HP heat resistant stainless steels after long term plant-service aging” *Mater. High Temp.* 2014 *31* 2-11.

[21] Da Silva, I.C.; Da Silva, R.S.; Rebello, J.M.A.; Bruno, A.C.; Silveira, T.F.; “Characterization of carburization of HP steels by non destructive magnetic testing” *NDT&E International* 2006 vol. 39, p. 569-577.

[22] Neubauer, B.; Wedel, V. “Restlife estimation of creeping components by means of replicas” In *ASME International Conference on Advences in Life Prediction Methods*, eds D.A. Woodford & J.R. Whitehead, ASME, New York, 1983 353-356.

[23] Linea Guida Ispesl S.6 LG V1, Linea guida raccomandata per la valutazione della vita residua di componenti esercìti in regime di scorrimento viscoso.

[24] Gommans, R.J. “Life Assessment and Inspection Techniques in Reformer Furnaces”. 6th Schmidt + Clemens Group Symposium Bali 2002.

[25] Mateša, B.; Bodenberger, R.; Sachs, B.P.; Pecić, V. “Non-destructive testing in predicting of processing furnace remaining life” *NDT for Safety* 2007, 7-9 November, Prague (CZ)

[26] Jaske, C.E.; Simonen, F.A.; Roach, D.B. “Predict reformer furnace tube life” *Hydrocarbon Proc*. 1983, January, p. 63-66.

[27] Singh, R.; “Residual Life Assessment of Reformer Tubes” NDE 2017 Conference & Exhibition of the Indian Society for NDT (ISNT) Chennai, TN, India, 14-16 December 2017.

[28] Gong, J.M.; Tu, S.T.; Yoon, K.B. “Damage assessment and maintenance strategy of hydrogen reformer furnace tubes” *Eng. Fail. Anal.* 1999, vol. 6 (3), p. 143-153.

[29] Liu, C.J.; Chen, Y. “Variation of the microstructure and mechanical properties of HP 40 Nb hydrogen reformer tube with time at elevated temperature”. *Mater. Design* 2011, vol. 32, p. 2507-2512.

[30] Dao, V. H.; Song, J. S.; Kim, J. Y.; Yoon, K. B. “Creep deformation characteristics of microalloyed HP40Nb steel at 950°C” *J. Mech. Sci. Technol.* 2019 vol.33 (10) 4813-4821

[31] Ruthardt, K.; Radtke, K.R.; Larsen, J. ”Hydrogen trends” *Hydrocarbon Eng*. 2005, vol.November.

[32] Alvino, A.; Antonini, A.; Lega, D.; Mennuti, C.; Tonti, A. “Damage characterization of heat resistant steels after long service in reforming plants” ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, Vancouver, British Columbia, Canada 17-21 luglio 2016.

[33] De Silveira, T.L.; Le May, I.; “Effects of metallographic preparation procedures on creep damage assessment” *Mater. Charact.* 1992 vol. 28 p. 75-85.

[34] Das, G.; Dutta, D.; Boral, K.; Seal, G.; “Advanced NDTs for Inspection of Catalyst Tubes of Reformer Furnace” Asia Pacific Conference on Non-Destructive Testing (14th APCNDT), Mumbai, India, November 18-22, 2013. e-Journal of Nondestructive Testing Vol. 19(2).

[35] Shannon, b.; Jaske, C.; “A Comprehensive Approach to Reformer Tube Inspection and Assessment” Second Middle East Nondestructive Testing

[36] Nondestructive Testing Handbook, Vol. 5: Electromagnetic Testing (ET), 3rd ed. ASNT International.

[37] Guglielmino, E.; Pino, R.; Servetto, C.; Sili, A. “Damage investigation on welded tubes of a reforming furnace” *La Metallurgia Italiana* 2015 vol. gennaio, 53-58.

[38] Bonaccorsi, L.; Guglielmino, E.; Pino, R.; Servetto, C.; Sili, A. “Damage analysis in Fe-Cr-Ni centrifugally cast alloy tubes for reforming furnaces”, Eng. Failure Anal. 2014, vol. 36, 65-74.

Utilizzo di dispositivi mobili per l'attività di monitoraggio dello stato degli impianti

A. Mura, A. Rubinato, M. De Martin, M. Bonetto, D. Realdon

Antea S.r.l.

Abstract

La memoria ha come obiettivo la presentazione e l'analisi delle possibilità di utilizzo di dispositivi mobili per l'esecuzione di attività di monitoraggio delle attrezzature d'impianto.
Tali strumenti, che attraverso specifiche applicazioni permettono la connessione istantanea ad un database integrato per la gestione dei dati di Asset Integrity (Integrity Data Management System), offrono grandi potenzialità in termini di ottimizzazione del lavoro e di risparmio di tempi e costi.
A dimostrazione di ciò esiste già qualche applicazione pratica presso clienti nel settore petrolchimico, di cui non vengono citati i dettagli per questioni di privacy. Tuttavia, l'intera memoria trae ampio spunto da questi casi pratici.
Questi sono gli obiettivi principali che si vogliono raggiungere con l'utilizzo di soluzioni mobile:

- Identificazione immediata delle attrezzature attraverso l'utilizzo di QR Code.
- Accesso ad informazioni (dati di progetto, dati ispettivi, modelli 3D, risultati di analisi di rischio e altro) e documenti (disegni costruttivi, isometrici, certificati e altro) fondamentali all'esecuzione delle attività direttamente dal campo.
- Inserimento on site di dati, di risultati di controlli/verifiche/ tarature e di anomalie per avere una valutazione immediata dei risultati.

Oltre alla descrizione delle singole applicazioni sviluppate, verranno proposti i workflow operativi e le modalità di lavoro anche in base all'esperienza dei progetti operativi esistenti.
Inoltre, verranno inserite delle note sulla scelta degli apparecchi ATEX disponibili sul mercato.
Infine, verranno presentati ulteriori piani di sviluppo di applicazioni al fine di incrementare le aree di gestione coinvolte e di ottimizzazione attraverso l'utilizzo di applicazioni mobile.
Ovviamente tali strumenti di integrazione forniscono risultati ottimali a condizione che vengano identificati e rispettati dei workflow procedurali adeguati.

Keywords: mobile device, mobile applications, asset Integrity.

1. La piattaforma attuale

L'attuale piattaforma è un software che ha come obiettivo la gestione dell'integrità di tutte le attrezzature presenti in un impianto.
Sviluppata per consentire l'accesso direttamente dal web, è in grado di integrare la gestione delle attività ispettive e manutentive secondo secondo metodologia/procedura RBI (Risk-Based Inspection) con grafiche interattive di navigazione 2D per la documentazione d'impianto e 3D per la consultazione del digital twin dell'impianto, attraverso modelli 3D e acquisizioni da laser scanning.
La struttura del software, come rappresentato nello schema di Fig. 1, è composta da una sezione centrale di Asset Management e da moduli di dettaglio che permettono la gestione specifica di determinate tipologie di attrezzatura (apparecchiature a pressione, tubazioni, attrezzature elettriche e strumentali, pipeline, strutture e altro).
Tale struttura assicura una gestione centralizzata ed integrata dei dati provenienti da fonti diverse, ma anche una gestione dettagliata di funzionalità peculiari a certe categorie di attrezzature.
A tale scopo sono stati inseriti moduli di calcolo specifici che aiutano gli analisti ad effettuare valutazioni tecniche sulla base di dati reali ed aggiornati.

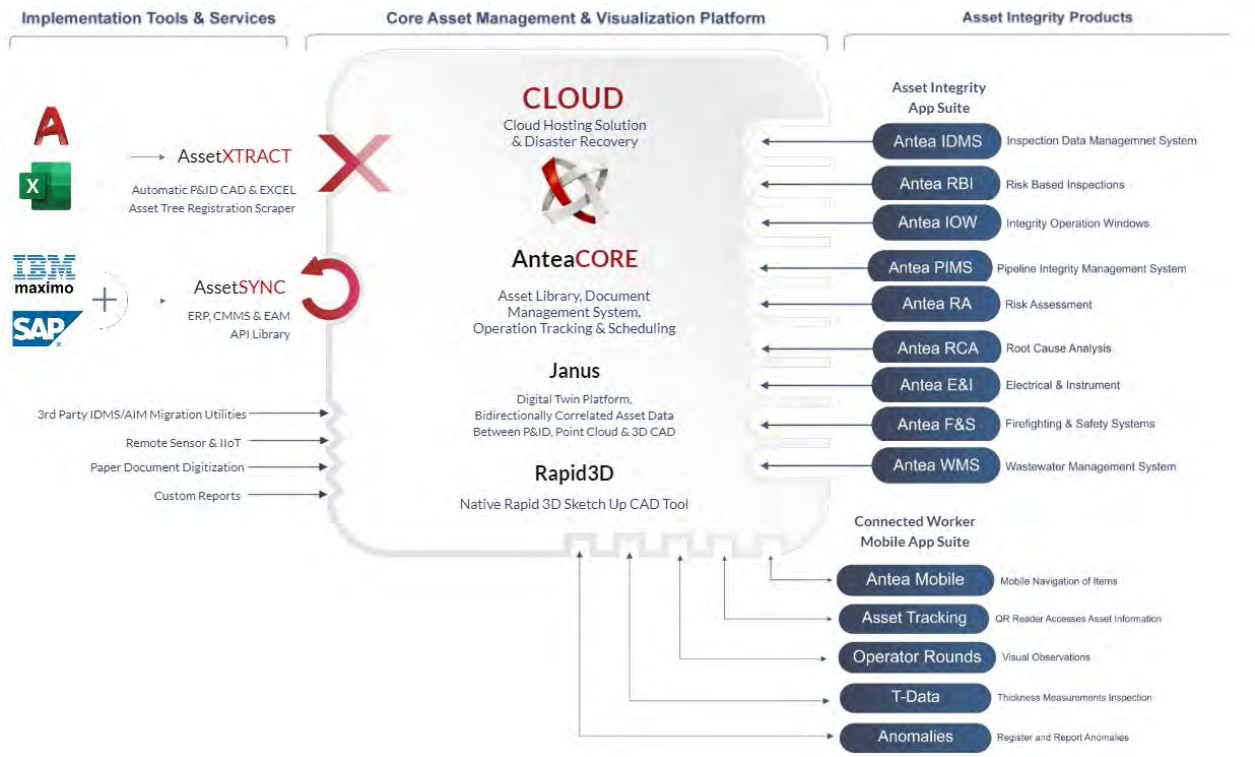


Figura 1. Struttura della Piattaforma

2. Le applicazioni mobile

Le applicazioni mobile, indicate nella parte bassa a destra dello schema, consentono di accedere comodamente ai moduli della piattaforma tramite telefono o tablet. Funzionalità come visualizzare la struttura gerarchica delle attrezzature, la loro documentazione, il loro stato, schemi 2D e la posizione dell'elemento sulla nuvola di punti forniscono importanti strumenti per supportare i tecnici sul campo. Inoltre, il poter localizzare la posizione delle attrezzature ed inserire le attività ispettive e manutentive quando vengono fatte, consente di risparmiare il tempo di inserimento dati in ufficio e di averli a disposizione tempestivamente.
La filosofia adottata per le applicazioni mobile è quella di averne varie a scopo e funzionamento semplificato ma connesse fra di loro. Per effettuare un'attività specifica si dovrà scegliere l'applicazione giusta ma si potrà passare facilmente da un'applicazione all'altra. Ad esempio, utilizzando l'applicazione "Asset Tracking" è possibile riconoscere il QR Code di un'attrezzatura e aprire l'applicazione "Mobile" direttamente nella sezione che contiene tutte le informazioni di quella specifica attrezzatura.

Di seguito la lista delle applicazioni con lo scopo e lo stato:

- Mobile. Scopo: consultazione dati. Stato: Disponibile.
- Asset Tracking. Scopo: identificazione tramite QR Code e geolocalizzazione. Stato: Disponibile.
- Operator Rounds. Scopo: inserimento ispezioni descrittive. Stato: Disponibile.
- T-Data. Scopo: inserimento ispezioni spessimetriche. Stato: Disponibile.
- Anomalies. Scopo: inserimento anomalie. Stato: In produzione.

Di seguito queste applicazioni verranno descritte nel dettaglio.

2.1 Mobile

Mobile consente la ricerca e l'individuazione di tutte le attrezzature dello stabilimento in base alla gerarchia creata. Per ciascuna di esse si possono visualizzare facilmente dati, allegati tecnici, risultati di ispezioni, analisi dei dati, date di scadenza e altro ancora.
Ad esempio, la possibilità di consultare i dettagli di un disegno costruttivo oppure il trend di corrosione nel dispositivo mentre si sta eseguendo un'ispezione o qualsiasi altra attività ad un'attrezzatura fornisce un valore aggiunto di grande valore, sia in periodi di gestione routinaria dell'impianto che durante i periodi di fermata.
Inoltre, la possibilità di consultare interattivamente sia gli schemi di processo che il modello 3D consente di effettuare anche altre tipologie di verifica rivolte anche all'area ingegneristica oltre che a quella ispettiva e manutentiva.

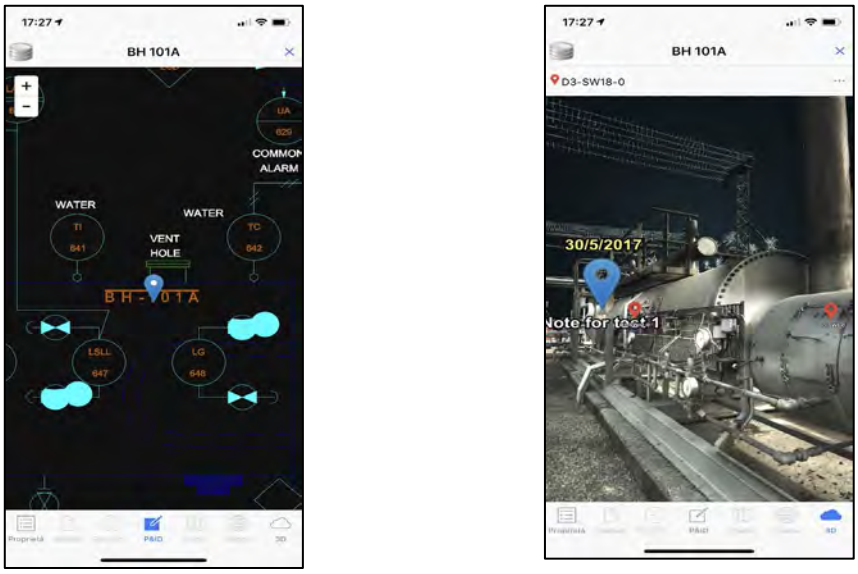


Figura 2. Esempio di visualizzazione dati da Mobile

2.2 Asset Tracking

L'applicazione consente di abbinare a ciascuna attrezzatura presente in impianto uno specifico QR Code e di riconoscerla successivamente in campo. Sarà possibile identificarla in impianto e quindi posizionarla in una pianta geo-referenziata, ottenendo così delle informazioni logistiche utilizzabili per pianificare le ispezioni.
Infine, il riconoscimento attraverso QR Code in campo consente di minimizzare i tempi di ricerca dell'attrezzatura e quindi della documentazione da consultare nell' applicazione mobile descritta nel precedente capitolo (Mobile) e in quelle che riguardano l'attività ispettiva che verranno descritte di seguito.
Ovviamente, affinché tale procedura possa funzionare, è necessario avere a disposizione dei QR Code fisici da posizionare sulle attrezzature o in prossimità di esse.
Gli step di lavoro da seguire per usufruire delle funzionalità di questa applicazione sono:

- Assegnazione e posizionamento dei QR Code univoci sulle attrezzature.
- Associazione di ciascun QR Code alla specifica attrezzatura.
- Individuazione in campo dell'attrezzatura e assegnazione delle coordinate GPS.
- Utilizzo dell'applicazione per individuazione delle attrezzature in campo per attività ispettive e manutentive.



Figura 3. Esempio di utilizzo di Asset Tracking

2.3 Operator Rounds

Operator Rounds è stata progettata per poter inserire i rapporti delle ispezioni visive e delle attività manutentive direttamente dal campo.

Questo tipo di operazioni, di carattere descrittivo, permettono di accedere a una semplice scrittura di un testo oppure di avere a disposizione vere e proprie checklist strutturate. Queste ultime possono far riferimento alle checklist di ispezioni da standard, come ad esempio quelle fornite dalle norme API 510 [1], API 570 [2] e API 563 [3] relativamente ad attrezzature a pressione, piping e serbatoi atmosferici, oppure essere personalizzate in base alle necessità. Possono essere create, ad esempio, delle checklist di manutenzione adattate in base alle tipologie di attrezzature (jobcard).

La procedura operativa prevede i seguenti step:

- Dalla piattaforma centrale l'utente pianificatore assegnerà le attività in programma ai diversi ispettori, ciascuno dei quali avrà una propria utenza con cui accedere alle app.
- Ciascun ispettore avrà tutta la lista delle attività che dovrà eseguire nel proprio tablet.
- A mano a mano che le attività di campo procederanno, sarà possibile inserirle con il dispositivo mobile.

Ovviamente i dati sulla piattaforma saranno accessibili immediatamente se la rete internet in campo è disponibile; oppure al rientro in ufficio nel caso contrario.

Esiste anche la possibilità di consultare gli applicativi offline, con necessaria operazione di backup preliminare. A seconda delle politiche di inserimento dati e allegati nel sistema, potrebbe essere necessaria la disponibilità di molta memoria nei dispositivi, per questo è stato pensato ad un sistema di backup parziale limitato alle attrezzature di interesse.

Oltre a dati testuali e alla selezione di checkbox di esecuzione delle attività, sarà possibile acquisire fotografie e registrazioni audio direttamente con i dispositivi. Queste immagini e audio verranno allegate direttamente all'operazione della piattaforma.

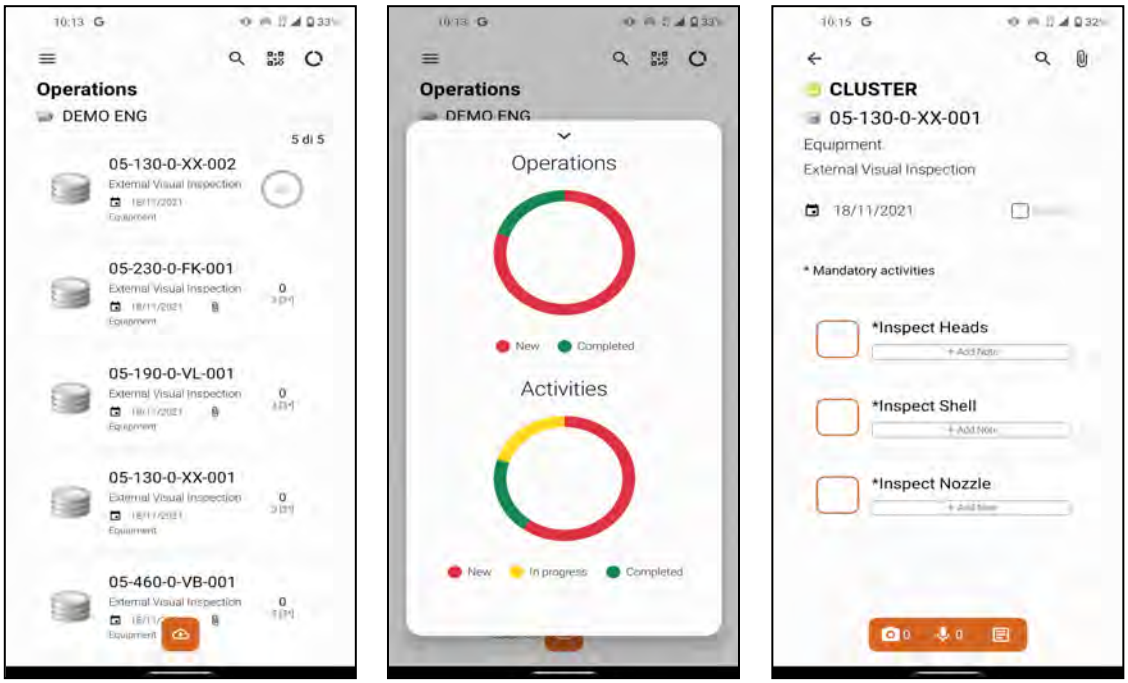


Figura 4. Schermate di Operator Rounds

2.4 T-Data

L'applicazione "T-Data" è stata progettata per fornire supporto nella fase di svolgimento dei controlli dello spessore. Al pari di "Operator Rounds", è possibile inserire nella piattaforma i risultati dell'indagine nel momento in cui viene eseguita.
La possibilità di accedere direttamente ai dati di spessore è di inestimabile valore, soprattutto durante i periodi di fermata. Infatti, nella piattaforma centralizzata, a mano a mano che vengono inseriti i valori di spessore, vengono aggiornati automaticamente i dati di trend di corrosione e di vita residua.
Nei periodi di fermata i tempi di stallo hanno un valore molto importante: per questo motivo, avere i dati a disposizione, essere supportati con la loro analisi e il decidere tempestivamente e in sicurezza è di fondamentale importanza.
La procedura operativa di utilizzo è la stessa dell'applicazione "Operator Rounds", descritta precedentemente.

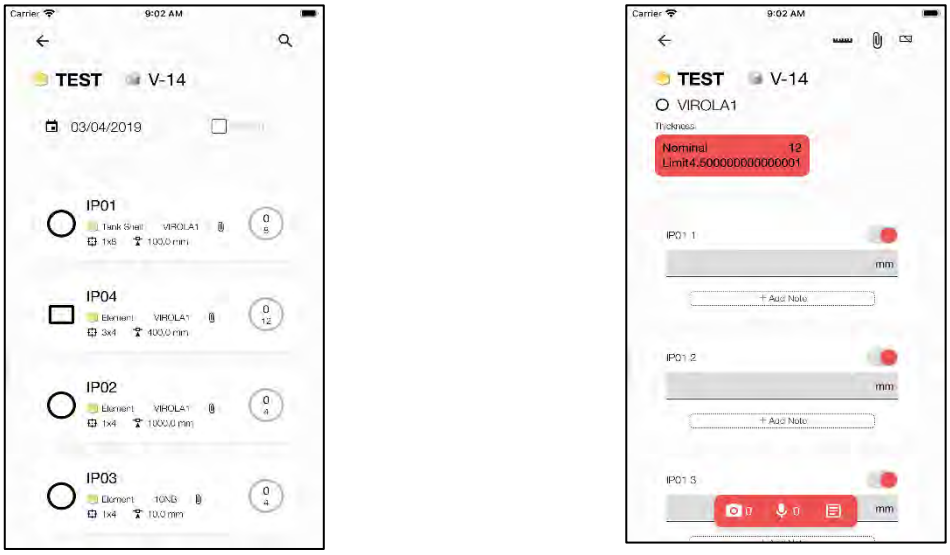


Figura 5. Esempio di visualizzazione dati da T-Data

2.5 Anomalies

L'applicazione consente di inserire anomalie che possono essere rilevate sulle attrezzature d'impianto sia durante la normale attività ispettiva (utilizzando come supporto "Operator Rounds" e "T-Data"), sia durante delle ronde dedicate.
L'applicazione funziona in modalità online e offline.
Quando un utente esegue un'Operazione (tramite le altre due applicazioni), può dichiarare delle anomalie riscontrate durante l'esecuzione dell'Operazione. Da Operator Rounds e T-Data è possibile avviare questa applicazione passando le informazioni sull'operazione in corso. La nuova applicazione chiede i dettagli dell'Anomalia e la carica server-side, associata all'Operazione.
La nuova applicazione può essere utilizzabile anche da Mobile, nel caso in cui l'utente voglia creare Anomalie a prescindere dalle Operazioni.

3. Workflow ottimale

Il workflow proposto contempla la pianificazione e l'assegnazione delle attività ispettive e manutentive nella piattaforma centrale e l'utilizzo di tutte le applicazioni mobile descritte in precedenza.
Innanzitutto, è necessario avere a disposizione un asset register aggiornato e avere tutti i dati a disposizione. Un'attività utile in tal senso è l'effettuazione del censimento delle attrezzature d'impianto attraverso l'applicazione "Asset Tracking".
Di queste attrezzature può essere valutato lo stato d'integrità e di conseguenza definire i piani ispettivi.
La prima fase per l'utilizzo delle applicazioni mobile è l'assegnazione delle varie attività ai diversi operatori dalla piattaforma. Le attività verranno scaricate in automatico nei device di ogni operatore che avrà così a disposizione la lista delle attività da eseguire.

Se in campo sono apposti i QR code, è possibile identificare ogni singola attrezzatura con l'applicazione "Asset Tracking". Inoltre, è possibile consultare tutti i dati a disposizione per ciascuna attrezzatura attraverso il link all'applicazione "Mobile".
Svolgendo le attività è possibile archiviarne direttamente i dettagli su "Operator Rounds" e "T-Data" e così poi nella piattaforma centrale. In questo processo, se verranno individuate delle anomalie, sarà possibile attivare il link all'applicazione "Anomalies", inserirle e successivamente gestirle nello specifico dalla piattaforma.

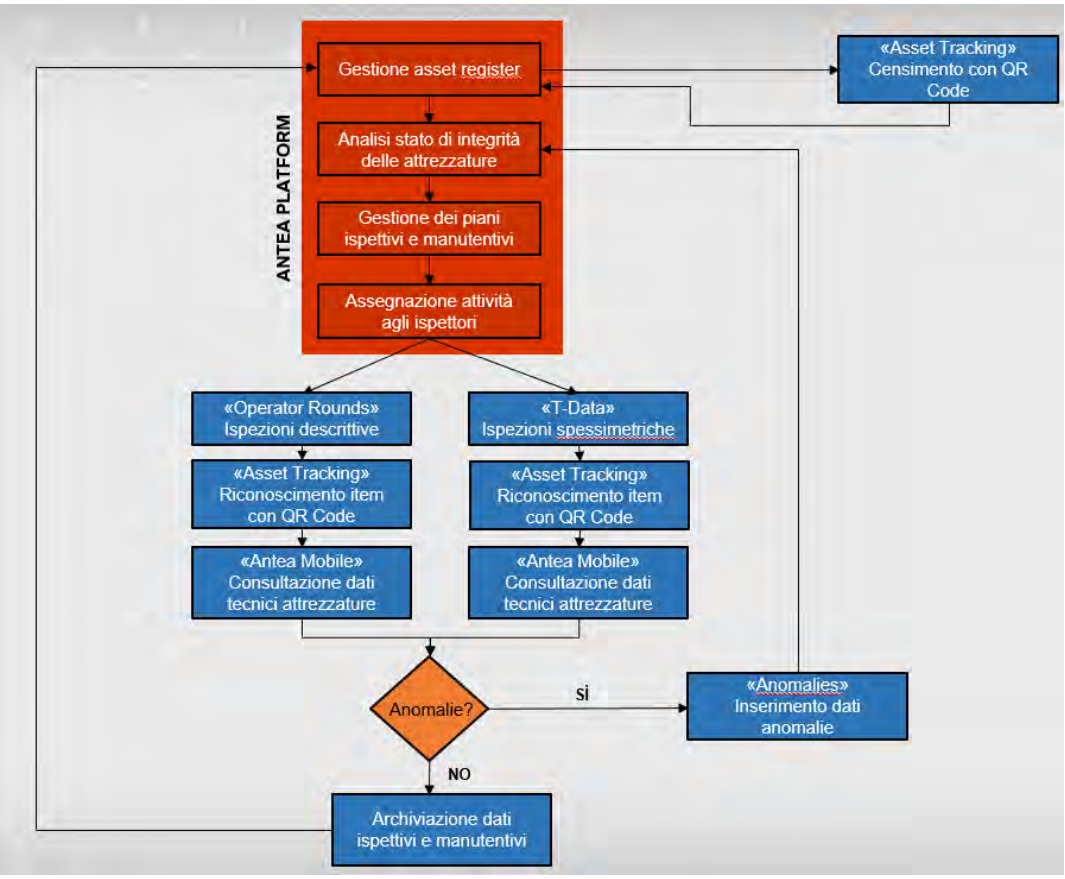


Figura 6. Workflow suggerito per l'utilizzo delle mobile app

4. Apparecchi Atex

Per l'utilizzo delle applicazioni descritte negli impianti industriali, dove sono presenti potenziali atmosfere esplosive, l'uso di dispositivi mobili come cellulari e tablet deve essere attentamente regolamentato per garantire la sicurezza degli operatori e prevenire potenziali incidenti. Gli apparecchi ATEX (Atmosphères Explosibles) sono stati progettati e certificati per essere utilizzati in queste condizioni potenzialmente pericolose.
Gli apparecchi ATEX devono conformarsi alle direttive europee ATEX 2014/34/UE [4] per l'apparecchiatura elettrica e 1999/92/CE [5] per la sicurezza dei luoghi di lavoro

soggetti ad atmosfere esplosive. Queste direttive stabiliscono i requisiti tecnici e di sicurezza che i dispositivi devono soddisfare affinché siano considerati sicuri per l'uso in ambienti potenzialmente esplosivi.
Gli apparecchi ATEX sono progettati per prevenire potenziali fonti di ignizione e per ridurre al minimo il rischio di esplosioni in ambienti con gas, vapori o polveri infiammabili. Essi sono stati sottoposti a rigorosi test e valutazioni per garantire che rispettino i requisiti stabiliti dalle direttive ATEX.
Ecco alcuni aspetti chiave da considerare per l'uso di apparecchi ATEX negli impianti industriali:

1) Classificazione delle zone ATEX: gli impianti industriali vengono classificati in zone in base alla probabilità di presenza di atmosfere esplosive. Gli apparecchi ATEX sono adatti a specifiche zone ATEX, e la loro classificazione è chiaramente indicata sulla targa.
2) Categorie di protezione ATEX: gli apparecchi ATEX sono divisi in categorie in base all'ambiente operativo previsto. Le categorie variano da 1 a 3, dove la Categoria 1 indica il livello di protezione più elevato.
3) Certificazione: prima di utilizzare un apparecchio ATEX in un impianto industriale, assicurarsi che sia stato certificato da un organismo riconosciuto per la conformità alle direttive ATEX.
4) Manutenzione e ispezione: gli apparecchi ATEX devono essere sottoposti a regolari operazioni di manutenzione e ispezione per garantire che mantengano il livello di sicurezza previsto.
5) Formazione degli operatori: gli operatori che utilizzano apparecchi ATEX devono essere adeguatamente formati riguardo alla sicurezza, all'uso corretto dei dispositivi e alle procedure di emergenza in caso di malfunzionamenti o incidenti.
6) Sostituzione e obsolescenza: gli apparecchi ATEX possono avere una vita utile limitata. Monitorare attentamente la scadenza e pianificare la sostituzione tempestiva per mantenere il livello di sicurezza adeguato.
7) Protezione aggiuntiva: anche con apparecchi ATEX, è importante adottare altre misure di protezione per ridurre ulteriormente il rischio di esplosioni, come l'uso di contenitori ermetici e l'implementazione di procedure di lavoro sicure.

In conclusione, gli apparecchi ATEX sono uno strumento vitale per garantire la sicurezza degli operatori negli impianti industriali con atmosfere potenzialmente esplosive. La corretta selezione, certificazione, formazione e manutenzione di questi dispositivi sono fondamentali per evitare incidenti e garantire un ambiente di lavoro sicuro.

5. Futuri sviluppi

Nell'ottica di ottimizzazione delle attività ispettive, un'area dove l'utilizzo di applicazioni mobile risulterebbe molto efficace, è quella dell'esecuzione e gestione delle calibrazioni degli strumenti di misura.
Questa tipologia di attività, dato l'elevato numero di attrezzature strumentali e data la necessaria garanzia del loro funzionamento, che scaturisce in una frequenza di controllo spesso dell'ordine del mese, risulta molto onerosa in termini di archiviazione e gestione dei risultati.
Nella Piattaforma è presente un modulo specifico, "E&I" per la gestione delle attrezzature elettriche e della strumentazione.
È disponibile la gestione completa delle calibrazioni per i vari tipi di attrezzature strumentali (strumenti analogici, sistemi multicomponente, strumenti campione multiscala, ecc.). Tali operazioni di taratura sono conformi alla norma ISO 13005 (UI-CEI 70098).
È inoltre possibile generare dei report in grado di valutare il tempo medio di risoluzione delle operazioni con esito negativo (Resolution time report) e di fare altri tipi di statistiche su ispezioni e taratura.
È inoltre disponibile il Report EN61511, che riporta il numero di operazioni che hanno chiuso un determinato programma e il relativo esito (positivo, negativo, ecc.).
In quest'ottica è stata pensata la creazione di una nuova applicazione mobile, denominata "Calibrations" che avrà lo scopo di inserire le operazioni di taratura.
Il funzionamento della fase preparatoria sarà del tutto simile a quello delle applicazioni "Operator Rounds" e "T-Data", con identificazione delle attrezzature da tarare e l'assegnazione delle attività ai singoli operatori, che potrebbero essere anche tecnici di ditte specializzate e non solamente gli operatori interni.
Nell'archiviazione dei dati in campo invece è prevista anche un'analisi dei risultati con la possibilità di vedere subito se il risultato è accettabile o meno.
Questa funzionalità risulterebbe importantissima nell'ottimizzazione delle attività. Infatti, oltre al già evidenziato risparmio dei tempi di popolamento della piattaforma, sarà possibile eventualmente procedere direttamente in loco con attività di ritaratura e manutenzione necessarie a fronte di risultati negativi, senza la necessità di pianificare altre uscite successivamente.
Attualmente, infatti, i risultati sono disponibili solamente quando le operazioni vengono archiviate e analizzate nella piattaforma centrale.

6. Conclusioni

I benefici di utilizzo delle applicazioni mobile in ambito Asset Integrity sono molteplici. Innanzitutto, la possibilità di consultare in qualsiasi momento i dati delle attrezzature, anche quelli più avanzati, è sicuramente un vantaggio molto importante.

Anche la possibilità di censire tutte le attrezzature e riconoscerle immediatamente in campo, con l'utilizzo dei QR-Code, è una comodità che snellisce tutte le operazioni di identificazione in campo che porta inevitabilmente a ridurre nel complesso le operazioni pratiche.
Ed infine l'eseguire l'attività ispettiva con il supporto delle applicazioni mobile offre innumerevoli vantaggi.
Innanzitutto, aiuta nella creazione dei work package ispettivi da assegnare a ciascun operatore, senza dover preparare alcuna documentazione cartacea.
In secondo luogo, assicura che l'attività ispettiva venga inserita nella piattaforma centrale, dato che non è necessaria alcuna attività di data loading in ufficio. Spesso, avendo a disposizione report cartacei, il loro inserimento viene posticipato e in alcuni casi dimenticato.
Questo implica anche una grande riduzione dei tempi di caricamento dei dati ispettivi sulla piattaforma e seguente reportistica e analisi.

Bibliografia

[1] American Petroleum Institute, API 510, Pressure Vessel Inspection Code, Edizione 11, Gennaio 2022

[2] American Petroleum Institute, API 570, Piping Inspection Code, Edizione 4, Gennaio 2016

[3] American Petroleum Institute, API 653, Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction, Fifth Edition, Edizione 5, Gennaio 2014

[4] Direttiva europea ATEX 2014/34/UE, febbraio 2014

[5] Direttiva europea ATEX 1999/92/CE, dicembre 1999

[6] ISO 13005, recepita in Italia come UNI CEI EN 13005, "Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)"), luglio 2000.

[7] UNI CEI 70098-3 "Guida all'espressione dell'incertezza di misura", settembre 2016

[8] CEI EN61511-1/2/3 "Sistemi strumentati di sicurezza per l'industria di processo", Aprile 2017

Metodi di stima della vita residua di tubazioni in polietilene: una review

C. Andenna, D. Lega, C. Mennuti

Inail – DIT

Abstract

In questi ultimi anni la produzione e l'impiego del polietilene sono aumentati notevolmente e di conseguenza sono sorti nuovi impulsi in merito agli studi sulle possibilità di impiego in sicurezza di tale materiale. Gli studi relativi ai materiali idonei per le reti di distribuzione dell'idrogeno mostrano che il polietilene ha delle proprietà molto interessanti che lo rendono attraente e performante rispetto ai materiali metallici. In linea generale non pone problemi di infragilimento e, anche se ha una permeazione all'idrogeno 4/5 volte superiore a quella relativa al metano, la perdita di gas appare comunque trascurabile, [1-5]. La sicurezza rimane comunque un problema particolarmente rilevante in relazione all'impiego di tale materiale negli idrogenodotti. In relazione all'uso in sicurezza del polietilene in questa memoria vengono presentate e discusse le principali modalità di frattura ed i metodi di stima della vita residua più interessanti e affidabili. In particolare, vengono discussi sia i metodi basati su prove meccaniche che quelli basati su indagini chimiche.

Keywords: polietilene, metodi di stima della vita residua, invecchiamento, meccanismi di danno.

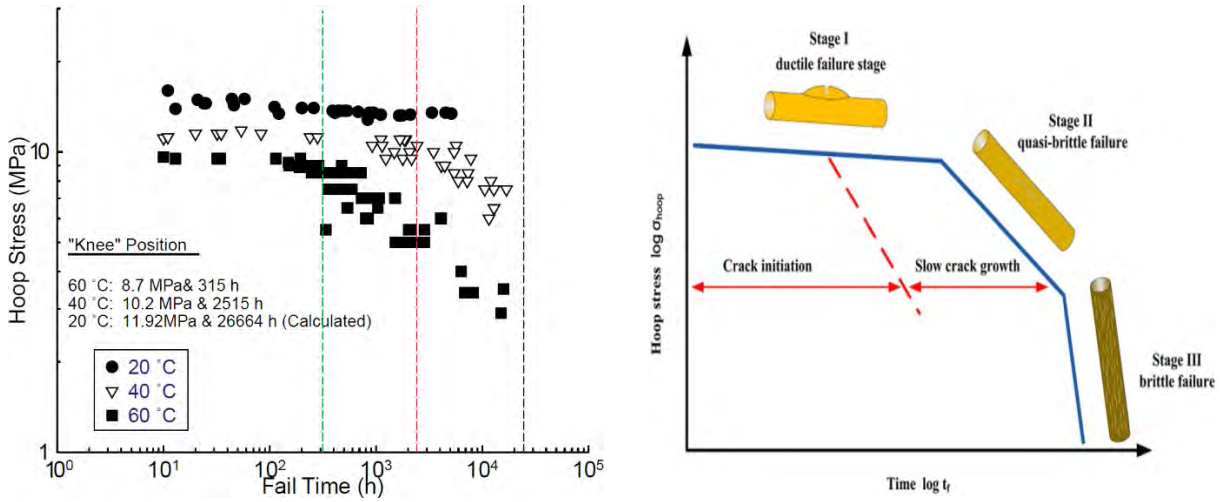
1. Metodi di stima della vita residua basati su prove meccaniche

La valutazione della vita residua di condotte realizzate in polietilene è tuttora una tematica di grande rilevanza in quanto nessuna delle molteplici tecniche proposte e sviluppate permette di ottenere risultati generalizzabili ai vari scenari reali [6]. Dal punto di vista normativo, le norme ISO 9080 [7] e ASTM D2837 [8], regolamentano la valutazione della resistenza idrostatica al di sotto della quale un tubo in materiale plastico può durare 50 anni alla temperatura di 20°C. Le due normative legano il tempo di vita atteso per il tubo in materiale plastico in funzione della pressione idrostatica interna al tubo e della temperatura di esercizio. In particolare, lo 'Standard Extrapolation Method' (SEM) proposto dalla ISO 9080 utilizza 4 parametri che devono essere determinati per la caratterizzazione dello specifico materiale plastico secondo la formula 1:

$$log_{10}(t) = c_1 + c_2/T + c_3 log_{10}(\sigma) + c_4\, log_{10}(\sigma)/T + e \quad (1)$$

Dove t è il tempo [h], σ la tensione circonferenziale [MPa], T la temperatura [K].

Il parametro 'e' tiene conto della variabilità intrinseca tra differenti prove effettuate nelle stesse condizioni sperimentali e permette di individuare come resistenza idrostatica quella corrispondente al valore di tensione circonferenziale per cui si ha il valore di confidenza di 0.975. Una volta determinate le costanti del modello, lo stesso può essere utilizzato per prevedere la vita residua di una condotta nelle condizioni di pressione e temperatura di esercizio. La stima della vita residua tramite le prove idrostatiche presenta però alcune criticità; infatti, richiede l'esecuzione di numerose prove al variare della pressione e della temperatura di esercizio che possono durare, per alcune combinazioni pressione-temperatura, anche migliaia di ore, Figura 1a. In genere l'interesse è quello di stabilire la vita residua di condotte in esercizio e, assumendo che non si realizzino situazioni di cedimento completamente duttile come per eventi di sovrappressione, si cerca di valutare il tempo prima di un cedimento quasi fragile o fragile.



a) b)

Figura 1. Risultati di prove idrostatiche (ISO 9080). a) Andamento della tensione circonferenziale in funzione del tempo di cedimento a varie temperature di prova, [9]. b) Stadi del cedimento di un tubo in PE [6].

Il primo in genere si realizza nel secondo stadio, tra il 'ginocchio' meccanico e quello 'chimico', della tipica curva di rottura per creep di un tubo, mentre il secondo si ha nel terzo stadio, dopo il ginocchio 'chimico' e prefigura una rottura in tempi brevi, Figura 1b. Nel secondo stadio si ha una frattura quasi fragile a partire da un difetto (intaglio o cricca) che verosimilmente si è generato nel periodo prima del ginocchio 'meccanico' e che può essere dovuto a varie cause come la presenza nel materiale di cavità, graffi o danneggiamenti superficiali, [10]. Successivamente alla fase iniziale della sua generazione, che può richiedere tempi di incubazione molto lunghi ma di difficile valutazione, valutare il periodo di crescita di tale difetto che poi porta alla rottura finale, può dare indicazioni utili per determinare la vita residua del componente stesso. A questo scopo, sono spesso utilizzate prove di 'Slow Crack Growth' (SCG) basate su tecniche di 'Linear Elastic Fracture Mechanics' (LEFM) utilizzando provette di varie forme e dimensioni con varie tipologie di intaglio, tra le

quali le 'Compact Test' (CT) e le 'Cracked Round Bar' (CRB). Questo approccio permette di determinare i tempi di crescita del difetto fino al cedimento del componente, tempi regolati dalle caratteristiche del materiale e dalle condizioni di prova. Queste tecniche hanno il grande vantaggio di essere molto più rapide delle prove idrostatiche, ma devono essere utilizzate in maniera da rispettare i meccanismi di degrado che si possono avere in esercizio perché tali meccanismi possono notevolmente alterare i risultati delle prove stesse, [11]. Ad esempio, la frattura può cambiare se il tubo è utilizzato per il trasporto di acqua o gas oppure se è esposto o meno alle intemperie e ai raggi solari. Una volta determinate le caratteristiche meccaniche del materiale, esse possono quindi venire usate per valutare la vita residua dei componenti di interesse (in genere dei tubi) in differenti condizioni di impiego previa la conoscenza dello stato tensionale interno al componente, ad esempio, con simulazioni agli elementi finiti (FEM). Si evidenzia che, una certa attenzione deve sempre essere impiegata in quanto le tecniche di LEFM dovrebbero essere utilizzate quando le zone di plastificazione che si hanno durante le prove meccaniche sono confinate vicino al fronte della cricca, [6, 10]. A parte la fase iniziale di rapida crescita, la velocità di crescita della cricca per creep nei materiali polimerici presenta un tratto centrale descritto dalla relazione di Paris-Erdogan, regione II della Figura 2a:

$$\frac{da}{dt} = A \cdot (K_I)^m \qquad (2)$$

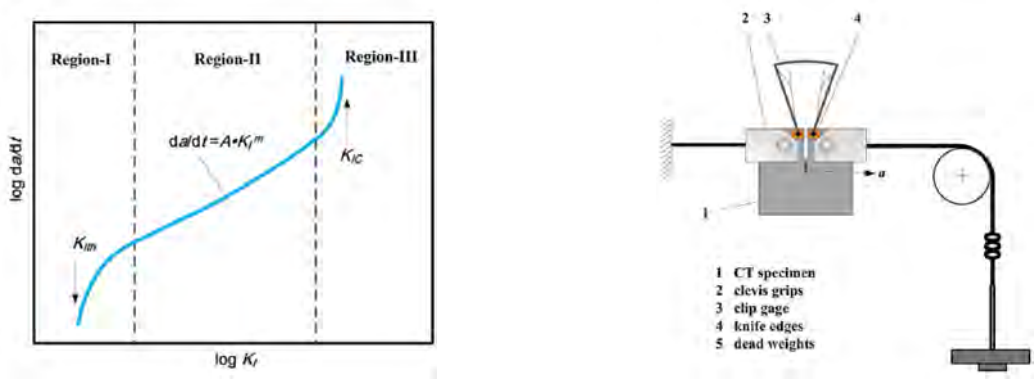
Da questa relazione si può determinare il tempo necessario perché la cricca raggiunga il valore critico a_f che porta alla rottura del componente tramite:

$$t_f = t_0 + \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{A \cdot K_I} \qquad (3)$$

Nella formula t_0 rappresenta un tempo iniziale necessario alla cricca per diventare di lunghezza a_0. Poiché la determinazione di t_0 è in genere molto complessa, si tende ad assumere dei valori iniziali a_0 e a calcolare il solo tempo che rimane alla cricca prima di diventare critica. Descriviamo ora due modi per determinare il valore dei coefficienti A ed m della curva di Paris-Erdogan, tipici del materiale di interesse.

1.1. Carico statico su provette CT

Un modo per determinare sperimentalmente i coefficienti A e m della curva di Paris-Erdogan per carico statico prevede l'impiego di prove con le provette CT, Figura 2b.



a) b)

Figura 2. a) Tipico andamento della velocità di avanzamento della cricca in funzione del fattore K_I [6, 13], b) Schema di prove a carico statico su provetta CT, [6].

In questo caso la determinazione dei coefficienti avviene tramite l'applicazione di un carico statico e misurando l'avanzamento della cricca nel tempo, ad esempio tramite la misura dell'apertura della provetta. Dalla misura della dimensione della cricca si può quindi calcolare il valore del K_I all'apice della stessa tramite la relazione, [12]:

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} \frac{\left(2+\frac{a}{W}\right)\left[0.886+4.64\frac{a}{W}-13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2+14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3-5.6\left(\frac{a}{W}\right)^4\right]}{\left(1-\frac{a}{W}\right)^{3/2}} \quad (4)$$

Dove a rappresenta la dimensione della cricca, W la dimensione della provetta, B il suo spessore e P il carico applicato. Dalle misure della dimensione della cricca e del valore del K_I corrispondente si può quindi ottenere la curva sperimentale di Paris-Erdogan e quindi i coefficienti A ed m tramite tecniche di best fit.

1.2. Prove di fatica su provette CRB

Sebbene le prove di fatica siano di fatto utilizzate su molteplici tipi di provette, tra cui le sopra menzionate CT, le provette CRB annoverano tra i vantaggi il fatto che permettono di poter investigare abbastanza rapidamente bassi valori di K_I, di avere una 'costrizione' del materiale simile a quello presente nei tubi riducendo le zone di tensione piana e presentano bassi valori di tensione in zone distanti dal fronte della cricca, [14]. Inoltre, vari lavori hanno indicato che le prove a carico ciclico mostrano meccanismi di cedimento simili a quelle effettuate con carico statico (nei limiti della LEFM) e che i risultati delle prove a carico ciclico sono in buon accordo con quelli delle prove idrostatiche nel caso di tubi in PE di vario grado, [6]. Il metodo consiste nell'eseguire una serie di prove a fatica per più valori del rapporto R tra il carico minimo e quello massimo, formula 5, estrapolando poi i risultati per il carico costante cioè per R=1.

$$R = \frac{K_{I,min}}{K_{I,max}} \quad (5)$$

$$\Delta K_I = K_{I,max} - K_{I,min} = K_{I,max}(1-R) \quad (6)$$

Durante le prove a fatica, la cricca una volta innescata, avanza secondo la legge di Paris-Erdogan, Figura 2a, e la sua velocità può essere espressa come:

$$\frac{da}{dt} = f \cdot A \cdot (\Delta K_I)^m = f \cdot A \cdot (1-R)^m \left(K_{I,max}\right)^m \qquad (7)$$

Dove f rappresenta la frequenza dei cicli di fatica.
I risultati delle prove di fatica permettono di ricavare per ogni valore fissato di R i coefficienti (A ed m) delle corrispondenti curve di Paris-Erdogan tramite le relazioni 6 e 7, Figura 3. Da queste relazioni si calcolano, invertendo la relazione 7, i valori di $K_{I,max}$ per ciascun valore di R a velocità di avanzamento della cricca fissate (ad esempio 10^{-3}, 10^{-5}, 10^{-7} mm/s).

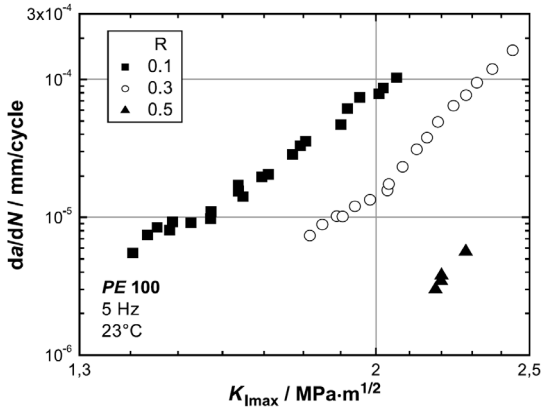


Figura 3. misure per le curve di Paris-Erdogan (regione II di Figura 2a), [14]

Si ottengono così, per ogni velocità fissata, i valori di $K_{I,max}$ in funzione di R che permettono poi di calcolare il valore di $K_{I,max}$ per R=1 per le varie velocità fissate, ad esempio tramite best fit, ottenendo infine la relazione cercata tra la velocità di avanzamento della cricca e i valori di $K_{I,max}$ a carico statico. In quanto segue, a titolo di esempio, si descrive una tecnica per determinare la vita residua di un tubo in presenza di cricche interne. Allo scopo si utilizzerà sia la procedura che i risultati della modellizzazione agli elementi finiti (FEM) dello stato tensionale all'apice di una cricca ellittica interna a un tubo trovati in letteratura, [15].

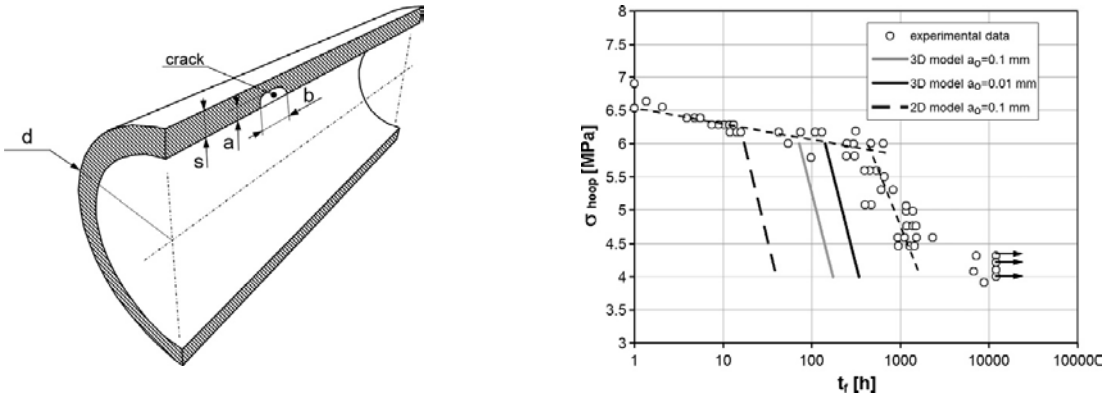
1.3. Stima della vita residua nel caso di un tubo con cricca

Il lavoro simula l'evoluzione di una cricca ellittica nella parte interna di un tubo a seguito della presenza di una pressione idrostatica, Figura 4a. Tramite la modellizzazione FEM, i valori del fattore di forma Y(a/s) necessari per il calcolo del fattore di intensificazione degli sforzi K_I nel caso di una cricca ellittica presente nella parte interna di un tubo e definito dalla relazione 8 sono espressi analiticamente dalle relazioni 9 e 10, rispettivamente nel caso di un carico di apertura della cricca dovuto alla pressione idrostatica interna al tubo e nel caso di chiusura della stessa dovuto alla pressione esterna al tubo. Il fattore K_I complessivo viene calcolato sommando i due fattori di $K_{I,int}$ e $K_{I,ext}$ trovati, [15].

$$K_I = \frac{pd}{s}\sqrt{\pi s}\, Y\left(\frac{a}{s}\right) \qquad (8)$$

p: pressione interna al tubo, d: diametro esterno, s: spessore, a: profondità cricca.

$$Y_{int} = 0.3417 + 0.0588\left(\frac{a}{s}\right) - 0.0319\left(\frac{a}{s}\right)^2 + 0.1409\left(\frac{a}{s}\right)^3 \quad (9)$$



a) b)

Figura 4. a) Schema del tubo e della cricca simulati con il FEM. [15]. b) Confronto tra i risultati sperimentali di un tubo in HDPE e il modello sia con una modellizzazione 2D che 3D. [15]

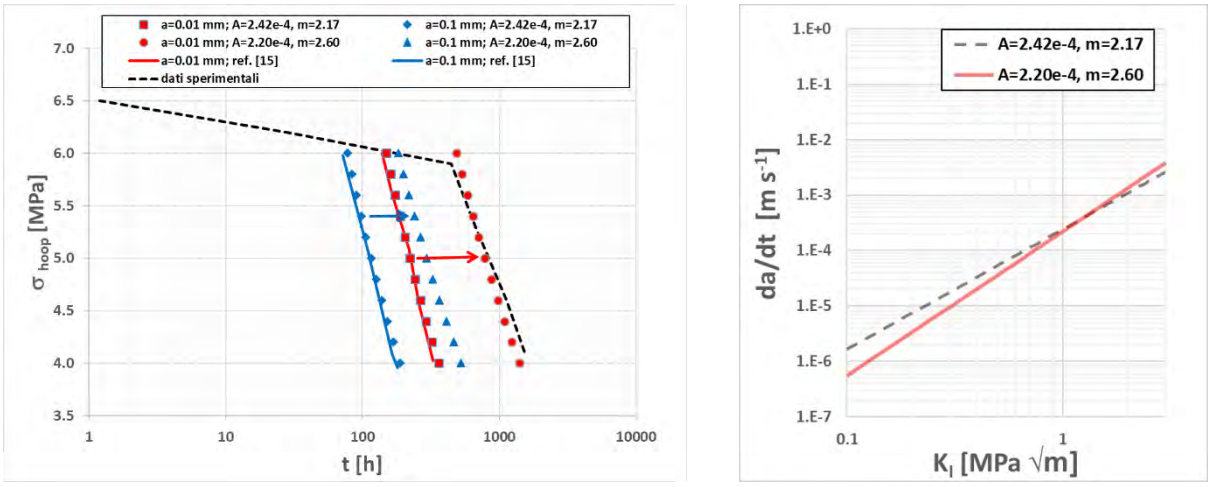
L'accuratezza di questa formula, relativamente ai valori di $K_{I,int}$ ottenuti con gli elementi finiti, è data entro il 3% per i valori del rapporto d/s = (9, 11, 13.6, 17, 21), [15].
Considerando il carico esterno si ha:

$$Y_{ext} = -0.3588 - 0.0701\left(\frac{a}{s}\right) + 0.116\left(\frac{a}{s}\right)^2 - 0.2444\left(\frac{a}{s}\right)^3 \quad (10)$$

Si evidenzia che se il carico esterno è positivo allora il valore di $K_{I,ext}$ assume un valore negativo indicando che tende a chiudere la cricca limitandone quindi l'avanzamento, [15].

L'applicazione del modello proposto, al caso di un tubo di materiale HDPE testato secondo lo standard ISO 9080 a 80°C considerando per i coefficienti della curva di Paris-Erdogan i valori $A=2.42\cdot10^{-4}$ e m=2.17, mostra un buon accordo per quanto riguarda la pendenza della parte di frattura quasi fragile ma ne sottostima l'inizio, Figura 4b, [15]. Il modello, comunque, evidenzia come la modellizzazione tramite FEM debba essere effettuata considerando la tridimensionalità del problema e non sia quindi possibile ridurlo ad un calcolo bidimensionale delle tensioni. Inoltre, il modello appare sensibile rispetto alla dimensione assunta della cricca iniziale (0.01 o 0.1 mm), infatti nel ridurre la cricca iniziale la curva corrispondente alla frattura quasi fragile tende a spostarsi sensibilmente verso destra ad indicare un aumento della vita residua del tubo. Si osserva comunque che i valori dei coefficienti della curva di Paris-Erdogan possono essere loro stessi fonte di incertezza sulla determinazione della vita residua. Ad esempio riproducendo, con codice Matlab, il modello proposto, si osserva come cambiando il valore di A da $2.42\cdot10^{-4}$ a $2.20\cdot10^{-4}$ e di m da 2.17 a 2.60, i valori attesi per la vita residua si spostino fino a quasi

sovrapporsi ai dati sperimentali nel caso di una cricca iniziale di 0.01 mm, Figura 5a. Chiaramente cambiare i valori dei coefficienti della curva di Paris-Erdogan comporta una differente velocità di avanzamento della cricca a parità di condizioni di carico, nel nostro esempio questo è riportato nella Figura 6b. La sottostima dell'inizio del cedimento quasi fragile può anche essere dovuta, oltre che a differenti valori dei parametri A ed m, alla mancanza di conoscenza nei parametri iniziali della cricca e del tempo di incubazione della stessa come riportato in letteratura, [15]. Questo ultimo punto è, in effetti, rilevante perché, come si può vedere nella Figura 2a, il valori del K_I nella regione I hanno un andamento estremamente ripido e dipendono dal valore di soglia $K_{I,th}$, al di sotto del quale si assume che non si abbia avanzamento della cricca. Se fosse disponibile anche il tempo t_0 di raggiungimento della dimensione a_0 della cricca, il tempo complessivo sarebbe stato ottenibile dal contributo delle curve delle prime due regioni di Figura 2a permettendo una verifica più accurata del modello stesso. Nella terza regione l'avanzamento è estremamente rapido e si può ragionevolmente trascurare per gli scopi di interesse di questo lavoro.



a) b)

Figura 5. a) Effetto dei coefficienti di Paris sulla previsione della vita residua, b) Effetto del cambiamento dei valori dei coefficienti della curva di Paris-Erdogan nell'esempio esaminato

2. Metodi di stima della vita residua basati su prove chimiche

Una delle principali forme di degradazione dei polimeri è la degradazione ossidativa che interviene per azione della temperatura e dell'ossigeno ambientale. La stabilità di un polimero rispetto a tali parametri si valuta mediante alcuni parametri chimici, tra questi i più interessanti sono la temperatura o il tempo di induzione all'ossidazione (OOT/OIT) e l'indice di perossidi [ROOH] come illustrato in Figura 6 [11,16,17]. Hoang e Lowe [16] propongono un metodo per utilizzare l'OIT per stime di vita residua a temperatura ambiente. Spezzoni del tubo oggetto della valutazione sono sottoposti a prove di pressione idrostatica a diverse temperature. Le prove vengono interrotte per eseguire misure di OIT/OOT a 200°C. Un esempio dei risultati ottenuti è presentato nella Figura 7a.

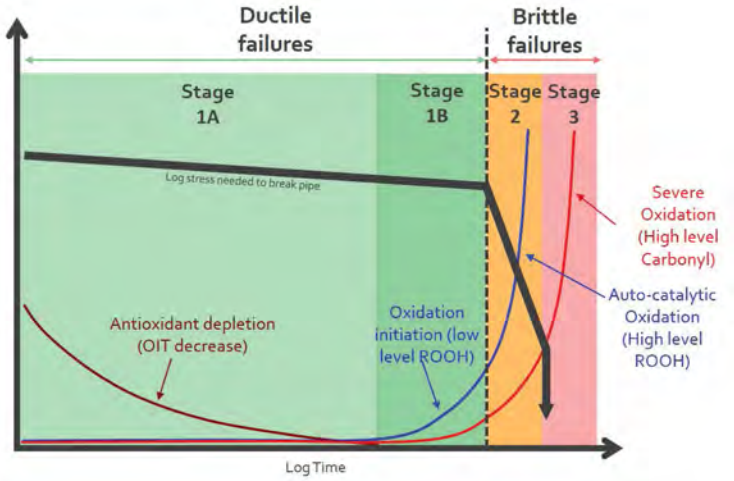
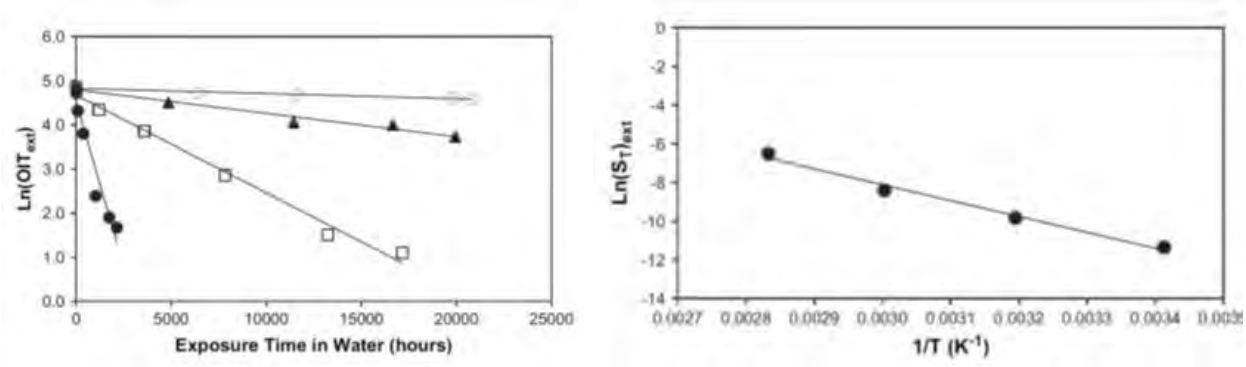


Figura 6. curva tensione tempo indicativa dei tre stadi di rottura del polietilene e andamento dei parametri chimici OIT/OOT e [ROOH] [17]



a) b)

Figura 7. a) ln(OIT) misurato presso la superficie esterna dei tubi campione vs t, ○ 20°C; ▲ 40°C; □ 60°C; ● 80°C; b ln(S_T) vs 1/T [16]

La relazione tra il valore dell'OIT al tempo di invecchiamento t e l'OIT al tempo 0 è la seguente formula 11:

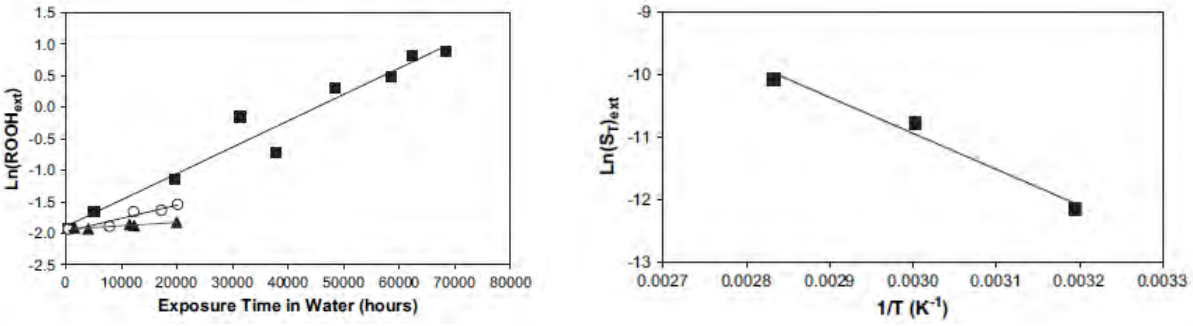
$$\ln(OIT_t) = \ln(OIT_0) + S_{T,OIT} \cdot t \qquad (11)$$

OIT_t è il valore dell'OIT al tempo di esposizione t, OIT_0 è il valore dell'OIT al tempo di esposizione 0, $S_{T,OIT}$ è la velocità di consumo dell'additivo alla temperatura T. Anche se è noto che i meccanismi di consumo dell'additivo sono complessi tuttavia sembrano seguire la cinetica del 1° ordine di Arrhenius. La costante di velocità $S_{T,OIT}$ viene misurata alle diverse temperature ed è presente una correlazione lineare tra il suo logaritmo e l'inverso della temperatura secondo la relazione 12, Figura 7b.

$$\ln\left(S_{T,OIT}\right) = -\frac{K}{T} + \ln\left(C\right) \qquad (12)$$

Il valore di $S_{T,OIT}$ quindi può essere calcolato a temperature più elevate ed estrapolato a temperatura ambiente, una volta noto il valore di $S_{T,OIT}$ si può calcolare il tempo che impiega l'additivo a consumarsi completamente assumendo un valore di OIT molto piccolo pari ad 1 minuto in prossimità della rottura. Attualmente esistono delle

banche dati dalle quali è possibile ottenere il valore del parametro $S_{T,OIT}$. [17] La concentrazione degli idroperossidi [ROOH] è strettamente correlata allo stato di ossidazione del polietilene. Si osserva infatti un forte incremento degli idroperossidi in corrispondenza del primo ginocchio duttile/fragile. La determinazione della concentrazione dei perossidi viene fatta mediante reazione con ioduro valutando l'assorbanza a 420nm. Se tale valore dell'assorbanza è superiore a 0.48 la tubazione ha superato lo stadio 1B di Figura 6 ed è entrata nel campo della rottura fragile. [11,16,17] Tale concentrazione presenta lo stesso andamento cinetico del parametro OIT alle diverse temperature, Figura 8a, b, secondo la formula 13.



a) b)

Figura 8. a) ln([ROOH]) vs T, ▲ 40°C; ○ 60°C; ■ 80°C; b) ln(S_T) vs 1/T [16]

$$\ln([ROOH]_t) = S_{T,ROOH} \cdot t + \ln([ROOH]_0) \qquad (13)$$

Eseguendo quindi delle prove idrostatiche interrotte anche per la concentrazione di perossidi [ROOH] è possibile estrapolare il valore di $S_{T,ROOH}$ a 20°C. Anche in questo caso è possibile avvalersi di opportune banche dati, [17].

2.1. Valutazione della vita residua di tubazioni adibite al trasporto dell'acqua

I metodi chimici sono adatti alla valutazione della vita residua rispetto al degrado termo ossidativo tipico dello stadio III del diagramma tensione circonferenziale-tempo di cedimento e quindi sono particolarmente utilizzati per la stima della vita residua delle tubazioni adibite al trasporto dell'acqua. Tali metodi prevedono il prelievo di una piccola porzione dallo spessore del tubo senza tagliarlo, tipicamente un dischetto di 32 mm di diametro e 1 mm circa di spessore, mediante un opportuno rasoio. Sanders propone lo schema decisionale di Figura 9 in relazione alla Figura 6 per i tubi adibiti al trasporto dell'acqua, [17]. Se il parametro OIT è maggiore di 1 minuto, la tubazione è collocata nello stadio 1A e la vita residua viene calcolata con i parametri OIT/OOT. Se invece l'OIT è inferiore ad 1 minuto la vita residua viene valutata considerando la concentrazione di perossidi [ROOH].

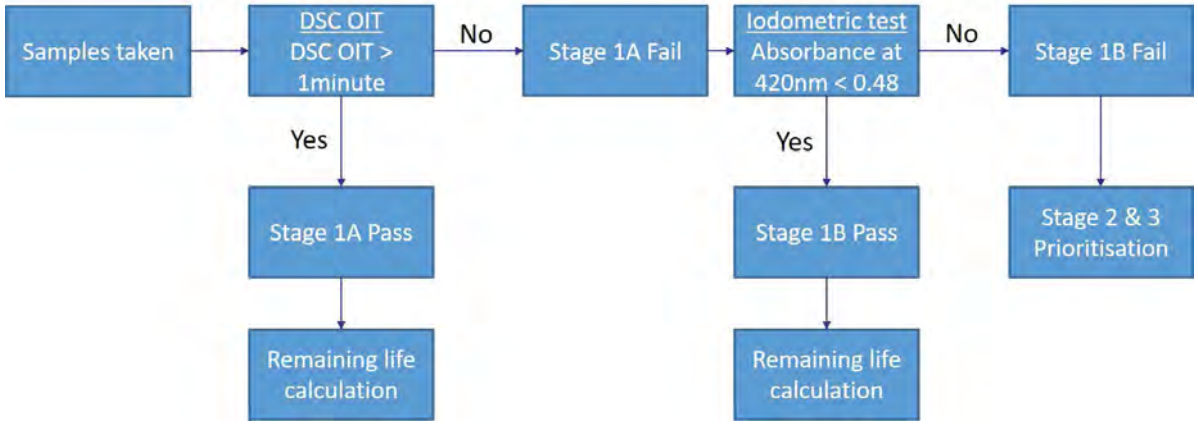


Figura 9. schema di valutazione della vita residua per tubazioni adibite al trasporto dell'acqua [17]

Il metodo chimico presenta il vantaggio di una facilità operativa ed una risposta in tempi brevi, un grosso svantaggio è che non tiene conto dell'eventuale presenza di difetti, [6].

3. Conclusioni

In questa memoria sono stati presentati alcuni metodi di stima della vita residua delle tubazioni in polietilene basati sia su prove meccaniche che su analisi chimiche. Inoltre, sono stati illustrati degli esempi di applicazione di tali metodi. Il metodo chimico consente una rapida valutazione della posizione del tubo sul diagramma tensione tempo ma non tiene conto dell'eventuale presenza di difetti nel loro stadio iniziale la cui crescita può portare ad una rottura fragile del componente in tempi inferiori a quelli attesi con il solo metodo chimico. La stima della vita residua deve quindi tenere conto dell'eventuale azione di entrambi i meccanismi. Dal lavoro si evince anche come sia rilevante lo sviluppo e/o l'impiego di modelli previsionali in grado di rendere conto delle differenti caratteristiche dei materiali assieme alle condizioni di esercizio (ambientali e tensionali) dei componenti per una stima la più accurata possibile della loro vita residua.

4. Bibliografia

[1] L. H. Gabriel. "History and physical chemistry of HDPE" Ch1, Recommended materials specifications and design requirements, National Academy Press, 1999, htpps://plasticpipe.org

[2] William F. Smith. Scienza e tecnologia dei materiali, seconda edizione McGraw-Hill

[3] J.M. Burgess Sanders. "Techniques to determine the remaining In- service life of polymer pipes for the water industry" PhD thesis, 2010, Imperial College, London

[4] M.A. Khan, C. Young, D.B. Layzell. "The techno-economics of hydrogen pipeline" Transition accelerator technical brief, volume 1, issue 2, november 2021

[5] S. Castagnet, J.C. Grandidier, M. Comyn, G.Benoit “Effect of long term hydrogen exposure on the mechanical properties of polymers used for pipes and tested in pressurized hydrogen” Int. J. Press. Vessel. (2012), 89, 203-209

[6] Sixi Zha, Hui-qing Lan, Hui Huang. Review on lifetime predictions of polyethylene pipes: Limitations and trends. Int. J. Press. Vessel. August 2022, Vol. 198. ISSN 0308-0161.

[7] BS EN ISO 9080 “Plastic piping and dutting systems: determination of long term hydrostatic strenght of termoplastic material in pipe form by estrapolation”

[8] ASTM D2837 Standard test method for obtaining hydrostatic design basis for thermoplastic pipe material or pressure design basis for thermoplastic pipe products.

[9] Analysis of ductile and brittle failures from creep rupture testing of high-density polyethylene (HDPE) pipes. Krishnaswamy, Rajendra K. 25, October 2005, Polymer, Vol. 46, p. 11664-11672. ISSN 0032-3861.

[10] Jung-Wook Wee, Byoung-Ho Choi Stochastic study on effects of material and physical parameters on slow crack growth behaviors of HDPE using the crack layer theory. Int. J. Solids Struct., 2020, Vol. 195, p. 13-27. ISSN 0020-7683.

[11] Sanders, J.M. Burgess. Techniques to determine the remaining In- service life of polymer pipes for the water industry, PhD thesis, 2010, Imperial College, London.

[12] David Broek. Elementary engineering fracture mechanics. Martinus Nijhoff publishers, Dordrecht, fourth revised edition 1987, pp. 181

[13] Lang, R.W., Stern, A. and Doerner, G. May Applicability and limitations of current lifetime prediction models for thermoplastics pipes under internal pressure. 1997, Die Angewandte Makromolekulare Chemie, Vol. 247, p. 131-145.

[14] Pinter, G., Lang, R. & Haager, M. A Test Concept for Lifetime Prediction of Polyethylene Pressure Pipes., Monatshefte fur Chemie, April 2007, Vol. 138, p. 347-355.

[15] Pavel Hutar, Martin Ševcík, Luboš Náhlík, Gerald Pinter, Andreas Frank, Ivaylo Mitev. A numerical methodology for lifetime estimation of HDPE pressure pipes. Eng. Fract. Mech., 2011, Vol. 78, p. 3049-3058.

[16] Eric M. Hoang, David Lowe “Lifetime prediction of a blue PE 100 water pipes” Polym. Degrad. Stab. ,2008, 93, 1496-1503

[17] J. Sanders et al. “Asset management procedure for assessing the risk of failure and remaining useable life of polyethylene waters mains” Water’s Industry insight www.rpsgroup.com

Verifica d'integrità decennale di un generatore di vapore a tubi d'acqua al servizio della linea 1 del Termoutilizzatore A2A di Brescia

F. Rossetti[1], N. Palumbo[1], A. Serra[2], D. Airoldi[3]

[1] Inail – Uot di Brescia
[2] ATS Brescia
[3] A2A Ambiente SPA

Abstract

Questa memoria espone le procedure che sono state messe in campo per l'esecuzione della verifica di integrità decennale del generatore di vapore al servizio della linea 1 del termoutilizzatore di Brescia. Verrà illustrata nel dettaglio la verifica di integrità del corpo cilindrico del generatore di vapore e della tubazione di caduta con particolare riguardo alle prove non distruttive.

Keywords: generatore di vapore a tubi d'acqua, verifica integrità, prove non distruttive.

1. Introduzione

Ai sensi dell'allegato VII del d. lgs. n. 81/2008 i generatori di vapore sono soggetti ad una verifica di integrità delle membrature soggette a pressione con una periodicità decennale. Ai sensi del d.m. 11/04/2011 la verifica di integrità decennale consiste nell'accertamento dello stato di conservazione delle varie membrature mediante esame visivo delle parti interne ed esterne accessibili ed ispezionabili, nell'esame spessimetrico ed altre eventuali prove eseguite da personale adeguatamente qualificato incaricato dal datore di lavoro, che si rendano necessarie:

a) data la non completa ispezionabilità dell'attrezzatura;
b) qualora emergessero dubbi sulla condizione della membratura;
c) a fronte di situazioni evidenti di danno;
d) in base alle indicazioni del fabbricante per attrezzature costruite e certificate secondo le direttive di prodotto (97/23/CE, 87/404/CEE, 90/488/CEE)

2. Modalità operative

L'attività di valutazione si compone delle seguenti fasi:

a) verifica documentale del generatore e redazione di un piano dei controlli;
b) valutazione dello stato di conservazione;
c) redazione del rapporto della valutazione.

In alternativa a quanto indicato sopra, l'analisi tecnica di conservazione può essere effettuata in accordo a procedure basate su analisi del tipo Risk Based Inspection (UNI/TS 11325-8) o ad altre norme o codici applicabili di cui sia dimostrata l'equivalenza degli esiti delle valutazioni.

2.1 Piano dei controlli non distruttivi

L'azienda proprietaria ed esercente l'impianto, ha provveduto a redigere un documento di dettaglio dei controlli non distruttivi, chiamato Piano dei Controlli (PdC) allo scopo di raccogliere le informazioni necessarie alla valutazione dello stato di conservazione del generatore di vapore a tubi d'acqua (GV) al servizio della Linea 1 dell'impianto di termoutilizzazione di Brescia. Il report finale del Piano dei Controlli è parte integrante del verbale di verifica di integrità decennale rilasciato dalla SSD impiantistica di ATS Brescia quale soggetto incaricato delle verifiche periodiche da parte del datore di lavoro. La definizione del dettaglio dei controlli prende in considerazione:

- ore di esercizio dei due GV;
- estensione ed esiti delle ispezioni e verifiche precedenti;
- il layout delle membrature in relazione ai vincoli ed ai punti fissi ed eventuali esiti del controllo del casing.

L'esame visivo interno/esterno e la prova idraulica saranno integrati da indagini supplementari atte a stabilire le reali condizioni dei componenti e monitorare al meglio l'andamento della corrosione negli anni e prevenire eventuali rotture e fermate improvvise nel futuro. I controlli non distruttivi sono stati eseguiti e valutati da personale qualificato di secondo livello secondo la norma UNI EN ISO 9712. Tutte le parti in pressione sono state esaminate con estensione dei controlli pari al 10% (considerando un coefficiente di saldatura di 0,85), considerate anche le condizioni operative dei vari componenti. Nel caso in cui, durante i controlli, l'operatore avesse riscontrato qualche anomalia sarebbe stata valutata l'entità della difettologia riscontrata e, se necessario, estesi i controlli e/o eseguiti controlli aggiuntivi di diversa tipologia. Il piano dei controlli è stato redatto e revisionato dalla ditta incaricata a seguito di sopralluogo effettuato durante la fermata programmata della linea. Nella scelta dei punti da controllare si sono privilegiati quelli dove l'operatore poteva accedere con maggiore efficacia ed in assoluta sicurezza. Il piano dei controlli è stato preventivamente sottoposto all'attenzione delle SSD Impiantistica di ATS Brescia che ha rilasciato, prima dell'esecuzione, un benestare sulle procedure stabilite. Durante l'esecuzione dei controlli i funzionari dell'Impiantistica di ATS Brescia hanno provveduto ad effettuare una visita sul luogo per constatarne l'esecuzione secondo il piano autorizzato.
I controlli non distruttivi eseguiti così come previsto dal piano approvato, sono stati i seguenti:

- Esame Visivo (VT);
- Controllo con metodo particelle magnetiche (MT);
- Rilievi spessimetrici con ultrasuoni (UTS);
- Controllo con ultrasuoni delle saldature (UT);
- Esame tramite replica metallografica (ST);

2.2 Dati del generatore

Costruttore: *ANSALDO CALDAIE S.p.A.*
Anno di costruzione: *novembre 1997 e Riqualificato PED in accordo alla 97/23/EC il 03/04/2012*
Tipo: *"GVR" Generatore di vapore*
Pressione di progetto caldaia: *87 bar*
Produzione di vapore: *150.000 kg/h*
Temperatura di progetto ECO: *304 °C*
Temperatura di progetto EVA: *302 °C*
Temperatura di progetto SH: *480 °C*
Capacità totale del generatore:
Economizzatore: *56.000 Lt.*
Corpo cilindrico: *19.000 Lt.*
Evaporatore: *56.000 Lt.*
Banchi evaporatore: *16.800 Lt*.
Surriscaldatore: *33.500 Lt.*
Fluido: Acqua
Stato fisico del fluido: *Liquido/Vapore surriscaldato*

2.3 Controlli e documentazione precedenti relative ai generatori

Di seguito si riportano gli estremi delle ultime verifiche periodiche effettuate:
- 05/07/2021: Ultima Verifica periodica "prova funzionale"
- 15/10/2021: Ultima Verifica periodica "Visita interna"

Interventi di riparazione e/o sostituzioni banchi dalla messa in servizio del 2017:
- Luglio 2017: Sostituzione di n.55 curve del diam. 42,4 mm sp. 5 mm sulla prima fila del banco uscita SH1.
- Giugno 2018: Sostituzione completa banco SH2, sostituzione completa cielo caldaia e parete di mezzo, apertura e ripristino della parete laterale sup. 1° passaggio, modifica pareti primo canale per cambio posizione aria secondaria, riporto di Inconel su alcune superfici in camera di combustione.
- Ottobre 2021: Sostituzione completa banco SH3, inserimento TIE IN 3" tubazione uscita vapore saturo.

2.4 Attrezzature oggetto dei controlli

Di seguito sono elencati i CND da eseguire sulle parti in pressione e sui componenti/membrature più a rischio di usura (per condizioni di temperatura, pressione e stress ciclico). Le membrature interessate dalle verifiche sono state sia

quelle interne sia quelle perimetrali (piping esterno compreso di valvolame di intercetto e di regolazione). In particolare, la percentuale di controlli è stata più estesa sui collettori dell'SH e dell'ECO e sulle tubazioni acqua/vapore esterne al generatore ma facenti parte dell'insieme a pressione, mentre nelle restanti zone, come le tubazioni dei banchi SH, EVA ed ECO non raggiungibili dall'Operatore, sono stati eseguiti controlli spot e solo in caso di difetti, dopo aver analizzato la loro entità, si è valutata la necessità di estendere i controlli o di eseguire controlli aggiuntivi. Tutte le membrature di seguito elencate, considerando i dati di progetto (TS e materiali), non sono soggetti a fenomeni di scorrimento viscoso ad eccezione del collettore uscita surriscaldatore (SH2), delle tubazioni che lo collegano agli attemperatori e degli attemperatori stessi per i quali è in atto la valutazione, da parte dell'INAIL, per l'autorizzazione all'ulteriore esercizio (l'utente ha richiesto un intervallo di riscontro pari a 50.000 ore).

In occasione della verifica d'integrità sono stati controllati:

1. Economizzatore;
2. Corpo cilindrico e suoi tubi di caduta principali, tubi di alimento evaporatore e collettore; tubazione vapore saturo e ritorni;
3. Principali collettori di tubi;
4. Surriscaldatori SH1, SH2 e SH3;
5. Attemperatori;
6. Parti in pressione – Valvole;

2.5 Specifiche di controllo e personale

Per l'esecuzione delle attività di controllo si è fatto riferimento a norme EN pertinenti quali:
- Esame visivo (VT): EN 17637:2017 e EN 17638:2016;
- Esame ultrasonoro per rilievo di spessori (UTS): EN 14127:2011;
- Esame ultrasonoro difettoscopico di saldature (UT): EN 16810:2014 e EN ISO 17640:2018 (livello di accettabilità 2 secondo EN11666:2018);
- Esame magnetoscopico (MT): EN1369:2012 e EN ISO 17638:2016;
- Esame con liquidi penetranti (LP): EN3452-1:2013 e EN ISO 23277:2015.

Il personale addetto all'esecuzione dei controlli non distruttivi è qualificato almeno di II° livello in accordo alla UNI EN ISO 9712:2012 (ora UNI EN ISO 9712:2022). Tutte le saldature dei tratti scoibentati sono state sottoposte a controllo visivo (VT). Sono stati controllati mediante esame magnetoscopico o liquidi penetranti tutti gli eventuali accessori saldati nelle vicinanze delle saldature delle parti in pressione e comunque dei pezzi sottoposti a controllo. Nel caso di inaccessibilità delle saldature, i controlli sono stati effettuati spostandosi sulla saldatura più vicina. Le saldature in prossimità di valvole sottoposte a controlli ultrasonori (UT) sono state controllate per quanto possibile.

2.6 Verifica dei supporti

Per alcune tubazioni non si hanno elementi sufficienti per valutare lo stato di funzionalità dei supporti. Le attività eseguite sono state finalizzate all'individuazione delle posizioni dei supporti che presentavano eventuali criticità. La valutazione dei risultati delle verifiche, oltre a fornire una indicazione di massima del corretto funzionamento dei supporti e quindi della efficienza delle linee, è stata impiegata come criterio generale per individuare le posizioni ove effettuare ulteriori controlli non distruttivi. L'attività si è articolata in due fasi: *Controllo visivo "a freddo"* e *controllo visivo "a caldo"*; in quest'ultima fase si segnalano eventuali problemi specifici dei singoli supporti quali: usura e cattiva conservazione dei sistemi di ancoraggio del supporto alla tubazione, evidente danneggiamento del tirante o della sospensione dei tiranti, supporti "in battuta", e si procede a rilevare l'appostamento degli indici mobili e degli indicatori tridimensionali laddove presenti. Si procede, inoltre, a segnalare eventuali interferenze della linea con le strutture fisse d'impianto o macroscopiche deformazioni della linea stessa.

2.7 Dettaglio delle verifiche sul corpo cilindrico e sulla tubazione di caduta del generatore al servizio della linea 1 con i relativi dati di progetto (tabella 2.7.1)

1. Esame visivo;
2. Esame magnetoscopico;
3. Rilievo spessimetrico con ultrasuoni;
4. Esame difettoscopico con ultrasuoni di saldature;

Corpo Cilindrico Tubo di caduta principale										
Dati identificativi			**Dati di progetto**							Note
Item	Identif.	Descriz. estesa	Mat.	Dn	De	SP Nom.	$SP_{min.}$ Nom.	PS (bar)	TS (°C)	
01	CC	Corpo cilindrico	Marrel AM60	1200	1200	30	30	87	302	Fondo SP_{min} 31
02	TB_CAD	Tubi di caduta	A106 Gr C	400	406,4	21,44	18,76	87	302	N.2 tubi

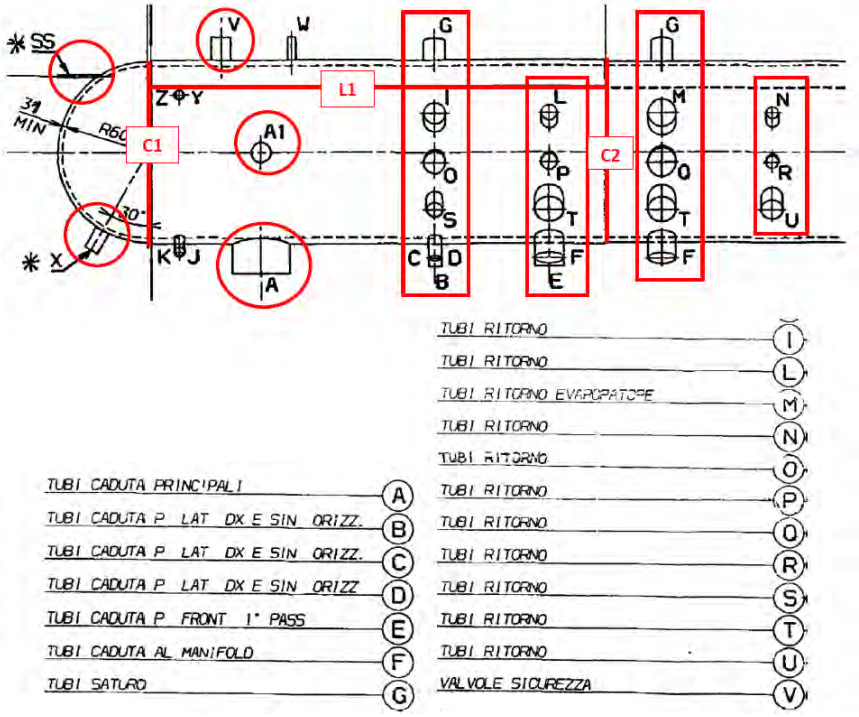


Tabella 1. Dati progettuali dell'attrezzatura

2.8 Parti ispezionate

- Tutte le superfici accessibili e scoibentate nei primi 5 metri lato destro;
- Tutte le saldature dei bocchelli in elenco al corpo cilindrico;
- Saldature di composizione circonferenziali C1 e C2 e longitudinale L1;
- Lo spigolo della foratura per il passo d'uomo sul fondo destro.

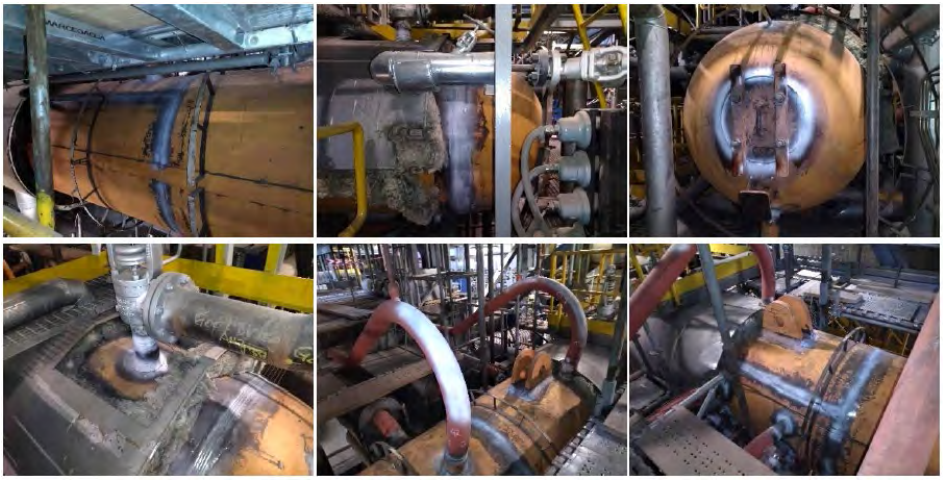
Di seguito sono riportati gli estratti dei report di verifica effettuati:

ESAME MAGNETOSCOPICO
MAGNETIC PARTICLES EXAMINATION

Piano di Controllo QCP: A2A-104-01_22		**Procedura** Procedure: ISO 17638	
Classe di saldatura Welding class: /	**Estensione** Coverage: Vedi schema	**Accettabilità** Acceptance: EN ISO 23278 LEV.2	
Condizioni superficiali Surfaces condition: Molato	**Fase** Phase: Componente esercito	**Materiale** Material	
Tipo di giunto Type of joint: Tests/Testa - (Butt weld)	**Spessori** Thickness: vari	**Processo di saldatura** Welding process: /	
Parametri / Parameters	**Metodo** / Method		**Osservazione** / Observation
CC / DC — X — CA / AC	**Puntali** Prods — **Distanza** Spacing	X **Diretta** Directly	**Luce di Wood** Wood light
Impulso Pulse: 5 Sec.	X **Giogo** Yoke — **Distanza** Spacing: 160 mm	**Illuminazione** Illuminance: ≥ 500 lx	

Prodotti impiegati / Products

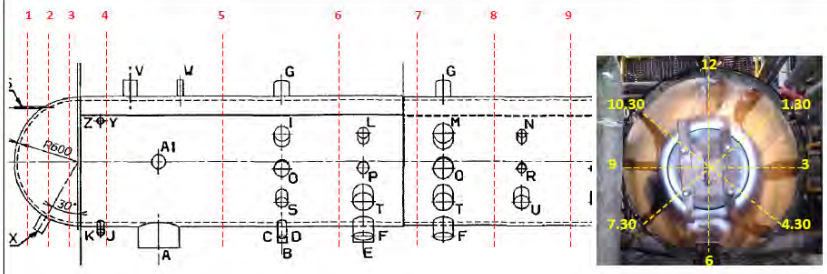
Prodotto / Product	**Marca** / Trade	**Tipo** / Type	**Colore** / Colour	**Applicazione** / Application
Mezzo di Contrasto Contrast Paint	CGM	Vecoplast	White	SPRAY
Sospensione Liquida Wet Souspension	CGM	LK 35	Black	SPRAY



RILIEVO SPESSIMETRICO con ULTRASUONI

THICKNESS MEASUREMENT by UT

Piano di Controllo Tests Planning	A2A-104-01_22		**Procedura** Procedure	NC-P-UT006 Rev.1	**Accettabilità** Acceptance: Vedi Sp. minimo
Fase Phase	X	**Componente esercito** Operational component	**Dati di progetto**		
Strumento Instrument	GE DM5E				
Trasduttori Probe	Krautkrämer DA501EN		**Corpo Cilindrico item 01** mantello **virola 1** sp_{nom} 40,0 mm – **virola 2** sp_{nom} 30,0 mm (*min. 30,0*) – **fondo** sp_{min} 31,0 mm		
Accoppiante Couplant	Gel				

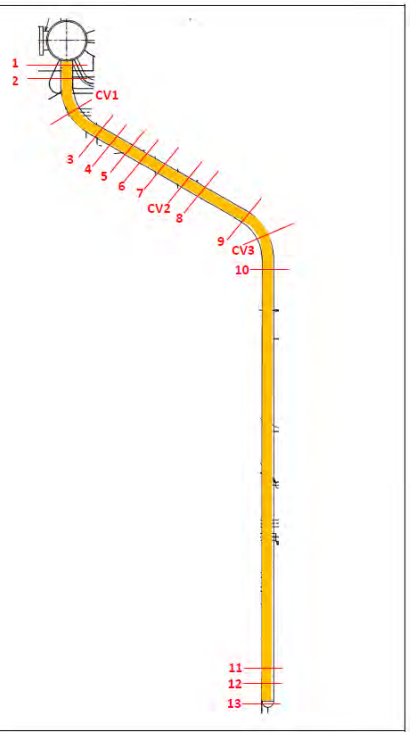


	Sezione	12^{00}	1^{30}	3^{00}	4^{30}	6^{00}	7^{30}	9^{00}	10^{30}
Fondo	1	33.8	33.8	33.6	33.6	33.6	33.6	33.5	33.5
	2	35.7	35.7	35.7	35.7	35.9	35.5	35.5	35.5
	3	37.9	37.8	37.5	37.5	37.3	37.4	37.2	37.1
Virola 1	4	44.4	44.3	44.7	44.6	44.7	44.7	44.2	44.4
	5	44.2	44.2	44.3	44.4	44.2	44.2	44.2	44.2
	6	44.2	44.4	44.3	44.3	44.3	44.2	44.2	44.2
Virola 2	7	34.2	34.2	34.2	34.5	34.3	34.3	34.3	34.5
	8	34.4	34.3	34.4	34.5	34.3	34.3	34.4	34.4
	9	34.4	34.2	34.3	34.3	34.4	34.5	34.5	34.3

RILIEVO SPESSIMETRICO con ULTRASUONI
THICKNESS MEASUREMENT by UT

Piano di Controllo / Tests Planning	A2A-104-01_22		Procedura / Procedure	NC-P-UT006 Rev.1	Accettabilità / Acceptance: Vedi Sp. minimo
Fase / Phase	X	Componente esercito / Operational component	Dati di progetto		
Strumento / Instrument	GE DM5E				
Trasduttori / Probe	Krautkrämer DA501EN		Tubo di caduta item 01		
Accoppiante / Couplant	Gel		sp_{nom} 21,44 mm (*min. 18,76*)		

sezione		12⁰⁰	3⁰⁰	6⁰⁰	9⁰⁰
1 bocchello		50.9	51.5	50.8	51.0
2		22.2	22.3	22.8	22.8
CV1	A	Estr. 21.0	Intr. 24.4		
	B	Estr. 21.1	Intr. 24.7		
	C	Estr. 21.1	Intr. 24.5		
3		22.9	23.4	22.1	21.1
4		22.8	24.2	21.5	21.4
5		23.7	23.8	21.0	22.4
6		21.7	22.8	23.2	22.0
7		21.6	21.5	22.7	22.2
CV2	A	Estr. 21.9	Intr. 24.5		
	B	Estr. 21.7	Intr. 24.5		
	C	Estr. 22.1	Intr. 24.2		
8		23.1	22.4	22.8	23.1
9		22.4	22.2	22.7	22.3
CV3	A	Estr. 21.1	Intr. 24.2		
	B	Estr. 20.9	Intr. 24.8		
	C	Estr. 21.1	Intr. 24.8		
10		22.1	22.2	22.5	22.8
11		20.9	22.2	21.5	20.8
12		20.8	22.2	21.3	20.6
13 fondello		25.3	25.2	25.1	24.9



ESAME DIFETTOSCOPICO con ULTRASUONI di SALDATURE
ULTRASONIC EXAMINATION of WELDS

Piano di Controllo / QCP	A2A-104-01_22	Procedura / Procedure	*UNI-EN 17640 Technique 1*
Classe di saldatura / Welding class	/	Estensione / Coverage	Accettabilità / Acceptance: UNI-EN 11666 Level 2

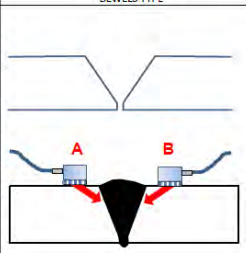
Fase / Phase: ☐ Primo controllo / First test ☐ Dopo riparazione / After repair ☐ Prima TT / Before PWHT ☐ Dopo TT / After PWHT ☒ Componente esercito / Operational component

Condizioni delle superfici / Surface conditions: ☐ Spazzolato / Brushed ☐ Lavorato di macchina / Machined ☒ Molato / Grinded ☐ Sabbiato / Sandblasted ☐ Verniciato / Painted

Tipo di giunto / Type of joint	Tests/Testa - (Butt weld)	Spessori / Thickness	30 / 40 mm
Materiale / Material	Marrel AM60 / ASTM A106 Gr. C		

	Krautkrämer — Tipo / Type	B2S	SWB60	SWB70	
Sonde / Probes	Angolo / Angle	0	60	70	
	Frequenza MHz / Frequency	4	2	2	2
	Dimensioni Cristallo / Cristal size(mm)	24	14x14	14x14	
	Posizione (rif.schema) / Position (ref to the sketch)	A – B	A – B	A – B	
Taratura / Calibration	Fondo scala / Range (mm)	2T	150	150	
	Amp. d'esame + / Gain + (dB)	6	6	6	
	ϕ foro (mm) / Hole diameter	Fbh 2	Sdh 3	Sdh 3	

TIPO DI CIANFRINO / BEWELS TYPE



Accoppiante / Couplant: Gel

Strumento / Instrument: Krautkrämer USMGO (SN 9100012)

SALDATURE CONTROLLATE

Corpo Cilindrico item **01**	Saldatura circonferenziale del Tubo di Caduta destro al bocchello "A"
	Saldatura circonferenziale del Tubo di Caduta Parete Frontale Primo Passo al bocchello "E"
	Saldature circonferenziali Fondo/Virola 1 e Virola 1 / Virola 2
	Saldature longitudinali Virole 1 e 2

ESAME DIFETTOSCOPICO con ULTRASUONI di SALDATURE
ULTRASONIC EXAMINATION of WELDS

Piano di Controllo QCP	A2A-104-01_22	Procedura Procedure	*UNI-EN 17640 Technique 1*
Classe di saldatura Welding class	/	Estensione Coverage	Accettabilità Acceptance: UNI-EN 11666 Level 2

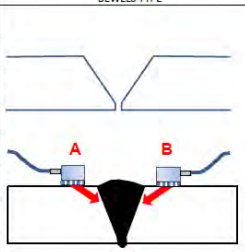
Fase Phase: ☐ Primo controllo First test ☐ Dopo riparazione After repair ☐ Prima TT Before PWHT ☐ Dopo TT After PWHT ☒ Componente esercito Operational component

Condizioni delle superfici Surface conditions: ☐ Spazzolato Brushed ☐ Lavorato di macchina Machined ☒ Molato Grinded ☐ Sabbiato Sandblasted ☐ Verniciato Painted

Tipo di giunto Type of joint	Tests/Testa - (Butt weld)	Spessori Thickness	22 mm
Materiale Material	Marrel AM60 ASTM A106 Gr. C		

	Krautkrämer Tipo Type	MB4	MWB60	MWB70
Sonde Probes	Angolo Angle	0	60	70
	Frequenza MHz Frequency	4	4	4
	Dimensioni Cristallo Cristal size(mm)	10	8x9	8x9
	Posizione (rif.schema) Position (ref to the sketch)	A – B	A – B	A – B
Taratura Calibration	Fondo scala Range (mm)	2T	100	100
	Amp. d'esame + Gain + (dB)	6	6	6
	ϕ foro (mm) Hole diameter	Fbh 2	Sdh 3	Sdh 3

TIPO DI CIANFRINO
BEWELS TYPE



Accoppiante Couplant: Gel

Strumento Instrument: Krautkrämer USMGO (SN 9100012)

SALDATURE CONTROLLATE

Tubo di Caduta item **02**

Saldatura di connessione al bocchello "A"

Saldatura circonferenziale tra CV1 e CV2

Figure 1. Report degli esami: Visivo, magnetoscopico, spessimetrico, difettoscopico.

2.9 Riepilogo e conclusioni

In tutti i report CND per la linea 1 non è stata individuata alcuna indicazione rilevante. Unica segnalazione riguarda i TUBI SCREEN Item 1.6 1° passaggio che, da esame visivo, presentano danneggiamenti della placcatura in Inconel. Tuttavia, il fenomeno non ha ancora provocato riduzioni di spessore al di sotto del minimo.

Sui tubi Item 1.6 (Tubi Screen 1° passaggio) e 1.13 (Tubi Screen 3° passaggio) sono state fatte delle misure di spessore a campione. Attualmente lo spessore misurato non è inferiore allo spessore minimo previsto da progetto.

Nel report 2208-498 / 5 è stato raccomandato il ripristino del riporto anticorrosione che è stato eseguito come dalle indicazioni progettuali.

Di seguito si riportano le immagini dopo il ripristino di inconel sui tubi screen 1° passaggio.



Figure 2. Ripristino di inconel sui tubi screen 1° passaggio.

Tutti i rilievi spessimetrici con ultrasuoni non hanno rilevato spessori inferiori al valore minimo progettuale calcolato come spessore nominale meno la tolleranza. Su tutti gli esami magnetoscopici eseguiti non sono emerse indicazioni da segnalare. In conclusione, questo lavoro vuole essere il resoconto dettagliato dei controlli da porre in essere su generatori a tubi d'acqua di grosse dimensioni, al fine di indirizzare, gli utilizzatori sulla corretta analisi dello stato di integrità di attrezzature in pressione di notevole complessità. Nello specifico, rimangono di fondamentale importanza l'esame visivo, magnetoscopico e spessimetrico. Mentre l'esame ultrasonoro è indispensabile per la verifica delle saldature.

Bibliografia

[1] d.m. 329 del 01/12/2004

[2] d.lgs. n. 81/2008

[3] d.m. 11/04/2011

Analisi dei meccanismi di corrosione di un surriscaldatore di vapore all'interno del termovalorizzatore di Acerra

N. Pedicini[1], M. Faiella[1], C. Liccardo[2], L. Tassan Pagnochit[2], A. Cocchiaro[3]

[1]Inail - Uot di Napoli
[2]A2A Ambiente SpA
[3]Consulente A2A Ambiente SpA

Abstract

Nel Termovalorizzatore di Acerra la configurazione delle caldaie a tubi d'acqua prevede stadi crescenti di surriscaldamento del vapore destinato all'azionamento della turbina; due di questi stadi avvengono in banchi surriscaldatori, denominati SH1.05 e SH3, realizzati con tubi di acciaio al cromo-molibdeno che sono posizionati nel secondo giro fumi (con temperature che vanno dai 450 ai 700 °C).
La temperatura e la tipologia dei fumi e la temperatura del vapore all'interno delle tubazioni comportano problematiche di usura dei banchi di surriscaldatori con conseguente corrosione superficiale delle tubazioni e riduzione degli spessori.
In particolare, la differenza di temperatura del vapore interno relativo alle due tipologie di scambiatori determina un diverso comportamento rispetto ai fenomeni di corrosione/erosione indotti dai fumi esterni, tanto che gli scambiatori SH1.05 sono rivestiti con uno strato di Inconel 625 e parzialmente con coppelle di acciaio (ma vi è comunque la necessità di frequenti interventi di sostituzione), mentre gli scambiatori SH3 sono rivestiti con cemento refrattario con ridotta permeabilità ai fumi.
Gli scambiatori termicamente più sollecitati, gli SH3, sono stati oggetto di analisi di laboratorio al fine di analizzare i meccanismi di corrosione in relazione alle sollecitazioni chimico-fisiche a cui sono sottoposti i materiali costituenti gli scambiatori stessi. I metodi di analisi adottati sono consistiti in indagini microscopiche, analisi chimiche e prove meccaniche su campioni di materiale prelevato da elementi sostituiti in seguito ad interventi di riparazione.
I risultati confermano la buona qualità dei materiali attualmente impiegati. Si evidenziano la possibilità di ulteriori approfondimenti sugli specifici meccanismi di corrosione e la possibile valutazione tecnico-economica sull'impiego di ulteriori tipologie di materiali caratterizzati da una ancor più elevata resistenza all'attacco chimico.

Keywords: corrosione, fumi, surriscaldatori.

1. Introduzione

Il Termovalorizzatore di Acerra è un impianto di recupero energetico dai rifiuti, progettato per produrre energia elettrica. È costituito da tre caldaie per la produzione di vapore, collegate ad un unico turbo-generatore.
La configurazione delle caldaie prevede diversi stadi di surriscaldamento del vapore realizzati con tubi di acciaio, seguiti da un ulteriore stadio di surriscaldamento (SH3) posizionato nel secondo giro fumi e rivestito con refrattario.
Gli scambiatori SH3 sono stati oggetto di analisi di laboratorio, di seguito presentate.

2. Indagini su meccanismi di corrosione SH3

Una sezione del pannello SH3 è stata inviata in laboratorio per le analisi, di seguito i risultati ottenuti.



Figura 1. Sezione di pannello analizzata



Figura 2. Dettaglio del campione analizzato

Inizialmente sono state eseguite le seguenti indagini:
• Rilievo fotografico
• Esame Macrografico
• Durezze HV10
• Esame Micrografico
• Analisi Chimica (XRF)

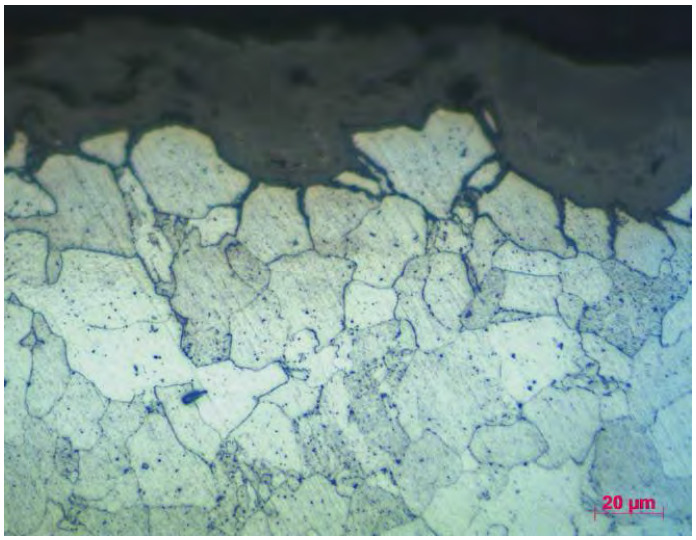


Figura 3. Esame micrografico 500X

RAPPORTO ANALISI CHIMICA/
CHEMICAL ANALYSIS TEST REPORT

➢ **ANALISI CHIMICA MATERIALE BASE-metodo: XRF /** *CHEMICAL ANALYSIS BASE MATERIAL - method: XRF*

Cr	Mn	Si	Ni	Cu	Mo	Ti	S	P
2.08	0.469	0.503	0.162	0.108	0.955	0.044	0.024	0.021

Note/*Remarks:*	Materiale compatibile con ASTM A 335 P22

Figura 4. Risultati analisi XRF

Successivamente sono state eseguite le seguenti indagini al fine di giungere ad una più accurata comprensione dei meccanismi di degrado.

- Prova di trazione a temperatura ambiente
- Prova di trazione a caldo (477 °C)
- SEM EDX sul pannello tubi e sul cemento
- Controlli C, S, Cl, Na e K
- XRD (diffrazione ai raggi X)

I principali risultati sono appresso riportati:

	T (°C)	Rm (MPa)	Rp 0,2% (MPa)
Materiale tubo pannello	t.a.	568±7,6	385±12,5
	477	427±18,8	345±34,5
Ref. Acciaio A335 P22	t.a.	415	205
	477	401	178

Figura 5. Sintesi dei risultati della prova a trazione e confronto con ASME IID – materiale risulta conforme

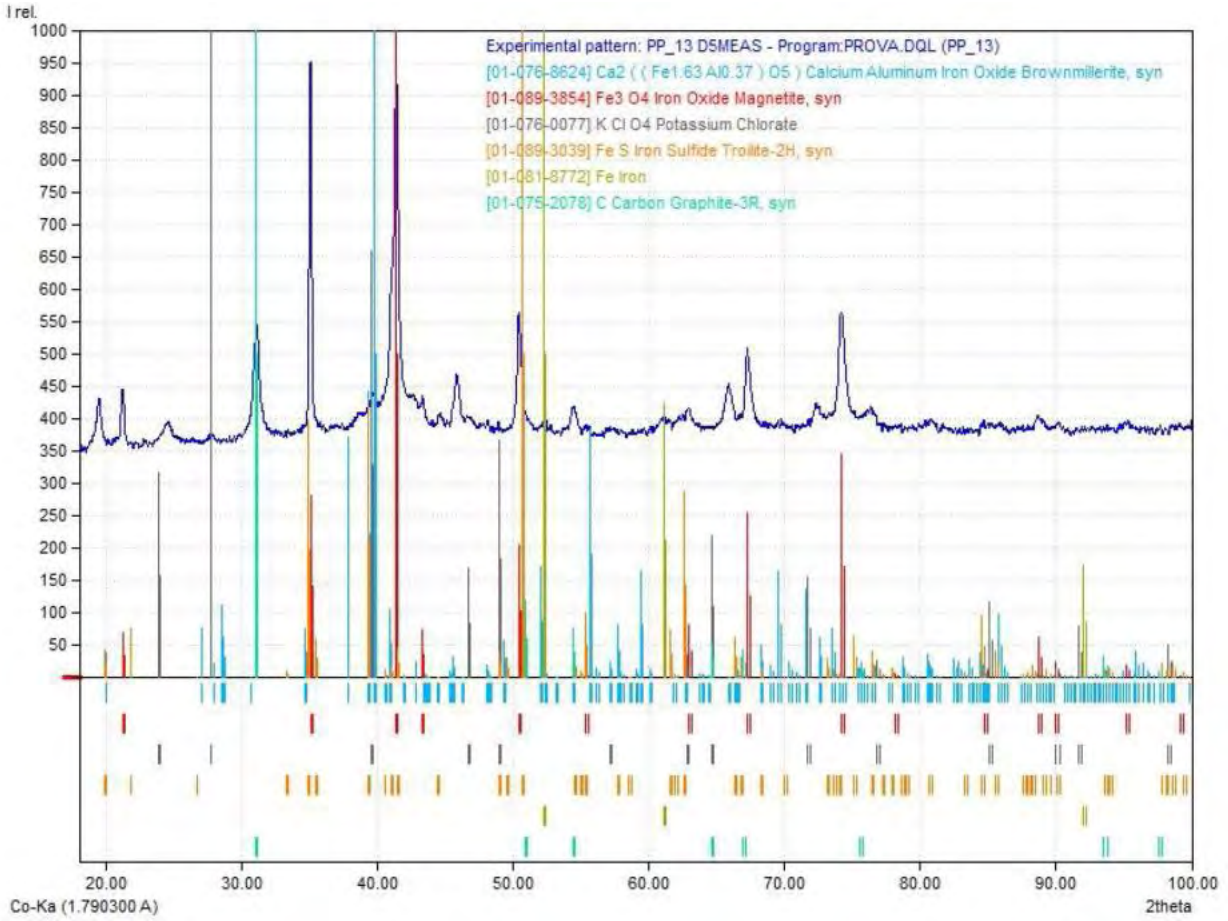


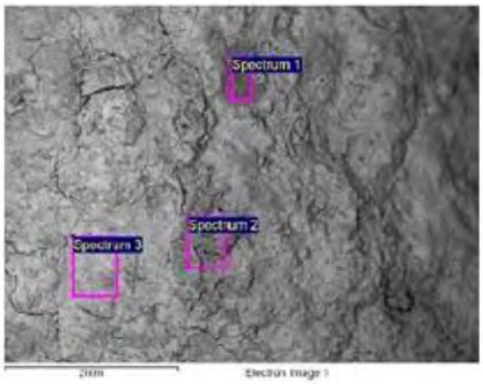
Figura 6. Pattern di diffrazione

Index	*Amount (%)*	*Name*	*Formula sum*
A	5,7	Calcium Aluminum Iron Oxide Brownmillerite, syn	Ca2 ((Fe1.63 Al0.37) O5)
B	46,9	Iron Oxide Magnetite, syn	Fe3 O4
C	2,5	Potassium Chlorate	K Cl O4
D	13,9	Iron Sulfide Troilite-2H, syn	Fe S
E	1,2	Iron	Fe
F	29,7	Carbon Graphite-3R, syn	C
	4,9	*Unidentified peak area*	

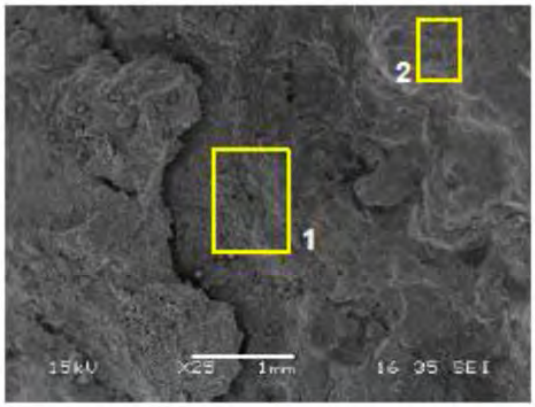
Figura 7. Fasi individuate risultanti dal pattern di diffrazione

Le analisi XRD sono state condotte su un campione massivo di materiale prelevato dalla superficie del pannello mediante spazzolatura e successivamente macinato al mortaio. I risultati delle analisi mostrano sia prodotti di corrosione che prodotti non ascrivibili ad attacchi corrosivi.
Aver riscontrato che circa il 50% dei prodotti aderenti alla superficie sono costituiti da Magnetite indica una sostanziale adeguatezza qualitativa del materiale. Gli ossidi di Fe

come la Magnetite, se di adeguata consistenza ed uniformità, possono svolgere una funzione protettiva (passivante) che evita ulteriori assottigliamenti.
Diversamente, il FeS può ritenersi un composto che in taluni casi può favorire la localizzazione dell'attacco, col rischio di vaiolature crateriformi.
La presenza di depositi carboniosi e di ossidi clorurati è chiaramente riconducibile sia alla carica del forno sia alla ventilazione comburente (che in impianti situati in zone marine favoriscono la formazione di depositi aderenti di Cloruri). Quando non si può incidere sulla carica, l'unico modo per ridurre tali depositi è quello di ottimizzare la quantità di aria in ingresso, evitandone gli eccessi.
Una quantità significativa di sostanze clorurate (quali il $KClO_4$) può svolgere una funzione di catalizzatore di processi di danneggiamento da sali fusi, in grado di dissolvere la magnetite protettiva e quindi favorire fenomeni di perforazione, anche piuttosto rapidi.
Una buona prassi impiantistica consiste nell'intervenire periodicamente per rimuovere tali ossidi, meglio se con tecniche meccaniche, poiché i lavaggi talvolta possono risultare inefficaci, quando le quantità di depositi risultano significative.
Le osservazioni al microscopio elettronico e le misure EDS sono state condotte sulla superficie del pannello tubi e su due campioni prelevati in sezione, in corrispondenza del tubo costituente principale. Analoghe osservazioni sono state condotte anche su frammenti di cemento, dopo specifica preparazione metallografica.
Si riportano di seguito alcune immagini SEM della superficie esterna del tubo, con le relative analisi chimiche puntuali EDS.

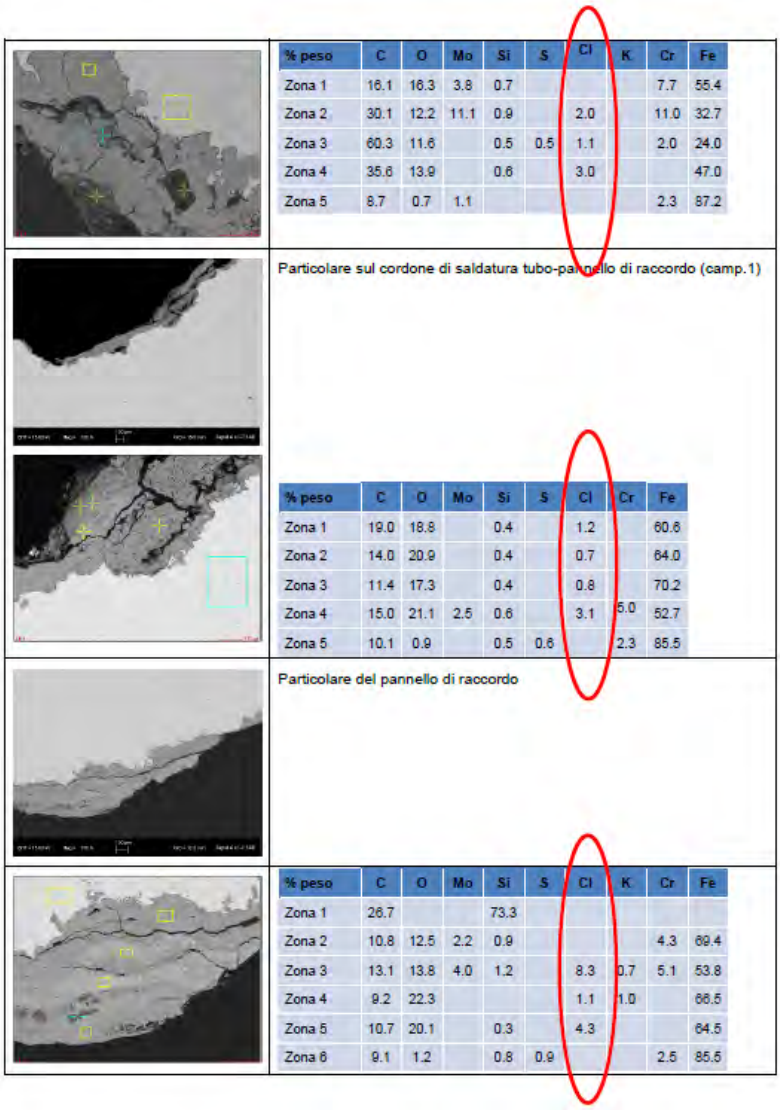


% peso	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Fe
zona 1		14.8				6.0	3.4	3.2	72.6
zona 2	13.2	20.9	0.3	0.4	0.2	2.6	3.1	1.7	57.7
zona 3			19.7			1.3	5.9		73.2



% peso	O	S	Cl	K	Ca	Fe
zona 1	20.7	0.6	17			61.4
zona 2	24.1	0.9	8.7	0.6	0.9	64.8

Figura 8. Immagini SEM in elettroni retrodiffusi (BSD) e relative analisi EDS delle superfici esterne del tubo



% peso	C	O	Mo	Si	S	Cl	K	Cr	Fe
Zona 1	16.1	16.3	3.8	0.7				7.7	55.4
Zona 2	30.1	12.2	11.1	0.9		2.0		11.0	32.7
Zona 3	60.3	11.6		0.5	0.5	1.1		2.0	24.0
Zona 4	35.6	13.9		0.6		3.0			47.0
Zona 5	8.7	0.7	1.1					2.3	87.2

Particolare sul cordone di saldatura tubo-pannello di raccordo (camp.1)

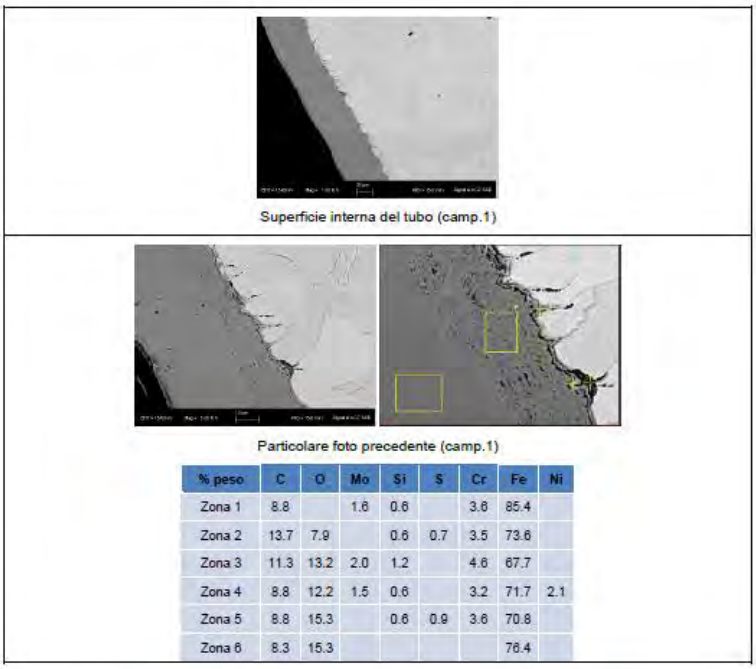
% peso	C	O	Mo	Si	S	Cl	Cr	Fe
Zona 1	19.0	18.8		0.4		1.2		60.6
Zona 2	14.0	20.9		0.4		0.7		64.0
Zona 3	11.4	17.3		0.4		0.8		70.2
Zona 4	15.0	21.1	2.5	0.6		3.1	6.0	52.7
Zona 5	10.1	0.9		0.5	0.6		2.3	85.5

Particolare del pannello di raccordo

% peso	C	O	Mo	Si	S	Cl	K	Cr	Fe
Zona 1	26.7			73.3					
Zona 2	10.8	12.5	2.2	0.9				4.3	69.4
Zona 3	13.1	13.8	4.0	1.2		8.3	0.7	5.1	53.8
Zona 4	9.2	22.3				1.1	1.0		66.5
Zona 5	10.7	20.1		0.3		4.3			64.5
Zona 6	9.1	1.2		0.8	0.9			2.5	85.5

Figura 9. Immagine SEM ed analisi EDS

La superficie esterna dei tubi è ricoperta da ossido (spessore circa 200 µm) in cui, oltre alle prevalenti fasi di ossidi di ferro e cromo, sono presenti elementi esogeni quali S; P; Cl; K, ma preminentemente Cl. Inoltre, in molte zone all'interno dell'ossido appaiono isole compatte in SiC, materiale componente principale del cemento di protezione utilizzato in esercizio



% peso	C	O	Mo	Si	S	Cr	Fe	Ni
Zona 1	8.8		1.6	0.6		3.6	85.4	
Zona 2	13.7	7.9		0.6	0.7	3.5	73.6	
Zona 3	11.3	13.2	2.0	1.2		4.6	67.7	
Zona 4	8.8	12.2	1.5	0.6		3.2	71.7	2.1
Zona 5	8.8	15.3		0.6	0.9	3.6	70.8	
Zona 6	8.3	15.3					76.4	

Figura 10. Immagini SEM e relative analisi EDS della superficie interna del tubo

La superficie interna del tubo appare ricoperta di un ossido stratificato di spessore attorno ai 40 µm, con alcune cricche orientate in direzione radiale, con una profondità fino a circa 80 µm. Lo strato più esterno, prevalentemente in ossido di ferro, ha uno spessore di circa il 70% del totale, mentre lo strato più prossimo alla superficie mostra un maggior contenuto in ossido di cromo rispetto allo strato esterno. Ci sono inoltre tracce piuttosto modeste di S.

3. Considerazione finali sui risultati delle indagini svolte

Le analisi microstrutturali al microscopio, in sezione trasversale dei tubi esaminati, hanno evidenziato una sostanziale omogeneità della microstruttura comparando le zone prossime al diametro esterno, a metà spessore e al diametro interno; non risultano evidenti difettosità significative della microstruttura.
Sono state rilevate alcune inclusioni e separazioni di modeste dimensioni tra tubo metallico e strato cementizio.
La superficie esterna del tubo mostra una marcata forma di danneggiamento corrosivo generalizzato.
La superficie interna del tubo mostra una uniforme ossidazione ed alcune modeste cricche ossidate orientate in direzione radiale.
Le analisi XRD mostrano la presenza di ossidi di Ferro e ossidi misti di Alluminio e Calcio e cloruro di Potassio e Solfuro di Ferro. Questi sono ossidi solo in parte ascrivibili a processi di corrosione.
Si è inoltre riscontrato che circa il 50% dei prodotti aderenti alla superficie sono costituiti da Magnetite e quindi una sostanziale adeguatezza qualitativa del materiale. Gli ossidi di Fe come la Magnetite, se di adeguata consistenza ed uniformità, possono svolgere una funzione passivante della superficie che evita ulteriori assottigliamenti.

Diversamente, il FeS può ritenersi un composto che in taluni casi può favorire la localizzazione dell'attacco, col rischio di vaiolature crateriformi.
La presenza di depositi carboniosi e gli ossidi clorurati è chiaramente riconducibile sia alla carica del forno e sia alla ventilazione comburente (che in impianti situati in zone marine favoriscono la formazione di depositi aderenti di Cloruri). Quando non si può incidere sulla carica, l'unico modo di ridurre tali depositi è quello di ottimizzare la quantità di aria in ingresso, evitandone gli eccessi.
Una quantità significativa di sostanze clorurate (quali il $KClO_4$) può svolgere una funzione di catalizzatore di processi di danneggiamento da sali fusi, in grado di dissolvere la magnetite protettiva e quindi favorire fenomeni di perforazione, anche piuttosto rapidi.
Una buona prassi impiantistica consiste nell'intervenire periodicamente per rimuovere tali ossidi, meglio se con tecniche meccaniche, poiché i lavaggi talvolta possono risultare inefficaci, quando le quantità di depositi risultano significative.
Le prove confermano la buona qualità del materiale impiegato che corrisponde ad un acciaio tipo P22; non si notano anomalie metallurgiche riconducibili all'esercizio. Sulla superficie esterna dei tubi si identificano prodotti di corrosione legati alla combustione e non si trovano contaminanti del cemento esterno che quindi non contribuisce al fenomeno corrosivo, per questo l'ipotesi è che i fumi di combustione, attraverso alcune rotture del cemento refrattario, possano insinuarsi tra il cemento e pannelli-tubi, dove condensando iniziano l'attacco corrosivo sul materiale base.

4. Bibliografia

[1] Kamuk B. Consequences by operating at extreme steam parameters. Presentazione tenuta al WtERT EU Meeting 2010, October 12-14, Brno, Czech Republic.

[2] Main A, Maghon T. Concepts and experiences for higher plant efficiency with modern advanced boiler and incineration technology. Presentazione (paper 3541) tenuta al NAWTEC 18, May 11, 2010, Orlando, FL, USA.

[3] Rapporto CISE-SCC-94-95. Stato dell'arte sul problema della corrosione ad alta temperatura negli inceneritori di rifiuti.

[4] Rapporto di prova 21080140 Tecnolab-lab Service srl – CND Service srl - Termovalorizzatore di Acerra – Indagini su campione di tubi SH3. Documento A2A Ambiente SpA

[5] Iovene R., Malvezzi S., Moretti D. Analisi dei meccanismi di danno nei surriscaldatori di vapore all'interno di un termovalorizzatore – Atti SAFAP 2014

Fattore di danno da creep secondo le metodologie di riferimento API 581

R. Cozza

SARTEC

Abstract

L'ispezione basata sul rischio (RBI) è un approccio proattivo alla gestione del rischio negli impianti industriali.

Si tratta di un processo strutturato e sistematico che aiuta a identificare le apparecchiature a maggior rischio e a dare priorità alle attività di ispezione e manutenzione in base a tale rischio.

L'RBI è utilizzato in molti settori, tra cui quello petrolifero e del gas, chimico, petrolchimico e della produzione di energia.

Il processo RBI inizia con l'identificazione delle apparecchiature critiche e la determinazione dei rischi potenziali associati al loro guasto. Ciò comporta l'analisi del progetto dell'apparecchiatura, delle condizioni operative e dei dati storici relativi a ispezioni, guasti e riparazioni. Il rischio viene quindi quantificato moltiplicando la probabilità di guasto per le conseguenze del guasto stesso.

Un'ulteriore fase dell'analisi RBI consiste nel definire le priorità delle apparecchiature in base al loro livello di rischio. Questo aiuta ad allocare le risorse in modo efficace, concentrandosi prima sulle apparecchiature con il rischio più elevato. Il processo RBI determina quindi le attività di ispezione e manutenzione appropriate in base al livello di rischio dell'apparecchiatura. Ad esempio, le apparecchiature ad alto rischio possono richiedere ispezioni più frequenti e/o più approfondite.

L'API RP 580 fornisce indicazioni sullo sviluppo di un programma RBI per apparecchiature statiche e le tubazioni, mentre l'API RP 581 fornisce procedure quantitative dettagliate per applicare la metodologia RBI.

L'Appendice J della prima edizione (2000) dell'API RP 581 conteneva procedure da applicare ai danni da Creep dei tubi dei forni. Tuttavia, la seconda (2008) e la terza (2016) non contenevano alcuna procedura per l'applicazione al danno da Creep delle apparecchiature, compresi i tubi dei forni.

È stato intrapreso un progetto RBI per un'unità di raffineria che richiedeva la valutazione dei componenti soggetti a danni da Creep. Nell'ambito di questo progetto, è stato sviluppato un modello dettagliato di probabilità di guasto (PoF) per il Creep.

Il presente documento esamina il modello PoF di Creep sviluppato e discute un caso di studio della sua applicazione. La PoF è stimata utilizzando una funzione di stato limite in cui la resistenza è caratterizzata dalle espressioni di Larson-Miller per il Creep e la rottura.

Per stimare la PoF si utilizza il metodo del valore medio del primo ordine e secondo momento (MVFOSM).
Il PoF calcolato con il metodo MVFOSM viene confrontato con i risultati applicando una simulazione Montecarlo.
Il caso di studio comprende il calcolo del Fattore di Danno per Creep e l'applicazione del principio di sovrapposizione per il Fattore di Danno per Thinning e Creep.

Keywords: Risk Based Inspection, scorrimento viscoso.

1. Affidabilità strutturale: approccio deterministico e probabilistico

In presenza di indeterminazione non è sempre semplice rispondere ai requisiti di progettazione.
La figura mostra un semplice esempio che considera due variabili: una variabile correlata alla richiesta del sistema (es.: carico di una struttura, S) ed una correlata alla capacità del sistema (es.: resistenza di una struttura, R) .
Sia R che S sono variabili casuali e possono essere caratterizzate dai seguenti parametri:

- media μ_s e μ_r
- deviazione standard σ_s , σ_r ,
- distribuzione cumulata di probabilità $f_S(s)$ e $f_R(r)$

La figura identifica anche i valori deterministici (nominali) di queste variabili, S_N and R_N, questi valori sono utilizzati nell' approccio convenzionale basato sugli indici di sicurezza.

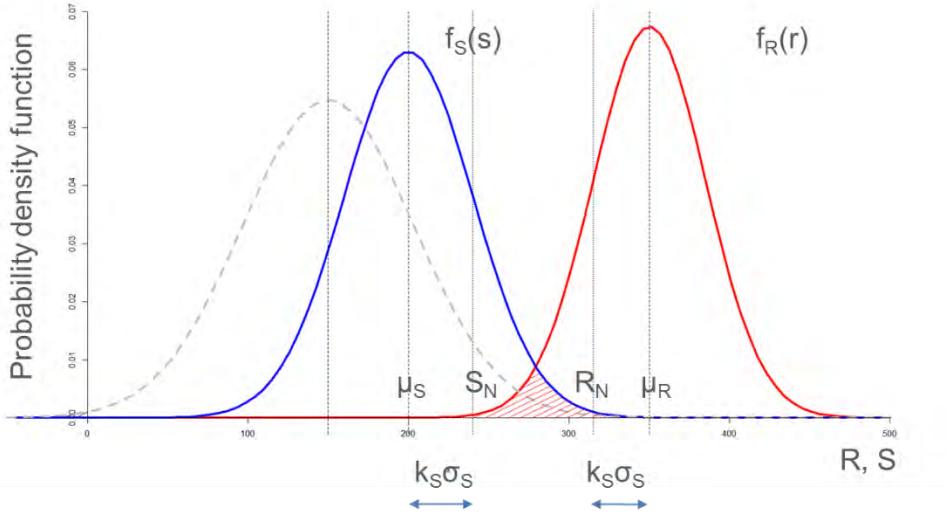


Figura 1. Distribuzione cumulata di probabilità $f_S(s)$ e $f_R(r)$

Sempre riferendosi alla figura, in un contesto deterministico, è richiesto che R_N sia maggiore di S_N con uno specifico margine di sicurezza (S_F):

- $S_F = R_N / S_N$

La resistenza nominale (o capacità) R_N è normalmente un valore conservativo, tipicamente uno, due, o tre deviazioni standard al di sotto del valore medio.

Il carico nominale (o richiesta) $\mathbf{S_N}$ è anch' esso un valore conservativo tipicamente uno, due, o tre deviazioni standard al di sopra del valore medio.
Riferendosi alla figura, quando la variabilità del carico e della resistenza sono espresse come una densità di probabilità, è possibile esprimere il rischio in termini di probabilità di "failure" o P(R < S) come:

$$p_f = P(\text{failure}) = P(R < S) = \int_0^\infty \left[\int_0^S f_R(r)dr \right] f_s(s)ds = \int_0^\infty F_R(s)\, f_s(s)ds$$

dove $F_R(s)$ è la distribuzione cumulata di R valutata ad s.
Questa espressione puo' essere considerate come l'equazione di base nell'ambito della progettazione basata sul rischio.

1.1 Definizione generale dell'indice di affidabilità

Consideriamo una struttura con resistenza R soggetta ad un singolo carico S.
Se sia R che S sono variabili normali è conveniente trasformarle nella loro forma standard che non è altro che la loro forma adimensionale.
Le variabili R ed S possono essere quindi trasformate nelle loro forme standard:

$$Z_S = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S}$$

$$Z_R = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R}$$

$$S = \mu_S + Z_S\sigma_S$$

$$R = \mu_R + Z_R\sigma_R$$

La funzione stato limite g(R,S) = R-S può quindi essere espresso come:

$$g(Z_R, Z_S) = \mu_R + Z_R\sigma_R - \mu_S - Z_S\sigma_S = (\mu_R - \mu_S) + Z_R\sigma_R - Z_S\sigma_S$$

Per ogni valore specifico di $g(Z_R, Z_S)$ l' equazione di cui sopra rappresenta una linea retta nello spazio delle variabili Z_R e Z_S.
La linea di nostro interesse per le nostre analisi di affidabilità è la linea corrispondente a $g(Z_R, Z_S) = 0$: questa linea separa I due domini *"safe"* e *"failure"* nello spazio delle variabili Z_R e Z_S.

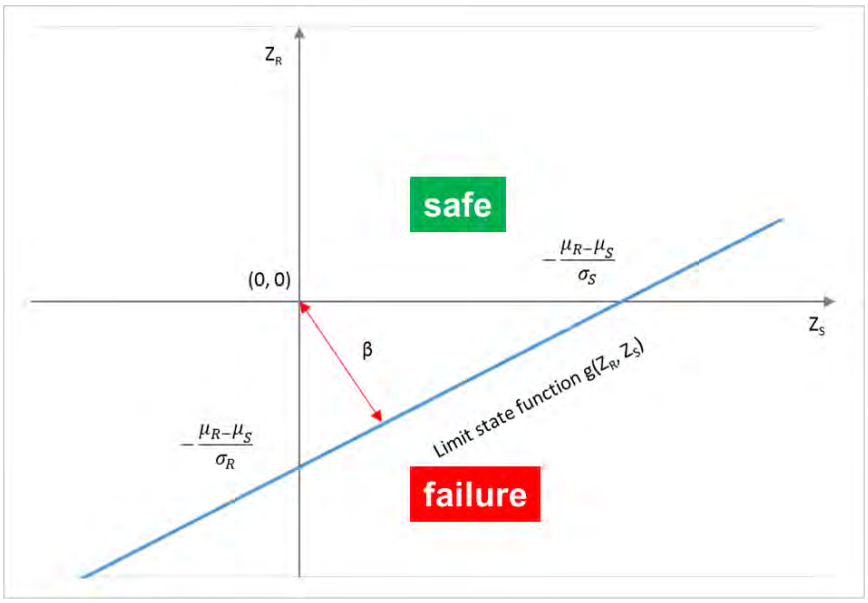


Figura 1. Linea stato limite per g(Z_R, Z_S) = 0.

Nel contesto della presente discussione è possibile definire l'indice di affidabilità β come la più breve distanza dall' origine alla retta g(Z_R, Z_S) = 0.
Utilizzando la geometria, l'indice di affidabilità β è pari a:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

Per variabili casuali con distribuzione normale si dimostra che l'indice di affidabilità β è correlato alla probabilità di avaria da:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$$

1.2 L' indice di affidabilità Hasofer-Lind

L' indice di affidabilità Hasofer-Lind, β , è definito come di seguito dettagliato:

- Definizione delle variabili ridotte

$$\{Z_1, Z_2, Z_3, \ldots\ldots Z_n\}$$

utilizzando

$$Z_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i}$$

- Ridefinire la funzione stato limite in termini di variabili ridotte:

$$(Z_1, Z_2, Z_3, \ldots\ldots Z_n)$$

- L' indice di affidabilità è la più breve distanza dall' origine dello spazio ad n dimensioni delle variabili ridotte con la superficie descritta dall' espressione:

$$g(Z_1, Z_2, Z_3, \ldots\ldots Z_n) = 0$$

1.3 Funzione stato limite lineare

Si consideri una funzione stato limite nella seguente forma:

$$g\left(X_1, X_2, X_3, \ldots\ldots X_n\right) = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + \ldots a_nX_n = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_iX_i$$

dove i a_i termini (i = 0, 1, 2, … , n) sono costanti e i X_i termini sono variabili casuali non correlate.
Applicando la procedura di cui sopra per la determinazione dell'indice di affidabilità, si ottiene la seguente espressione per β:

$$\beta = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^{n}\left(a_i\mu_{X_i}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(a_i\sigma_{X_i}\right)^2}}$$

1.4 Funzione stato limite non lineare

Si consideri una funzione stato limite non lineare.
Quando la funzione non è lineare è possibile linearizzarla utilizzando le serie di Taylor. Il risultato è:

$$g\left(X_1, X_2, X_3, \ldots\ldots X_n\right) \cong g\left(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \ldots\ldots x_n^*\right) + \sum_{i=1}^{n}\left(X_i - x_i^*\right)\left.\frac{\partial g}{\partial X_i}\right|_{\text{evaluated at } \left(x_1^*, x_2^*, x_3^* \ldots x_n^*\right)}$$

dove

$$\left(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \ldots\ldots x_n^*,\right)$$

è il punto dove l'espressione è valutata.

Se il punto dove l'espressione è valutata corrisponde ai valori medi delle variabili casuali l'espressione diventa:

$$g\left(X_1, X_2, X_3, \ldots\ldots X_n\right) \cong g\left(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \ldots\ldots \mu_n\right) + \sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \mu_{x_i}\right)\left.\frac{\partial g}{\partial X_i}\right|_{\text{evaluated at mean value}}$$

A seguito di alcuni passaggi algebrici l'indice di affidabilità β risulta:

$$\beta = \frac{g\left(\mu_{X_1}, \mu_{X_1}, \mu_{X_1} \ldots\ldots \mu_{X_1}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(a_i\sigma_{X_i}\right)^2}} \quad \text{where} \quad a_i = \left.\frac{\partial g}{\partial X_i}\right|_{\text{evaluated at mean value}}$$

2. Esempio

Si vuole calcolare la probabilità di avaria (failure) a seguito di danneggiamento da creep per un tubo di un forno di raffineria.

Dati di Progetto ed esercizio del tubo del forno

- Material = SA− 335 Grade P22 Year 1998 (2.25Cr 1Mo)
- Typical Conditions = 1.448 MPa(g)@601.66°C (210 psig@1115°F)
- Outside Diameter = 219.075 mm (8.625 in)
- Fabricated Thickness = 8.179 mm (0.322 in)
- Weld Joint Efficiency = 1.0
- Unsupported Length = 3.658 m (144 in)
- Cylindrical Shell
- Operating Time = 131,400 hours (15 yr)
- Corrosion Rate = 0.169 mm/yr (Future Corrosion Allowance, FCA = 15 * 0.169 = 2.54 mm)

2.1 Modello di avaria per Creep

Il modello utilizza la relazione sollecitazione-temperatura-tempo di rottura per il calcolo della probabilità di avaria a seguito di Creep.

Il comportamento di stress-temperatura-rottura dei materiali viene misurato mediante prove a trazione fino a rottura sotto carico costante a temperatura elevata. La resistenza allo stress-temperatura-rottura è rappresentata utilizzando il noto parametro Larson-Miller (LMP), che è definito come segue:

$LMP = (T + 273) * (log_{10}[L] + C_{LMP})$

I valori medi e minimi del parametro Larson-Miller si basano sui tempi medi e minimi di rottura per sollecitazione, e sono calcolati utilizzando le relazioni fornite da API 579-1/ASME FFS-1.

Il parametro di Larson Miller è dato dall'espressione:

$$LMP(\sigma) = A_0 + A_1 * log_{10}(\sigma) + A_2 * \left(log_{10}(\sigma)\right)^2 + A_3 * \left(log_{10}(\sigma)\right)^3$$

I valori di A0, A1, A2, A3 e C_{min} e C_{avg} per il parametro minimo e medio di Larson-Miller sono riportati nella API 579-1/ASME FFS-1.

2.2 Approccio deterministico

Di seguito la sintesi dei principali risultati del calcolo utilizzando il modello deterministico[1]:

[1] Per questo esempio si utilizza uno spessore completamente corroso per semplicità. Un approccio più realistico consiste nel calcolare la sollecitazione in funzione dello spessore, in base ai tassi di corrosione previsti.

Data	Description	UM	Expression	Value
σ_1	Sollecitazione circonferenziale	MPa	$\frac{P * D_{mean}}{2 * E * t_{corr}} = \frac{P * (OD - t_{nom} + CR * age)}{2 * E * (t_{nom} - CR * age)}$	26.679
σ_2	Sollecitazione assiale	MPa	$\frac{P * {}^{D_{mean}}/_{2}}{2 * E * \{t_{corr} - t_{sl}\}} = \frac{P * {}^{(OD - t_{nom} + CR * age)}/_{2}}{2 * E * (t_{nom} - CR * age - t_{sl})}$	13.340
σ_3	Sollecitazione radiale	MPa		0.000
σ_e	Sollecitazione equivalente (von-Mises)	MPa	${}^{1}/_{\sqrt{2}} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$	23.105
S_s	Termine utilizzato per il calcolo di S_{eff}	MPa	$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}$	29.828
J_1	Termine utilizzato per il calcolo di S_{eff}	MPa	$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$	40.019
C_{min}	Costanti di Larson Miller		19.566	
C_{avg}			18.918	
A_0			$2.8323097E + 04$	
A_1			$-4.6611111E + 03$	
A_2			0	
A_3			0	
S_{eff}	Sollecitazione equivalente utilizzata per calcolare la vita rimanente tramite Larson Miller	MPa	$\sigma_e * \exp\left(0.24\left(\frac{J_1}{S_s} - 1\right)\right)$	25.079
$LMP(S_{eff})$	Parametro di Larson Miller calcolato per la sollecitazione S_{eff}		$A_0 + A_1 * \log_{10}(S_{eff}) + A_2 * \left(\log_{10}(S_{eff})\right)^2 + A_3 * \left(\log_{10}(S_{eff})\right)^3$	21,800.730
L_{avg}	Tempo medio a rottura secondo Larson Miller	hours	$10^{\frac{LMP(S_{eff})}{(T+273)} - C_{avg}}$	1,015,793.905
L_{min}	Tempo minimo a rottura secondo Larson Miller	hours	$10^{\frac{LMP(S_{eff})}{(T+273)} - C_{min}}$	228,457.596
${L}/{L_{avg}}$	Frazione di vita consumata rispetto al tempo medio a rottura			57.48%
${L}/{L_{min}}$	Frazione di vita consumata rispetto al tempo minimo a rottura			12.93%

Tabella 1. Esempio di calcolo e risultati per la determinazione della frazione di vita consumata

2.3 Approccio probabilistico

Utilizzando il metodo del valore medio del primo ordine del secondo momento (MVFOSM), definiamo una funzione di stato limite come segue:

g = R - S

Dove R, resistenza:

$$R = log_{10}[L_{LMP}] = \frac{LMP(\sigma)}{(T+273)} - C_{LMP}$$

ed S, carico:

$$S = log_{10}[L]$$

$$g = log_{10}[L_{LMP}] - log_{10}[L] = \frac{LMP(\sigma)}{(T+273)} - C_{LMP} - log_{10}[L]$$

L' indice di affidabilità β è quindi pari a:

$$\beta = \left(\frac{LMP(\sigma)}{(T+273)} - C_{avg} - log_{10}[L]\right) \Big/ \sigma_{LMP}$$

Dove σ_{LMP} è la deviazione standard di $\frac{LMP(\sigma)}{(T+273)} - C_{LMP}$

Come indicato dall'API Standard 530, il parametro minimo di Larson-Miller si basa sul limite inferiore di confidenza del 95% della media dei parametri di Larson-Miller ottenuto da un adattamento ai minimi quadrati dei dati.
Pertanto, la curva di sollecitazione minima in funzione del parametro di Larson-Miller è determinata sottraendo 1,645 volte la deviazione standard dalla curva della sollecitazione media rispetto al parametro di Larson-Miller.
La differenza tra il valore $log_{10}[L_{avg}]$ e $log_{10}[L_{min}]$ viene utilizzata per stimare il valore di σ_{LMP} come segue:

$$\sigma_{LMP} = \left(\frac{LMP(\sigma)}{(T+273)} - C_{avg} - \frac{LMP(\sigma)}{(T+273)} + C_{min}\right) \Big/ 1.645 = \frac{(C_{min} - C_{avg})}{1.645}$$

Il modello sopra riportato per il calcolo del LoF si basa sui valori di pressione e perdita di spessore dovuto a corrosione costanti.
Per includere la variabilità della pressione e della perdita di spessore possiamo generalizzare l'espressione per calcolo dei valori di $log_{10}[L]$ come segue:
$g = log_{10}[L] = g(P, CR * age, M)$
dove M rappresenta la resistenza del materiale al Creep.
La funzione g è linearizzata come:

$$g(P, CR * age, M) \cong g\left(\mu_P, \mu_{CR*age}, \mu_M\right) + (P - \mu_P)\frac{\partial g}{\partial P} + \left(CR * age - \mu_{CR*age}\right)\frac{\partial g}{\partial CR * age} + (M - \mu_M)\frac{\partial g}{\partial M}$$

e indice di affidabilità β è quindi pari a:

$$\beta = \frac{g\left(\mu_{X_1},\mu_{X_1},\mu_{X_1}.....\mu_{X_1}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(a_i\sigma_{X_i}\right)^2}} = \frac{g\left(\mu_P,\mu_{\mathrm{CR*age}},\mu_{\mathrm{M}}\right)}{\sqrt{\left(\sigma_P\frac{\partial \mathrm{g}}{\partial P}\right)^2+\left(\sigma_{CR*age}\frac{\partial \mathrm{g}}{\partial CR*age}\right)^2+\left(\sigma_M\frac{\partial \mathrm{g}}{\partial M}\right)^2}}$$

dove

$$a_i = \frac{\partial g}{\partial X_i}\Big|_{evaluated\ at\ meanvalue}$$

La probabilità di avaria P_f (POF) è quindi:

$$P_f = \Phi(-\beta)$$

Le variabili casuali sono la Pressione, la riduzione di spessore e le caratteristiche del materiale per la resistenza Creep.

I parametri delle distruzioni statistiche sono dati nella seguente tabella:

Dato	Descrizione	UM	Valore medio	COV	Deviazione standard
P	Pressure	MPa	1.448	0.05	1.448*0.05=0.0724
CR*age= Δt	Thinning reduction	mm	0.127*15= 1.9050	0.170	1.9050*0.170=0.4318
CML	Larson Miller parameter				$\frac{\mathrm{C_{min}}-\mathrm{C_{avg}}}{1.645}=\frac{19.566-18.918}{1.645}=0.394$

Tabella 2. Parametri distribuzione statistiche

Linearizziamo la funzione limite, calcoliamo le deviazioni standard, l'indice di affidabilità e la probabilità di avaria (POF):

Espressione	Descrizione	Valore
$\mu_{\mathrm{g}} = \frac{\mathrm{LMP}(\sigma_{\mathrm{avg}})}{(\mathrm{T}+273)} - \mathrm{C_{avg}} - \log_{10}[\mathrm{L}]$	Approssimazione del primo ordine alla media della funzione di stato limite	0.888
$\frac{\partial \mathrm{g}(\mathrm{P},\mathrm{CR}*\mathrm{age},\mathrm{M})}{\partial \mathrm{P}} =$	Derivata della funzione limite rispetto alla pressione.	-1.598
$\frac{\partial \mathrm{g}(\mathrm{P},\mathrm{CR}*\mathrm{age},\mathrm{M})}{\partial \mathrm{CR}*\mathrm{age}} =$	Derivata della funzione limite rispetto alla Perdita di spessore. Δt =C_r*age	-0.433
$\frac{\partial \mathrm{g}(\mathrm{P},\mathrm{CR}*\mathrm{age},\mathrm{M})}{\partial \mathrm{M}} =$	Derivata della funzione limite rispetto al parametro di Larson Miller	-1.000

Espressione	Descrizione	Valore
$\sigma_g = \sqrt{\left(\sigma_P \frac{\partial g}{\partial P}\right)^2 + \left(\sigma_{CR*age} \frac{\partial g}{\partial CR * age}\right)^2 + \left(\sigma_M \frac{\partial g}{\partial M}\right)^2}$	Approssimazione del primo ordine alla varianza della funzione di stato limite.	0.451
$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g}$	Indice di affidabilità e probabilità di guasto. Φ ( ) è la funzione di probabilità cumulativa di una variabile casuale normale con una media di 0 e una deviazione standard di 1. Questo è il metodo standard per convertire un indice di affidabilità (indipendentemente dalla sua fonte) in una probabilità nominale di guasto e non è esclusivo di questo metodo.	1.96973191
$P_f = -\Phi(-\beta)$	Probabilità di Avaria (POF)	2.44%

Tabella 3. Risultati linearizzazione funzione limite, indice di affidabilità e POF

Il damage factor è calcolato dividendo la probabilità così ottenuta per la probabilità di default indicata nell' API581:

$$DF = \frac{P_f}{0.0000306} = 798.515$$

2.3.1 Risultati simulazione Montecarlo con Oracle® Crystal Ball

Di seguito sono rappresentati i risultati della simulazione Montecarlo utilizzando le espressioni ed i parametri per la distribuzione statistica precedentemente riportati

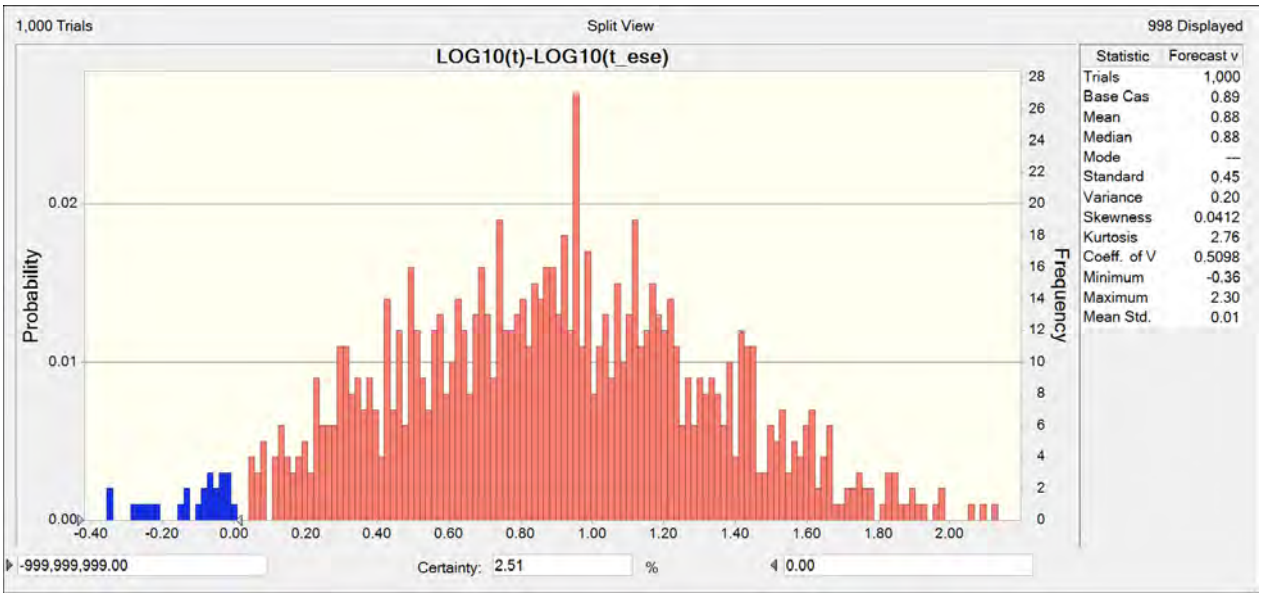


Figura 3. Distribuzione risultati simulazione Montecarlo funzione limite

L' area indicata in blu comprende i valori per cui la funzione di stato limite è < 0, ovvero in cui si ha una failure.
Secondo la simulazione Montecarlo, per 1000 cicli di run, la probabilità di avaria è del 2.51%. La deviazione standard della funzione limite è pari a 0.45.

2.3.2 Calcolo del Damage Factor per il thinnig e "globale"

La probabilità di avaria[2] per il Thinning è pari a 1.8747e-06 con un Damage Factor per il Thinning << 1.
Considerando i meccanismi di danno per Thinning e Creep, e applicando del principio di sovrapposizione per il fattore di fanno, il damage factor globale è pari a:

$$D_{f-total} = max\left(D_{fgov}^{thin};\ D_{fgov}^{creep}\right) = \ max(0.0613;\ 798.515) = \ 798.515$$

Conclusioni

E' stata illustrata la modalità di calcolo per ottenere la probabilità di avaria (POF) per un componente soggetto a Creep.
Si è dimostrato che l'applicazione del metodo del valore medio del primo ordine del secondo momento (MVFOSM) per il calcolo del POF per il Creep utilizzando il metodo di Larson Miller è consistente con i risultati applicando una simulazione Montecarlo.
La metodica proposta è applicabile per calcolare in maniera celere, e con limitate risorse computazionali, la probabilità di avaria.
La metodica verrà estesa anche utilizzando il metodo Omega e verrà completata indicando le modalità di applicazione dei risultati delle attività ispettive.
Ricevuto il necessario consenso, la metodica illustrata verrà proposta per essere implementata nelle prossime edizioni dell'API 581.

[2] PoF è calcolata in accordo a [4] per un solo stato di danno in cui il CR è uguale al CR nominale.

3. Bibliografia

[1] API PUBL 581, 1st Edition, 2000 - Risk-Based Inspection Base Resource Document

[2] API RP 581, 3rd Edition, April 2016 - Risk-Based Inspection Methodology

[3] Kaley, L.C., Trinity Bridge, LLC and Ray, B.D., Marathon Petroleum Company, LLC, API 581 Ballot POF Approach Update, Presentation to API 581 Task Group, November 2011.

[4] Mike Conley & Lynne Kaley, Lloyds Register & Trinity Bridge, Replacement of RP 581 Table 5.11 "Thinning damage factor" with Mathematical Model, March 2011

[5] Andrzej S. Nowak, Kevin R. Collins, Reliability of Structures, McGraw-Hill, New York, 2000

[6] A. Haldar, S. Mahadevan, Probability, Reliability, and Statistical Method in Engineering Design, John Wiley & Sons, 2000

[7] Alten F. Grandt Jr., Fundamentals of Structural Integrity

[8] Larson, F. R., and Miller, J., 1952, "Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses," Transactions of the ASME, Vol. 74, pp. 765-775.

[9] API 579-1, 2021 Edition, December 2021 - FITNESS-FOR-SERVICE

[10] API 579-2, 1st Edition, August 11, 2009 - Fitness-For-Service Example Problem Manual

[11] API STD 530, 7th Edition, April 2015 - Calculation of Heater-tube Thickness in Petroleum Refineries.

[12] Jaske, CE, Topalis, P, Loong, WS, & Md Sidek, AS. "Risk Based Inspection Methodology for Components Subject to High-Temperature Creep." Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference. Volume 6B: Materials and Fabrication. Waikoloa, Hawaii, USA. July 16–20, 2017. V06BT06A009. ASME. https://doi.org/10.1115/PVP2017-66022

[13] Riccardo Cozza, "API RP 581: Teorema di Bayes e Indici di Affidabilità", Presentazione al SAFAP, Novembre 2016

Repository Safap: il database degli articoli

F. Ceruti, D.G. Cogliani, C. Delle Site, A. Nebbioso

Inail – Dit

Con la collaborazione di Silvia Ansaldi

Abstract

Il convegno Safap si configura come il più rilevante appuntamento nazionale di confronto tecnico-scientifico del settore relativo alla sicurezza e affidabilità delle attrezzature a pressione e degli impianti di processo; è proposto con cadenza biennale a partire dal 2004, collezionando una grande quantità di articoli scientifici su diverse tematiche.
Il progetto "Repository Safap" è nato con l'obiettivo di realizzare un database che contenesse tutti gli articoli raccolti nei vari convegni Safap, al fine di renderli velocemente fruibili all'utenza con un motore di ricerca di semplice utilizzo.
Per agevolare le funzionalità di ricerca, a ciascun documento sono stati associati tematiche, keyword e altri metadati, definiti e validati dai partecipanti al gruppo di lavoro e gestiti a livello di amministrazione del sistema.
Poiché i Convegni sono organizzati in sessioni tematiche, dedicate ai vari aspetti della vita delle attrezzature a pressione, le tematiche sono state immaginate come "contenitori" che possono essere d'aiuto ad un utente interessato solo ad un argomento generale. Le keyword, così come gli altri metadati, appartenenti ad una o più tematiche, sono state utilizzate invece per agevolare una ricerca più specifica dei documenti.
Utilizzando il database relazionale mySQL e i linguaggi di programmazione PHP e HTML rispettivamente per lo sviluppo dell'applicazione e per le pagine web, sono stati realizzati due ambienti. Un primo ambiente è riservato all'inserimento e alla gestione degli articoli ed è utilizzato dai membri del gruppo di lavoro; un secondo è dedicato alla ricerca (search) dei documenti i cui utenti, in una fase iniziale, saranno i colleghi Inail, che potranno utilizzare modalità di ricerca per testo libero, per metadati o per autore.

Keywords: tematiche, keyword, metadati, documenti.

1. Introduzione

Il convegno Safap è organizzato in sessioni tematiche, dedicate ai vari aspetti della vita delle attrezzature a pressione, dalla progettazione alla fabbricazione, dall'ispezione alla manutenzione.

Le sessioni tematiche delle prime edizioni del Safap erano incentrate esclusivamente su 4 settori: Normazione, Prove non distruttive, Analisi dei rischi, Idoneità all'esercizio di materiali e componenti.
Nel corso degli anni la presentazione dei risultati delle ricerche e dei nuovi studi condotti principalmente dal nostro Istituto sulle tematiche di sicurezza delle attrezzature a pressione, e delle relative esperienze maturate nella pratica della prevenzione nei luoghi di vita e di lavoro, ha riscontrato un crescente interesse e una comprensibile attenzione da parte dei soggetti pubblici e privati interessati a vario titolo al settore delle attrezzature a pressione, e tali da rendere necessaria l'introduzione di nuove tematiche e l'ampliamento delle suddette sessioni.
In particolare, le sessioni di specifico interesse sono focalizzate su tematiche che vanno dall'analisi dei rischi alle direttive europee di settore (PED, TPED, ATEX, Seveso III), dalle metodiche di valutazione dell'idoneità al servizio di attrezzature a pressione (Fitness for Service, Risk Based Inspection) agli approcci di calcolo della vita residua dovuti a creep, fatica, corrosione per le diverse tipologie di attrezzature ed impianti.
Un'attenzione particolare è rivolta al ruolo della diagnostica (prove non distruttive) sia in fase di fabbricazione sia di verifica di esercizio, così come alla normazione tecnica nazionale e internazionale e alla regolamentazione nazionale di approccio alla verifica sotto il profilo tecnico ed amministrativo (es. d.m. 329/04, art. 71 d.lgs. 81/08 e d.m. 11 aprile 2011).

1.1 I numeri del Safap

Nel seguito vengono presentati alcune tabelle e grafici che narrano l'evoluzione del Safap nel corso del tempo, dalla sua prima edizione all'ultima, realizza nel 2021.
Nelle tabelle vengono sintetizzate, per ogni singola edizione, le percentuali di presenza degli articoli accettati e pubblicati negli atti relativi all'edizione stessa:

2006	**% di lavori presenti**
Normazione e direttive di prodotto	20,93
Prove non distruttive	25,58
Analisi dei rischi	25,58
Idoneità all'esercizio di materiali e componenti	27,91

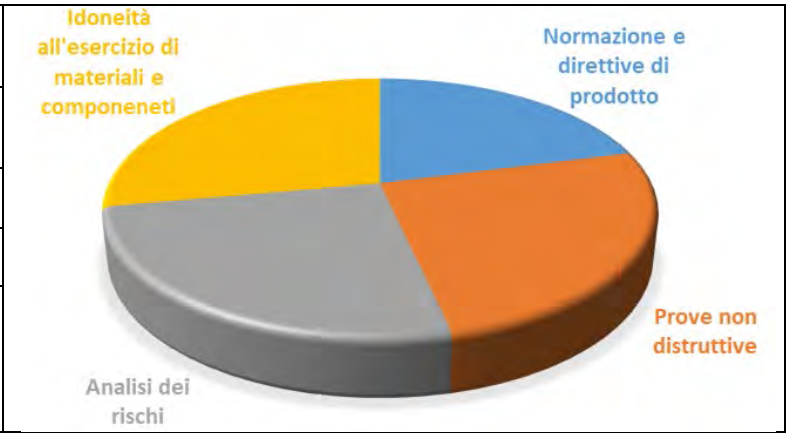


Tabella e Grafico 1. Sessioni SAFAP 2006 [1]

2008	% di lavori presenti
Normazione e calcolo strutturale	25,58
Prove non distruttive	20,93
Analisi dei rischi	23,26
Idoneità all'esercizio di materiali e componenti	30,23

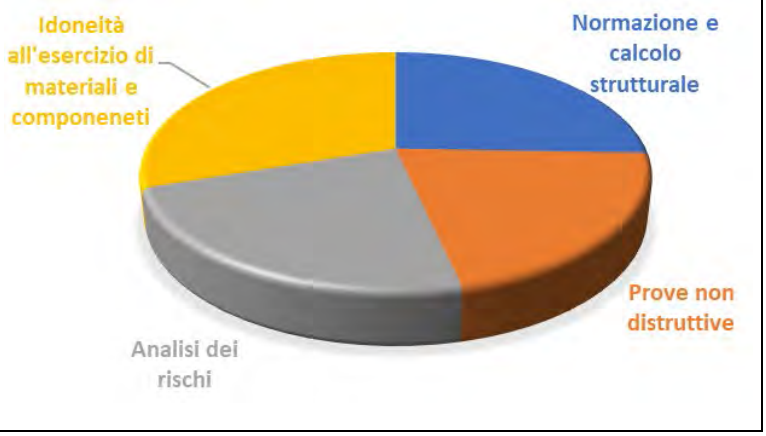


Tabella e Grafico 2. Sessioni SAFAP 2008 [2]

2010	% di lavori presenti
Normazione	26,76
Prove non distruttive	18,31
Analisi dei rischi	18,31
Integrità	18,31
Tubazioni	9,86
Valvole	8,45

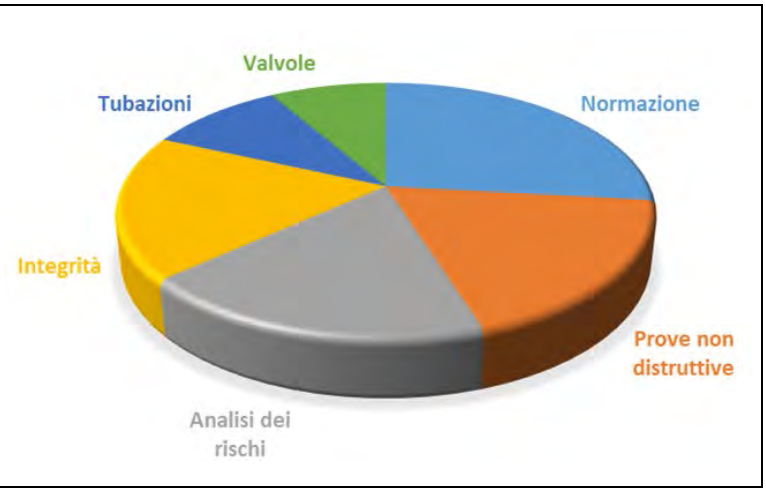


Tabella e Grafico 3. Sessioni SAFAP 2010 [3]

2012	% di lavori presenti
Normazione	23,53
Prove	25,49
Integrità strutturale di materiali e componenti	15,69
Idoneità al servizio di attrezzature a pressione	9,80
Analisi dei rischi	15,69
Atex	9,80

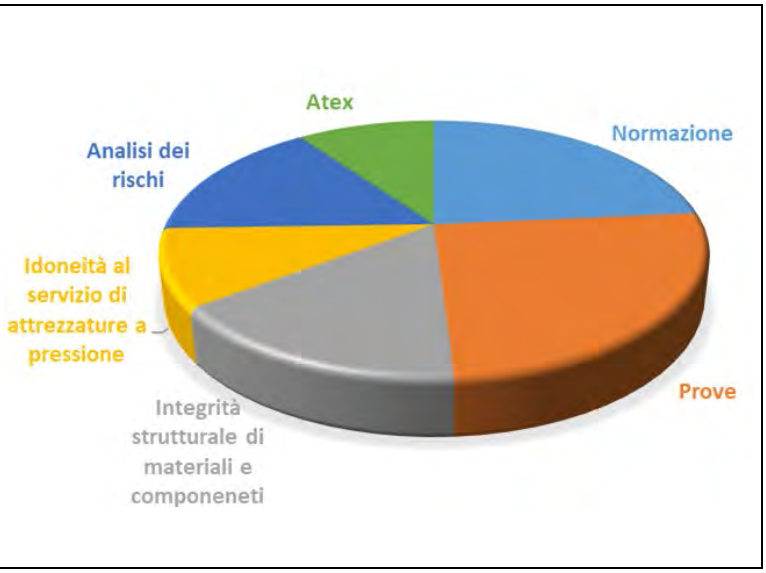


Tabella e Grafico 4. Sessioni SAFAP 2012 [4]

2014	% di lavori presenti
Progettazione e Costruzione 1	11,54
Progettazione e Costruzione 2	11,54
Diagnostica	11,54
Tecnologie di Sicurezza	11,54
Integrità	13,46
Atex	11,54
Analisi dei rischi	13,46
Esercizio	11,54
Normazione	3,85



Tabella e Grafico 5. Sessioni SAFAP 2014 [5]

2016	%di lavori presenti
Progettazione e Costruzione 1	7,32
Integrità 1	7,32
Analisi dei Rischi 1	7,32
Impianti Tecnologici	6,10
Analisi dei Rischi 2	7,32
Conformità	6,10
Progettazione e Costruzione 2	7,32
Integrità 2	7,32
Diagnostica 1	7,32
NaTech	7,32
Tecnologie di Sicurezza 1	7,32
Diagnostica 2	7,32



Tabella e Grafico 6. Sessioni SAFAP 2016 [6]

2018	% di lavori presenti
Integrità strutturale	7,06
Progettazione e fabbricazione	7,06
Rischi NaTech	7,06
Materiali e meccanismi di danno	8,24
Impianti 1	8,24
Conformità	8,24
Diagnostica	8,24
Seveso	8,24
Gestione in sicurezza	8,24
Analisi dei rischi	10,59
Impianti 2	9,41
Invecchiamento	9,41



Tabella e Grafico 7. Sessioni SAFAP 2018 [7]

2021	% di lavori presenti
Progettazione e Costruzione	9,47
Impianti RIR	9,47
Tecnologie di sicurezza	9,47
Meccanismi di danno	9,47
Analisi dei rischi 1	9,47
Impianti a pressione	9,47
Prove non distruttive	9,47
Rischio NaTech	9,47
Analisi dei rischi 2	9,47
Impianti tecnologici	5,26
Impianti complessi	5,26
Gestione del rischio	4,21

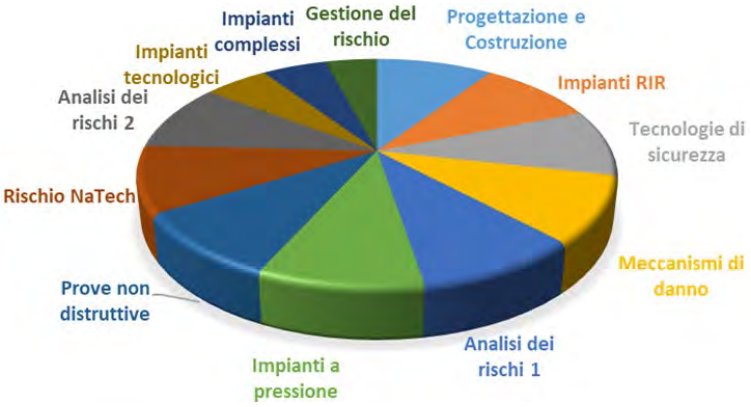


Tabella e Grafico 8. Sessioni SAFAP 2021 [8]

Edizione	Numero memorie
SAFAP 2004	26
SAFAP 2006	43
SAFAP 2008	43
SAFAP 2010	71
SAFAP 2012	51
SAFAP 2014	52
SAFAP 2016	82
SAFAP 2018	85
SAFAP 2021	95

Tabella 9. Numero di memorie presentate (per anno)

L'evoluzione che si è registrata negli anni rispetto alla strutturazione e ai contenuti scientifici del Safap è perfettamente aderente a quella che si è avuta sia in ambito normativo che tecnico in riferimento alle attrezzature in pressione. Un esempio importante in tal senso è l'inserimento delle tematiche "Seveso" e "Rischio Natech" nel 2016, conseguente ovviamente al recepimento italiano della Direttiva Seveso III nel 2015 con il D.Lgs n.105. Un altro elemento che ha influito sull' assetto scientifico del convegno è la nuova configurazione dei Dipartimenti scientifici dell'Istituto che si è avuta a seguito dell'incorporazione dell'Ispesl in Inail. La confluenza di più competenze all'interno del nuovo Dipartimento di innovazione tecnologica ha di fatto ampliato le tematiche di ricerca, certificazione e verifica della Struttura proponente del Safap e ciò ha determinato anche un'estensione dei contenuti dei lavori accettati per il convegno nel corso del tempo.
Per quanto riguarda i numeri, fino all'anno 2021, sono stati pubblicati circa n. 650 articoli scientifici (di cui circa n.100 poster) e le sessioni sono passate dalle n. 4 del 2006 alle n. 12 del 2021. La sessione "analisi dei rischi" è quella che tendenzialmente nelle ultime edizioni è sempre stata la più popolata mentre nei primi anni era quella della "Normazione" ad esserlo. Escludendo le memorie accettate come poster, in assoluto l'edizione più partecipata è stata quella del 2021: rispetto al 2006, prima edizione ad essere strutturata in sessioni tematiche, si è registrato un aumento che ha superato il 100%.

2. Obiettivi

Considerata la numerosità e varietà degli articoli relativi alle diverse edizioni della manifestazione, l'obiettivo del progetto è stata la realizzazione di un repository che raccogliesse i singoli lavori dei convegni svolti e che fosse dotato di specifiche

funzionalità di ricerca, al fine di gestire in modo completo e digitale l'archivio degli articoli e di renderlo velocemente fruibile all'utenza interna con un motore di ricerca che tenesse conto di keyword e di metadati associati a ciascun articolo.
Il Repository sarà fruibile in primis all'utenza interna Inail, ma il progetto prevede la possibilità di allargare l'applicativo anche all'esterno.

3. Archivio documentale SAFAP

Al momento nel Repository sono disponibili gli atti dei convegni Safap 2014, 2016, 2018 e 2021, gestiti come singoli documenti pdf provvisti di indice a link, organizzato sulla base delle sessioni tematiche individuate.
Gli articoli estratti dagli atti del convegno sono stati salvati con nome, numero progressivo e organizzati sotto una cartella che indica l'anno del convegno.
Per poter procedere in modo più rapido all'inserimento dei documenti, è stato utilizzato un file excel che conteneva dati e metadati associati a ciascun articolo, quali: nome del file, tematica, titolo, keyword 1, keyword 2, numero di autori, per ciascun autore si riporta il cognome, nome e affiliazione.

4. Metodologia

Come primo approccio sono state individuate le funzionalità da realizzare, sulla base delle quali sono state stabilite e opportunamente organizzate le caratteristiche che rappresentavano in modo univoco un articolo.
Sono stati previsti due ambienti, uno per l'inserimento e la gestione degli articoli (*administrator*) e uno per la ricerca (*search*), i cui utenti saranno, in una prima fase, i colleghi Inail.

4.1 Analisi delle funzionalità

Per l'ambiente di *administrator* sono state fornite le funzionalità per l'inserimento degli articoli nel *repository*, assegnando le opportune caratteristiche (*metadati*) a ciascuno di essi.
Per l'ambiente di *search*, sono state individuate le possibili interrogazioni. In questa prima fase è stata prevista una ricerca per *metadati* o testuale sul titolo dell'articolo.

4.2 Analisi dei dati

Di seguito si fornisce un elenco non strutturato delle informazioni più rappresentative per ciascun articolo (Fig. 1):

- Anno del convegno
- Sessione tematica
- Autore/i dell'articolo
- Affiliazione dell'autore
- Titolo dell'articolo
- Keywords

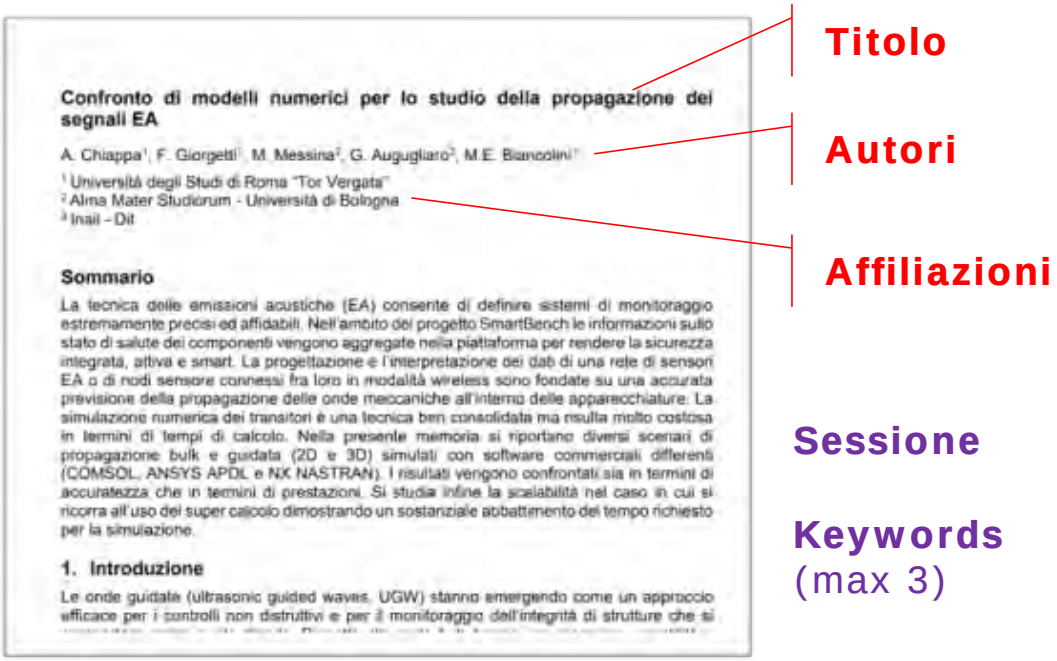


Figura 1. Informazioni rappresentative degli articoli Safap

5. Applicativo

L'applicativo Repository Safap ha visto la progettazione e la realizzazione del *repository* e dei due moduli applicativi.
Il db relazionale mySQL è stato lo strumento utilizzato per il repository, PHP il linguaggio di programmazione per lo sviluppo dell'applicazione e HTML il linguaggio di programmazione per le pagine web.
L'applicazione in questa fase iniziale risiede su una Virtual Machine e ha principalmente lo scopo di dimostrare la fattibilità della realizzazione e gestione di un *repository* relativo ai convegni Safap.

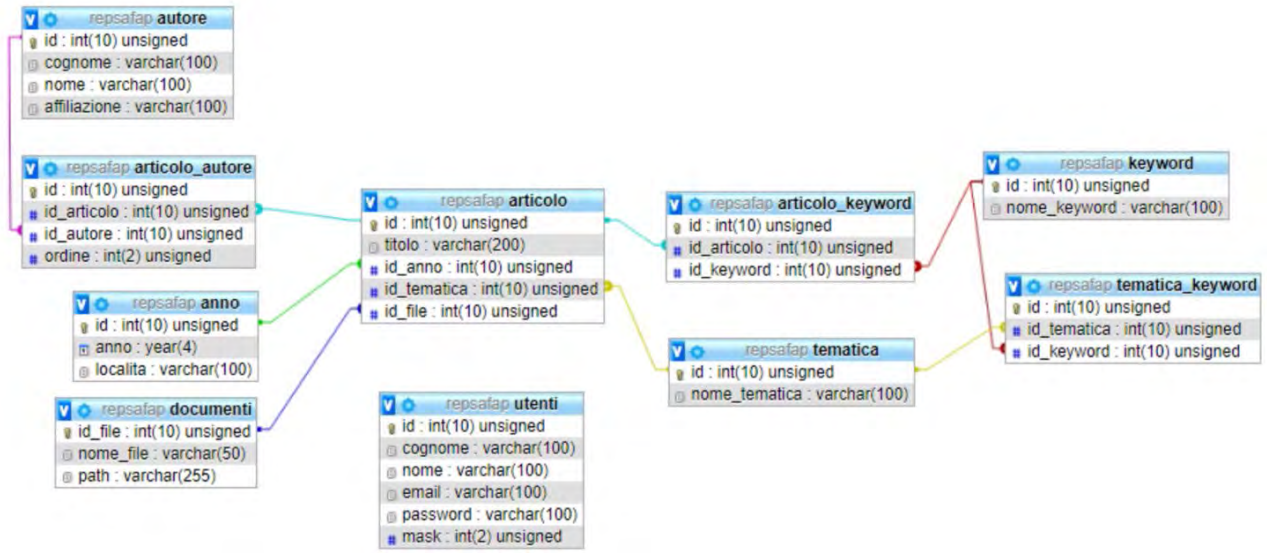


Figura 2. Architettura del sistema

5.1 Metadati

Per metadati si intendono informazioni di pertinenza dell'applicazione che possono essere associate ad un documento; i metadati sono stati definiti e validati dai partecipanti al progetto e gestiti a livello di amministrazione del sistema. Il lavoro di individuazione dei metadati è stato fondamentale per rappresentare in modo significativo un insieme di documenti e agevolare le funzionalità di ricerca.
I metadati individuati sono i seguenti:

- Anno
- Autore
- Affiliazione
- Tematica
- Keywords

Dall'analisi preliminare dei dati è emerso che le sessioni tematiche variavano a seconda dell'anno di convegno SAFAP; a volte differivano solo nella terminologia, altre volte venivano aggiunte o eliminate. Inoltre, si è riscontrato che spesso le memorie contenevano elementi per essere inserite in più sessioni. È stato, pertanto, importante armonizzare questi valori per giungere ad un unico elenco univoco e condiviso.
Per quanto riguarda l'associazione con le keywords, gli articoli SAFAP in passato non l'avevano prevista, ma il loro inserimento è stato necessario, al fine di agevolare la ricerca dei documenti. A tal fine il Gruppo di lavoro ha proceduto all'analisi di ogni singola memoria, individuando per ognuna un massimo di 2 keywords, che possono appartenere ad una o più tematiche.

5.2 Interfaccia utente

È stato previsto un accesso con credenziali, che offre il vantaggio di avere una sola applicazione e poter gestire diverse tipologie di utenti, gli amministratori e gli utenti finali.
L'applicativo si sviluppa su diverse pagine HTML, ciascuna con una funzionalità specifica, quali la pagina di caricamento dei documenti, di modifica dei dati, di intervento sui valori dei metadati, di ricerca. Le pagine sono collocate nei due ambienti, gestionale e di ricerca.

Ambiente gestionale (Administrator)
Le funzionalità di questo modulo sono rivolte al caricamento dei convegni Safap, degli articoli e delle keywords ad essi associate, tramite upload di un file di tipo .csv. L'accesso a queste pagine è riservato esclusivamente al personale di livello *Amministratore* che gestisce questi documenti. Una pagina del modulo è dedicata all'inserimento delle credenziali degli utenti di tipo *Amministratore* o *Generico*.

Ambiente di ricerca (Search)

Le funzionalità di questo modulo sono rivolte alla ricerca degli articoli e sono divise in due pagine, a seconda se si vuole cercare per caratteristiche dell'articolo o per autore.

Utilizzando la ricerca negli atti dei convegni, la pagina si presenta suddivisa in due parti (Fig. 3).

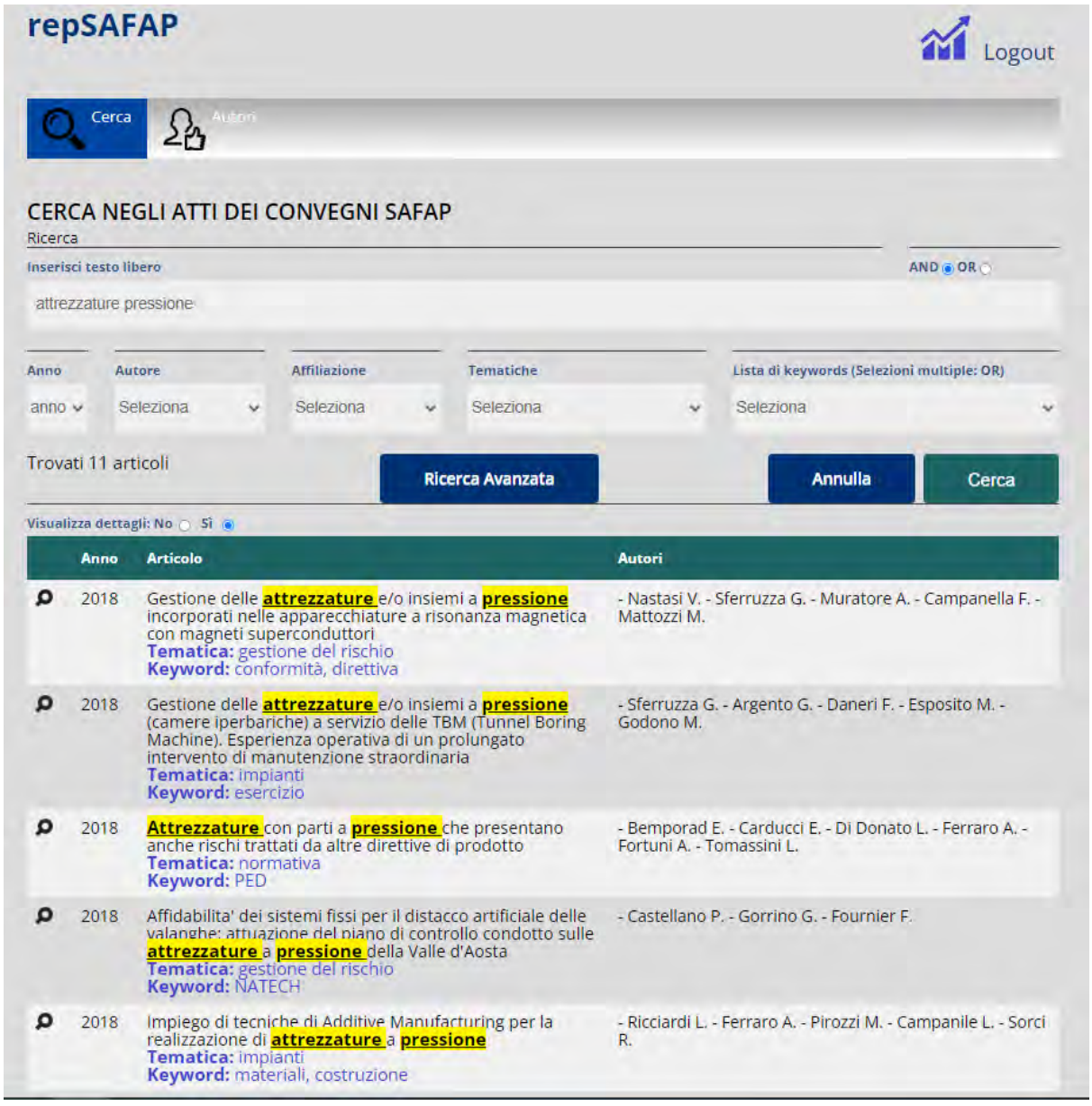


Figura 3. Pagina di ricerca semplice

Nella parte superiore sono posizionati i controlli per effettuare la *ricerca semplice,* che sarà effettuata esclusivamente nei titoli degli articoli, inserendo una o più parole di testo libero nell'apposito campo.

Inoltre, può essere eseguita una ricerca per anno, autore, affiliazione, tematica e/o keywords, tramite scelta dei metadati dai menù a tendina predisposti, con selezione singola o multipla.
Nella parte inferiore sono elencati i risultati della ricerca in forma tabellare, con le parole ricercate evidenziate in giallo e con possibilità di visualizzare dettagli (tematica e keywords) e scaricare il file dell'articolo in formato .pdf.
È inoltre possibile effettuare una *ricerca avanzata*, tramite il motore di ricerca Omnifind [9], che permette di cercare sia nel titolo che nel testo dell'articolo, sfruttando anche la possibilità di individuare sinonimi (Fig. 4). La possibilità di effettuare questo tipo di ricerca è il valore aggiunto di questo applicativo.

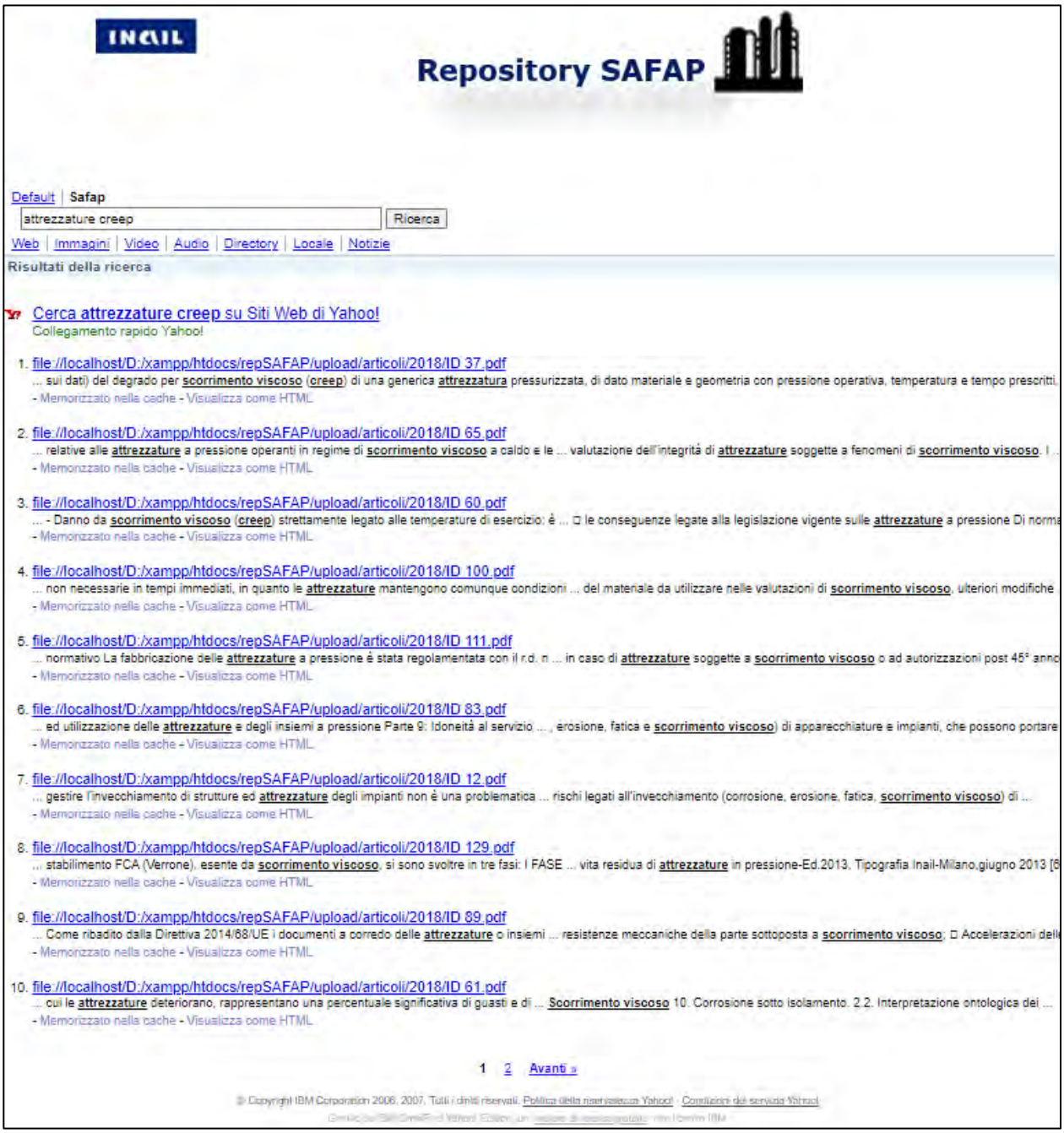


Figura 4. Ricerca avanzata con Omnifind

Infine, è possibile cercare gli articoli anche conoscendo solo un Autore, tramite ricerca per ordine alfabetico, selezionando la lettera iniziale del Cognome o per Affiliazione, utilizzando l'apposito menù a tendina.

Conclusioni

Il "Repository Safap" è sicuramente uno strumento di supporto non solo per i ricercatori, tecnologi e tecnici dell'Istituto, ma in generale per tutti coloro che svolgono la propria attività nell'ambito della tematica delle attrezzature a pressione. Chiunque necessiti di reperire informazioni o abbia bisogno di aggiornarsi rispetto ai temi e ai contenuti propri del convegno, può di fatto effettuare una ricerca mirata e specifica che lo facilita nelle proprie attività. Avere l'immediata disposizione di articoli perfettamente aderenti ai parametri inseriti per la ricerca, rappresa infatti un enorme valore aggiunto anche in termini di velocità con cui l'utente riesce a traguardare il proprio obiettivo, ma non solo. Lo sviluppo del Repository, effettuato grazie alle implementazioni informatiche descritte nei paragrafi precedenti, è assolutamente necessario anche rispetto alla transizione digitale che coinvolge le attività della Pubblica Amministrazione e che ha visto, vede e vedrà interessate anche quelle espletate all'interno del nostro Istituto, soprattutto in termini di digitalizzazione delle informazioni messe a disposizione dell'utente in generale e del proprio personale nel particolare.

Bibliografia

[1] Atti del convegno SAFAP 2006. Inail. 2006.

[2] Atti del convegno SAFAP 2008. Inail. 2008.

[3] Atti del convegno SAFAP 2010. Inail. 2010.

[4] Atti del convegno SAFAP 2012. Inail. 2012. ISBN 978-88-7484-230-8.

[5] Atti del convegno SAFAP 2014. Inail. Milano, 2014. ISBN 978-88-7484-418-0 https://www.inail.it/cs/internet/docs/allegato_safap_2014_sicurezza_affidabilita.pdf

[6] Pubblicazione (A cura di) "Atti del convegno SAFAP 2016". Inail. Milano, 2016. ISBN 978-88-7484-520-0 https://www.inail.it/cs/internet/comunicazione/pubblicazioni/catalogo-generale/safap-2016-sicurezza-ed-affidabilita.html

[7] Atti del convegno SAFAP 2018. Inail. Milano, 2018. ISBN 978-88-7484-139-4 https://www.inail.it/cs/internet/docs/pubbl-safap-atti-di-convegno-2018-alg.pdf

[8] Atti del convegno SAFAP 2021. Inail. Milano, 2021. ISBN 978-88-7484-709-9 https://www.inail.it/cs/internet/docs/alg-pubbl-atti-covegno-safap-2021-sicurezza-affidabilita.pdf

[9] SW Omnifind. https://en.wikipedia.org/wiki/IBM_Omnifind

Centrale di teleriscaldamento alimentata a combustibile solido. Caso studio

F. Pastoret[5], G. Gorrino[1], S. Manna[1], A. Urso[2], S. Spinoso[3]

[1]Inail – Uot di Roma
[2]Inail – Uot di Alessandria
[3]Inail – Uot di Torino
[5]Pastoret Engineering & Consulting Srl - Aosta

Abstract

Oggetto della presente memoria è la gestione, il funzionamento e i fattori di rischio di una centrale di teleriscaldamento a combustibile solido a servizio di due paesi della Valle D'Aosta. La caratteristica principale di questa centrale di teleriscaldamento è la presenza di tre generatori a combustibile solido e due generatori a gasolio di supporto/emergenza. L'impianto analizzato è a vaso chiuso e il monitoraggio dei parametri principali, temperature e pressioni, è assicurato con la presenza continua nelle 24 ore dal personale presente nella centrale di teleriscaldamento, il quale gestisce inoltre eventuali problematiche riscontrate dalle utenze operando direttamente sugli scambiatori di calore.
Partendo da tali premesse, si è effettuata l'analisi del funzionamento e dei controlli della centrale, in ottemperanza ai disposti normativi del D.M.1/12/75 e la relativa raccolta R Ed. 2009, D.M. 01/12/2004, n. 329 e del D.M. 11/04/2011 relativo alle verifiche periodiche, per la gestione in sicurezza dell'impianto di teleriscaldamento.
La memoria ha, in ultimo, lo scopo di evidenziare come la sinergia tra il gestore dell'impianto e la comunità abbia portato alla nascita di una economia ecosostenibile, in termini di risparmio energetico, riduzioni di emissioni in atmosfera, riutilizzo degli scarti di combustione.

Keywords: teleriscaldamento, combustibile solido, vaso chiuso.

1. Introduzione

La nascita e lo sviluppo del teleriscaldamento sono stati favoriti dalla natura del combustibile utilizzato all'epoca: il carbone.
La notevole attività manuale richiesta per la gestione delle caldaie alimentate a carbone è stata, infatti, la principale causa che ha favorito la centralizzazione della combustione in pochi siti facilmente accessibili e logisticamente attrezzati, trasferendo poi il calore così prodotto alle varie utenze con possibile utilizzo di uno scambiatore.
Negli Stati Uniti il vettore termico con cui si trasferiva il calore era vapore, mentre in

Europa era usata principalmente acqua calda.
Gli impianti di generazione di calore di maggiore rilevanza sono spesso impianti di cogenerazione e impianti di incenerimento che recuperano il calore dalla combustione dei rifiuti.
Viste le sue caratteristiche, il teleriscaldamento ha sempre costituito parte integrante della pianificazione urbanistica, dell'organizzazione dei servizi nelle aree urbane, ed è stato, tra le altre cose, una tecnologia che ha svolto un ruolo importante sulle scelte dei combustibili da impiegare per il riscaldamento degli edifici permettendo di usare anche combustibili di logistica difficile, garantendo emissioni sempre più ridotte negli anni grazie al miglioramento delle tecnologie.
Nel nostro paese, il primo impianto di teleriscaldamento è stato realizzato dall'azienda municipale di Brescia dopo la crisi energetica del 1973 in un periodo nel quale in Italia stava diffondendosi l'uso del metano.
Nell'ultimo decennio è aumentato l'utilizzo del calore proveniente dagli impianti di smaltimento dei rifiuti e da impianti alimentati da biomasse.
Lo sviluppo in Italia è stato guidato per molti anni dalla città di Brescia seguita poi dall'azienda di Torino e, dagli anni '90, da una molteplicità di iniziative minori in varie città.
Il calore viene prodotto da una grande centrale di cogenerazione e trasmesso ad un fluido termovettore (acqua calda, surriscaldata, vapore o liquidi diatermici) che viene distribuito attraverso una rete di condotte verso le utenze finali.
A questo punto la rete di tubazioni primaria si interfaccia con quella secondaria degli utenti e avviene lo scambio di calore attraverso scambiatori di calore installati nelle sotto centrali presenti presso i singoli edifici.
Il calore viene trasferito all'acqua dei circuiti secondari degli utenti e può essere utilizzato per riscaldare gli ambienti o per produrre acqua calda sanitaria. Infine, il fluido termovettore, che ha ormai perso il suo contenuto energetico, torna verso la centrale di teleriscaldamento, per essere nuovamente riscaldato e ridistribuito.
In ciascun edificio (residenziale, pubblico, commerciale o industriale) la centrale di produzione calore viene sostituita da un semplice scambiatore di calore; l'impianto di distribuzione interna dell'edificio rimane inalterato, un aspetto importate per gli utilizzatori e che vengono meno gli oneri per gli adempimenti inerenti la prevenzione incendi.
In Italia lo scambiatore di calore, oltre ad essere soggetto, per gli aspetti legati alla fabbricazione e commercializzazione, alla direttiva europea PED relativa agli apparecchi a pressione, può ricadere nell'obbligo dell'applicazione della normativa nazionale che ne regola l'esercizio, ovvero il D.M. 329/04, qualora il volume totale sia superiore a 50 litri o a 25 litri se con pressione di progetto superiore a 12 bar.
Con questo sistema è possibile estendere la fornitura di calore ad intere aree urbane, similmente a quanto avviene con l'acquedotto o con la rete elettrica cittadina.
Il fluido termovettore più utilizzato è l'acqua, che in genere viene inviata a circa 90 °C

e ritorna in centrale a 30-60 °C. Quest'ultima temperatura dipende dalla tipologia di terminali di riscaldamento dei destinatari: i normali radiatori (termosifoni) richiedono temperature di esercizio di circa 65 °C, mentre terminali quali ventilconvettori e pannelli radianti hanno temperature di esercizio molto inferiori (rispettivamente 45° e 35°), permettendo quindi temperature di ritorno superiore.

2. Caratteristiche della centrale termica

La centrale di teleriscaldamento è composta da 5 generatori di calore comprendenti n. 3 generatori alimentati a cippato di legna con potenze di 2.400+2.400+4.380 kW e da n. 2 generatori di integrazione e soccorso alimentati a gasolio con potenze di 3.192+3.855 kW, adibiti per il riscaldamento ambiente e produzione di acqua calda. L'impianto di teleriscaldamento è stato progettato e costruito nell'ottica del risparmio energetico e della salvaguardia dell'ambiente con l'applicazione di vari dispositivi per il controllo del processo di combustione.
Il sistema prevede il controllo in continuo della combustione con due diverse zone di insufflamento dell'aria con una aria primaria ed una aria secondaria attestate su due differenti ventilatori dotati entrambi di inverter e comandati dal quadro generale di ogni generatore. Più sonde di controllo quali: sonde di temperatura, di O2 e di CO opportunamente dislocate all'interno della camera di combustione rilevano i vari parametri e mediante i PLC dedicati al controllo, forniscono gli apporti di combustibile e di aria/ossigeno per avere sempre una combustione ottimale anche in base alle caratteristiche del combustibile come essenza e umidità residua presente.

3. Descrizione dell'impianto

3.1 Caldaie a biomassa

3.1.1 Caldaia

L'impianto è composto da 3 caldaie a biomassa e sistema di espansione a vaso chiuso, temperatura di caldaia variabile e mantenimento della temperatura di ritorno grazie all'utilizzo di economizzatori. Il focolare è integrato nei generatori ed è alimentato da cippato di legna. La pressione massima di esercizio è di 3,5 bar.



Figura 1. Caldaia a cippato di legna



Figura 2. Griglia mobile

Descrizione del tipo di combustione:
• Il sistema di combustione è a griglia mobile, ovvero il combustibile viene movimentato meccanicamente all'interno della camera per favorire il processo di combustione, lo scarico delle ceneri e la pulizia della griglia ottimizzando così il passaggio dell'aria comburente;
• nella parte frontale della caldaia vi è l'alimentazione del combustibile tramite un nastro trasportatore e uno spingitore fino alla griglia di combustione;
• il rivestimento del focolare è in mattoni refrattari di qualità per una temperatura massima di 1600°C;
• Finestra di ispezione nella camera di combustione e nel canale della postcombustione per il controllo del processo di combustione;
• Scambiatori a tubi a 4 giri di fumo con attacchi orizzontali e aperture di ispezione superiori ed inferiori;
• Copertura caldaia calpestabile;
• Isolamento di tutte le pareti con pannelli in lana di roccia inseriti nella lamiera di rivestimento.

3.1.2 Estrazione combustibile dal silos
Il sistema di estrazione dal silos per il trasporto del combustibile è realizzato da rastrelli mossi avanti ed indietro tramite un sistema oleodinamico.



Figura 3. Estrazione dal silos e caricamento nastro trasportatore

3.1.3 Regolazione aria comburente
L' aria comburente è separata in zone con aria primaria e secondaria. L'aria primaria viene insufflata nella parte inferiore della griglia mobile mentre l'aria secondaria viene messa direttamente nella parte superiore della camera di combustione. Il tutto viene gestito da PLC tramite le sonde inserite nella camera di combustione per la misurazione dell'O_2 e del CO che attivano i ventilatori per l'ottimizzazione della combustione.

3.1.4 Rimozione ceneri

La rimozione automatica delle ceneri dalla griglia della camera di combustione è comandata in proporzione alla quantità di combustibile introdotta e trasportata in apposito container di raccolta.

3.1.5 Pulizia caldaia

La pulizia automatica delle tubazioni di caldaia avviene con un sistema ad aria compressa, comandato ad intervalli prestabiliti.

3.1.6 Pulizia fumi

La pulizia dei fumi di scarico è realizzata da filtri elettrostatici a unità modulari, gestiti tramite PLC con appositi sensori che attivano il sistema automatico di pulizia. Le polveri filtrate vengono trasportate tramite un sistema a tramoggia con coclea.
I ventilatori fumi assicurano una depressione costante necessaria allo smaltimento dei fumi e al superamento della resistenza del filtro.

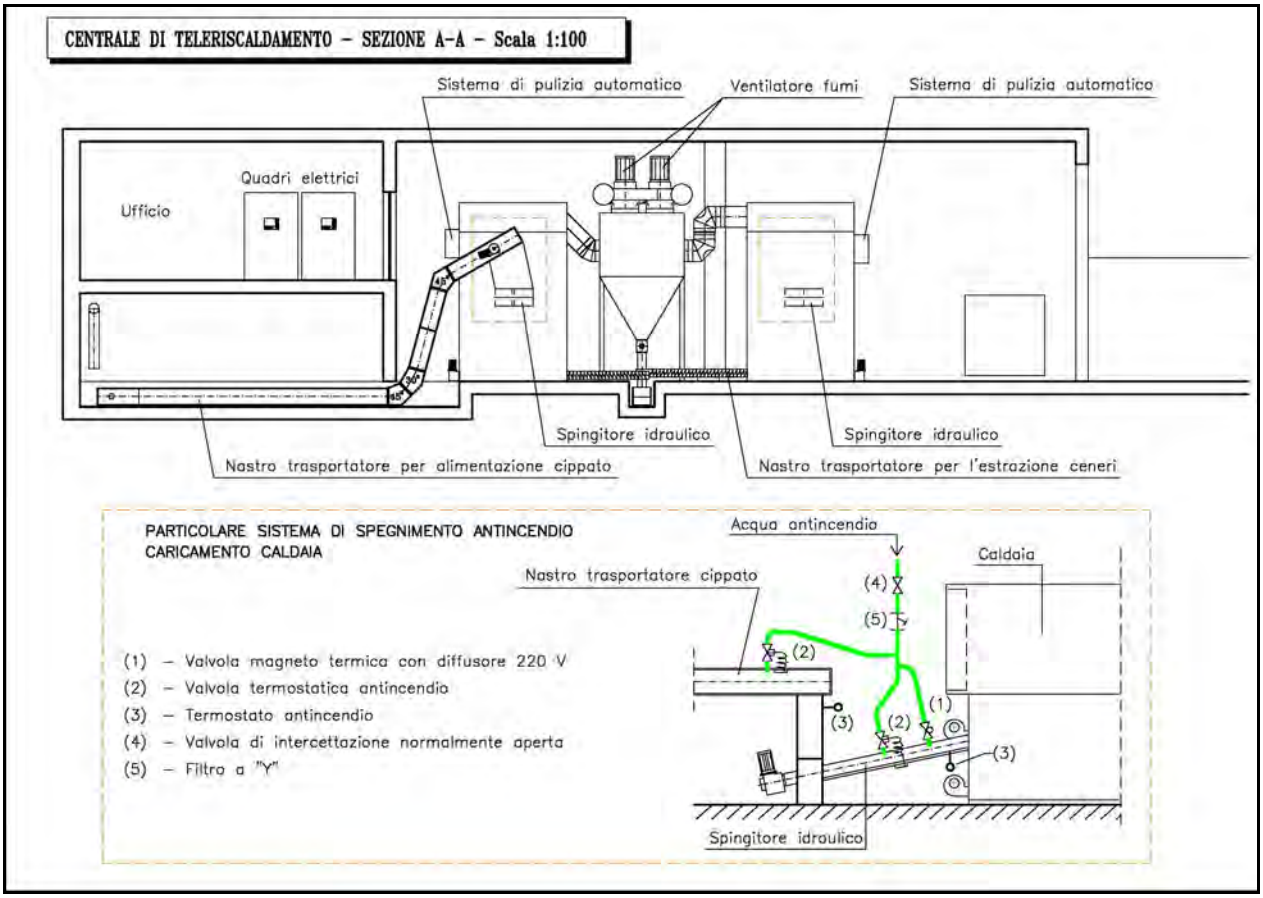


Figura 4. Schema caldaia a biomassa

3.2 Caldaie di integrazione e soccorso alimentate a gasolio

Sono presenti 2 generatori alimentati a gasolio che possono essere di integrazione o soccorso, utilizzati in caso di avaria e/o manutenzione delle 3 caldaie principali

alimentate a biomassa. Il gasolio è stoccato in appositi serbatoi del combustibile posti all'esterno ed interrati.



Figura 5. Caldaia a gasolio

3.3 Sistema di espansione

Il sistema di espansione è di tipo a pressione costante e volume variabile composto da n. 6 vasi di espansione aventi ciascuno la capacità di 5.000 litri atti a garantire una capacità utile di espansione pari a 21.420 litri per un contenuto utile totale di impianto di 490.000 litri. La particolarità riscontrata durante l'attività di verifica è che il sistema è stato certificato come insieme ai sensi della direttiva 2014/68 UE, comprendente un vaso di espansione principale dotato di tutti i dispositivi di sicurezza e accessori di controllo quali: livellostato, pressostato, indicatore di livello, manometro e valvola di sicurezza e cinque vasi secondari con indicatore di livello, manometro e valvola di sicurezza.



Figura 6. Sistema di espansione

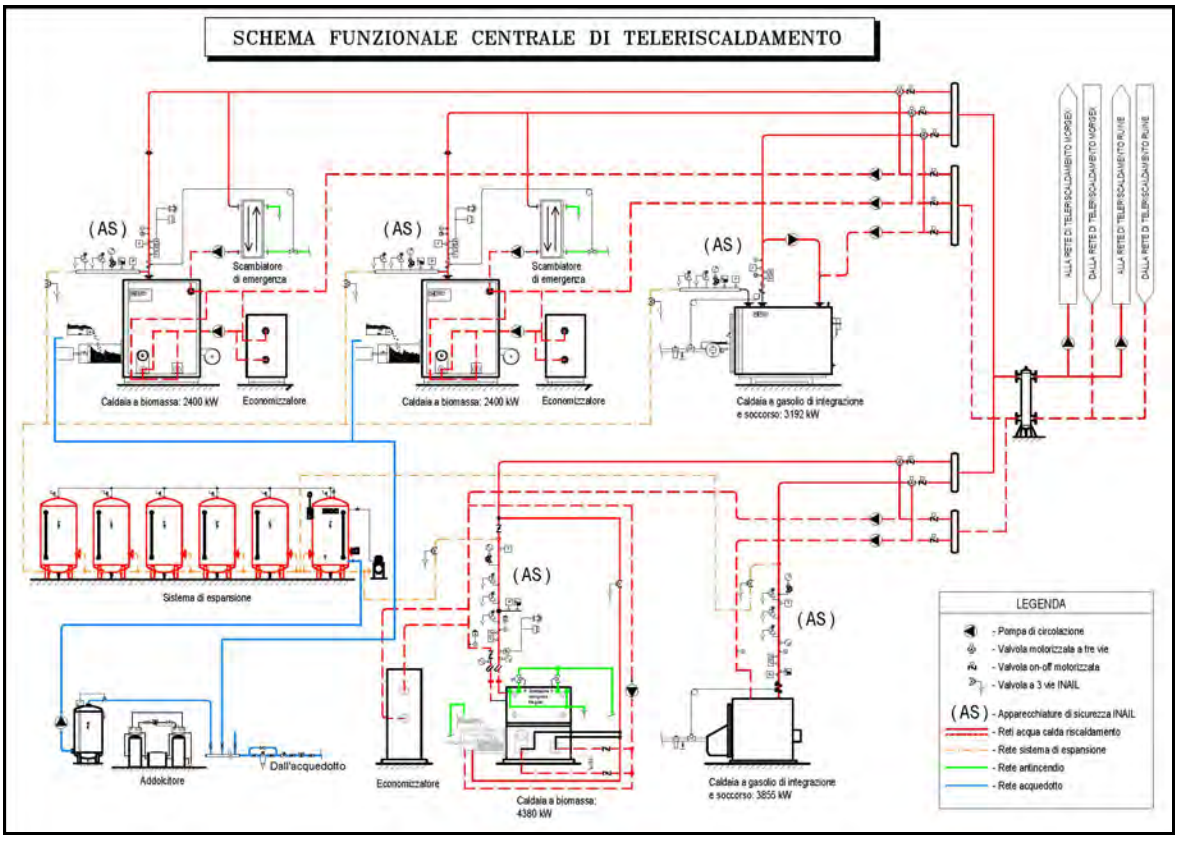


Figura 7. Schema centrale di teleriscaldamento

4. Sistema di emergenza raffreddamento caldaie

Una particolarità del sistema di raffreddamento dell'acqua di caldaia è stata affrontata nella realizzazione del primo lotto sulle due caldaie a biomassa da 2.400 kW, non ancora dotate di scambiatore di emergenza incorporato come per la terza caldaia a biomassa da 4800 kW installata successivamente con la realizzazione del secondo lotto.

Per i primi due generatori di calore per garantire la sicurezza sul mantenimento del controllo della massima temperatura è stato realizzato un sistema comprendente, per ogni generatore, uno scambiatore di calore a piastre costituito da un circuito primario dove l'acqua di caldaia viene movimentata mediante due elettropompe che sono azionate dal termostato di regolazione/sicurezza con il bulbo inserito direttamente nel corpo caldaia. Una particolarità del sistema è che in caso di interruzione della corrente elettrica, le pompe vengono alimentate da un gruppo di continuità (UPS) venendo così garantita la circolazione dell'acqua in caldaia per il raffreddamento in caso di emergenza.

L'alimentazione idraulica del circuito secondario dello scambiatore di emergenza della caldaia è attivata da una valvola di sicurezza di scarico termico (VSST) con l'elemento sensibile inserito nella tubazione di mandata del generatore, che alla temperatura di intervento apre la valvola (VSST) sull'alimentazione dell'acqua di raffreddamento, proveniente dall'acquedotto dotato di una doppia alimentazione per garantire la continuità della fornitura idrica.

5. Sicurezze antincendio

Per i soli generatori a biomassa, sono previste ulteriori sicurezze antincendio atte a garantire la prevenzione di problematiche dovute alla tipologia di combustibile, ma in particolare al sistema che comprende il deposito, il trasporto e il caricamento all'interno della camera di combustione, in particolare:

- Una prima sicurezza è inserita nel locale deposito con un impianto sprinkler attivato manualmente dagli operatori che presidiano l'impianto mediante un pulsante posizionato nei pressi dell'ingresso della centrale che comanda una elettrovalvola di apertura del flusso d'acqua derivato direttamente dall'acquedotto dotato di doppia alimentazione;
- Il passaggio del combustibile tra deposito e centrale termica tramite un nastro trasportatore deve garantire la compartimentazione REI 120, pertanto è stata introdotta una serranda tagliafuoco ad acqua con apposite testine di spruzzamento pilotate da apposito sensore termostatico inserito all'interno del nastro trasportatore che rileva un aumento della temperatura;
- Una ulteriore sicurezza è fornita da un controllo sull'alimentazione del combustibile prima dell'ingresso dello stesso nella camera di combustione con un sistema analogo al precedente, che per un qualsiasi innalzamento della temperatura irrora a diluvio il combustibile presente evitando una eventuale propagazione della fiamma verso il deposito.

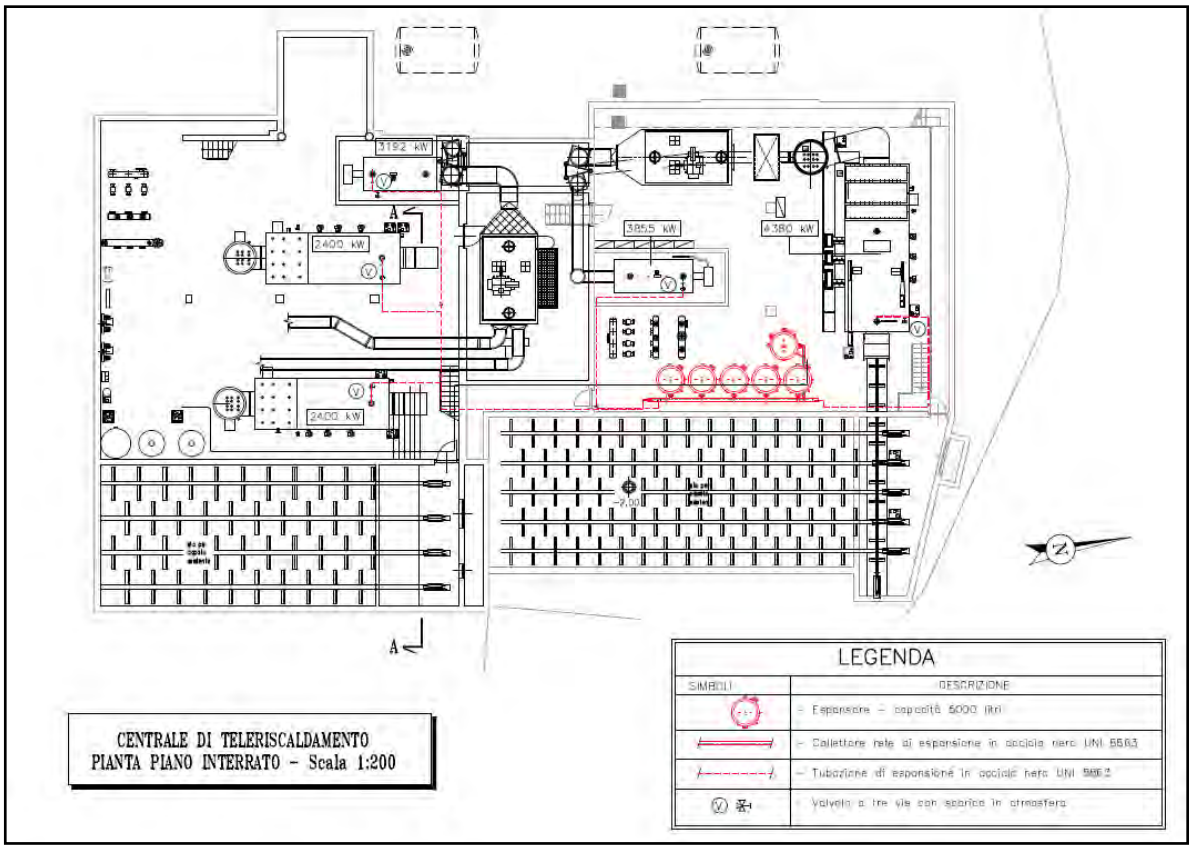


Figura 8. Planimetria centrale di teleriscaldamento

6. Conclusioni

Lo studio ha evidenziato come la sinergia tra il gestore dell'impianto e la comunità abbia portato alla nascita di una economia virtuosa, in termini di risparmio energetico, riduzioni di emissioni in atmosfera e riutilizzo degli scarti di combustione.
Inoltre, ha voluto focalizzare l'attenzione dei progettisti e dei costruttori sull'impiego di caldaie a combustibile solido non polverizzato per la realizzazione degli impianti di teleriscaldamento nell'arco alpino, utilizzando sempre meno combustibili fossili e dando nuovo impulso ed una maggiore sensibilità verso una cultura più ecosostenibile.

7. Bibliografia

[1] Decreto Ministeriale 1° dicembre 1975, "Norme di sicurezza per apparecchi contenenti liquidi caldi sotto pressione" (G.U. S.O. n. 33 del 06/02/1976).

[2] Raccolta R ed. 1999

[3] Decreto Ministeriale 28 maggio 2005

[4] Decreto Ministeriale 8 maggio 2023 "Regolamento recante inserimento del legno lamellare in forma di cippato nell'allegato X, parte II, sezione 4, paragrafo 1, alla parte quinta del decreto legislativo 3 aprile 2006"

[5] D.Lgs 9 aprile 2008, n. 81, Testo coordinato con il D.Lgs. 3 agosto 2009, n. 106, Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro. Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. (Gazzetta Ufficiale n. 101 del 30 aprile 2008 - Suppl. Ordinario n. 108; Decreto integrativo e correttivo: Gazzetta Ufficiale n. 180 del 05 agosto 2009 - Suppl. Ordinario n. 142/L).

[6] D.Lgs 25.02.2000 n. 93 e s.m.i. – Attuazione della Direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione

[7] Specificazioni tecniche applicative del D.M. 21 maggio 1974 - «Raccolta E».

[8] Direttiva 2014/68/UE del parlamento europeo e del consiglio del 15 maggio 2014 concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione

Incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose: rilevazione ed identificazione chimica *on site*

M.P. Gatto, C. De Toro, I. Campitelli, R. Di Leo, G. Selvestrini

Inail - Uot di Avellino

Abstract

Gli incidenti provocati da sostanze chimiche, a partire da quelli di Seveso nel 1976 o di Bhopal nel 1984, fino alla più recente esplosione di Beirut nel 2020, hanno avuto gravi impatti sulle persone e sull'ambiente. Per evitare o, quantomeno, ridurre le conseguenze degli incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose è necessario garantire, nel più breve tempo possibile, una adeguata rilevazione e quantificazione delle sostanze chimiche aerodisperse. Scopo del presente lavoro è stato quello di valutare le caratteristiche tecniche, quali sensibilità, selettività e specificità, intervallo di linearità e tempo di risposta, dei più diffusi sistemi di monitoraggio *real-time* appartenenti a quella divisione della chimica analitica che va sotto il nome di analisi speditiva o anche *on-site analysis*. Alcuni mezzi speditivi sono adatti alla rilevazione e determinazione semi-quantitativa dei contaminanti in fase gassosa, altri, solo per citare alcuni esempi, lo FT-IR (spettrometro a infrarossi in trasformata di Fourier) o il GC-MS portatile (gascromatografo con rivelazione a spettrometria di massa), sono utilizzabili anche per la speciazione e la quantificazione delle relative concentrazioni. Analogamente per il particolato (*Particulate Matter - PM*), gli strumenti a lettura diretta forniscono, generalmente, una concentrazione in massa delle particelle, e, talvolta, anche informazioni sulla classe chimica di appartenenza. L'analisi chimica *on-site*, fornendo tempestivamente informazioni preziose circa la natura e le concentrazioni dei contaminanti aerodispersi, nonché indicazioni sulle loro variazioni nel tempo e/o nello spazio, rappresenta un valido strumento per garantire le adeguate misure di emergenza ed attenuare, pertanto, le eventuali conseguenze sull'uomo e sull'ambiente antropico e naturale di un incidente rilevante.

Keywords: incidenti rilevanti, rischio chimico, analisi speditiva.

1. Introduzione

Ai sensi dell'art.3 del d.lgs. 105/2015 [1], norma di recepimento in Italia della Direttiva sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose (dir. 2012/18/UE) [2], si definisce incidente rilevante (IR) "*un evento quale un'emissione, un incendio o un'esplosione di grande entità, dovuto a sviluppi incontrollati che si verificano durante l'attività di uno stabilimento soggetto al presente decreto e che dia luogo a un pericolo grave, immediato o differito, per la salute umana o per l'ambiente,*

all'interno o all'esterno dello stabilimento e in cui intervengano una o più sostanze pericolose". Un IR richiede urgenti provvedimenti e tempestivi e qualificati interventi per fronteggiarlo, al fine di difendere la salute della popolazione dalla potenziale esposizione sia di natura fisica (incendio o esplosione) sia chimica (sostanze tossiche rilasciate nell'atmosfera durante l'incidente), e di tutelare l'ambiente dalle ricadute dell'evento e, quindi, dai possibili danni legati alla contaminazione dell'atmosfera, dell'acqua, del suolo e degli alimenti da parte delle sostanze rilasciate. In caso di incendi e esplosioni, agli effetti sanitari e ambientali, si aggiungono anche i danni a impianti, strutture e infrastrutture [3]. Una delle condizioni di cui tenere conto per il contenimento delle conseguenze di un IR sulla salute umana e/o sull'ambiente è quella di avere, nel più breve tempo possibile, una determinazione qualitativa e, possibilmente, anche quantitativa delle sostanze chimiche pericolose aerodisperse. Scopo del presente lavoro è stato quello di valutare lo stato dell'arte, nonché le possibili future applicazioni, degli strumenti a lettura diretta ad oggi disponibili appartenenti a quella divisione della chimica analitica definita come analisi speditiva o anche *on-site* o *real-time analysis*. Gli strumenti a lettura diretta sono apparecchiature in grado di rilevare sostanze chimiche aerodisperse, effettuando, *on site* ed in stretta successione temporale, il campionamento, l'analisi degli analiti di interesse e la registrazione del dato. Le misurazioni, anche dette speditive, possono, inoltre, essere utili per apprezzare le variazioni di concentrazione, nel tempo e nello spazio, di agenti chimici aeriformi (gas e vapori), particellari o aerosol (polveri, fumi, nebbie), fornendo informazioni sul *pattern* della concentrazione dell'inquinante e su localizzazione e intensità delle sorgenti emissive, identificando luoghi e periodi di elevata esposizione. La scelta della strumentazione da utilizzare a seguito di un evento in uno stabilimento con pericolo di incidente rilevante (PIR) dipende dall'obiettivo dell'analisi, rispondendo in ogni caso alla necessità di ottenere misure quali-quantitative in tempi brevi per la salvaguardia dell'ambiente, della salute della popolazione generale nonché dei lavoratori impegnati nell'esercizio dell'evento emergenziale e potenzialmente esposti a sostanze pericolose [4-5].



Figura 1. Attività RIR (Banca Dati Immagini Inail)

2. Gli strumenti per la rilevazione di composti aerodispersi *on site*

La IUPAC[1] definisce il sensore come: "*un sistema in grado di trasformare un'informazione chimica, che va dalla concentrazione di un singolo componente specifico del campione in analisi alla concentrazione di tutti i componenti l'intera matrice, in un segnale analiticamente utile*". Le prestazioni degli strumenti speditivi o a lettura diretta sono valutate attraverso la definizione di alcuni parametri tecnici di cui i più significativi sono descritti di seguito.

2.1. Parametri e requisiti degli strumenti a lettura diretta

È necessario che tutte le procedure di misurazione, comprese, quindi, anche quelle che prevedono l'impiego di strumenti a lettura diretta, siano sottoposte a validazione, ovvero conferma, attraverso l'esame e l'apporto di evidenza oggettiva, che i requisiti particolari per l'utilizzazione prevista siano soddisfatti. Dunque, anche per i metodi analitici speditivi, così come avviene per i metodi analitici di laboratorio, il risultato analitico non può essere valutabile, né confrontabile, né interpretabile, se non è corredato da una serie di indicatori che informano sulle *performance* del metodo impiegato per ottenerlo.

Si elencano alcune peculiarità specifiche degli strumenti speditivi per la misurazione di agenti chimici (punti a e b) e, relativamente ai punti da c) ad f), i principali parametri della validazione del metodo analitico, in conformità con quanto stabilito dalla norma tecnica UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2018 [6]:

a) *Tempo di risposta*: il tempo che un sistema impiega a reagire ad un dato *input*. Una delle caratteristiche fondamentali dei sensori è rappresentata dalla risposta in tempo reale: alcuni di essi consentono la lettura diretta della concentrazione della/e sostanza/e *target* con tempi di risposta istantanei (minimo 1 secondo), mentre altri presuppongono una preliminare separazione degli analiti (come ad es. i gascromatografi) e una elaborazione del dato. In quest'ultimo caso la necessità di una separazione selettiva delle sostanze *target*, prima della rivelazione, allunga il tempo di risposta dello strumento, che, nel caso di sostanze aeriformi, è funzione anche di quello di eluizione dell'inquinante nella colonna cromatografica (circa 10 minuti).
b) *Reversibilità*: possibilità di riutilizzo e assenza di effetti memoria, o presenza di effetti memoria facilmente rimovibili.
c) *Selettività*: la capacità di una tecnica analitica di non risentire della presenza di interferenti o di altri componenti diversi dall'analita in esame dal comportamento similare.
d) *Intervallo di linearità*: il *range* di concentrazione entro il quale il segnale varia linearmente con la concentrazione.
e) *Limiti di rivelabilità e di quantificazione*: il limite di rivelabilità (*Limit Of Detection* - LOD) è definito, secondo la IUPAC, come "la più piccola concentrazione di analita

[1] International Union of Pure and Applied Chemistry

che può essere rilevata in un campione con una certa accuratezza statistica". Si definisce, invece, limite di quantificazione (*Limit Of Quantification* - LOQ) la più piccola concentrazione di analita in un campione che può essere rilevata e determinata con una sufficiente precisione. In genere si assume:

$$LOD = \overline{x}_b + \frac{3 * \sigma_b}{b_1} \quad (1)$$

$$LOQ = \overline{x}_b + \frac{10 * \sigma_b}{b_1} \quad (2)$$

con $\overline{x}_b$ pari alla media del bianco, σ_b deviazione standard delle misure di bianco e b_1 il coefficiente angolare della retta di calibrazione.

f) *Accuratezza* (esattezza e precisione): l'accuratezza dei risultati è data dalla valutazione sia degli effetti sistematici sia di quelli casuali del metodo analitico utilizzato; a queste due componenti vengono associate, rispettivamente, esattezza e precisione, pari a:

$$Esattezza = R(\%) = \frac{V_S}{V_T} * 100 \quad (3)$$

$$Precisione = rep(\%) = \frac{Dev.Std.}{\mu} * 100 \quad (4)$$

con V_s e V_T rispettivamente valore medio sperimentale e valore teorico di riferimento accettato e μ media aritmetica.

g) *Incertezza di misura*: rappresenta il grado di indeterminazione con il quale il processo di misurazione ottiene il risultato e consiste nell'intervallo di valori, intorno al risultato di una misura, entro il quale è compreso il valore vero del misurando, con un livello di probabilità che generalmente è stabilito pari al 95%. Nella stima dell'incertezza di misura devono essere prese in considerazione tutte le componenti di rilievo in una data situazione [7].

2.2. Tipologie dei più diffusi strumenti a lettura diretta

In generale gli strumenti a lettura diretta si distinguono sulla base del principio di funzionamento del rivelatore. Alcuni di questi strumenti possono essere equipaggiati con un certo numero di sensori, in genere elettrochimici, ma anche catalitici, a infrarossi o a fotoionizzazione, permettendo di effettuare misurazioni di differenti analiti contemporaneamente. Nel seguito si riporta la descrizione delle caratteristiche dei più diffusi strumenti a lettura diretta dei livelli di concentrazione ambientale di gas e vapori (paragrafo 2.2.1.) e di particolato sottile (paragrafo 2.2.2.).

2.2.1. Misurazione di sostanze in forma di gas o vapore

Si descrive brevemente la funzionalità di base delle fiale colorimetriche e di tre dei più diffusi analizzatori *on site* di composti volatili: il detector a fotoionizzazione (PID), lo spettrometro a infrarossi a trasformata di Fourier (FT-IR), il gascromatografo portatile o micro-gascromatografo (μGC) accoppiato con i rivelatori a ionizzazione di fiamma (FID) a termo conducibilità (mTCD) o a spettrometria di massa (MS).

• Fiale colorimetriche: tubi di vetro dotati di scala graduata, contenenti sostanze rivelatrici sensibili a diverse varietà di sostanze chimiche. Quando il gas entra a

contatto con il contenuto della fiala si verifica un rapido e marcato cambiamento di colore. Dalla misurazione della lunghezza della decolorazione si risale alla concentrazione del contaminante. Si distinguono fiale a lettura diretta, il cui utilizzo comporta aspirazione dell'aria mediante una pompa manuale, e fiale ad assorbimento passivo, in cui le sostanze contaminanti passano all'interno della fiala, dove entrano in contatto con i reagenti mediante processi di diffusione.

• Foto-ionizzatore PID: strumento non-distruttivo (solo lo 0,01% delle molecole subisce il processo di fotoionizzazione) e non selettivo, ovvero non in grado di fornire una speciazione chimica.

Il principio di funzionamento su cui si basa consiste nella ionizzazione degli inquinanti aerodispersi una radiazione ultravioletta (UV) proveniente da una lampada con una specifica energia. La misura viene effettuata nel momento in cui il gas fluisce nella camera del *detector* dove gli ioni, attirati ad un elettrodo, producono una corrente proporzionale alla concentrazione del gas. Il principale vantaggio del rivelatore PID consiste nell'ampia classe di composti misurabili (aromatici, chetoni e aldeidi, ammine e ammidi, idrocarburi clorurarti, composti dello zolfo, idrocarburi insaturi e saturi, alcoli e alcune molecole inorganiche come ammoniaca e idrogeno solforato) con valori di LOD e LOQ che, in alcuni casi, mediante l'adozione di lampade ad elevata efficienza e di elettronica di particolare livello, possono arrivare fino ai ppb (parti per bilione).

• Spettrometro FT-IR: analizzatore che utilizza la spettroscopia a infrarossi a trasformata di Fourier per ottenere uno spettro di assorbimento (o di emissione) di un composto chimico. Esso fornisce misurazioni affidabili con bassi valori di LOD e LOQ e una capacità di riconoscimento di molteplici analiti, anche in miscele gassose complesse. La tecnica di funzionamento prevede l'aspirazione del gas all'interno dell'analizzatore con una pompa incorporata dotata di un filtro antiparticolato. Il *detector* funziona in modalità continua, misurando le medie ponderate della concentrazione in un intervallo di tempo di lunghezza definibile dall'utente. La criticità maggiore nelle determinazioni di tipo quantitativo è connessa alla disponibilità di librerie di spettri sufficientemente ampie per gli analiti di interesse e la presenza di contaminanti interferenti che alterano la forma del tracciato strumentale rispetto a quello che si registra per le sostanze pure.

• Rivelatore a ionizzazione di fiamma (FID): il *detector* rileva le sostanze organiche ionizzate mediante una micro-fiamma alimentata da idrogeno e aria; l'intensità della corrente elettrica prodotta è proporzionale alla concentrazione delle sostanze organiche presenti nel gas analizzato, che viene distrutto in fase di misurazione. I FID sono più comunemente noti come rilevatori GC, ma possono anche essere utilizzati come strumenti autonomi [8].

• Gascromatografo portatile o μGC: gli strumenti GC portatili presentano tutte le componenti principali di un sistema GC, l'iniettore, la colonna e il rilevatore, rimpicciolite rispetto agli strumenti da laboratorio per ottenere una migliore trasportabilità. Tutti i gascromatografi (GC) hanno la necessità di un gas di trasporto

(*carrier*), che permetta la separazione; a tal fine si utilizzano elio o azoto, trasportati in piccole bombole. I μGC sono certamente più costosi e complessi dei più semplici sensori di gas ma presentano il vantaggio di essere maggiormente selettivi verso specifici analiti *target*. Uno dei rivelatori GC più utilizzati è quello a termo-conducibilità (TCD), caratterizzato da una maggiore universalità di risposta. Il LOD va dai ppm (parti per milione), nel caso d'introduzione diretta dell'aria, fino a tre-quattro ordini di grandezza più bassi con l'inserimento, a monte dell'iniettore, di un sistema di pre-concentrazione del campione. Per ottenere una maggiore selettività si può utilizzare un gascromatografo accoppiato a un rivelatore a spettrometria di massa (MS), che consente, attraverso una frammentazione selettiva e specifica delle molecole, di ottenere una "impronta digitale" del composto, identificabile con un elevato livello di probabilità (spettro di massa) [9]. La calibrazione con miscele standard opportunamente selezionate può, inoltre, consentire una analisi quantitativa dell'analita *target*. In tabella 1 si riporta una sintesi delle caratteristiche principali dei sensori appena descritti.

Tipologia sensore e principio funzionamento	Specifiche chiave/ Selettività	t90**	Vantaggi	Svantaggi
	Fiale colorimetriche*			
Colorimetrico	> 350 composti volatili	Pochi minuti	Economiche, semplice utilizzo	Misura non in continuo, lettura soggetta a interpretazione
	PID			
Fotoionizzazione	Idrocarburi aromatici, etero composti	10 ÷ 200s	Economico, semplice utilizzo	Non selettivo
	FT-IR			
Spettroscopia a infrarossi in trasformata di Fourier	Misura decine di gas simultaneamente. Libreria con > 200 composti volatili	<120s	Economico, semplice utilizzo	Non adatto alla ricerca di sostanze non presenti in libreria
	FID			
Ionizzazione di fiamma	Scarsa risposta per sostanze alogenate	<3s	Campo di applicazione vasto	Scomodo, necessità di idrogeno
Gascromatografia accoppiata a PID, Termo conducibilità (mTCD) o con rivelazione a spettrometria di massa (MS)	**GC portatile**			
	Selettività dipendente dalle caratteristiche della micro-colonna cromatografica.	Pochi minuti	Prestazioni notevoli	Costo elevato, utilizzabile solo da personale specializzato

Tabella 1. Caratteristiche tecniche per tipologia di sensore; *assimilabili agli strumenti a lettura diretta per la velocità di risposta e la facilità di impiego; **t90= tempo di risposta, tempo necessario per rilevare il 90% del valore finale.

2.2.2. Strumenti a lettura diretta per il PM

Analogamente a quanto visto per l'analisi speditiva dei composti sotto forma di gas o vapori, anche per il particolato aerodisperso è disponibile una grande varietà di strumenti in grado di raccogliere le particelle in funzione del loro diametro aerodinamico o contatori di particelle o apparecchi che ne misurano la massa, oppure strumenti che ne danno la distribuzione dimensionale [10].

Viene di seguito rappresentato il funzionamento di due apparecchi per il monitoraggio di PM: il TEOM, microbilancia oscillante a elemento conico, strumento piuttosto costoso e sofisticato, il cui utilizzo necessita di operatori esperti e il *light scattering detector*, economico, maneggevole, che invece non richiede per l'uso personale specificatamente qualificato; una rassegna più ampia, quantunque non esaustiva, è sintetizzata a fine paragrafo in tabella 2.

- TEOM (*Tapered Element Oscillating Microbalance***)**: Il principio su cui si basa consiste nella determinazione della massa raccolta su un filtro attraverso la misura dei cambi di frequenza di un elemento di vetro cavo e affusolato, utilizzato come microbilancia, alla cui estremità è fissato il filtro. Il *detector* può essere utilizzato per il monitoraggio del PM10 e del PM2.5. L'aria viene aspirata attraverso un dispositivo di entrata riscaldato e il filtro sostituibile situato all'estremità del tubo cavo; l'aria filtrata passa poi attraverso il tubo, mantenuto in oscillazione. Quando il particolato si accumula sul filtro, la frequenza di oscillazione naturale del tubo diminuisce; il sistema elettronico monitora costantemente questo parametro e, in base alla relazione diretta tra la massa del PM e la frequenza di oscillazione, il microprocessore dello strumento calcola la massa totale accumulata sul filtro in tempo reale. Per mantenere precisione nelle misure, ed evitare, anzitutto, la raccolta di vapore acqueo legato alle particelle, l'elemento oscillante viene tenuto alla temperatura costante di circa 50°C: questo comporta la parziale volatilizzazione delle specie volatili o semi-volatili quali i sali di ammonio e molte specie organiche. Per ovviare a questo problema il TEOM può essere equipaggiato con il FDMS (*Filter Dynamics Measurement System*) in grado di misurare la porzione semivolatile indipendentemente dal campione totale in entrata e utilizzando questa frazione nel calcolo della concentrazione di massa di PM.
- *Light-scattering Detector*: numerose tecniche si basano sul *light scattering* e diversi parametri possono essere misurati; il principio generale su cui si basano consiste nel fatto che la luce, quando colpisce una molecola o una particella, viene in parte assorbita e in parte riemessa in tutte le direzioni. Secondo l'equazione di Rayleigh, l'intensità della luce scatterata a un determinato angolo dipende da molti fattori, tra cui il peso molecolare e la dimensione delle particelle del campione esaminato. La dimensione delle particelle viene, quindi, determinata dalla variazione misurata nell'intensità della luce diffusa in funzione dell'angolo di diffusione. L'incremento dell'intensità dello *scattering* è lineare con il peso molecolare, non lo è invece rispetto alla dimensione. Si distingue la *Static Light Scattering* (SLS), dove il segnale rilevato è statico e la tecnica dalla *Dynamic Light Scattering* (DLS), utilizzata per misurare la dimensione delle particelle. Rispetto alla DLS, nella SLS il movimento delle particelle

è meno importante poiché l'intensità diffusa rispetto all'angolo è una funzione diretta della dimensione delle particelle [11].
Generalmente la TEOM viene utilizzata per ricerche specifiche, visto l'elevato costo dello strumento, mentre gli analizzatori che misurano la *light-scattering* vengono preferiti per i rilevamenti di *screening*.

Tipologia sensore	Principio funzionamento e specifiche tecniche	Vantaggi	Svantaggi
TEOM			
Analizzatore a microbilancia oscillante con o senza FDMS	Il cambiamento della massa depositata su filtro produce una frequenza di oscillazione proporzionale alla quantità di PM	Dati con una discreta risoluzione temporale, precisione	Misura non in continuo, lettura soggetta a interpretazione. Si può sottostimare fino al 30% della concentrazione di particolato a causa di perdite di composti semi-volatili (senza FDMS)
Light-scattering			
Misuratori con tecnologia di misura diffrattometrica	La tecnologia è basata sull'effetto di diffrazione della luce generata dalla presenza di particolato	Leggero, relativamente economico, richiede poca manutenzione	Possibili interferenze in caso di nebbie
Analizzatore di assorbimento radiazioni β			
	Riduzione in intensità delle particelle ß al passaggio sui filtri dovuta al loro assorbimento da parte del particolato campionato e del filtro	Dati con una discreta risoluzione temporale	Costi per l'acquisto e la manutenzione elevati; possibili interferenze dovute alla presenza di condensa; necessità di sorgente radioattiva
Analizzatore ottico			
	Sfruttano l'interazione tra le particelle aerodisperse e la luce visibile o infrarossa o laser per la determinazione simultanea di polveri totali, PM10 e PM2.5	Maneggevoli e spesso funzionanti a batteria; misurazione di diverse frazioni dimensionali	Come per sensori *Light-scattering*
Analizzatori ottici multicanale			
	Misuratore ottico di polveri automatico multicanale per la determinazione di polveri totali e per il conteggio delle particelle suddivise in classi dimensionali	Dati con una discreta risoluzione temporale, precisione	I risultati per le particelle notevolmente pesanti o leggere possono differire da quelli ottenuti attraverso il campionamento con selettori

Tabella 2. Peculiarità dei più diffusi sensori per la misurazione di materiale particolato (PM) aerodisperso.

3. Gestione della fase post incidentale: definizioni e ruolo dell'analisi speditiva nel controllo del pericolo

Si definiscono Piani di Emergenza Interna (PEI) e Piani di Emergenza Esterna (PEE) i documenti previsti al fine di individuare, rispettivamente, le azioni che devono compiere i lavoratori e le squadre di soccorso in caso di emergenza interna allo stabilimento (PEI) e le azioni e gli interventi da intraprendere principalmente all'esterno dello stabilimento (PEE) nel perseguimento dell'obiettivo di mitigare gli effetti dannosi per l'uomo, l'ambiente e i beni materiali a seguito di un IR connesso con il rilascio di sostanze pericolose. L'efficacia di un PEE, predisposto dal Prefetto, coadiuvato da un *team* multidisciplinare costituito da vari soggetti pubblici e privati quali VV.F., ARPA, AUSL, FF.O., Comune, Città Metropolitana/Provincia, rappresentanti della Protezione Civile della Regione, 118, Gestore dello stabilimento, ecc., è valutata in funzione della capacità di rispondere in modo efficace e tempestivo ad una emergenza industriale, sulla base degli scenari che individuano le zone a rischio ove presumibilmente ricadranno detti effetti (di sicuro impatto, di danno, di attenzione). Nella gestione post incidentale è compito delle ARPA, oltre a quello di fornire supporto tecnico in base alla conoscenza dei rischi ambientali e degli eventuali controlli effettuati e/o della documentazione in proprio possesso, di effettuare, anche di concerto con l'ASL, gli accertamenti analitici per fornire informazioni sullo stato delle matrici ambientali coinvolte nello scenario incidentale, mediante misurazioni speditive e/o analisi di laboratorio. In ambito emergenziale particolarmente complesse risultano le misurazioni strumentali: le difficoltà maggiori consistono sia nella compresenza di diversi composti potenzialmente pericolosi non noti a priori, sia nella esatta definizione di variabili quali, la temperatura di incendio, l'altezza del pennacchio di fumo (nel caso di incendio), nonché dei diversi fattori meteoclimatici [12].

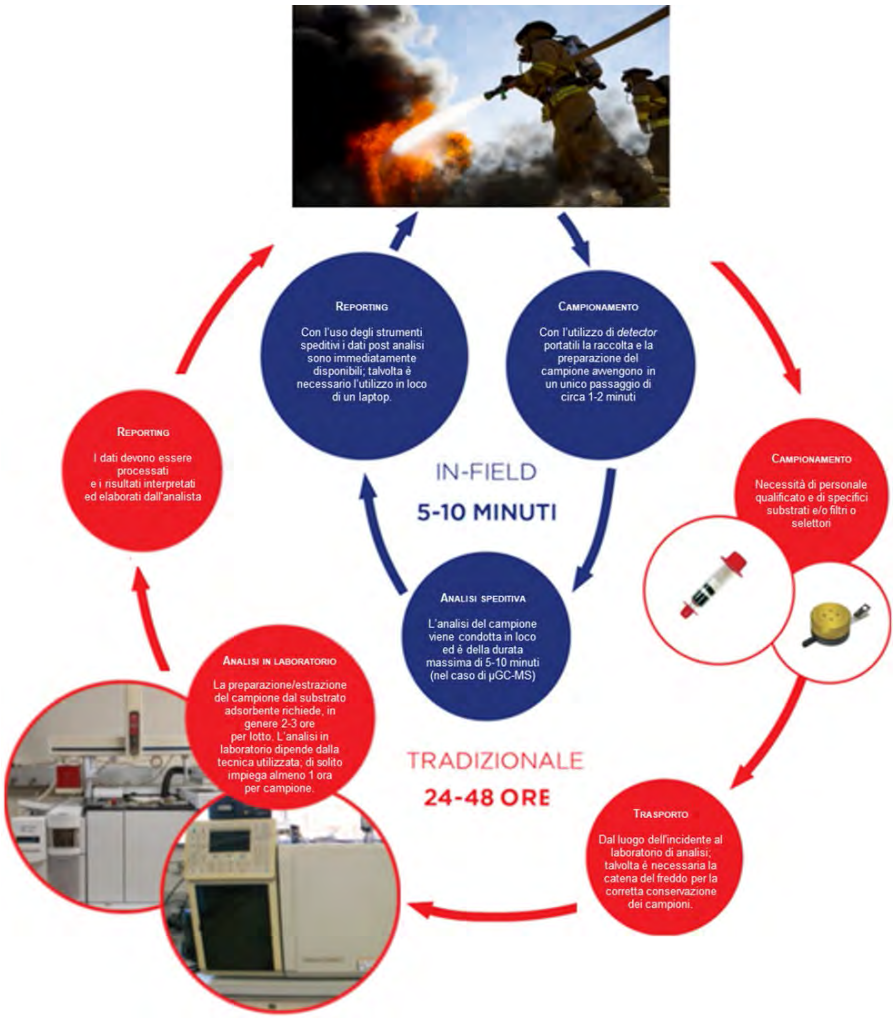


Figura 2. Analisi tradizionale condotta in laboratorio VS analisi *in-field*.

L'analisi tradizionale o *off-site* presenta, inoltre, rispetto a quella speditiva, problematicità aggiuntive legate alla modalità di campionamento necessaria alla realizzazione di un campione significativo, al suo trasporto in laboratorio, alla conduzione dell'analisi e ai relativi tempi, dettaglio, quest'ultimo, di fondamentale importanza nella gestione di una emergenza. Come si evince dalla figura 2., i tempi di risposta degli strumenti speditivi, a partire dall'acquisizione dei dati di monitoraggio ambientale fino al *report* finale, sono notevolmente inferiori rispetto a quelli dell'analisi tradizionale. Le misurazioni speditive vanno effettuate tenendo conto delle caratteristiche della sostanza rilasciata, della direzione di diffusione della contaminazione, delle condizioni meteo (in particolare della direzione del vento), nonché delle condizioni al contorno (es. geografia dei luoghi, presenza di attività antropiche) [4]. Qualora ritenuto necessario per confermare i dati acquisiti con le misure in campo, sulla base delle valutazioni effettuate e delle evidenze riscontrate, o per acquisire dati analitici utili alle successive attività di monitoraggio post emergenza, in parallelo o successivamente alle misure speditive, potranno essere prelevati campioni (anche in matrici acqua e suolo) da sottoporre a metodiche tradizionali mediante analisi di laboratorio, le cui specificità in termini di LOD, LOQ

etc, descritte nel paragrafo 2.1., soddisfano determinati requisiti per il confronto con i valori limite nelle diverse matrici per gli ambienti di vita e di lavoro definiti dalla normativa vigente [4-5].

4. Sviluppi futuri per la rilevazione *on site*

La ricerca e la tecnologia hanno permesso la messa a punto di sensori chimici con livelli di velocità di misura, sensibilità, stabilità nell'utilizzo intensivo e reversibilità impercorribili fino a qualche decennio fa. L'analisi GC-MS *off-site* resta, tuttora, la tecnica *gold standard* in termini prestazionali per la determinazione quali-quantitativa dei composti chimici volatili; si sottolinea, però, che questa metodica è anche piuttosto costosa, richiede tempo e personale altamente specializzato. Le principali sfide future per i sensori chimici saranno il raggiungimento di una specificità strumentale e valori di LOD e LOQ uguali a quelli del GC-MS *off-site*, l'eliminazione delle interferenze dovute sia all'effetto matrice sia ad altre componenti del campione, una maggiore stabilità e costi più sostenibili.
Tre sembrano essere, in particolare, le direzioni per il futuro delle analisi speditive. Innanzitutto, con i recenti miglioramenti nella selettività e sensibilità dovuta ai nuovi materiali di rivestimento per gli strati attivi e al meccanismo di trasduzione, così come anche grazie a una migliore stabilità operativa e di durata, i sensori saranno presto in grado di essere utilizzati in sempre più ampi contesti, non solo in ambito emergenziale. Nel settore dell'igiene del lavoro, per esempio, le analisi speditive, adesso utilizzate quasi esclusivamente nella fase di *screening,* raggiungeranno valori prestazionali sufficienti da poter soddisfare i requisiti delle metodiche standardizzate, di cui all'art. 225 e all'all. XLI del d.lgs 81/08, previsti per la valutazione approfondita del rischio [13]. Gli sviluppi nella miniaturizzazione e nella semplificazione della tecnica gascromatografica permetteranno il passaggio dal μGC a dispositivi micro-fabbricati integrati con chip "micro-fluidici", già oggi oggetto di un'intensa attività di ricerca [14]. Ciò porterà a un'eccellente selettività e sensibilità, tempi di risposta molto rapidi e una buona capacità di quantificazione. Infine, sarà implementato lo sviluppo di tecnologie ibride dove i sensori chimici saranno accoppiati a dispositivi innovativi quali i droni o i cosiddetti smart DPI (Dispositivi di Protezione Individuale) [15-16].

Conclusioni

La presenza sul territorio di stabilimenti che utilizzano o detengono sostanze chimiche per le loro attività produttive può esporre la popolazione e l'ambiente circostante al rischio industriale. In emergenza, le misurazioni a lettura diretta forniscono informazioni preziose circa le variazioni di concentrazione dei contaminanti nel tempo e nello spazio, costituendo un valido strumento per la definizione di eventuali azioni successive.
Dallo studio condotto è emerso come le due tecniche di monitoraggio degli inquinanti aerodispersi, quella di tipo tradizionale condotta in laboratorio e quella speditiva attraverso l'ausilio di sensori, siano complementari e non alternative; la scelta

dell'una o dell'altra, così come della tipologia di *detector*, dipende dalle finalità dell'indagine. Infine, sebbene alcuni di questi strumenti speditivi, come ad es. il μGC-MS, abbiano già raggiunto dei limiti prestazionali molto vicini a quelli degli strumenti *off-site*, significativi sviluppi si prevedono per il futuro sia in termini di ottimizzazione strumentale sia come ampliamento del campo delle loro applicazioni.

Bibliografia

[1] DECRETO LEGISLATIVO 26 giugno 2015, n. 105 Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose. GU Serie Generale n.161 del 14-07-2015 - Suppl. Ordinario n. 38.

[2] DIRETTIVA 2012/18/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 4 luglio 2012 sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose, recante modifica e successiva abrogazione della direttiva 96/82/CE del Consiglio.

[3] Linee Guida, Parte I, per la Pianificazione dell'emergenza esterna per gli stabilimenti industriali a rischio di incidente rilevante., ai sensi dell'art. 21 commi 7 e 8 del d. lgs. 105/2015, ed. 2021.

[4] Linee Guida Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) "Manuale operativo per la gestione delle emergenze ambientali del SNPA". 36/2021 ISBN 978-88-448-1088-7.

[5] Gherardi, M., Incocciati, E., Gatto, M.P. Monitoraggio dell'aria ambiente per la valutazione approfondita del rischio. https://www.inail.it/cs/internet/docs/alg-intervento-incocciati-evento-conv-siti-contaminati-venezia.pdf

[6] Norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2018, Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e taratura.

[7] Eurachem/CITAC guide: Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement, ed. S. L. R. Ellison and A. Williams, 3rd edn, 2012, ISBN 978-0-948926-30-3.

[8] Karagulian, F., Barbiere, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., Redon, N., Crunaire, S., Borowiak, A. Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring. *Atmosphere.* 2019; *10*, 506.

[9] Jian, R.-S., Huang, Y.-S.; Lai, S.-L.; Sung, L.-Y.; Lu, C.-J. Compact Instrumentation of a μ-GC for Real Time Analysis of Sub-Ppb VOC Mixtures. *Microchem. J.* 2013; 108: 161-167.

[10] Eatough, D.J., Eatough, N.L., Obeidi, F., Pang, Y., Modey, W., Long R. Continuous determination of $PM_{2.5}$ mass, including semi-volatile species, *Aerosol Sci. Technol.* 2000; 34:1–8.

[11] Su, X., Sutarlie, L, Loh, X.J. Sensors and Analytical Technologies for Air Quality: Particulate Matters and Bioaerosols. *Chem Asian J*. 2020;15(24):4241-4255.

[12] Linee guida Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) per la gestione delle emergenze derivanti da incendi. 2021.

[13] DECRETO LEGISLATIVO 9 aprile 2008, n. 81 Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro (G.U. n. 101 del 30 aprile 2008).

[14] Epping, R.; Koch, M. On-Site Detection of Volatile Organic Compounds (VOCs). *Molecules.* 2023; *28*, 1598.

[15] De Fazio, R., Dinoi L.M., De Vittorio, M., Visconti, P. A Sensor-Based Drone for Pollutants Detection in Eco-Friendly Cities: Hardware Design and Data Analysis Application. *Electronics.* 2022; *11*, 52.

[16] Márquez-Sánchez, S., Campero-Jurado, I., Herrera-Santos, J., Rodríguez, S. Corchado, J.M. Intelligent Platform Based on Smart PPE for Safety in Workplaces. *Sensors.* 2021; *21*, 4652.

Installazione ed esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 13 m^3

G. Vaccaro[1], M. Torres[2], F. Moncini[3], D. Di Fonzo[1], F.P. Sofia[1]

[1] Inail - Uot di Palermo
[2] Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco- Direzione Regionale per la Sicilia
[3] Inail - Uot di Torino

Abstract

La memoria intende trattare la normativa in materia di installazione ed esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto (GPL) con capacità complessiva non superiore a 13 m^3, a partire dalla dichiarazione/verifica di messa in servizio ai sensi del d.m. n. 329 del 2004, fino alla riqualificazione periodica ai sensi del d.m. n. 329 del 2004, considerando anche le verifiche periodiche dei serbatoi asserviti a processi produttivi ai sensi del d. interm. 11 aprile 2011.
Saranno analizzate le tematiche relative al rischio da sovrappressione nell'ambito delle attrezzature a pressione nonché le tematiche di prevenzione incendi, nell'ottica estesa della sicurezza finalizzata alla salvaguardia delle persone ed alla tutela dei beni.
In particolare, verranno affrontati i seguenti aspetti:

- tipologie di installazione (serbatoi fuori terra ed interrati);
- distanze di sicurezza rispetto agli elementi pericolosi del deposito;
- accessori a corredo dei serbatoi;
- operazioni di riempimento.

Si farà quindi riferimento ai decreti specifici dei depositi di GPL, quali il d.m. 29/02/1988 (con le modifiche introdotte dal d.m. 23/09/2004) ed il decreto 17/01/2005, nonché ai dispositivi normativi specifici di prevenzione incendi, quali il d.m. 13/10/1994, il d.m. 14/05/2004 (coordinato ed aggiornato dal d.m. 05/07/2005 e dal d.m. 04/03/2014).
Scopo della trattazione sarà quindi quello di rappresentare, a valle degli obblighi che si sono susseguiti nel tempo, il quadro legislativo e normativo di riferimento necessario per orientarsi e districarsi tra i diversi adempimenti obbligatori in materia sicurezza dei depositi di GPL con capacità complessiva non superiore a 13 m^3.

Keywords: depositi GPL, verifiche, prevenzione incendi.

1. Introduzione

Nel tempo sono stati emanati importanti provvedimenti normativi inerenti le attività disciplinate dal d.m. 29 febbraio 1988 recante le norme di sicurezza per la progettazione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 5 m^3, quali:

1- d.m. 14 maggio 2004;
2- d.m. 23 settembre 2004;
3- d.m. 1° dicembre 2004 n. 329;
4- d.m. 17 gennaio 2005;
5- d.m. 5 luglio 2005;
6- d. interm. 11 aprile 2011;
7- d.m. 4 marzo 2014.

2. Variazioni apportate al d.m. 29 febbraio 1988

Tra le variazioni più significative si segnala quanto disposto dall'art.1 del d.m. del 23 settembre 2004, nel quale viene ampliato a 13 m^3 il campo di applicazione del d.m. 29/02/1988, originariamente limitato a 5 m^3.

2.1 Verifiche di primo o nuovo impianto

La verifica di primo impianto o messa in servizio, ai sensi di quanto disposto all'art.4 del d.m. n. 329 del 2004, è obbligatoria soltanto se il serbatoio di GPL non rientra nel caso di esclusione di cui al comma 1 lettera d) dell'art.5 del citato d.m.
Per l'applicabilità dell'art.5 il serbatoio deve essere stato immesso sul mercato come insieme ai sensi della direttiva P.E.D. e devono risultare effettuate, da parte del competente organismo notificato, le verifiche degli accessori di sicurezza e dei dispositivi di controllo, le cui risultanze devono costituire parte integrante della documentazione trasmessa all'atto della dichiarazione di messa in servizio.
La verifica di primo impianto, ovvero della messa in servizio, potrà essere effettuata anche presso il magazzino del fabbricante, della ditta fornitrice del gas o della ditta installatrice del recipiente, anziché presso l'utente, alle condizioni previste alle lettere a), b) e c) dell'art.2 del d.m. 29 febbraio 1988.
In particolare, per i serbatoi di stoccaggio di gas di petrolio liquefatto (GPL) di capacità non superiore a 13 m^3 e dei lori insiemi, essendo attrezzature costruite in serie ed installate presso gli utilizzatori da aziende che, conservandone la proprietà e la responsabilità tecnica, provvedono al loro rifornimento, l'interessato può compilare un'unica dichiarazione di messa in servizio cumulativa per tutte le apparecchiature e gli insiemi installati in un semestre.

2.2 Verifiche periodiche di funzionamento

Le verifiche periodiche sui recipienti di GPL impiegati per uso domestico sono disciplinate dall'art.10 del dm n.329 del 2004 mentre i serbatoi GPL asserviti a

processi produttivi sono assoggettati alle verifiche periodiche di cui al d. interm. 11 aprile 2011.
Le suddette verifiche consistono in:

- esame documentale;
- controllo della funzionalità dei dispositivi di protezione;
- controllo dei parametri operativi;
- individuazione dell'attrezzatura (o delle attrezzature componenti l'insieme);
- verifica di corrispondenza delle matricole rilasciate dall'ISPESL o dall'INAIL;
- constatazione della rispondenza delle condizioni di installazione, di esercizio e di sicurezza con quanto indicato nella dichiarazione di messa in servizio;
- controllo dell'esistenza e della corretta applicazione delle istruzioni per l'uso del fabbricante.

Tali recipienti possono fruire dell'esonero dalla prescrizione relativa alla verifica biennale (anziché annuale) di esercizio a condizione che la ditta fornitrice del gas si impegni a:

- proteggere gli accessori di sicurezza e di controllo dagli agenti atmosferici;
- effettuare in occasione del riempimento, e comunque con scadenza non superiore all'anno, il controllo dello stato di conservazione della superficie protettiva esterna del recipiente e della funzionalità degli accessori;
- sostituire, almeno ogni due anni, la valvola di sicurezza con altra previamente tarata al banco dal soggetto preposto.

Per i serbatoi di GPL da sottoporre a verifica di primo o nuovo impianto l'accertamento dei requisiti per l'esonero potrà essere eseguito dall'INAIL contestualmente alle verifiche previste presso l'utilizzatore.

2.3 Verifiche di integrità

Relativamente alle verifiche di integrità, con l'emanazione del d.m. 329 del 2004 e del d. interm. 11 aprile 2011, restano comunque ferme le disposizioni previste dall'art.4 del d.m. 29 febbraio 1988 per le verifiche decennali, che possono essere costituite da un'ispezione generale ed una visiva esterna integrata da controlli non distruttivi per il rilievo degli spessori.
In alternativa ai cosiddetti controlli tradizionali possono essere utilizzate le modalità indicate nel d.m. 23 settembre 2004 che per i soli recipienti per GPL interrati consistono nella campionatura degli stessi e nell'impiego del metodo di controllo con Emissioni Acustiche, di cui allo standard europeo UNI EN 12817:2010.





Figura 1. Controllo attraverso le Emissioni Acustiche

3. Equipaggiamento

I serbatoi di GPL utilizzati per la fornitura allo stato gassoso devono essere equipaggiati in maniera tale da garantire determinate funzioni operative, che la UNI EN 14570:2014 categorizza in “obbligatorie” ed “opzionali”.
Equipaggiamento obbligatorio:

- La valvola limitatrice di pressione o valvola di sicurezza;
- Un sistema di rimozione del liquido;
- Un indicatore di livello fisso e/o un dispositivo di protezione contro il riempimento eccessivo;
- Un sistema di riempimento indipendente, posizionato e progettato in moda da evitare interferenze con altre funzioni (come, ad esempio, quella di prelievo del gas o di indicazione del livello di liquido);
- Un sistema di prelievo del gas;
- Un indicatore del livello di liquido.

Equipaggiamento opzionale:

- Drenaggio;
- Ritorno del gas;
- Prelievo del liquido;
- Ritorno del liquido;
- Indicazione della temperatura;

- Indicazione della pressione;
- Punto di collegamento equipotenziale;
- Messa a terra.

Si evidenzia che nell'elenco dell'equipaggiamento opzionale sono presenti accessori previsti da provvedimenti legislativi nazionali che li rendono invece obbligatori.

4. Rischio da sovrapressione

In quanto attrezzature/insiemi a pressione, i serbatoi GPL devono garantire il rispetto dei requisiti essenziali di sicurezza previsti dalla Direttiva P.E.D. (97/23/CE e 2014/68/UE) e quindi dai rispettivi decreti di recepimento (d.lgs. 25/02/2000 n.93 e d.lgs. 15/02/2016 n.26).
I serbatoi devono pertanto essere "*progettati, fabbricati, controllati e, ove occorra, dotati dei necessari accessori*" al fine di eliminare i rischi noti da sovrapressione.
Il d.lgs. 15/02/2016 n.26 specifica che i dispositivi di limitazione della pressione devono essere progettati in modo che la pressione non superi in permanenza la pressione massima ammissibile PS (salvo il picco temporaneo limitato al 10% della PS previsto al punto 7.3).
La UNI EN 14570:2014 individua come elemento obbligatorio la "valvola limitatrice di pressione o valvola di sicurezza idrostatica" e prevede che tale dispositivo inizi a scaricare ad una pressione non minore della pressione sviluppata dal GPL alla temperatura di riferimento e non maggiore della PS del serbatoio.
La UNI specifica che, per condizioni di funzionamento diverse dall'esposizione a fiamme esterne, la capacità di scarico attraverso tale dispositivo deve essere tale che la pressione nel serbatoio non superi permanentemente la PS, con eventuale breve picco di pressione in ogni caso ≤110% della PS, in analogia con quanto indicato nel d.lgs. 15/02/2016 n.26.
Sempre la UNI specifica che i serbatoi interrati/tumulati possono essere esentati dalla prescrizione della presenza di valvola limitatrice di pressione o di sicurezza idrostatica, con la condizione che vi siano mezzi alternativi di protezione dal rischio di sovrapressione durante il funzionamento.
Tale condizione deve essere esplicitata da parte del Fabbricante nelle istruzioni per l'uso/installazione.
I mezzi alternativi consistono in alcuni accorgimenti quali:

- Spessore terra di ricoprimento ≥ 0,5 m;
- due sistemi di protezione indipendenti contro il rischio di riempimento eccessivo di liquido, comprendenti l'arresto automatico dell'operazione di riempimento al raggiungimento del livello massimo;
- due sistemi di controllo indipendenti della sovrapressione, consistenti in pressostati che chiudano le linee di alimentazione/ritorno delle fasi liquide e gassose;

- protezione antincendio del corpo del serbatoio in pressione all'interno del pozzetto delle valvole, per esempio mediante un rivestimento di protezione antincendio o predisposizione di allagamento d'emergenza.

Alcune indicazioni ulteriori specificano le condizioni di installazione dei dispositivi di protezione dalla sovrapressione:

- devono essere collegati alla fase gassosa;
- se si trovano all'interno di un vano, la copertura di tale vano deve essere dotata di un foro di dimensioni sufficienti per permettere lo scarico libero (foro non richiesto per i serbatoi interrati se la copertura non è a tenuta d'acqua e consente il libero scarico);
- devono essere dotati di protezione dalla pioggia e dalla polvere.

Ed ovviamente, poiché i sistemi di funzionamento delle attrezzature a pressione devono essere tali da escludere qualsiasi rischio ragionevolmente prevedibile derivante dal funzionamento, è necessario prestare attenzione anche ad evitare che gli scarichi delle valvole di sicurezza costituiscano fonte di pericolo.

5. Prevenzione incendi

I serbatoi di GPL di piccola capacità sono installati presso fabbricati di civile abitazione ed edifici adibiti ad attività nel terziario.

La necessità di adottare misure di sicurezza antincendio per i serbatoi di GPL discende dalla infiammabilità del gas che, se fuoriuscito, può dare luogo alla formazione di miscele infiammabili con l'aria.

In questo ambito è cogente la regola tecnica di prevenzione incendi allegata al d.m. 14/05/2004 modificata con d.m. 04/03/2014 che si applica per i depositi con capacità complessiva da 0,1 m^3 a 13 m^3.

Il rischio correlato ad un deposito di gas, costituito da uno o più serbatoi, ed in particolare la possibilità che da un serbatoio possa fuoriuscire una certa massa di gas, che diffondendosi può dare origine a miscele pericolose, è da ricondurre essenzialmente ai seguenti aspetti:

- integrità strutturale di un serbatoio e dei suoi componenti cioè dal grado di sicurezza meccanica dello stesso;
- distribuzione del prodotto dal serbatoio agli impianti utilizzatori;
- affidabilità delle operazioni di riempimento di un serbatoio da autocisterna;

Riguardo al primo aspetto, la regola tecnica prima enunciata fa riferimento alle norme UNI-EN vigenti che, se correttamente attuate, consentono di minimizzare il rischio dovuto a fenomeni di tipo meccanico che, oltre a coinvolgere la struttura del serbatoio, possono coinvolgere altri componenti del serbatoio (gli organi di riempimento, gli organi di intercettazione e controllo, il gruppo valvolare) che la regola tecnica di cui sopra considera come elementi pericolosi.

Allo scopo di preservare l'integrità di un serbatoio, gli accessori ed i dispositivi di sicurezza devono essere racchiusi in un apposito pozzetto con chiusura a chiave,

quindi accessibile solo al personale addetto alle operazioni di manutenzione, protetto dai ristagni di acqua e che abbia continuità metallica col serbatoio stesso. Il serbatoio deve essere inoltre ancorato o zavorrato al terreno di posa e protetto, ad una distanza minima di 1,5 metri da cordoli in calcestruzzo con altezza ≥ 0,2 m ovvero da barriere resistenti agli urti distanti ≥ 1 metro, rispetto ad automezzi che possono transitare nell'area di pertinenza del serbatoio stesso.
Riguardo al secondo aspetto la regola tecnica prende in esame i dispositivi che fanno parte del sistema di distribuzione quali vaporizzatori, tubazioni di adduzione, regolatori di pressione, scambiatori di calore per i quali sono previsti rivestimenti e protezioni allo scopo di resistere alle sollecitazioni meccaniche cui vengono sottoposti durante il loro esercizio.
Riguardo al terzo aspetto il personale addetto all'utilizzo delle autocisterne deve essere appositamente formato all'uso e soprattutto a svolgere le operazioni di trasferimento del prodotto nel modo corretto utilizzando opportunamente le attrezzature che servono a minimizzare il rischio di innesco di eventuali miscela gas-aria che si possono formare durante il trasferimento stesso ed inoltre di tubazioni flessibili (tronchetti) che permettono di intercettare il flusso di gas in trasferimento in caso di malfunzionamento dell'organo di riempimento del serbatoio o perdite di gas dall'autocisterna.
Tuttavia, a causa di errori umani o di usura nel tempo dei materiali, il rischio, inizialmente basso per l'adozione delle misure di cui sopra, tende a crescere col tempo rendendo necessario, quindi, il ricorso a misure di sicurezza antincendio che hanno lo scopo di proteggere persone e manufatti civili nel momento in cui si materializza la fuoriuscita di una massa di gas con conseguente pericolo di incendio.
Le misure di sicurezza antincendio previste dalla regola tecnica sono principalmente misure di sicurezza di tipo passivo, che hanno lo scopo di contenere la propagazione del gas minimizzando le possibilità di innesco e le eventuali conseguenze di un incendio, una volta verificatosi il rilascio da un contenitore, e misure di sicurezza di tipo attivo che vanno adoperate nel momento in cui si manifesta il principio di incendio a seguito della formazione di una miscela gas-aria innescata.
Di seguito si esporranno i criteri concettuali alla base delle misure di protezione rimandando ad una lettura integrale della regola tecnica riguardo i diversi parametri che caratterizzano le misure di sicurezza da adottare.
La natura delle misure di sicurezza di tipo passivo dipende dalla proprietà del GPL che è un gas più pesante dell'aria per cui, una volta fuoriuscito dal contenitore, si muoverà lungo il terreno.
Partendo da questo comportamento del gas, diventano punti vulnerabili da proteggere le cavità, le depressioni, le fogne dove facilmente il gas può accumularsi, a cui vanno ad aggiungersi i fabbricati verso i quali la protezione è da considerare in relazione alla possibilità che la miscela di gas possa essere innescata provocando un principio di incendio.

In questo ambito le misure di protezione prescritte consistono nella predisposizione di distanze di sicurezza da questi punti vulnerabili e da edifici che vengano diversamente considerati in relazione alla funzione che svolgono (ad esempio se utilizzati per attività aperte al pubblico o meno o se utilizzati per la detenzione di materiale combustibile e/o infiammabile).
Pertanto, in relazione alla capacità del deposito (che può coincidere con la capacità del singolo serbatoio nel caso in cui sia l'unica installazione presente), le distanze di sicurezza imposte, rispetto agli elementi pericolosi di un serbatoio già evidenziati, avranno valori crescenti all'aumentare della capacità del deposito. Altresì vengono stabilite delle distanze rispetto a linee elettriche ad alta tensione e linee elettriche ferroviarie.
Si soggiunge inoltre, in quanto aspetto spesso trascurato, che nell'area di installazione dei serbatoi non devono essere presenti materiali combustibili di qualsiasi natura compresi alberi di alto fusto e arbusti vegetativi nel raggio di 5 metri.
La determinazione di queste distanze rispetto agli elementi pericolosi di un serbatoio viene fatta utilizzando la regola del filo teso.
A questa tipologia di distanze si aggiunge quella relativa alle distanze di protezione che sono le distanze minime rispetto agli elementi che delimitano l'area del deposito.
I valori minimi delle distanze di sicurezza possono essere dimezzati frapponendo, fra un serbatoio e l'elemento da proteggere, un muro oppure interrando il serbatoio poiché entrambe le soluzioni consentono di contenere la propagazione di una massa di gas fuoriuscita.
Quindi gli aspetti dirimenti per potere individuare le distanze di sicurezza sono:

- la composizione del deposito in termini di area utilizzata e numero di serbatoi presenti nel deposito;
- la posizione dei serbatoi nell'area rispetto ai punti vulnerabili da proteggere;

Il deposito può essere costituito da un serbatoio o da più serbatoi.
In particolare per depositi fino a 5 m^3 i serbatoi di ciascun deposito devono distare almeno 6 metri fra loro e la somma delle capacità di tutti i serbatoi presenti nel raggio di 15 metri deve comunque essere inferiore a 5 m^3,ove detta capacità complessiva sia superiore a 5 m^3 la distanza fra i serbatoi di ciascun deposito deve essere almeno di 15 metri.
Si riportano di seguito per una migliore comprensione due schemi applicativi.

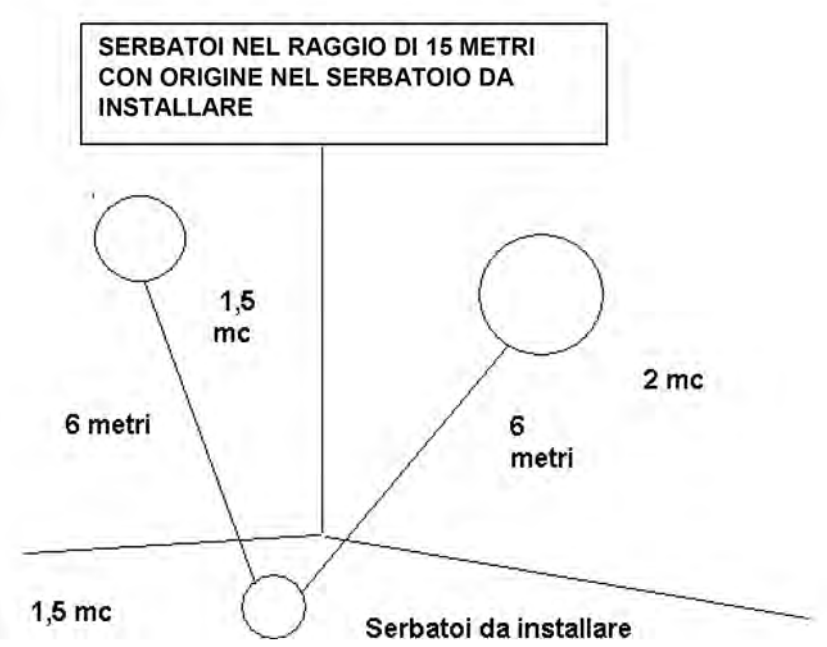


Figura 2. Serbatoi nel raggio di 15 metri con capacità complessiva ≤ 5 m^3

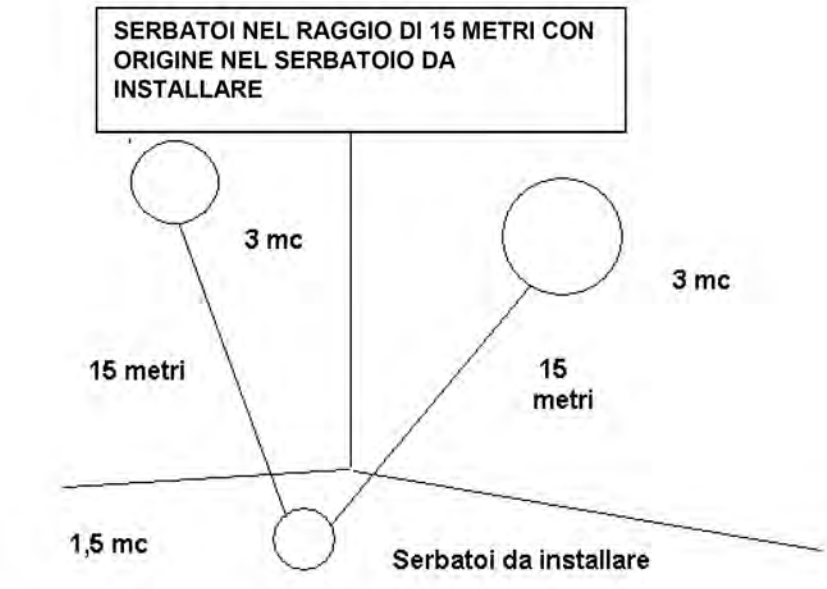


Figura 3. Serbatoi nel raggio di 15 metri con capacità complessiva > 5 m^3

In tutti i casi in cui la predetta regola non viene rispettata i serbatoi vanno considerati facenti parte di un unico deposito con l'obbligo di adottare le misure di sicurezza previste per la capacità massima ottenuta sommando le capacità dei singoli serbatoi o, addirittura, se si supera la capacità complessiva di 13 m^3, di dovere applicare la regola tecnica del d.m. 13/10/1994.

Quindi va evidenziato che, ai fini della determinazione delle distanze da adottare, si deve fare riferimento alla capacità massima del deposito mentre per la verifica delle distanze da applicare si deve fare riferimento alla posizione del serbatoio nel deposito. Infatti, in base alla posizione, si considera il serbatoio più vicino ai punti vulnerabili da proteggere e, in base alla disposizione planimetrica dei punti vulnerabili ed alla posizione dei serbatoi, è possibile che la verifica debba essere fatta non per un solo serbatoio ma per più serbatoi presenti nel deposito.
A causa dei rischi evidenziati è fatto divieto di installare i serbatoi sulle terrazze.

Infine, vi è l'aspetto relativo alla security cioè alla possibilità che i serbatoi di un deposito possano non essere accessibili da chiunque per cui le aree di installazione vanno protette con recinzioni metalliche alte almeno 180 cm e porte di accesso con lucchetto tranne nel caso in cui i serbatoi sono collocati in area residenziale di per sé munita di accessi controllati.
Per quanto riguarda il rischio derivante dalle operazioni di travaso, le misure imposte sono di due tipi:

- distanze di sicurezza fra autocisterna che rifornisce un serbatoio ed un serbatoio del medesimo deposito e fra autocisterna e fabbricati indipendentemente dalla capacità del serbatoio e dell'autocisterna;
- obbligo per il personale addetto al rifornimento di avere frequentato positivamente uno specifico corso di formazione sulla base di un programma approvato dal Dipartimento VVF.

In relazione alle misure di protezione attiva, indipendentemente dalla capacità del deposito, è fatto obbligo di installare due estintori, preferibilmente da kg 6 classe 13 A 89 BC; invece, nel caso di depositi fuori terra con capacità superiore a 5 m^3 sono necessari i naspi ad acqua DN 25 con 60 L/min e 2 bar con autonomia minima di 30 minuti in numero tale da proteggere l'intera area del deposito.
Per quanto concerne i controlli sul territorio, il D.P.R. 151/2011 prevede l'assoggettabilità ai procedimenti di prevenzione incendi, per i depositi o singoli serbatoi, a partire da una capacità di 0,3 m^3.
Per depositi di capacità da 0,3 m^3 a 5 m^3 è prescritta la sola SCIA, a partire da capacità dei serbatoi/depositi superiori a 5 m^3 la SCIA deve essere preceduta da una valutazione progetto.
Per depositi fino a 5 m^3 la documentazione tecnica da allegare alla SCIA è semplificata in quanto in luogo del progetto è sufficiente:

- una planimetria, a firma di un tecnico abilitato o di un tecnico della ditta installatrice del serbatoio o deposito, nella quale sono riportate tutte le distanze di sicurezza del serbatoio rispetto ai punti vulnerabili presenti nelle aree circostanti il serbatoio o il deposito;
- una dichiarazione di installazione a regola d'arte dei serbatoi rilasciata dalla ditta installatrice (da non confondere con la dichiarazione di conformità di cui al

d.m. 22 gennaio 2008 n. 37 che in questo caso non è prevista) da rendersi su un apposito modello predisposto dal Dipartimento VVF.

Per i depositi di capacità superiore a 5 m^3 e fino a 13 m^3, fatta salva l'acquisizione della valutazione positiva del progetto, la documentazione certificativa da allegare alla SCIA è invece quella prevista dal d.m. 07/08/2012.

Occorre al riguardo sottolineare che il corretto esercizio del serbatoio o del deposito, indipendentemente dalla capacità, è consentito a condizione che gli impianti utilizzatori a valle siano stati installati a regola d'arte.

Pertanto, se, in sede di controllo, dovesse emergere che un impianto utilizzatore alimentato da un serbatoio non sia stato installato a regola d'arte, dal punto di vista antincendio, comporterebbe l'assunzione di provvedimenti fra cui anche il divieto dell'esercizio del serbatoio o del deposito.

In questo ambito l'attività di controllo è esercitata, dai Comandi VF, per i depositi fino a 13 m^3, su un campione minimo del 5% delle SCIA acquisite da ciascun Comando o su un campione maggiore a seconda delle disposizioni emanate annualmente dal Ministero dell'Interno ed un controllo sul 100% delle SCIA acquisite da ciascun Comando per le SCIA dei depositi con capacità superiore a 13 m^3.

Il controllo viene effettuato entro 60 giorni dal deposito della SCIA presso il Comando, laddove l'esito del controllo non sia positivo il Comando potrà prescrivere di conformare, entro un tempo massimo di 45 giorni, il deposito alle misure di sicurezza non attuate prescritte dalla regola tecnica imponendo, ove necessario, delle misure di sicurezza temporanee da adottare nell'immediato per il periodo di tempo fino a 45 giorni.

Allo scadere dei 45 giorni la mancata conformazione del deposito alla regola tecnica di prevenzione incendi comporterà la decadenza immediata della SCIA e l'adozione, da parte del Comando, di uno o più provvedimenti di divieto di utilizzo del deposito con eventuale ordine di rimozione dei serbatoi.

6. Bibliografia

[1] d.m. 29 febbraio 1988 "Norme di sicurezza per la progettazione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 5 m^3";

[2] d.m. 14 maggio 2004 "Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 13 m^3";

[3] d.m. 23 settembre 2004 "Modifica del decreto del 29 febbraio 1988, recante norme di sicurezza per la progettazione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas, di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 5 m3 e adozione dello standard europeo EN 12818 per i serbatoi di gas di petrolio liquefatto di capacità inferiore a 13 m^3";

[4] lettera circolare ISPESL n.12 del 22 luglio 2005 “decreto del ministero dell’industria del 29 febbraio 1988 recante - Norme di sicurezza per la progettazione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 5 m^3”;

[5] d.m. 1 dicembre 2004 n. 329 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93”;

[6] d.m. 17 gennaio 2005 “Procedura operativa per la verifica decennale dei serbatoi interrati per GPL con la tecnica basata sul metodo delle emissioni acustiche”;

[7] d.m. 5 luglio 2005 “Integrazioni al decreto 14 maggio 2004, recante l'approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto, con capacità complessiva non superiore a 13 m^3”;

[8] d. interm. 11 aprile 2011 “Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all’All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l’abilitazione dei soggetti di cui all’articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo”;

[9] UNI EN 12817:2010 “Attrezzature e accessori per GPL - Ispezione e riqualifica dei serbatoi per gas di petrolio liquefatti (GPL) di capacità geometrica minore o uguale a 13 m^3”

[10] d.m. 4 marzo 2014 “Modifiche ed integrazioni all'allegato al decreto 14 maggio 2004, recante approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 13 m^3”;

[11] UNI EN 14570:2014 “Attrezzature e accessori per GPL – Equipaggiamento di serbatoi per GPL fuori terra e interrati”;

[12] d.lgs. 25/02/2000 n.93 “Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione”;

[13] d.lgs. 15/02/2016 n.26 “Attuazione della direttiva 2014/68/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 15 maggio 2014, concernente l’armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relativa alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione (rifusione)”.

L'integrazione dell'analisi dei rischi derivanti da attacchi informatici nel Sistema di Gestione della Sicurezza degli Stabilimenti RIR

M.N.Tini[1], M.A. Palazzi[1], A. Dubbini[2], P. Grilli[2], G. Cristiano[2], E. Manna[2]

[1] Inail- Uot di Terni
[2] Folignogas srl

Abstract

L'adozione del d.l. 14 giugno 2021, n. 82 ha ridefinito l'architettura nazionale cyber ed ha istituito l'Agenzia per la Cybersicurezza Nazionale a tutela degli interessi nazionali nel campo della cybersicurezza.
La cybersecurity coinvolge qualsiasi azienda abbia accesso ad Internet, sia le piccole aziende che utilizzano un semplice server centrale per immagazzinare i dati e per accedervi da remoto sia le imprese che usano le connessioni Internet per collegare interi reparti, stabilimenti o uffici.
Tra gli Stabilimenti a Rischio di Incidente Rilevante (RIR) , troviamo spesso aziende energetiche definite "obiettivi sensibili" per quanto riguarda gli attacchi informatici in particolare dei ransomware, una categoria di malware in grado di bloccare l'accesso ad un terminale e cifrare tutti i file in esso contenuti.
Gli Stabilimenti RIR sono tenuti a redigere e mantenere un Sistema Gestione Sicurezza, denominato SGS-PIR (Prevenzione Incidenti Rilevanti), finalizzato a prevenire l'accadimento o mitigare le conseguenze degli incidenti rilevanti e che pertanto deve garantire il corretto funzionamento dei sistemi impiantistici e gestionali, molti dei quali gestiti da remoto.
Con il presente lavoro si vuole sottolineare e dimostrare l'importanza di integrare nel SGS-PIR l'analisi e la gestione dei rischi derivanti da attacchi di cybercriminali. Tali attacchi, infatti, causando il blocco temporaneo dei terminali, impediscono la possibilità di accesso al sistema di controllo da remoto degli impianti, con evidente aumento del rischio di incidente. Inoltre, la possibilità di entrare e sottrarre i dati dell'azienda, relativamente a ubicazioni di impianti e sistemi di controllo, può favorire un'eventuale manomissione intenzionale degli stessi.

Keywords: cybersecurity, cybercrime, SGS-PIR, incidente rilevante, formazione, analisi dei rischi.

1. Introduzione

La cybersicurezza è e un tema di sicurezza nazionale e internazionale con ripercussioni evidenti nella politica, nella società e nell'economia. Nel dicembre del

2020 la Commissione UE e l'Alto Rappresentante dell'Unione per gli affari esteri e la politica di sicurezza hanno presentato una nuova strategia dell'UE per la cyber security. La strategia definisce in che modo l'UE intende proteggere i cittadini, le imprese e le istituzioni dalle minacce informatiche, promuovere la cooperazione internazionale e contribuire a garantire un'Internet globale e aperta. Nello specifico si occupa dell'analisi delle vulnerabilità, del rischio, dei vari tipi di minacce e attacchi e della protezione dell'integrità fisica (hardware) e logico funzionale (software) di un sistema informatico e dei dati in esso contenuti o scambiati. Un sistema resiliente in ambito di cyber security ha capacità di anticipare, resistere, recuperare e adattarsi a condizioni avverse, stress, attacchi o compromissioni di sistemi che utilizzano o sono abilitati da risorse informatiche, da ciò nasce l'esigenza di dotarsi di sistemi informatici sicuri da parte di tutte le aziende che hanno accesso ad internet in un contesto normativo europeo e italiano sempre più importante e puntuale.
Il D. Lgs. 105/2015, attuazione della Direttiva 2012/18/UE, relativa al controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose, identifica come stabilimenti a rischio di incidente rilevante (RIR) quelli nei quali, un evento quale un'emissione, un incendio o un'esplosione di grande entità, dovuto a sviluppi incontrollati, dia luogo ad un pericolo grave (immediato o differito), per la salute umana o per l'ambiente, all'interno o all'esterno dello stabilimento, ed in cui intervengano una o più sostanze pericolose.
Se si fa riferimento ad una delle definizioni classiche di Rischio (R), definito come R=PxM dove P rappresenta la probabilità che si verifichi un determinato evento incidentale (per esempio in termini di eventi/anno) ed M indica la magnitudo dell'evento cioè la sua gravità, il rischio, per tali stabilimenti, è definito da una bassa probabilità di evento incidentale ma da una elevata magnitudo. Si parla quindi di eventi poco probabili, ma dalle conseguenze disastrose, dovuti comunque a sviluppi incontrollati.
Proprio per l'elevata magnitudo del rischio in questi Stabilimenti riteniamo interessante ipotizzare l'integrazione nell'SGS dell'analisi dei rischi da attacco informatico.
Tra gli Stabilimenti RIR di soglia superiore, sottoposti a verifica ispettiva, abbiamo analizzato il documento, emesso nel Luglio 2023, da parte del Gestore di un deposito di stoccaggio e movimentazione di GPL (situato nella Regione Umbria), che definisce i criteri di valutazione, le metodologie, gli strumenti ed illustra i risultati conseguenti, in relazione alla valutazione del rischio di cybersecurity per tutti i lavoratori che, con le varie mansioni previste dall'organigramma aziendale, sono in forza presso il deposito.

2. Gli attacchi informatici

L'attacco informatico viene definito dal National Initiative For Cybersecurity Careers And Studies (NICCS) come "il tentativo di ottenere un accesso non autorizzato a servizi, risorse o informazioni di sistema e/o di comprometterne l'integrità e, in

generale, consiste nell'atto intenzionale di tentare di eludere uno o più servizi di sicurezza o i controlli di un sistema informativo digitale per alterare la riservatezza, l'integrità e la disponibilità dei dati".
In base ad attori e finalità, la minaccia si distingue in:

- cybercrime (truffa, furto identità ecc)
- cyber espionage (acquisizione indebita di dati)
- cyber terrorism (con connotazione ideologica)
- cyberwarfare (pianificazione e conduzione)

Il Cybercrime è un reato informatico realizzato attraverso l'utilizzo di nuove tecnologie con scopi economici o furti di identità.
Il cyber espionage rappresenta una delle più rilevanti minacce dirette verso le aziende ed il settore pubblico. La sottrazione di know how tecnologico, nonché di informazioni riservate, è un'attività in continua crescita che si avvale di tecnologie sempre più sofisticate.
Il cyberterrorismo è spesso definito come qualsiasi attacco premeditato e motivato politicamente contro sistemi di informazione, programmi e dati che minacci la violenza o sfoci in violenza.
Infine, si definisce la cyberwarfare come l'impiego di tecniche di intrusione o sabotaggio delle risorse informatiche e fisiche di un paese rivale, effettuate in un contesto bellico, attraverso l'impiego di computer e reti di telecomunicazioni informatiche, volte a compromettere le difese, il funzionamento e la stabilità economica.
In base alle modalità di attacco, è possibile distinguere degli attacchi in cui gli utenti sono parte attiva e quelli in cui l'attacco che avviene tramite un software malevolo (malware) è un attacco passivo.
Nel primo caso, si parla di attacco-phishing che consiste in una truffa realizzata sulla rete Internet attraverso l'inganno degli utenti e che si concretizza principalmente attraverso messaggi di posta elettronica ingannevoli, L'attacco phishing rientra nella categoria degli attacchi di Social Engineering, che ha come scopo quello di convincere l'utente a fidarsi del contenuto del messaggio ricevuto e quindi di eseguirne i comandi. Quando il sistema non ha bugs da sfruttare, il Social Engineering aggira antivirus e firewall puntando sulle debolezze e sulla curiosità delle persone.
Nel secondo caso l'attacco avviene attraverso software malevoli: il malware o "software malevolo" è un termine generico che descrive un programma/codice dannoso che mette a rischio un sistema. I malware cercano di invadere, danneggiare o disattivare computer, sistemi, reti, tablet e dispositivi mobili, spesso assumendo il controllo parziale delle operazioni del dispositivo. Tra I malware più dannosi ci sono i ransomware. Il ransomware è un tipo particolare di malware che può "infettare" un dispositivo digitale (PC, tablet, smartphone, smart TV), bloccando l'accesso a tutti o ad alcuni dei suoi contenuti, per poi chiedere un riscatto (in inglese, "ransom") da pagare. A volte viene inserito tramite phishing, altre attraverso falle di sicurezza nei

software aziendali. L'attacco ransomware è attuato da organizzazioni del cybercrime che distribuiscono i dati della vittima su più siti web.
I dati che seguono, tratti dal report Clusit 2022, (CLUSIT – Associazione Italiana per la Sicurezza Informatica) si riferiscono agli attacchi classificati come gravi e di cui l'Associazione ha avuto notizia. Negli ultimi 11 anni sono stati analizzati e classificati, in media, 106 attacchi gravi di dominio pubblico al mese. Negli ultimi 4 anni questa media si è alzata vertiginosamente, A livello mondiale si sono registrati 14010 attacchi gravi tra gennaio 2011 e dicembre 2021, di cui oltre la metà (7144) registrati dal 2018 in poi. È da evidenziare come, rispetto ai 7144 attacchi censiti in tutto il mondo tra il 2018 e il 2021, oltre 900 offensive hanno colpito l'Europa e ben 185 di questi attacchi sono stati registrati in Italia. Un dato che non può passare inosservato e che dimostra, al pari di quello che succede a livello globale, come anche in Italia gli attacchi cyber siano in aumento e di quanto il nostro Paese stia diventando un bersaglio sempre più frequente.
La vittima preferita dai cybercriminali restano i governi. I dati confermano come, nel 2021, la categoria "Gov" sia al primo posto assoluto raggruppando il 15% del totale delle offensive su scala mondiale. Classificando invece le tipologie di attacco, in termini assoluti nel 2021 la categoria "Cybercrime", nella quale rientrano tutte quelle azioni definibili come "crimini informatici", fa registrare il numero di attacchi più elevato degli ultimi 11 anni e rappresenta ormai l'86% del totale (era l'81% nel 2020).
Nonostante l'arretratezza dell'Italia dal punto di vista del digitale e del tech si registra la necessità del nostro Paese di crescere e di compiere uno switch, sia culturale che mentale. Nel 2022, per la prima volta, il settore dell'Information Security compare al primo posto nelle priorità di investimento di grandi imprese e PMI come risulta dalla ricerca dell'Osservatorio Cybersecurity & Data Protection del Politecnico di Milano.

2.1 Cybercrime e Cyber Resilience - Normativa italiana ed europea

La prima norma che, in Italia, ha disciplinato il reato informatico risale alla legge 547/93. Il provvedimento regolava le manifestazioni e le integrazioni delle norme del Codice Penale e del codice di procedura penale in tema di criminalità informatica.
Lo spessore internazionale del Cybercrime ha trovato pieno riconoscimento con la Convenzione di Budapest il 23 novembre 2001. Questa Convenzione raffigura il primo accordo internazionale riguardante i reati commessi tramite internet. Tale Convenzione è stata ratificata con la legge 18 marzo 2008 n. 48 da parte del Parlamento italiano. In Italia, come abbiamo visto, l'adozione del d.l. 14 giugno 2021, n. 82 ha ridefinito l'architettura nazionale cyber e istituito l'Agenzia per la Cybersicurezza Nazionale a tutela degli interessi nazionali nel campo della cybersicurezza.
La strategia adottata a livello Europeo mira a stabilire un quadro normativo comune in cui definire e uniformare le misure necessarie ad assicurare la Cyber Resilience dell'UE e dei suoi Stati Membri, rafforzare la sicurezza di reti e sistemi informativi, migliorare le capacità in ambito Cybersecurity, di gestione dei rischi e di segnalazione

degli incidenti, insieme a norme sulla cooperazione, la condivisione delle informazioni e la vigilanza.
Possiamo definire la "resilienza" come "la capacità di reagire di fronte ad un evento avverso", che si tratti di congiuntura economica, evoluzione del mercato, cambiamenti tecnologici, oppure di sopravvivere a un attacco terroristico di tipo tradizionale o cyber. La Cyber Resilience, viene definita dal NIST (National Insitute of Standard and Technology) come "La capacità di anticipare, resistere, recuperare e adattarsi a condizioni avverse, stress, attacchi o compromissioni di sistemi che utilizzano o sono abilitati da risorse informatiche" .
La Cyber Resilience riveste un ruolo sempre più centrale anche nel contesto normativo europeo e italiano in ambito Cybersecurity e le regolamentazioni emanate negli ultimi anni ne sono la testimonianza. L'UE si sta adoperando, infatti, su più fronti per promuovere la ciberresilienza, combattere la criminalità informatica e rafforzare la diplomazia informatica e la ciberdifesa, tramite norme e regolamenti che mirano a rafforzare la capacità delle organizzazioni di prevenire, resistere e rispondere alle minacce informatiche e di garantire la continuità dei servizi digitali in caso di eventi avversi, interruzioni di servizio e incidenti di sicurezza cyber.
L'Unione Europea si è dotata di "strutture di resilienza" ovvero, strutture fisiche (centri, agenzie), normative europee e best-practice su base volontaria, a volte globali a volte specifiche per settore, non ancora del tutto armonizzate tra loro, quali principalmente:

- ENISA (European Union Agency for Network and Information Security, ovvero l'Agenzia Europea per la Sicurezza che ha emesso nel 2022 best pratice di Cyber resilienza per strutture pubbliche e private;
- proposta dell'Unione Europea di creare l' EU Cyber Solidarity Act uno scudo europeo per la sicurezza informatica, costituito da centri operativi per la sicurezza (SOC), interconnessi in tutta l'UE, e un meccanismo di emergenza per la sicurezza informatica completo per migliorare la postura informatica dell'UE , che sarà attiva dal 2024 e servirà appunto ad individuare le minacce cyber e a gestirle nel migliore dei modi possibili e adotterà un proprio meccanismo di emergenza informatica e di revisione degli incidenti cyber;
- quadro di regole per una certificazione della cibersicurezza dei prodotti, dei servizi e dei processi relativi alle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT), in attuazione del regolamento (UE) n. 2019/881, emanato da ENISA;
- Blueprint (raccomandazioni della Commissione europea) , vale a dire principi e meccanismi, in termini di obiettivi e modalità di cooperazione per rispondere in modo coordinato a incidenti e crisi cyber su larga scala

Tra le principali normative europee emanate nel corso del 2022 e "impegnate" sul fronte della Cyber Resilience, occorre citare le seguenti:

• DORA - Digital Operational Resilience Act (Regolamento UE 2022/2554 e Direttiva UE 2022/2556 - dicembre 2022), Regolamento unico europeo al fine di creare un approccio unificato sulla resilienza digitale;

• Direttiva NIS2 (Direttiva UE 2022/2555 - dicembre 2022), regola e uniforma la legislazione dell'UE in materia di cyber security, definendo le misure giuridiche necessarie a rafforzare il livello generale di sicurezza nei Paesi dell'Unione Europea. Si applica alle organizzazioni pubbliche e private che gestiscono servizi essenziali per la società, come ad esempio: fornitori di servizi essenziali, società di produzione e distribuzione energia, ervizi sanitari, trasporti, infrastrutture di comunicazione elettronica, servizi bancari e finanziari.

• Cyber Resilience Act (CRA), proposta di Regolamento UE - settembre 2022, che mira rafforzare la sicurezza informatica dei singoli prodotti con dentro componenti digitali (esempio smartphone e giocattoli)

3. La cyber security

La cyber security (anche detta cyber sicurezza o sicurezza informatica) consiste nell'insieme di tecnologie, processi e misure di protezione progettate per ridurre il rischio di attacchi informatici. Nello specifico si occupa dell'analisi delle vulnerabilità, del rischio, delle minacce o attacchi e della protezione dell'integrità fisica (hardware) e logico funzionale (software) di un sistema informatico e dei dati in esso contenuti o scambiati

Tale protezione è ottenuta attraverso misure tese ad assicurare:

• l'accesso fisico e/o logico solo ad utenti autorizzati (autenticazione)

• la fruizione di tutti e soli i servizi previsti nelle modalità previste dal sistema (disponibilità)

• la correttezza dei dati (integrità)

• l'oscuramento dei dati (cifratura)

Le minacce e i rischi dovuti al cybercrime sono molteplici. Il vettore più utilizzato per veicolare attacchi e truffe risultano le mail di phishing. Una mail di phishing ben strutturata può indurre l'utente a scaricare qualsiasi file malevolo e creare una mole di danni molto alta, sia alla singola persona che all'intera struttura aziendale.

La violazione informatica può produrre danni quali:

• perdita di dati

• interruzione di servizi

• interruzioni delle comunicazioni

• perdita di denaro

• danni d'immagine

È pertanto evidente come anche nell'ambito della sicurezza informatica sia essenziale, ai fini di prevenire attacchi attivi e passivi, un sistema strutturato articolato su tre livelli:

• persone (formazione educazione consapevolezza)

• processi (governance, policy, reporting)

- tecnologie (firewalls, IDS/IPS, SIEM, anti-malware, strong passwords)

3.1 Sicurezza dei sistemi: caratteristiche

Si definisce sicuro un sistema informatico in cui le informazioni contenute vengono garantite, attraverso sistemi e misure di sicurezza appositamente predisposti, contro il pericolo di violazione dei parametri RID: Riservatezza, Integrità, Disponibilità.
Riservatezza (Confidentiality): dati e informazioni memorizzate in un sistema o scambiate tra due entità devono essere protette da letture non autorizzate, ovvero devono risultare accessibili solo agli utenti e ai processi che ne hanno diritto, in base alle policy definite nel sistema.
Integrità (Integrity): dati e informazioni memorizzate in un sistema o scambiate tra due entità devono essere protette da modifiche non autorizzate (cancellazione o aggiunta).
Disponibilità (Availability): le risorse, i servizi e i dati di un sistema devono essere sempre accessibili agli utenti legittimi. In altre parole, i sistemi devono risultare funzionanti con il livello di prestazioni prestabilito e nessuno dovrebbe essere in grado di minacciare il loro funzionamento regolare. Le minacce intenzionali più comuni a questa proprietà sono gli attacchi DoS (Denial of Service)
La sicurezza informatica fa riferimento alla definizione dei processi organizzativi idonei a garantire la sicurezza di un sistema informatico. Il processo è l'insieme di attività fra di loro interrelate o interagenti che trasformano elementi in ingresso (input) in elementi in uscita (output) (ISO/IEC 27000)

4. Il risk assessement

Il rischio è un concetto probabilistico, ovvero è la Probabilità che accada un certo evento capace di causare un danno. Un rischio è una potenziale perdita o danno ed è ascrivibile ad ambiti diversi: responsabilità legali, calamità naturali, incidenti, errori di gestione o minacce informatiche.
Il Cyber-security Risk Assessment (Valutazione del rischio informatico) è un'analisi del sistema informativo di un'azienda finalizzata ad individuare potenziali minacce e vulnerabilità che potrebbero mettere a rischio la sicurezza dei dati aziendali seguita dall'adozione di protocolli efficaci di cyber-security. Potremo identificare i principali passaggi della valutazione del rischio informatico nei seguenti:

1. Identificazione degli asset di sicurezza informatica: ad esempio server, applicazioni, dati e reti.
2. Identificazione delle minacce: identificare le minacce che potrebbero causare danni agli asset dell'organizzazione, ad esempio attacchi informatici, malware, violazioni della privacy e disastri naturali.
3. Valutazione delle vulnerabilità: valutare le vulnerabilità degli asset dell'organizzazione rispetto alle minacce identificate. Ad esempio, verificare se le applicazioni e i sistemi operativi sono aggiornati e se sono configurati correttamente.

4. Valutazione del rischio: determinare la probabilità che una minaccia possa sfruttare una vulnerabilità e causare un danno e l'impatto potenziale del danno. Questa valutazione aiuterà a classificare il rischio in base alla sua gravità.
5. Identificazione delle contromisure: valutare le contromisure disponibili per ridurre o eliminare il rischio. Queste contromisure potrebbero includere l'installazione di software di sicurezza, la definizione di politiche di sicurezza e la formazione del personale.
6. Prioritizzazione dei rischi: determinare quali rischi devono essere affrontati in modo prioritario in base alla loro gravità e all'importanza degli asset.
7. Implementazione delle contromisure: implementare le contromisure prioritarie identificate e monitorare la loro efficacia.
8. Valutazione costante del rischio: effettuare regolarmente valutazioni del rischio per garantire che l'organizzazione sia protetta contro le minacce emergenti e che le contromisure siano efficaci nel tempo.
5. La valutazione dei rischi di cyber-security per gli stabilimenti a rischio d'incidente rilevante.

5.1 Un esempio virtuoso

L'impianto per la lavorazione e il deposito del gas di petrolio liquefatto per uso combustione in oggetto rientra, per i quantitativi di Gas di Petrolio Liquefatto presenti in stoccaggio, negli Stabilimenti R.I.R. di Soglia Superiore, ai sensi dell'art. 3 del d.lgs. 105/2015 – Seveso III

Nel luglio 2023 è stato redatto un documento che definisce i criteri di valutazione ed illustra i risultati conseguenti in relazione alla valutazione del rischio per tutti i lavoratori che, con le varie mansioni previste dall'organigramma aziendale, sono in forza presso il deposito di stoccaggio e movimentazione di GPL.

I principali obiettivi del documento sono stati definiti in:

- assicurare che la valutazione del rischio di cybersecurity sia svolta in totale conformità con la legislazione vigente in materia di salute e sicurezza sul lavoro (art. 28, commi 1 e 2 del d. lgs. del 81/08 e s.m.i.) ;
- indicare criteri, metodologie e strumenti da utilizzare nella valutazione del rischio di cybersecurity per il personale dipendente e per siti o impianti che potrebbero essere esposti al rischio di cybersecurity;
- illustrare i risultati di tale valutazione;
- definire eventuali dispositivi di prevenzione e protezione da impiegare al fine di minimizzare il rischio per i lavoratori, per i siti o gli impianti che potrebbero essere esposti al rischio di cybersecurity;
- applicare le disposizioni impartite dalla Direzione in materia di riduzione del rischio

5.2 Individuazione delle fasi, delle attività e delle responsabilità

FASI	1. Individuazione dei criteri di valutazione	2. Valutazione dei rischi per lavoratori con probabilità di esposizione ad Incidenti Rilevanti a seguito di attacchi di Cybersecurity.	3. Definizione delle misure di prevenzione e protezione
ATTIVITA'	Individuazione dei criteri di valutazione	Valutazione dei rischi di cybersecurity per gli stabilimenti soggetti a normativa Seveso	Raccomandazioni e piani di miglioramento/ mantenimento
RESPONSABILITA'	Gestore RSPP	Gestore RSPP	Gestore RSPP
SUPPORTO	Security system administrator	Security system administrator	Capo deposito IT manager RLS Preposti

Figura 1. Flusso di individuazione delle fasi, delle attività e delle responsabilità

5.3 Individuazione dei criteri di valutazione

Il Gestore, RSPP e l'IT Manager, sulla base di quanto prescritto dalla legislazione vigente e di quanto previsto dalla "Valutazione dei rischi, degli aspetti ambientali e di Security", e, previa consultazione attiva con l'RLS. e i Preposti alla sicurezza hanno identificato i criteri di valutazione dei rischi per i lavoratori con probabilità di esposizione al rischio d'Incidente Rilevante a seguito di attacco di Cybersecurity.
Per analizzare nel dettaglio dati eventi indesiderati sono stati presi a riferimento i seguenti dati statistici e storici:

- i dati statistici messi a disposizione dal CLUSIT – Associazione Italiana per la Sicurezza Informatica sul fenomeno degli attacchi informatici in Italia;
- i dati statistici "aziendali" interni relativi ad attacchi subiti di cybersecurity avvenuti nel perimetro delle attività svolte dal Gruppo proprietario del deposito che hanno interessato siti o impianti Seveso in Europa;
- i dati statistici "aziendali" interni relativi a eventi di cybersecurity perpetrati da terzi avvenuti nel perimetro dei depositi Seveso appartenenti allo stesso gruppo e quelli controllati che abbiano coinvolto personale dipendente, siti o impianti.
- analisi delle modalità di accadimento degli eventi classificabili di Cybersecurity.

5.4 Valutazione dei rischi per lavoratori con probabilità di esposizione al rischio d'Incidente Rilevante a seguito di attacco di Cybersecurity

Tutte le mansioni svolte dal personale dipendente con probabilità di esposizione al rischio d'Incidente Rilevante a seguito di attacco di Cybersecurity sono riportate nell D.V.R aziendale.
Nel contesto e nel luogo ove ha sede il Deposito e dove si svolgono le attività lavorative occorre anche valutare la possibilità, seppur remota, che durante un attacco di Cybersecurity potrebbe essere presente personale dipendente ed

occasionalmente soggetti terzi e dipendenti da ditte sotto contratto, come ad esempio:

- le ditte che trasportano di GPL per conto della società depositanti;
- le ditte che svolgono lavori di pulizia;
- le ditte di manutenzione degli impianti elettronici e meccanici;
- le ditte di manutenzione dell'impiantistica tecnologica in generale;
- visitatori.

5.5 Valutazione dei dati statistici per rischio d'Incidente Rilevante a seguito di attacco di Cybersecurity

Per quanto attiene la valutazione dei dati statistici si prende atto che al momento della redazione del documento non sono disponibili studi e dati statistici di riferimento per ciò che attiene l'attività specifica di deposito di stoccaggio e movimentazione di G.P.L. sfuso ed in bombole e, di conseguenza, si farà riferimento per parallelismo al "settore Energy & Utilities" e lo specifico rapporto Clusit 2023 di seguito riportato.

Rapporto Clusit 2023 - Approfondimento: Energy & Utilities 2023 Q1 ' Il numero di attacchi che hanno colpito il settore Energy & Utilities andati a buon fine è raddoppiato negli ultimi quattro anni. A livello mondiale, quasi metà delle vittime (45%) sono in Europa, sia sul campione 2022 che sul 2023. Il malware è stato e resta la principale causa di attacco, passando dal 47% al 78%, con un 66% di crescita in valore assoluto. Estremamente rilevante risulta il fatto che il 13% di incidenti occorsi nel 2022 hanno avuto come "punto di ingresso" la presenza di vulnerabilità. Gli incidenti con impatto Critical passano da oltre metà a quasi due terzi. Si noti la totale assenza di incidenti con impatti bassi. Da notare che la rilevanza di attacchi a matrice Information Warfare del 2022 nel 2023 va azzerandosi; al contrario, nel 2023 raddoppiano gli attacchi a matrice Hacktivism.

Queste variazioni non devono stupire, in quanto nell'analisi di un incidente, la fase di attribuzione ed origine è sempre tra le più complesse; rispetto a fenomeni come l'Information Warfare ovviamente il rischio di operazioni "sotto copertura", per spostare su altri la responsabilità, è sempre un rischio concreto.

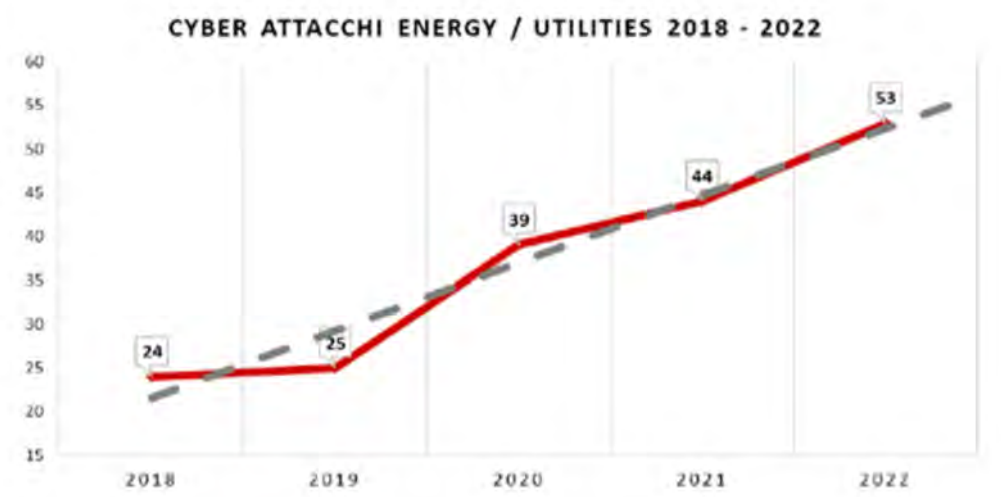


Figura 2. Andamento degli incidenti in ambito Energy & Utility 2018-2022

5.6 Stima del danno dei lavoratori esposti al rischio di attacchi Cybersecurity con probabilità di esposizione al rischio d'Incidente Rilevante

In linea generale, le conseguenze dannose eventualmente derivanti dall'evento di Cybersecurity possono essere sinteticamente suddivise in due tipologie:

- blocco temporaneo dei terminali che gestiscono da remoto gli impianti di processo, con il rischio di aumentare la probabilità d'incidente;
- accesso incontrollato ai dati aziendali relativamente all'ubicazione di impianti e sistemi di controllo.

5.7 Le misure di prevenzione e protezione adottabili

Per prevenire incidenti di "security", il Gestore ha emanato una Politica e ha redatto dei General Standard, recepiti dal Sistema Gestione della Sicurezza SGS-PIR. In questa prima analisi è stato valutato il solo rischio da "cybersecurity", con un focus specifico sui Sistemi OT, rimandando ad altri documenti specifici la valutazione di altri ambiti della "security", quali ad esempio i rischi per il servizio di custodia e sorveglianza, rischi d'attentato, di rapina, d'intimidazione, d'aggressione o di sequestro di persona.
Per valutare il rischio di Cybersecurity si è provveduto a realizzare un'analisi approfondita di tutte le apparecchiature del deposito che, gestite attraverso software, possono essere raggiunte attraverso collegamenti da "remoto".
Il risultato di tale analisi è riportato nella tabella 1 denominata 'Elenco delle possibilità di utilizzo del sistema e delle connessioni da remoto" relativa al sito del deposito.

ELENCO DEI SISTEMI E POSSIBILITA' DI CONNESSIONE REMOTA						
Impianto/Attrezzatura	**Descrizione**	**Collegamento Interno**	**Connessione all'esterno del sito**	**Dettagli di accesso da remoto**	**Accesso da remoto - EXTRA**	**Controlli per accesso da remoto**
IMPIANTO INDICATORI DI LIVELLO SERBATOI	Strumentazione che misura in continuo il livello,la pressione e la temperatura del GPL contenuto nei serbatoi di stoccaggio	E' collegata a un PC locale posizionato all'interno dell'Ufficio del sito	NA		Possibile per manutenzione software di gestione	Attivazione manuale quando necessario
IMPIANTO DI ALTO E ALTISSIMO LIVELLO SERBATOI	Strumentazione che avvisa e interrompe l'operazione di travaso in caso di sovrariempimento oltre i limiti consentiti dei serbatoi	NA	NA	NA	NO	NO
IMPIANTI DI RIVELAZIONE GAS & FUMO	Sistemi di Emergenza per la rivelazione di perdite di GPL o di principio di incendio o fumo	I rivelatori in campo sono collegati alle relative centraline locali di gestione allarmi	NON CONNESSO		NO	NO
IMPIANTO ANTINCENDIO	Sistema idrico di attrezzature per l'intervento in caso di emergenza mediante utilizzo di Monitori,lance ecc	Il sistema è collegato alle relative centraline locali di gestione allarmi	NON CONNESSO		NO	NO
IMPIANTO PRODUZIONE ARIA	Strumentazione per la produzione e distribuzione di aria compressa sugli impianti di stoccaggio e produzione	NA	NON CONNESSO		NO	NO
IMPIANTO TVCC PUNTI PERICOLOSI	Sistema TVCC di monitoraggio dei punti pericolosi dello Stabilimento	E' collegato ad una centralina all'interno dell'Ufficio del Capo Stabilimento	Telecamere visibili attraverso Smartphone dal Capo Deposito. Collegamento h24 con Sala Operativa Vigilanza esterna, Ripetizione video presso appartamento del Custode.	Collegamento mediante indirizzo IP statico	Possibile per manutenzione software di gestione	Per esecuzione video ronde di controllo da parte di società di vigilanza
IMPIANTO TVCC VIDEO SORVEGLIANZA	Sistema TVCC di monitoraggio degli ingressi dello Stabilimento	E' collegato ad una centralina all'interno dell'Ufficio del Capo Stabilimento	Telecamere visibili attraverso Smartphone dal Capo Deposito. Collegamento h24 con Sala Operativa Vigilanza esterna, Ripetizione video presso appartamento del Custode.	Collegamento mediante indirizzo IP statico	Possibile per manutenzione software di gestione	Per esecuzione video ronde di controllo da parte di società di vigilanza
IMPIANTO ANTINTRUSIONE PERIMETRALE	Sistema di monitoraggio del perimetro dello Stabilimento	E' collegato ad una centralina all'interno dell'Ufficio del Capo Stabilimento	Allarmi remotati su smartphone Capo Deposito, Custode e Sala Operativa Vigilanza	Collegamento mediante indirizzo IP statico	Possibile per manutenzione software di gestione	Attivazione manuale quando necessario
IMPIANTO DI ALLERTA SISMICA	Sistema di monitoraggio degli evienti sismici con impostazione di una soglia d'intervento per la mess ain sicurezza degli impianti GPL (Shut - Down degli impiajnti GPL, distacco F.M. nelle aree operative e allerta sonora con sirena PEI.	E' collegato ad una centralina all'interno dell'Ufficio del Capo Stabilimento	Connessione all'esterno mediante collegamento al sito web della Società mediante applicativo "SARASL06" protetto da user ID e password	Collegamento mediante indirizzo IP statico	Possibile per manutenzione software di gestione	Attività gestita con personale del deposito quando necessario
POSTAZIONI PC	Postazioni lavorative Uffici	BACKUP NAS/CLOUD	SI	FIREWALL ROUTER + antispam email + antivirus + UGI- AS400		

Tabella 1. Elenco delle possibilità di utilizzo del sistema e delle connessioni da remoto

5.8 Interventi di prevenzione attuati

Gli interventi di prevenzione attuati nel deposito sono costituiti da misure quali:
NON connessione al web dei sistemi di controllo a servizio dei seguenti impianti o apparecchiature:

- indicatori elettronici di livello, pressione e temperatura dei serbatoi di stoccaggio di G.P.L;
- indicatore meccanico di alto ed altissimo livello, con blocco automatico del riempimento dei serbatoi di stoccaggio al raggiungimento del livello massimo dell'85% del volume;
- centralina ed impianto di rilevazione fughe gas o di principio di incendio che attiva automaticamente i sistemi idrici antincendio nei vari reparti del deposito;
- impianto antincendio che aziona i sistemi idrici a protezione dei reparti del deposito;
- impianti di produzione dell'aria complessa per l'apertura/chiusura delle valvole pneumatiche degli impianti G.P.L e di quelli idrici antincendio;

Connessione al web attraverso indirizzi IP statici verso dispositivi autorizzati e identificati dei seguenti impianti o apparecchiature:

- impianto di video sorveglianza a circuito chiuso per il monitoraggio in continuo degli elementi pericolosi del deposito (d.m. 13.10.1994) e dei varchi di ingresso al sito, comprese le aree esterne di sosta temporanea;
- impianto di antintrusione perimetrale collegato a centralina ubicata nell'uffici del capo Deposito che invia allarme verso centrale di un Istituto di Vigilanza, smartphone del Capo Deposito e del Custode.

• sistema di allerta sismica, che in caso di terremoto di magnitudo stabilita effettua lo shunt – down automatico delle valvole pneumatiche GPL, realizzando la "messa in sicurezza" di tutto il deposito.

• postazioni PC, connesse permanentemente al web attraverso crittografia dei dati realizzata mediante una VPN, mediante un dispositivo Router – Firewall, con ulteriore incremento della sicurezza grazie all'uso di software antivirus.

L'impossibilità di attivare da remoto i sistemi di comando della pompa o compressore G.P.L. che può essere azionato solo localmente, mediante pulsantiere gestite dagli operatori addetti al travaso.
Anche i quadri di controllo e le centraline automatiche che gestiscono gli impianti di produzione dell'aria compressa e l'impianto idrico antincendio NON hanno alcuna connessione con la rete web.

5.9 Esito della valutazione

Il Gestore, sulla base dell'analisi effettuata, valuta che il rischio di attacchi Cybersecurity con probabilità di esposizione al rischio d'Incidente Rilevante possa essere di livello "Basso" in quanto lo stesso comporta danni attesi di gravità di classe 4 con un livello di probabilità Improbabile A

MATRICE DI RISCHIO										
Gravità	CONSEGUENZE				PROBABILITA'					
	Persone	Ambiente	Assets	Reputazione	A	B	C	D	E	
					Mai sentito parlare nel settore o industrie associate	Sentito parlare nel settore o industrie associate	È successo nel Gruppo o più di una volta / anno nel settore	È successo nel Sito o più di una volta all'anno nel gruppo	È successo più di una volta all'anno nel Sito	
0	Nessun infortunio o effetto sulla salute	Nessun Effetto	Nessun danno materiale	Nessun impatto	Monitoraggio & Miglioramento Continuo (Priorità inferiore per un'ulteriore riduzione del rischio)					
1	Leggere lesioni o effetti sulla salute	Effetti leggeri	Danni leggeri	Impatto leggero			Monitoraggio & Miglioramento Continuo (Maggiore priorità per un'ulteriore riduzione del rischio)			
2	Lesioni o effetti minori sulla salute	Effetti minori	Danni Minori	Impatto Minore				Controllo ALARP		
3	Lesioni o effetti moderati sulla salute	Effetti Moderati	Danni Moderati	Impatto Moderato						
4	Gravi lesioni o effetti sulla salute o Mortalità	Effetti Maggiori	Danni Maggiori	Impatto Maggiore						
5	Più di 1 Mortalità	Effetto Catastrofico	Danno Catastrofico	Impatto Catastrofico				Intollerabile o tollerabilità da approvare da Senior Management		

Tabella 2. Matrice del rischio

5.10 Definizione di misure di prevenzione e mitigazione

Il Gestore, l'RSPP e l'IT Manager, previa consultazione attiva con l'R.L.S. e Preposti alla sicurezza, in base a quanto espresso nella valutazione del "rischio di attacchi di Cybersecurity con probabilità di esposizione al rischio d'Incidente Rilevante" hanno identificato le seguenti misure di prevenzione e mitigazione in relazione alla natura ed all'entità dei pericoli identificati e valutati, secondo le prassi aziendali già consolidate, al fine del mantenimento / miglioramento dell'attuale livello di rischio

A carico del Gestore:

- aggiornamento periodico della valutazione del rischio in caso di nuove disposizioni o di modifiche tecniche sostanziali da parte del Gruppo in materia di Cybersecurity;
- predisposizione di idonea informazione / formazione per i lavoratori neoassunti e di aggiornamento per i lavoratori che hanno già seguito formazione in materia di prevenzione di attacchi informatici;
- attraverso il Servizio Informatica & Telecomunicazioni, continuare nell'opera di prevenzione dei rischi di Cybersecurity, inviando periodicamente specifici messaggi "phishing – malware" per testare il comportamento del personale;
- in caso di cessazione del rapporto di lavoro, rimozione immediata da parte del Servizio Informatica & Telecomunicazioni delle credenziali di accesso.

A carico del Preposto:

- divieto di collegamento delle apparecchiature elettroniche degli impianti del deposito alla rete – web se non per il tempo strettamente necessario agli aggiornamenti del software da parte dei fornitori incaricati alla loro manutenzione;
- obbligo di segnalazione al Gestore eventuali anomalie di funzionamento dei dispositivi di sicurezza che hanno collegamento permanete alla rete – web, pur con indirizzi statici IP;
- obbligo di vietare l'accesso di personale tecnico non autorizzato alla Sala IT per evitare danneggiamenti delle apparecchiature o accessi non autorizzati alla rete dati locale

A carico del Dipendente:

- impegno nel fare attenzione ai messaggi phishing - malware che vengono ricevuti al proprio indirizzo di posta elettronica aziendale e di segnalare la "criticità" al Servizio IT, attraverso l'apposita icona contenuta nell'applicazione Outlook di Windows;
- divieto di divulgazione a terzi, anche interni, delle proprie credenziali (user name e password individuali) e/o di utilizzare quelle di altro collega;
- impegno a non conservare le password personali su supporti cartacei facilmente rintracciabili;
- sostituzione frequente della password di acceso al PC o alle applicazioni aziendali, sulla base dei criteri di composizione stabiliti dagli applicativi, evitando di duplicarle;

• obbligo di non divulgazione di informazioni “sensibili” relativamente ai dispositivi ed ai software utilizzati per le attività aziendali;

• divieto di collegamento di dispositivi personali, quali ad esempio chiavi USB, Hard Disk, alle apparecchiature aziendali, come PC, Tablet o telefoni cellulari;

• impegno di accurata distruzione dei documenti cartacei, rendendoli illeggibili, che riportano informazioni su apparecchiature elettroniche, dispositivi informatici o software aziendali.

Da quanto esposto si può dedurre che anche per gli stabilimenti RIR che non hanno gli impianti collegati in rete, quindi riconducibili ad un rischio “basso”, esiste la necessità di implementare la valutazione dei rischi prendendo in considerazione anche quelli di cyber-security.

6.Conclusioni

La valutazione dei rischi da cybersecurity nello stabilimento RIR con cui ci siamo confrontati rappresenta un valido esempio per l’accuratezza dell’analisi e delle misure di prevenzione e mitigazione e costituisce un primo approccio alla complessità e novità della tematica. Tuttavia, il DVR cybersecurity resta un documento a sé stante rispetto all’SGS. A nostro avviso la gestione degli attacchi informatici dovrebbe rientrare in modo organico nell’articolazione del sistema di gestione, ovvero il Rapporto di Sicurezza e i documenti dell’SGS-PIR e andrebbero integrati. In particolare, per rimanere nell’esempio analizzato di un’azienda virtuosa nell’organizzazione dello stabilimento andrebbe inerita la figura dell’IT manager e inseriti i ruoli del personale, programmi e risorse ai fini della sicurezza informatica e relative procedure per l’idonea informazione/formazione per i lavoratori neoassunti e di aggiornamento per i lavoratori che hanno già seguito formazione in materia di prevenzione di attacchi informatici, effettuando la calendarizzazione e i relativi test di riscontro, come già previsto per le procedure in essere; nella parte riguardante il controllo operativo, nella sezione inerente le apparecchiature, andrebbe inserita una sotto-sezione in cui vengano incluse de dotazioni tecnologiche comprensive di terminali, hardware e software, e relative procedure di individuazione, gestione e monitoraggio degli interventi di manutenzione e sicurezza informatica; nella sezione inerente all’identificazione dei pericoli, valutazione e controllo dei rischi, andrebbero inseriti anche i Rischi da Cyber-security. Di conseguenza tutte le sottosezioni relative ai criteri per la classificazione degli indici di rischio e descrizione della metodologia di analisi dei compiti andrebbero integrate con quanto descritto ai paragrafi precedenti di questo lavoro, individuando tra gli scenari anche quelli relativi agli attacchi informatici analizzati nel DVR da cyber-security. Di conseguenza nella sezione riguardante il controllo operativo, la manutenzione e la gestione di materiali e servizi, andrà prevista e stabilita la frequenza di ispezioni e controlli anche delle IT e relativi aggiornamenti. Inoltre, andrà regolamentato anche il processo di gestione degli approvvigionamenti anche per quanto riguarda i sistemi informatici di sicurezza, dalla

selezione e qualifica iniziali dei fornitori, sino alle modalità di controllo in campo dei prodotti forniti.
Questo lavoro vuole essere un primo approccio all'integrazione dell'analisi dei rischi derivanti da attacchi informatici nel Sistema di Gestione della Sicurezza degli Stabilimenti RIR con l'auspicio di sensibilizzare sempre più Gestori alla valutazione anche di questi rischi nell'ottica del miglioramento continuo che si prefigge l'SGS – PIR.

Bibliografia

[1] d.l. 14 giugno 2021, n.82 "Disposizioni urgenti in materia di cybersicurezza, definizione dell'architettura nazionale di cybersicurezza e istituzione dell'Agenzia per la cybersicurezza nazionale"

[2] d. lgs. 105/2015 "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose"

[3]https://www.cybersecurity360.it/legal/strategia-ue-per-la-cyber-security-e-armonizzazione-normativa-obiettivi-e-possibili-conflitti/#:~:text=La%20strategia%20definisce%20in%20che,un'Internet%20globale%20e%20aperta.

[4]https://www.cybersecurity360.it/nuove-minacce/guerra-cibernetica-cyberwarfare-cose-presente-e-futuro-casi-famosi/#:~:text=%E2%80%9CCybercrime%E2%80%9D%2C%20il%20Trattato%20di,computer%20e%20reti%20di%20telecomunicazioni

[5] https://www.privacylab.it/IT/1148/social-engineering-cos-e-e-come-riconoscerlo/

[6] https://it.malwarebytes.com/malware/

[7] https://www.garanteprivacy.it/temi/cybersecurity/ransomware

[8]https://clusit.it/wp-content/uploads/area_stampa/2022/Rapporto_Clusit_edizione_ottobre_2022.pdf

[9] https://www.agendadigitale.eu/sicurezza/cyber-attacchi-minaccia-sempre-piu-reale-anche-in-italia-analisi-e-dati-dellevoluzione/

[10] https://www.cybersecurity360.it/soluzioni-aziendali/resilienza-contro-gli-attacchi-informatici-linee-guida-per-le-aziende/

[11]https://it.nttdata.com/insights/blog/cyber-resilience-strategie-protezione-attacchi-informatici

[12] https://www.agendadigitale.eu/sicurezza/cyber-attacchi-su-scala-europea-cosi-la-ue-coordinera-la-difesa/

[13] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex%3A32017H1584

[14] https://it.nttdata.com/insights/blog/cyber-resilience-strategie-protezione-attacchi-informatici

[15] https://www.foniagroup.it/sicurezza-informatica/

[16] https://www.dogma.it/it/news/cyber-security-risk-assessment--cos-e-e-come-funziona

[17] https://www.redhat.com/it/topics/management/what-is-risk-management

[18] d. lgs. 105/2015 “Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose”

[19] d.lgs. n. 81/2008 e smi “Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro”

[20] d.m. 13.10.1994 “Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di G.P.L. in serbatoi fissi di capacità complessiva superiore a 5 mc e/o in recipienti mobili di capacità complessiva superiore a 5.000 kg”

[21]https://clusit.it/wp-content/uploads/download/Rapporto_Clusit_2023-Approfondimento-energy-e-utilities-Q1.pdf

Criticità operative nella gestione degli impianti di aria compressa del Centro Italiano Ricerche Aerospaziali

F. Petrosino[1], G. Marino[1], I. Campitelli[2], O. Di Donato[2]

[1] CIRA, Centro Italiano Ricerche Aerospaziali
[2] Inail - Uot di Avellino

Abstract

Le apparecchiature a pressione costituiscono la spina dorsale di molti sistemi industriali, spesso, anche di elevata complessità sistemica. La sicurezza e l'affidabilità di questi insiemi di dispositivi diventa un importante lavoro di ricerca, sia dal punto di vista della resa industriale, al fine di equilibrare e gestire diversi processi coinvolti, sia dal punto di vista delle interferenze uomo-macchina. Diventa fondamentale, quindi, comprendere come ricalibrare il processo lavorativo in funzione dell'invecchiamento delle macchine e soprattutto in funzione di una corretta e specifica manutenzione delle stesse, al fine di non compromettere la salute e la sicurezza degli addetti all'uso.

Keywords: invecchiamento, manutenzione, monitoraggio.

1. Introduzione

Il CIRA, Centro Italiano Ricerche Aerospaziali (Figura 1), società a prevalente partecipazione pubblica costituita nel 1984, svolge attività di ricerca nei settori aeronautico e spaziale, e conduce avanzate ricerche aerospaziali, che vanno dallo studio di velivoli aeronautici e spaziali in grado di volare autonomamente e a velocità molto elevate, fino alla progettazione di soluzioni innovative per ridurre l'impatto ambientale degli aeromobili. Il Centro, si occupa inoltre, di migliorare la sicurezza dei voli e ottimizzare la gestione del traffico aereo. Il CIRA è attivamente coinvolto nei principali programmi di ricerca europei e internazionali, collaborando con università di rilievo e aziende leader nei settori aeronautico e spaziale, sia italiane che straniere.



Figura 1. Vista aerea del CIRA

Il CIRA dispone della più vasta infrastruttura di ricerca nel campo aerospaziale presente in Italia, con impianti di prova unici su scala mondiale e laboratori all'avanguardia utilizzati da enti e industrie provenienti da tutto il mondo. In particolare, sono presenti tre grandi impianti di prova denominati IWT, PWT, e PT1.

- L'Icing Wind Tunnel (IWT) è una delle più grandi gallerie del vento esistenti per prove in ghiaccio, che viene utilizzata prevalentemente per attività di sperimentazione in ghiaccio condotte per clienti, con lo scopo di dimostrare la conformità di sistemi di protezione dal ghiaccio alle normative di certificazione di riferimento. Grazie ad essa è possibile simulare l'effetto della quota sull'accrescimento del ghiaccio, fino a 7000 metri di altitudine con la minima temperatura statica dell'aria variabile tra -32 °C e -40°C.
- Il PT1, unica galleria del vento transonica/supersonica operativa in Italia, offre capacità di sperimentazione aerodinamica ed aeroacustica per regimi di moto, con bassi valori di turbolenza, subsonico, transonico e supersonico, raggiungendo velocità di prova fino a Mach 1.4.
- Il Plasma Wind Tunnel (PWT) dispone di due impianti ipersonici arc-jet, SCIROCCO e GHIBLI, per la simulazione delle condizioni estreme di flusso termico e pressione a cui sono esposti i veicoli spaziali che rientrano nell'atmosfera terrestre. Questi impianti sono in grado di generare un getto di plasma di dimensioni fino a 2 metri di diametro, a Mach 12, per una durata di prova fino a 30 minuti, utilizzando una miscela di Aria e Argon con una portata massima di 3,5 kg/s e temperature comprese tra 2.000 e 10.000 gradi Kelvin.

L’ efficacia delle attività di prove e verifiche svolte nelle gallerie è supportata da alcuni impianti industriali ausiliari, tra i quali un impianto di produzione di aria di processo ad alta pressione, denominato Centrale Aria Compressa (CAC). Questo impianto è in grado di erogare portate di aria compressa fino a 2 Kg/s, a pressioni

fino a 115 bar. Il corretto dimensionamento e l'adeguata conduzione operativa dell'impianto, per alimentare ogni sotto-impianto di prova secondo le diverse condizioni richieste in termini di pressioni e portate, rappresentano un elemento fondamentale per il conseguimento degli obiettivi prefissati nelle attività svolte nelle gallerie.
Per la Centrale, che ha una vita trentennale, sono stati definiti piani di manutenzione e controllo di sicurezza appositi al fine di rispondere ad uno specifico requisito atipico di funzionamento definibile ad *intermittenza.* Questo perché la Centrale fornisce aria alla singola galleria o a tutte e tre contemporaneamente, solo a richiesta degli utenti; ossia non in modo continuativo come solitamente accade per altri impianti industriali simili.

2. Centrale Aria Compressa

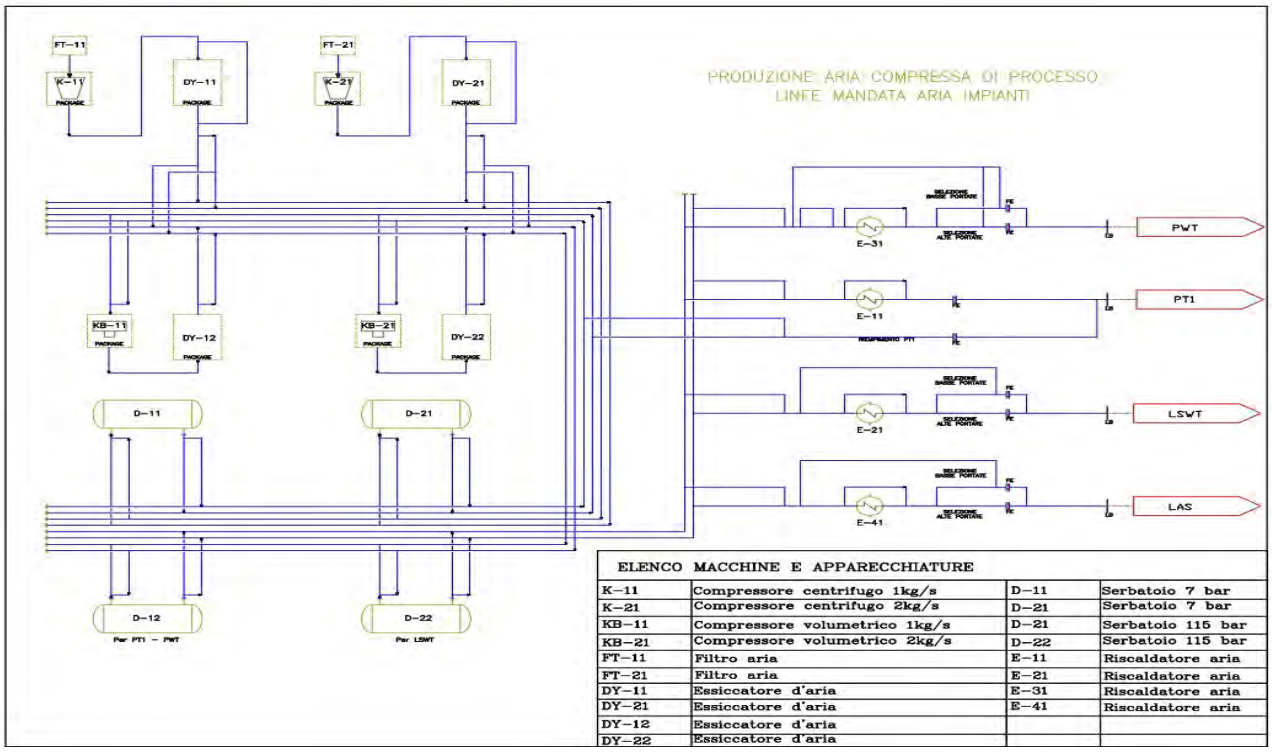
La CAC del CIRA (Figura 2) è dimensionata per produrre aria di processo ad alta pressione per l'alimentazione delle gallerie del vento PWT, GHIBLI, e PT1.



Figura 2. Centrale Aria Compressa.

La sezione della Centrale che si occupa dell'aria di processo (Figura 3), è costituita da due linee di compressione, ciascuna delle quali è fornita di un compressore centrifugo Centac della Ingersoll Rand, che comprime l'aria dell'atmosfera alla pressione di 10 bar; dopo l'essicazione ad un punto di rugiada in pressione (p.d.p.) di -41°C a mezzo di un essiccatore STI. L'aria così trattata viene stoccata in un serbatoio intermedio da 60 m^3 di capacità. Da qui viene aspirata da un compressore alternativo Nuovo Pignone, che la comprime fino a 115 bar; essiccata nuovamente in un secondo essiccatore STI fino ad un p.d.p. di -41 °C, per venire quindi stoccata in un serbatoio di alta pressione con una capacità di 135 m^3, pronta per essere inviata all'utenza.

Le linee di compressione sono due, caratterizzate rispettivamente da una portata pari a 1 Kg/s e 2 Kg/s. I due compressori alternativi della Nuovo Pignone sono denominati KB-11 e KB-21 (Figura 4), rispettivamente operanti sulle linee di portata di 1 Kg/s e 2Kg/s, e sono provvisti ciascuno di tre scambiatori a fascio tubiero acqua/aria di interfase che vengono raffreddati con acqua, proveniente dalle torri evaporative. Ognuno dei tre circuiti è caratterizzato da uno scambiatore alimentato con acqua surriscaldata che ha lo scopo di evitare il raffreddamento dell'aria per effetto della laminazione alla pressione di prova e conseguente formazione di ghiaccio sui circuiti.
Una valvola di regolazione su ogni circuito regola la pressione al valore richiesto dall'utenza; ad inizio prova la pressione a monte della valvola è pari a 115 bar, per poi diminuire progressivamente fino al valore minimo necessario per assicurare il valore di prova. Sono possibili tipologie di prova diverse in termini di portata, pressione e durata.



ELENCO MACCHINE E APPARECCHIATURE

K-11	Compressore centrifugo 1kg/s	D-11	Serbatoio 7 bar
K-21	Compressore centrifugo 2kg/s	D-21	Serbatoio 7 bar
KB-11	Compressore volumetrico 1kg/s	D-21	Serbatoio 115 bar
KB-21	Compressore volumetrico 2kg/s	D-22	Serbatoio 115 bar
FT-11	Filtro aria	E-11	Riscaldatore aria
FT-21	Filtro aria	E-21	Riscaldatore aria
DY-11	Essiccatore d'aria	E-31	Riscaldatore aria
DY-21	Essiccatore d'aria	E-41	Riscaldatore aria
DY-12	Essiccatore d'aria		
DY-22	Essiccatore d'aria		

Figura 3. Schema della Centrale Aria Compressa.

Inoltre, per il normale esercizio di tutti gli impianti, siano essi gallerie o produttori di ausiliari ad esse asserviti, la Centrale produce aria compressa a 8.5 bar che viene fornita, disoleata, alle utenze. Ciascun utente provvede, poi, per le proprie esigenze inerenti alla strumentazione, ad essiccarne la quota parte necessaria.
L'impianto viene gestito interamente tramite un sistema di controllo della Elsag Bailey FreeLance 2000, i PLC relativi sono posti all'interno di un armadio con relativo UPS ubicato all'interno della sala controllo.

2.1 Stato delle Centrale Aria Compressa

Coadiuvati dall'azienda produttrice dei compressori a servizio della CAC, nel 2021 è stato effettuato un esame dell'intero impianto per verificarne lo stato di sicurezza e l'operatività delle macchine e dei sotto-insiemi. Sono stati effettuati rilievi ed analisi per comprendere se la condizione di stress d'uso, legato ai frequenti cicli di accensione e spegnimento ed alle lunghe durate di fermo/stand-by che spesso le componenti della centrale sono costrette a supportare, possano causare problemi strutturali e di processo per l'impianto o per singole parti di questo (sotto-insiemi e tubazioni), tali da compromettere la CAC o la riuscita dei test sperimentali.

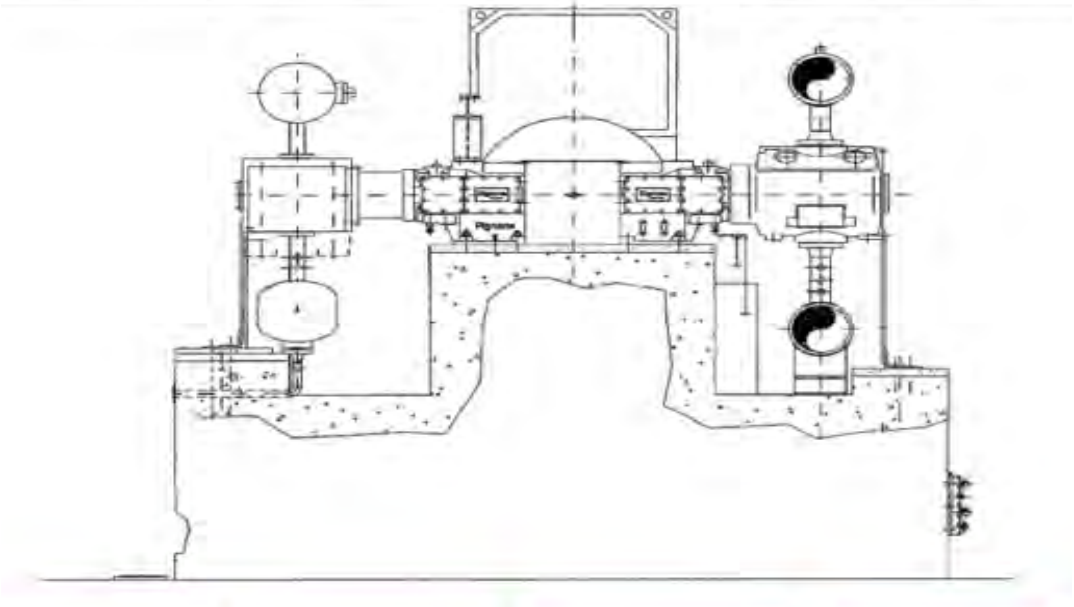


Figura 4. Schema del compressore KB-11.

Dal controllo dei dati di targa dei compressori, l'anno di costruzione dell'incastellatura risulta essere 1996. Le ore di funzionamento reali totali dal primo avviamento, così come registrate nelle apparecchiature, alla data del 17/11/2021 risultano essere 143 giorni e 6,5 ore per il compressore KB-11, e 129 giorni e 14,3 ore per il compressore KB-21.

Questi valori corrispondono ad una media di ore di funzionamento pari a 156 h/anno per il KB-11 e 141 h/anno per il KB-21, un funzionamento non usuale per questo tipo di macchine.

Come ci si aspettava, questo uso *"intermittente"* della CAC fa si che molte parti a contatto con il gas di processo, in questo caso l'aria, tendano all' ossidazione (Figura 5), specificamente i cilindri e i liner, con la conseguente formazione di rigature sulle pareti dei cilindri (Figura 6). In aggiunta, il circuito di raffreddamento dei compressori utilizza come vettore l'acqua senza che questa subisca trattamenti specifici, con il risultato di formazione di incrostazioni di calcare nei canali di circolazione (Figura 7), fenomeno che a sua volta genera un raffreddamento non adeguato all'unità di compressione con conseguenze sulla sua efficienza.



Figura 5. Tiranti e bulloneria del coperchio valvola di aspirazione su KB-11. Evidenti i segni di ossidazione.



Figura 6. Liner su KB-21, evidenti rigature.



Figura 7. Scatola premistoppa, presenza di calcare nel canale di passaggio dell'acqua di raffreddamento.

3. Piano manutentivo

Il piano di manutenzione standard a corredo d'uso dei compressori al momento dell'installazione, che la casa di costruzione redige per le attrezzature a pressione, non risulta rispondente per la necessità di lavoro della CAC. È stato pertanto necessario che i produttori realizzassero una modifica ai manuali in considerazione delle criticità evidenziate.

Nel caso particolare dell'impianto CAC del CIRA la fase di avviamento è un momento di alta criticità per la macchina, durante il quale i cuscinetti sono sottoposti a forte tensione dovuta al contatto con l'albero di trasmissione. Finché non si instaura la condizione di portanza oleodinamica tra albero e cuscinetto, l'attrezzatura viene sottoposta a strisciamento con conseguenze sulla finitura delle superfici e la tenuta degli accoppiamenti.

Il fluido utilizzato per il funzionamento dei compressori è l'aria, che circolando nei cilindri, li espone a fenomeni corrosivi causati dalla condensazione dell'umidità atmosferica naturalmente presente. A sua volta, l'acqua usata per il raffreddamento dei compressori causa la formazione di depositi di calcare all'interno dei circuiti, con conseguenze anche in termini di aumento delle temperature di esercizio delle macchine a causa della riduzione di efficacia del sistema di cooling.

Le modalità di funzionamento delle apparecchiature in uso al CIRA sono da considerarsi più severe rispetto a quanto previsto dai produttori, per cui un piano di manutenzione basato sulle ore di funzionamento, ovvero quello che tipicamente viene previsto per queste macchine, non può essere adottato. Il piano manutentivo e di sicurezza macchine deve essere basato, invece, sui controlli periodici indipendenti dal numero di ore di funzionamento accumulate ed inoltre risulta necessario integrare

tale piano con accorgimenti manutentivi costanti da avviare nei periodi di fermo prolungato.
Nel caso di periodi di inattività, sarebbe buona norma isolare il compressore dal resto dell'impianto, depressurizzando tutte le tubazioni e gli apparecchi. Per evitare che l'aria presente all'interno del compressore possa generare fenomeni corrosivi sulle pareti dello stesso si può eseguire una pressurizzazione del compressore con azoto, in modo da preservare i materiali.
Durante i periodi di stand-by dell'impianto, ad intervalli di tempo regolari, il compressore e le pompe ausiliare di lubrificazione dovrebbero essere attivati in modo da garantire una corretta lubrificazione dell'impianto e preservarne lo stato.
Inoltre, il circuito di raffreddamento andrebbe svuotato per evitare ristagni e/o congelamenti nei periodi invernali.

4. Conclusioni

Il piano manutentivo della CAC del CIRA è attualmente in fase di definizione, ma possiamo riportare alcune considerazioni introdotte all'analisi dello stato dell'impianto e dei suoi sotto-insiemi di cui ai lavori dell'anno 2021.
Seppure i singoli sotto-insiemi di un impianto complesso, quale la CAC, possano essere considerati di tipo regolare, l'insieme globale non può essere identificato in una tipologia standard. Per questo motivo, il piano di manutenzione deve essere progettato basandosi su quella che sarà l'effettiva vita lavorativa dell'attrezzatura.
La personalizzazione del piano di manutenzione e dei manuali d'uso deve essere parte integrante del processo di progettazione di un impianto complesso, in modo da assicurare la giusta conservazione delle apparecchiature e preservare la loro efficienza nel tempo e per la sicurezza degli operatori.

5. Bibliografia

[1] G. Goduto, F. Del Gatto, P. Cangiano, "Descrizione degli Impianti Generali, dei Mezzi di Prova e del Patrimonio Civile del CIRA", CIRA-CF-16-1021, 2016.

[2] C. Izzo, L. Vecchione, "CIRA PT-1 User Manual", CIRA-CF-09-1144, 2009.

[3] F. Ferrigno, L. Vecchione, "CIRA IWT User Manual", CIRA-CF-04.0541, 2004.

[4] A. Martucci, "Studio aerotermodinamico di sonde per misure di flussi termici nella galleria al plasma SCIROCCO", Tesi di Dottorato Ciclo XX, Università degli Studi di Napoli.

Analisi e individuazione delle cause che hanno prodotto lo scoppio di un generatore di vapore a tubi da fumo a fondo bagnato

R, Mercurio[1], A. Mercurio[1], G. Paglione[2], A. Turi[2], G. Piva[3]

[1] Soggetto Abilitato METIDE
[2] Inail - Uot di Bari
[3] Soggetto Abilitato TUV SUD - Italia

Abstract

Abbiamo analizzato le cause che hanno portato al verificarsi dell'incidente a seguito di scoppio di un generatore di vapore, indagando sulle cagioni tecniche.
Pertanto abbiamo acquisito le caratteristiche tecniche costruttive di base del generatore vapore oggetto di scoppio, stabilito le circostanze dell'incidente, identificato le ragioni tecniche dell'incidente, ed infine valutato la possibilità di ulteriori controlli preventivi per evitare il ripetersi dell'incidente in altri generatori di vapore della stessa tipologia.

Scopo

Imparare dalla casualità degli eventi, per migliorare e rendere efficaci le strategie di prevenzione degli incidenti in centrale termica. Abbiamo cercato di comprendere non solo perché gli incidenti devono essere investigati e analizzati, ma anche cosa si intende per analisi e investigazione degli incidenti, sviluppando un processo di tipo deduttivo capace di evidenziare i fattori che hanno contribuito o causato l'incidente, che con un percorso logico, partendo dallo scoppio, tende a rivelare la ragione che l'ha causato.

Risultati attesi

Memoria tecnica che riconduce alla causa dello scoppio. La presente trattazione comprende la rilevazione dei difetti, le indagini in campo per l'individuazione delle cause della "failure", la ricerca di soluzioni in letteratura scientifica, l'individuazione e l'applicazione della soluzione ottimale secondo le "best practices"

Keyword: scoppio, generatore di vapore a fondo bagnato, valutazione delle cause, controlli.

1. Caratteristiche del generatore di vapore

1.1 Il generatore di vapore oggetto di scoppio

Il generatore di vapore a tubi da fumo oggetto di esame, costruito nel 1978 secondo le disposizioni e procedure dell'A.N.C.C., è caratterizzato dalla presenza di un fondo bagnato per eliminare i costi di manutenzione, le perdite di calore per irraggiamento ed il surriscaldamento della piastra tubiera posteriore.
Presenta:

- eccentricità del focolare verso il basso:
- assenza di tubi nella parte inferiore per favorire la pulizia lato acqua:
- focolare di grande diametro per favorire il rendimento e rispettare ecologicamente i valori delle emissioni al camino.
- tre giri di fumo per aumentare il rendimento.
- piastre tubiere stampate e sottoposte a trattamento termico di normalizzazione. Le bordature assorbono uniformemente le dilatazioni del corpo e del fascio tubiero fungendo da veri e propri compensatori. I tubi sono mandrinati e saldati alle piastre tubiere.
- Camera di inversione dei fumi e fondo del generatore di vapore vincolati da tiranti ottenuti da tondo pieno ASTM A105 F □ 28 mm.
- fasciame / mantello di grande diametro è munito di passo d'uomo, portine passi di mano o passi d'uomo d'ispezione, tronchetti di presa, attacchi per ausiliari e golfari di sollevamento.

1.2 Vista longitudinale generatore di vapore a fondo bagnato

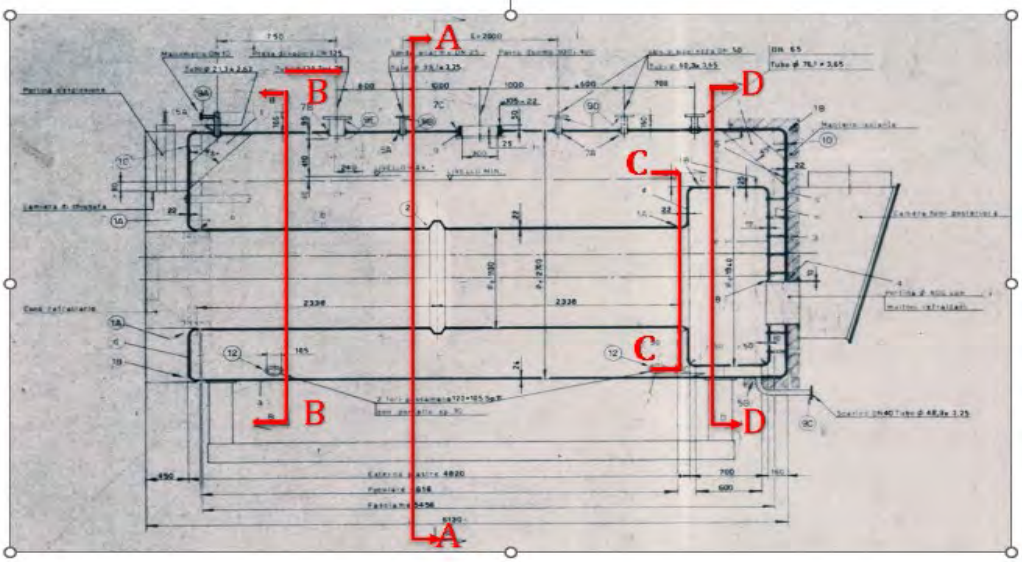


Figura 1

1.3 Sezioni generatore di vapore a fondo bagnato

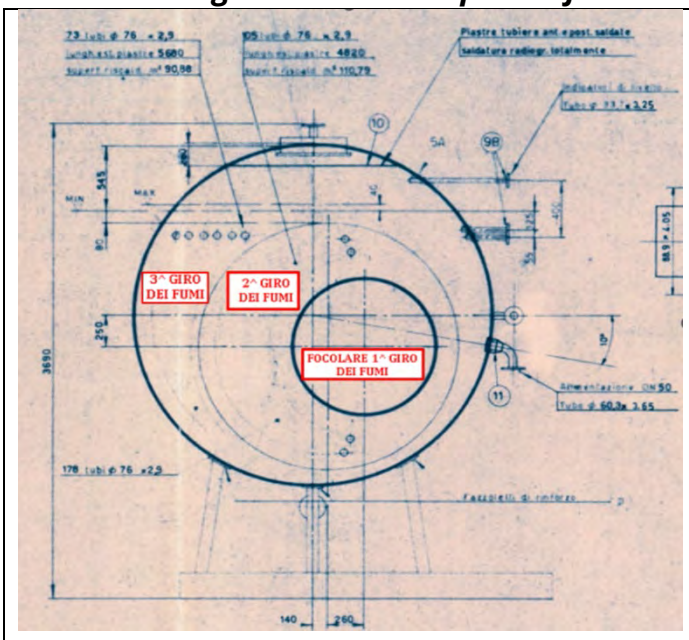


Figura 2. **SEZIONE A-A** riproduzione ridotta per esigenze di impaginazione -. Posizione asimmetrica del focolare, i limiti delle bordature della piastra tubiera posteriore, numero dei tubi da fumi per il "2^ e 3^ giro dei fumi, posizione del passo d'uomo, limite minimo e massimo del livello d'acqua in caldaia, posizione di alcuni tronchetti per l'alimentazione ed il controllo del livello, volume di contenimento dei tre giri del fumo.

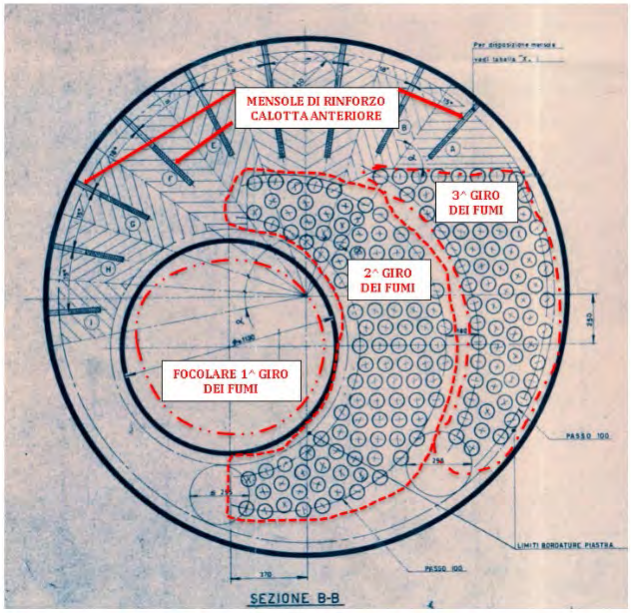


Figura 3. **SEZIONE B-B** Disposizione dei tubi da fumo per il "2^ e 3^ giro dei fumi, la disposizione delle mensole di rinforzo piastra tubiera anteriore
Si rileva il percorso dei fumi caldi prodotti dal bruciatore (1^ giro dei fumi) con la cessione del calore alla caldaia, il 2^ giro dei fumi in camera di inversione dei fumi posteriore ed il 3^ giro dei fumi completamente accessibile per la visione dei tubi da fumo e dei tiranti e la posizione asimmetrica del focolare

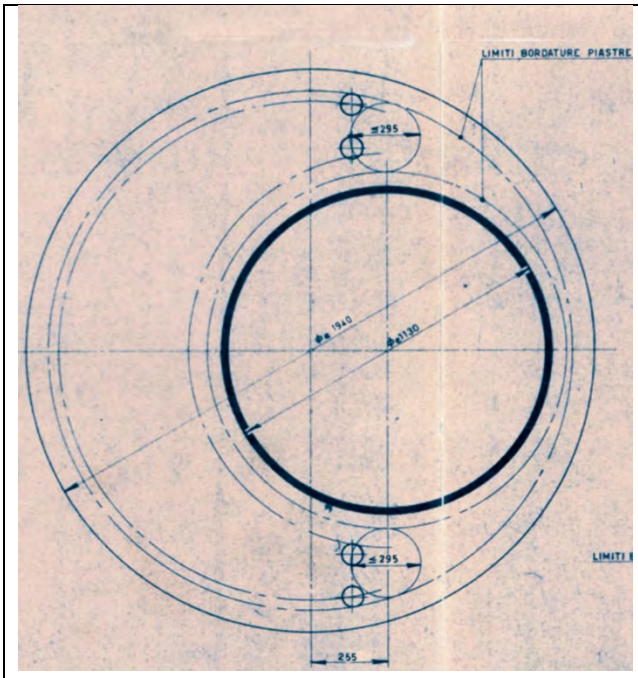


Figura 4**. SEZIONE C-C**
Si rilevano disposizione del focolare, il limite delle bordature della camera di inversione dei fumi, le dimensioni esterne della camera di inversione dei fumi posteriore pari a 1.940 mm completamente accessibile per la visione dei tubi da fumo e dei tiranti e la posizione asimmetrica del focolare.

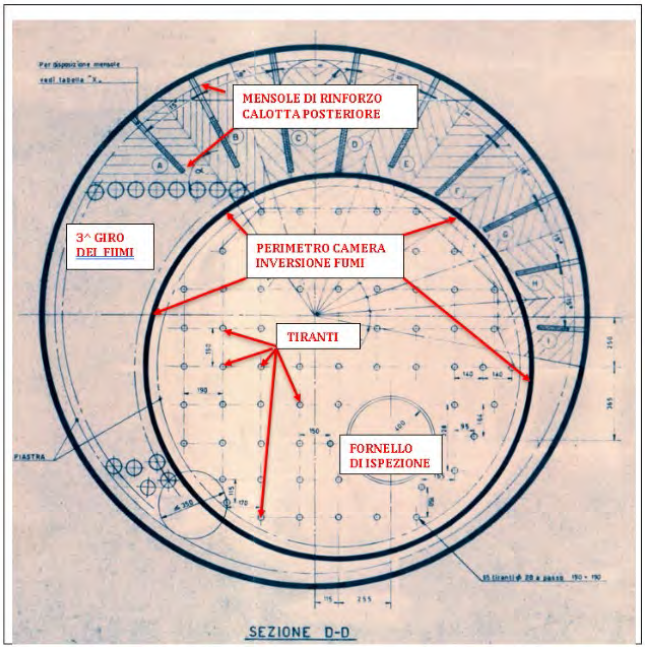


Figura 5**. SEZIONE D-D**
Si evidenzia la disposizione del fornello posteriore, le mensole di rinforzo della calotta posteriore, la posizione dei 65 tiranti di rinforzo da 28 mm., tra la camera di inversione dei fumi posteriore, e la calotta posteriore

2 Analisi delle possibili cause e rilievo eseguito

La società proprietaria del sito produttivo, che comprende il generatore di vapore, indicato ha patito dopo alcuni anni di esercizio il fermo produttivo e fallimento per difficoltà finanziarie. La società subentrante nel 2003 non è entrata in possesso della documentazione attestante le attività di manutenzione ordinaria e straordinaria eseguite sul generatore in precedenza. Per cui gli atti posti in visione sono stati emessi dalla nuova gestione a seguito del subentro datati pertanto dopo il 2003.

2.1 Acqua d'alimentazione

Negli impianti termici l'acqua può dare origine a due principali tipi di inconvenienti: incrostazioni, e corrosioni.
Mentre il fenomeno delle incrostazioni è abbastanza definito e delineato perché la sua origine è unica ed è, quasi sempre, la durezza, il fenomeno corrosivo è, invece, un fenomeno complesso di cui è spesso difficile determinarne le cause d'origine e quelle

di sviluppo. La corretta conduzione di una centrale a vapore prevede controlli sistematici dei parametri chimici dell'acqua di alimento e di esercizio, ma anche controlli periodici mensili da eseguire con l'ausilio di un laboratorio qualificato sulle analisi dell'acqua d'alimento degli impianti. Gli atti esaminati (analisi di ditte esterne, analisi dei conduttori ad ogni turno) confermano che il processo di trattamento delle acque di alimentazione e quello di esercizio con impianto di demineralizzazione e degassazione è conforme alla normativa di riferimento.

2.2 Variazione del combustibile

In tempi riferiti non apprezzati in sede di rilievo, è stata eseguita la sostituzione del bruciatore a combustibile B.T.Z .con altro a metano

L'adozione di un combustibile diverso da quello originario, in particolare la sostituzione dell'olio combustibile con il gas metano, deve avvenire con le dovute attenzioni.

La fiamma prodotta da un olio combustibile cede calore per irraggiamento mentre quella del gas principalmente per convezione. Con la combustione dei gas, i fumi pertanto escono più caldi con il rischio di surriscaldamento delle pareti di scambio; tale fenomeno può provocare in molti casi fessurazioni nella parte terminale dei tubi da fumo e nei giunti saldati. Gli atti esaminati (analisi dei fumi ad ogni avvio) confermano che il bruciatore di metano a corredo del generatore di vapore, è oggetto di attenta regolazione da ditta esterna qualificata, ad ogni riavvio stagionale.

2.3 Surriscaldamento e dilatazioni termiche



Oltre al pericolo di cricche nelle mandrinature di unione tra i tubi e piastre tubiere o nei tubi stessi, si possono generare aumenti localizzati della temperatura di parete delle piastre tubiere e nelle camere di inversione dei fumi in generatori vapore a fondo bagnato, tipologia di presente nel caso in oggetto.

La precedente gestione ha sostituito l'intero corpo dei tubi da fumo che rappresenta il secondo giro dei fumi.

Tale sostituzione, evidente nella nostra ispezione, per la presenza di tubi mandrinati collocati non a filo della piastra tubiera, probabilmente non è stata rilevata dai nuovi proprietari e da tutti gli attori delegati del processo manutentivo ed ispettivo del Generatore di Vapore.

Le dilatazioni termiche sono particolarmente pericolose per i generatori a tubi di fumo di grande potenzialità poiché direttamente proporzionali alla lunghezza delle membrature. Nella documentazione messa a disposizione non vi è traccia degli interventi sicuramente eseguiti prima della gestione attuale.

Figura 6

Appare evidente, dalla figura 6 la presenza di sfogliature sulla parte dei tubi da fumo esterna alla piastra tubiera sul primo giro dei fumi, dopo il focolare, chiaro indice del fenomeno di surriscaldamento.

2.4 Messa a riposo stagionale.

Il generatore di vapore ha utilizzo stagionale dovuto alle campagne di trattamento di prodotti orto-frutta. Nell'azienda è attuato ad ogni fermo per stagionalità un programma di conservazione in fase secca, vuotando a caldo il contenuto di acqua, secondo le modalità già conosciute dagli addetti al settore:
Gli atti esaminati (procedure di messa a riposo e riavvio) registrate dal coordinatore dei servizi di manutenzione, ad ogni fermo e riavvio stagionale, confermano la correttezza delle procedure.

3 Analisi del possibile danno

3.1 Premessa

Non sono considerate le norme e danni specificamente prodotti per fenomeni di scorrimento viscoso (creep) non pertinenti (per temperatura e pressione) per il caso in studio.

3.2 Il danno causato dal degrado dei materiali

La definizione di "danno" è estremamente ampia e riguarda uno spettro molto vasto di situazioni; ogni tipo di materiale è soggetto a tipologie di danno differenti, a seconda degli impieghi. Il danno può essere classificato in modi diversi, ad esempio facendo riferimento ai meccanismi di degrado, alla analisi delle rotture, alle indagini che permettono di individuarlo, ai metodi di prevenzione.
Le attrezzature in pressione operano in un ampio range di pressioni e temperature.
I materiali utilizzati per le attrezzature in pressione ante PED devono rispondere ai requisiti di sicurezza allora vigenti.
Oggi devono rispondere ai requisiti di sicurezza. previsti nella Direttiva PED, lavorando nelle condizioni previste per un tempo definito. Occorre quindi tenere conto, nella progettazione e nell'analisi dei rischi, dei possibili meccanismi di danno.
Nella progettazione si considerano eventuali condizioni particolari di esercizio e si prevedono verifiche aggiuntive, che normalmente riguardano Corrosione – Erosione – Fatica - Infragilimento.
Ognuno di questi meccanismi può provocare una o più tipologie di danno, da considerare anche nella loro evoluzione nel tempo (analisi dei rischi, RES, mantenimento dei RES).
Questo approccio richiede di dimostrare che il danno, e in particolare i difetti, possono essere evidenziati dalle ispezioni prima che riducano la resistenza del componente al di sotto del livello di sicurezza.

Nel seguito, ai fini della valutazione del danno nel caso specifico del Generatore oggetto di scoppio, riportiamo alcune cause, le più probabili, che possono determinare il degrado dei materiali.

3.3 Infragilimento

La temperatura di esercizio e lo stato di sforzo permettono di determinare se il materiale è utilizzato al di sopra o al di sotto della transizione duttile-fragile, al di sotto della quale possono verificarsi rotture con un assorbimento di energia relativamente basso.
Anche materiali duttili possono presentare rotture fragili solitamente improvvise; l'origine di queste fratture è quasi sempre un intaglio o un difetto preesistente, di cui non era stata rivelata la presenza durante i controlli di fabbricazione, o di cui non è stato tenuto adeguatamente conto. Tra i fattori che controllano la temperatura di transizione di un acciaio possono essere ricordati la composizione chimica, la procedura di fabbricazione, la saldatura. Fenomeni di frattura fragile possono verificarsi anche nella fase finale della propagazione di cricche.
Alcuni tipi di infragilimento possono verificarsi in seguito all'invecchiamento del materiale, e dipendono dal degrado della microstruttura in seguito a trattamenti termici e/o tensioni indotte, tra questi:

- Infragilimento per deformazione (tipico degli acciai con basso contenuto di carbonio sottoposti a carichi ciclici)
- Infragilimento per tempra (Acciai a basso tenore di carbonio raffreddati velocemente).

3.4 Cricche

Le cricche vengono definite come difetti acuti (con angolo all'apice tendente a zero), che causano l'intensificazione del campo di sforzi. Teoricamente, non possono essere accettate, neanche adottando coefficienti di sicurezza, ma richiedono una valutazione di stabilità tramite l'applicazione della meccanica della frattura.
È molto difficile dare una descrizione breve ed esauriente allo stesso tempo dei fenomeni di criccatura, che possono essere dovuti a corrosione e o tensocorrosione, fatica, errori di fabbricazione, infragilimento del materiale.
Dal punto di vista applicativo, occorre tenere conto dei limiti dei controlli, ed a tal fine valutare quanto tempo è necessario perché una cricca passi da una dimensione non individuabile, a quella che può essere rivelata con i controlli.
In sede di progetto, la resistenza del materiale tiene conto del limite di fatica.
Applicando la meccanica della frattura si può prevedere una fase di crescita sottocritica, nel corso della quale il componente può continuare a lavorare in sicurezza.

3.5 Tensocorrosione (corrosione sotto sforzo)

Agli strumenti e ai metodi analitici della meccanica della frattura e della propagazione per fatica si dovrebbe avere l'accortezza di aggiungere l'effetto ambientale quando è

necessario. Non sempre però questi effetti sono quantificabili in termini di velocità di propagazione del difetto, per mancanza di conoscenze sui meccanismi e di modelli adeguati. Fra i meccanismi di corrosione viene solitamente indicata la tensocorrosione (Stress Corrosion Cracking, SCC) definita come la formazione di cricche causate dall'azione simultanea di un ambiente corrosivo e di un carico di trazione.
In altri termini, per tensocorrosione si intende un fenomeno di degrado di un materiale dovuto all'azione combinata di corrosione e applicazione di un carico costante, e o variabile.
Spesso conduce a rottura improvvisa di materiali metallici normalmente duttili sottoposti a stress in ambiente corrosivo. La velocità di propagazione della frattura è notevole proprio a causa dell'azione combinata dei due fattori. Lo stress può essere causato da concentrazioni di tensione in zone particolarmente critiche, come bordi di fori o spigoli non sufficientemente raccordati (si parla in tal caso di "effetto intaglio"), oppure da residui di tensione dovuti alla fabbricazione (ad esempio dopo una lavorazione a freddo).
A parere degli scriventi, la tensocorrosione è la ragione principale del degrado nel tempo dei tiranti, causa dello scoppio, fenomeno evidenziato nel capitolo 5.

4 Invecchiamento delle attrezzature a pressione

L'invecchiamento è un problema emergente per gli impianti di processo - Per valutare l'idoneità al servizio di impianti vecchi occorre valutare la vita residua. Per i meccanismi tempo-dipendenti (fatica, corrosione), al fine di valutare lo stato di degrado/invecchiamento di un'attrezzatura a pressione è utile valutare la frazione di vita consumata. La conoscenza della vita consumata può dare infatti indicazioni sull'estensione delle PnD da effettuare sul componente (più elevata la vita consumata più intensi i controlli).

4.1 Norma UNI/TS 11706:2018 [9]

Lo sviluppo tecnologico ha progressivamente portato a un sensibile miglioramento delle caratteristiche strutturali dei materiali e della loro stabilita nel tempo durante l'esercizio.
Tuttavia, la specificità dei materiali per attrezzature a pressione, le cui proprietà si basano su un forzato blocco della microstruttura in stati fuori dall'equilibrio termodinamico, determina intrinsecamente una progressiva evoluzione microstrutturale di ritorno all'equilibrio iniziale, con conseguente alterazione delle proprietà, con degrado metallurgico anomalo, e diminuzione delle proprietà tensili e tenacità.
Questa tendenza è propria di tutti i materiali strutturali (da quelli fabbricati da tempo ai più recenti), varia solo la sua cinetica.
A questo fattore si aggiunge poi l'effetto che, attraverso fenomeni di diffusione, può avere l'ambiente di esercizio. Le conseguenze di questa evoluzione saranno tanto più rilevanti in funzione del tempo e delle modalità di esercizio del componente.

Per tale motivo, le proprietà del materiale con cui furono realizzati componenti con un tempo di esercizio accumulato molto elevato, potrebbero essere sensibilmente cambiate rispetto a quelle inizialmente utilizzate per la progettazione.
I soggetti interessati, valutata la necessità, hanno elaborato la norma UNI 11706:2018.
La norma ha lo scopo di definire le modalità e le procedure per valutare lo stato di conservazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione in esercizio, relativamente al degrado strutturale e metallurgico del materiale. La norma tratta i meccanismi di danno a evoluzione lenta i cui effetti non risultano rilevabili all'esame visivo. La valutazione deve essere effettuata non oltre i 40 anni dalla data di inizio dell'effettivo esercizio dell'attrezzatura a pressione, eseguita da persona competente con almeno 5 anni di esperienza**.**
Il riferimento normativo temporale, non esclude, anzi raccomanda l'esecuzione di un'analisi preliminare per individuazione dei meccanismi di danno, per prevedere eventuali intervalli di verifica inferiori. Non oltre i 10 anni dalla messa in servizio o dalla verifica di primo impianto.
La norma UNI 11706:2018 riporta specificamente quanto sia determinante conoscere, nella analisi preliminare, la storia di esercizio dell'attrezzatura.
La valutazione effettuata deve essere documentata in una relazione tecnica che includa analisi, individuazione dei meccanismi di danno, i controlli eseguiti, esercibilita del componente, eventuali interventi successivi
Nel caso in cui l'attività di analisi faccia emergere l'assenza di possibili meccanismi di danno, la relazione tecnica deve comunque essere predisposta per dare evidenza della valutazione eseguita.

4.2 UNI/TS 11325 tutte [6-7-8-10]

Le specifiche tecniche applicabili per la messa in servizio e l'utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione sono contenute nel pacchetto delle norme UNI/TS 11325: Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione. La Raccolta tecnica fornisce le indicazioni per la sorveglianza dei generatori rientranti nel campo di applicazione del D.M. 329/04.
Le Specifiche Tecniche della serie UNI TS 11325 costituiscono un set di norme per la valutazione dei meccanismi tempo-dipendenti e il degrado metallurgico dei materiali dovuto al prolungato esercizio
I controlli obbligatori per legge, esame visivo e controllo spessimetrico, sono spesso insufficienti a valutare l'invecchiamento di un'attrezzatura.
È utile programmare le ispezioni da effettuare sul componente utilizzando una metodologia RBI, al fine di individuare i controlli più idonei in funzione del rischio del componente.
In particolare, per le verifiche periodiche dei generatori di vapore ed i controlli durante l'esercizio sono specifiche le seguenti parti della norma:
Parte 3: Sorveglianza dei generatori di vapore e/o acqua surriscaldata.
Parte 6: Messa in servizio delle attrezzature e degli insiemi a pressione;

Parte 8: Pianificazione della Manutenzione su attrezzature a pressione attraverso metodologie basate sulla valutazione del rischio (RBI)
Parte 11: Membrature soggette a fatica
Parte 12: Procedure generali per le Verifiche periodiche delle attrezzature e degli insiemi a pressione.

5 Valutazione delle cause che hanno prodotto lo scoppio de generatore di vapore

Verificata de visu la condizione dei tiranti, durante l'ispezione interna, evidenziata nelle immagini riportate di seguito, siamo indotti a credere che la rottura sia effetto di **tensocorrosione**, probabilmente innescata da tensioni in fase di montaggio irregolarmente ripartite su alcuni tiranti che hanno attivato, nel tempo, un effetto domino sui rimanenti ulteriormente sollecitati, provocando conseguente aggravio di carico strutturale del fornello per incremento localizzato delle sollecitazioni
Si è portati a supporre che il fenomeno di tensocorrosione, sia iniziato nei tiranti maggiormente sollecitati, gradualmente nel lungo tempo di esercizio (43 anni dalla costruzione) ed a causa di fenomeni di invecchiamento dei materiali per fatica.

5.1 Rappresentazione grafica e fotografica del degrado dei tiranti

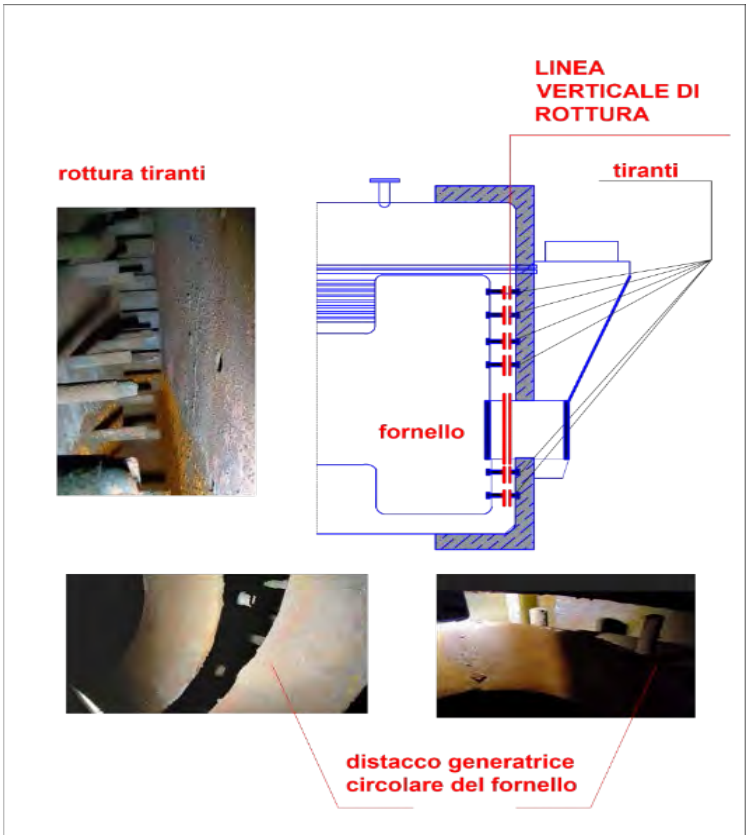


Figura 7

Qualsiasi componente meccanico, elemento di macchina o parte di impianto può, durante l'impiego operativo, andare soggetto a svariati inconvenienti di natura metallurgica.
Tra i più importanti fenomeni di danneggiamento e/o degrado dei materiali metallici dovuti all'esercizio che a parere degli scriventi sono riconducibili allo scoppio, sono i seguenti:
1) Cedimenti statici (fenomeni di fragilità ed infragilimento);
2) Rotture per fatica;
3) Degrado per Tensocorrosione;
I fenomeni di danneggiamento elencati sono spesso tra loro interdipendenti. Lo sono nelle rotture per fatica con innesco di cricca a partire da danneggiamenti per fenomeni di corrosione sotto tensione, indotti dalle sollecitazioni meccaniche applicate al componente (stress corrosion cracking).

5.2 Direzione degli sforzi principali nei tiranti

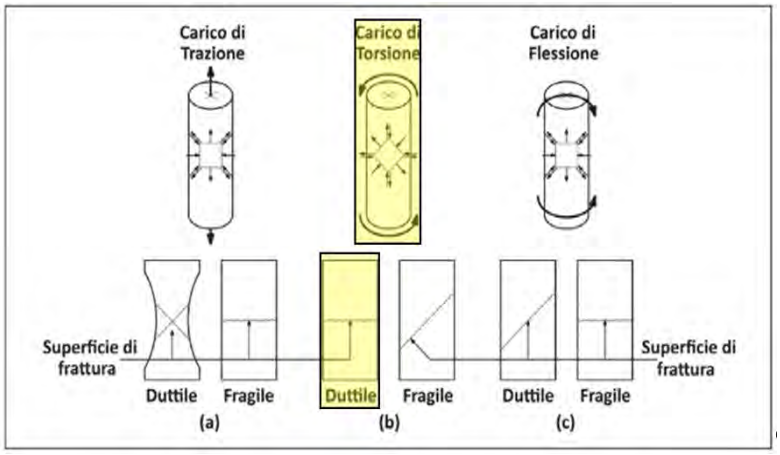


Figura 8

La conoscenza dell'orientazione degli sforzi principali nel tirante è importante per sapere i punti in cui più probabilmente è avvenuta la rottura. In molti casi la determinazione degli sforzi principali è complessa, nelle configurazioni di carico più semplici è possibile ricavarli e correlarli all'orientazione delle superfici di frattura. Questo collegamento non può essere fatto a prescindere dal materiale che si sta considerando.

Nel caso in oggetto, la rottura si è manifestata probabilmente lungo i piani ove sono massimi gli sforzi di taglio per effetto delle sollecitazioni di scorrimento. Da cui si ipotizza un carico di torsione, dovuto a dilatazioni termiche con svariati a cicli in oltre 40 anni di esercizio. L'illustrazione grafica riporta l'orientazione degli sforzi principali normali e di taglio e delle superfici di frattura su campioni, simili ai tiranti, sottoposti a carichi di (a) trazione - (b) torsione - (c) flessione.

Conclusioni

L'esercizio e gli interventi di manutenzione straordinaria devono essere correttamente documentati nel tempo e conservati per tutta la vita del generatore di vapore, al fine di valutare l'eventuale degrado dei materiali nel tempo.
Le verifiche periodiche di integrità decennali, che riguardano lo stato di conservazione nel caso costruttivo caratteristico dei generatori di vapore a fondo bagnato, dovrebbero essere operate secondo una valutazione approfondita indirizzata alla peculiarità costruttiva del generatore che consente di rilevare e prevenire il problema strutturale causa dell'incidente.
Si propone, oltre quanto indicato dalle Norme UNI/TS, una procedura di controlli che comprenda quanto riportato nel seguito
Ispezione visiva, lato acqua, approfondita sulla parte posta a cavallo della camera di inversione dei fumi posteriore, e la calotta posteriore del generatore. Tale approfondimento visivo, può evidenziare, eventualmente anche ad occhio nudo, la rottura iniziale in alcuni tiranti danneggiati, maggiormente sollecitati dalle tensioni indotte per difetti di planarità, e, qualora rilevati, la conseguente esclusione dall'esercizio del generatore di vapore a fondo bagnato.
Controllo planarità delle piastre tubiere mediante lo spostamento di un comparatore su tutta la superficie e rilevando l'errore di planarità come differenza tra la massima e minima misura rilevata, e quindi la probabile presenza di tensioni indotte.
Ispezione dei forgiati (tiranti) con ultrasuoni difettoscopico USM B-Scan. Il difetto colpito dalle onde incidenti assorbe energia. Il segnale che ritorna alla sonda contiene tutte le informazioni sulle dimensioni, lontananza dalla sorgente, geometria e natura dell'ostacolo(difetto).

Bibliografia

[1] G. Bianchi – F. Mazza - Corrosione e protezione dei metalli - Associazione Italiana di Metallurgia terza edizione 2005 pp 218 – 222.

[2] A. Alvino, A. Antonini, C. Delle Site, A. Di Loreto, F. Giacobbe, D. Lega, E. Pichini, Maurizio A. Pierdominici, L. Ricciardi, A. Tonti - Analisi delle cause di rottura di materiali metallici: esempi di applicazione - INAIL Quaderni di ricerca n^9 – febbraio 2016

[3] M Boniardi Dipartimento di Meccanica POLIMI A. Casaroli Dipartimento di Meccanica POLIMI - C. Tagliabue Forgiatura A. Vienna, Rho (MI) Fenomeni di danneggiamento dei materiali metallici dovuti all'esercizio (Failure Analysis) Dispensa tecnica capitolo IV

[4] Feynmann R. P. et al., The Feynman Lectures in Physics, California Institute of Technology, 1964 da ASM Handbook Committee, Metals Handbook, Vol. 12 - Fractography, ASM International, Metals Park, Ohio, 1987).

[5] G, Sferruzza – Coordinatore CT 223 GL 3 CTI -Inail UOT Palermo - UNI 11325-12 Tecnologie innovative in ausilio ai controlli ed alle verifiche di attrezzature a pressione Giornata di studio – Palazzo Bernardini 10 aprile 2018

[6] GdL UNI/TS UNI /TS 11325-9 – Maggio2013 Idoneità al servizio di attrezzature ed insiemi a pressione Fitness for Service -

[7] GdL UNI/TS 11325-8 – Luglio2013 - Messa in servizio di attrezzature ed insiemi a pressione - Pianificazioni delle manutenzioni.

[8] GdL UNI/TS 11325-11–giugno2015 - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature ed insiemi a pressione – procedura di valutazione dell'idoneità al servizio per attrezzature a pressione soggette a fatica

[9] GdL UNI 11706–marzo 2018 - Attrezzature a pressione – Valutazione dello stato di conservazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione a seguito del degrado strutturale e metallurgico da esercizio dei materiali

10] GdL UNI11325-3 – novembre2021-Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature ed insiemi a pressione – Sorveglianza dei generatori di vapore e/o acqua surriscaldata

Background delle formule per il calcolo della deformazione di membrature di attrezzature a pressione

N. Palumbo[1], E. Bemporad[2], G. Gurnari[3]

[1]Inail - Uot di Brescia
[2]Inail - Dit
[3]Inail - Uot di Udine

Abstract

La deformazione, a seguito della formatura, delle membrature costituenti le attrezzature a pressione è il parametro in funzione del quale è valutata la necessità o meno di un trattamento termico ai fini del rilassamento/compensazione di eventuali tensioni residue o significative alterazioni della struttura metallografica.
In questa memoria, si analizza il background delle formule per il calcolo della deformazione previste nei codici più utilizzati, nazionali, europei e internazionali per la fabbricazione delle suddette attrezzature.
Il confronto delle formule previste nei suddetti codici evidenzia, in alcuni casi, significative differenze per la valutazione della deformazione.

Keywords: deformazione, formatura, membratura, attrezzatura, formule.

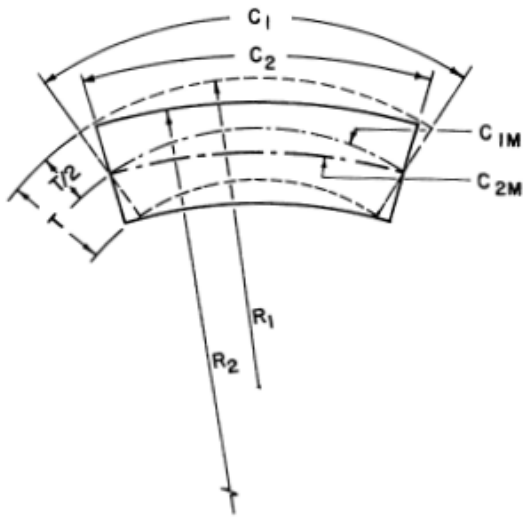
1. Introduzione

Le membrature costituenti le attrezzature a pressione metalliche derivano, nella maggior parte dei casi, da un processo di formatura che deforma plasticamente il materiale di partenza (grezzo), producendo una deformazione permanente.
La formatura può essere eseguita a freddo oppure a caldo, a seconda della temperatura alla quale è realizzata la lavorazione meccanica; detta temperatura è stabilita nei codici per la fabbricazione di attrezzature a pressione.
La formatura è considerata a freddo per gli acciai dei gruppi (CEN ISO/TR 15608) 1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 3.1, 4, 5, 6 e 9, quando la temperatura di deformazione è inferiore di 30°C rispetto a quella massima di distensione, esclusi gli acciai termomeccanici per i quali la massima temperatura di deformazione è 580°C; mentre per gli acciai dei gruppi 8.1, 8.2 e 10 la temperatura deve essere inferiore a 300°C.
La formatura è invece considerata a caldo per temperature superiori alle precedenti; solitamente si esegue a temperature attorno a quella di normalizzazione e non è ammessa per gli acciai con trattamento termomeccanico.
La deformazione plastica a freddo provoca l'incrudimento del materiale, ossia l'aumento della resistenza a rottura e della durezza, congiunto a una diminuzione della duttilità e della resilienza, nonché la permanenza di tensioni residue.

Al fine di contenere questi effetti negativi sulle proprietà meccaniche entro limiti accettabili, i codici di fabbricazione stabiliscono valori massimi di deformazione per la formatura a freddo senza la necessità di un successivo trattamento termico e forniscono formule per il calcolo della deformazione in funzione del tipo e delle dimensioni delle membrature.
In questa memoria si analizza il background delle formule previste nelle norme più adottate per la fabbricazione delle attrezzature a pressione e si confrontano le prescrizioni dei codici, evidenziando le differenze.
Nei paragrafi seguenti sono ricomprese le considerazioni degli autori su specifici aspetti delle formule prese in esame[1].

2. Formula della deformazione delle virole cilindriche e coniche calandrate

Con riferimento alla figura 1, tratta da [3], si riporta la derivazione della formula per il calcolo della deformazione dei cilindri, dovuta a Carpenter e Floyd [1] e modificata da Zick [2], come esposta nel rapporto di Bunk [3].



Sezione retta del cilindro curvo

R_2 = raggio iniziale
R_1 = raggio finale
C_{2M} = lunghezza iniziale dell'asse neutro
C_{1M} = lunghezza finale dell'asse neutro
C_2 = lunghezza iniziale della fibra esterna di raggio R_2
C_1 = lunghezza finale della fibra esterna di raggio R_1
T = spessore

Significato dei simboli

Figura 1. Deformazione di un cilindro

Poiché l'asse neutro non subisce deformazione, si assume che:

$$C_{1M} = C_{2M}$$

essendo poi:

$$C_1/C_{1M} = R_1/(R_1 - T/2) \quad \text{e} \quad C_2/C_{2M} = R_2/(R_2 - T/2)$$

si ricava la deformazione S:

[1] la simbologia adottata nei paragrafi seguenti è uguale a quella delle fonti bibliografiche consultate.

$$S = \frac{(C_1 - C_2)}{C_{1M}} = \frac{C_1}{C_{1M}} - \frac{C_2}{C_{2M}} = \frac{R_1}{R_1 - T/2} - \frac{R_2}{R_2 - T/2}$$

che si riduce a:

$$S = \frac{R_1 R_2 - R_1 T/2}{R_1 R_2 - R_2 T/2} - 1 \qquad (1)$$

e in percentuale:

$$\%S = 100\left(\frac{R_1 R_2 - R_1 T/2}{R_1 R_2 - R_2 T/2} - 1\right)$$

Dall'equazione (1), si ricava:

$$S = \frac{R_1(R_2 - T/2)}{R_2(R_1 - T/2)} - 1$$

che può essere riscritta come:

$$S = \frac{T}{2(R_1 - T/2)}(1 - R_1/R_2) \qquad (2)$$

Posto il raggio medio finale pari a $R_F = R_1 - T/2$ e il raggio medio inziale pari a $R_0 = R_2 - T/2$, si ha:

$$R_F/R_0 \approx R_1/R_2$$

Con questa approssimazione, la (2) diventa:

$$S = \frac{T}{2R_F}(1 - R_F/R_0) \qquad (3)$$

e in forma percentuale:

$$\%S = 100\frac{T}{2R_F}(1 - R_F/R_0) = \frac{50T}{R_F}(1 - R_F/R_0) \qquad (4)$$

La (1) è l'equazione di Carpenter e Floyd, e la (4) rappresenta l'equazione di Zick, in forma percentuale, per il calcolo della deformazione dei prodotti cilindrici.

2.1 Considerazioni sulla formula

a) Un modo alternativo per giungere alla (1), è il seguente:

$$S = \frac{C_1 - C_2}{C_2} = \frac{C_1}{C_2} - 1 = \frac{[R_1/(R_1 - T/2)]C_{1M}}{[R_2/(R_2 - T/2)]C_{2M}} - 1 = \frac{R_1/(R_1 - T/2)}{R_2/(R_2 - T/2)} - 1$$
$$= \frac{R_1 R_2 - R_1 T/2}{R_1 R_2 - R_2 T/2} - 1$$

in cui la deformazione è calcolata come il rapporto tra la lunghezza finale meno la lunghezza iniziale e la lunghezza iniziale stessa e si tiene conto che $C_{1M} = C_{2M}$.

b) La formula, sebbene ricavata per i cilindri, può essere applicata ai prodotti a singola curvatura, come i coni.

c) Quando il prodotto iniziale è piano, Zick suggerisce di porre $R_0 = \infty$, a differenza di Carpenter e Floyd che propongono $R_0 = 1000\ in = 25{,}4\ m$; con quest'ultimo valore di R_0 si ottengono deformazioni inferiori.

2.2 Obblighi normativi

L'impiego della formula (4) di Carpenter, Floyd e Zick è obbligatorio per il calcolo della deformazione dei cilindri e dei coni nelle seguenti norme[2]:

- EN 13445-4: 2021 (*punto 10.2.1 - formula 10.2-1*)
- ISPESL Raccolta M rev.1995 ed.1999 (*punto M.13.B.2.2 - formula 2.2*)
- ASME VIII Div. 1: 2023 (*paragrafo UG-79 e tabella UG-79-1*)
- ASME VIII Div. 2: 2023 (*paragrafo 6.1.2.1 e tabella 6.1*)
- ASME VIII Div. 3: 2023 (*paragrafo KF-602 solo per acciai temprati e rinvenuti)*
- ASME I (*paragrafo PG 19 solo per materiali austenitici*)
- CODAP 2005 Div. 2 (*parte F*).
- PD 5500: 2021 (*punto 4.2.2.3.2 solo per acciai austenitici)*

3. Formula della deformazione dei fondi sferici

Dopo aver modificato la formula per i cilindri di Carpenter e Floyd, Zick ha proposto una relazione per il calcolo della deformazione dei fondi sferici [2] e [3], che di seguito si ricava.

Per le forme sferiche, tenendo conto della contrazione laterale, la deformazione è equivalente a $1 + \mu$, che per $\mu = 0{,}3$, coefficiente di Poisson elastico per l'acciaio, diventa $1 + \mu = 1{,}3$.

Pertanto, la formula (3) per i cilindri, moltiplicando per 100 per ottenere la deformazione percentuale, si trasforma in:

$$\%S = 1{,}3 \times 100 \times \frac{T}{2R_F}(1 - R_F/R_0) = 65\frac{T}{R_F}(1 - R_F/R_0) \qquad (5)$$

La formula (5) rappresenta l'equazione di Zick per la deformazione delle sfere.

Bunk [3], osservando che nello stato plastico il coefficiente di Poisson è 0,5, ha modificato la (5) nella seguente:

$$\%S = 1{,}5 \times 100 \times \frac{T}{2R_F}(1 - R_F/R_0) = 75\frac{T}{R_F}(1 - R_F/R_0) \qquad (6)$$

[2] Il codice inglese e quello tedesco stabiliscono l'obbligo del trattamento termico con le seguenti disuguaglianze, ottenute imponendo un valore limite della deformazione:

- PD 5500: 2021 (per gli acciai al carbonio e al carbonio manganese vale la formula Ri<10t e per tutti gli altri acciai ferritici vale la formula Ri<18t con Ri raggio di curvatura interno e t spessore del cilindro, punto 4.2.2.3.1)
- AD 2000 Merkblatt: 2009 (HP 7/2 punto 2.1: per i cilindri e i segmenti sferici s>0,05Dm con Dm diametro medio e s spessore del cilindro)

3.1 Considerazioni sulla formula

a) La formula (6) vale per i prodotti sferici, ma in alcune norme è stata adottata anche per i fondi bombati non sferici (ellittici e torosferici) in un sol pezzo e per i fondi formati da segmenti a doppia curvatura (sferici e toroidali).

3.2 Obblighi normativi

L'impiego della formula (6) è obbligatorio per i prodotti a doppia curvatura (es. fondi) nelle seguenti norme:

- ASME VIII Div. 1: 2023 (*paragrafo UG-79 e tabella UG-79-1*)
- ASME VIII Div. 3: 2023 (*paragrafo KF-602 per gli acciai temprati e rinvenuti*)

L'impiego è altresì obbligatorio per il calcolo della deformazione dei segmenti sferici e tororoidali di fondi bombati in più pezzi nelle seguenti norme:

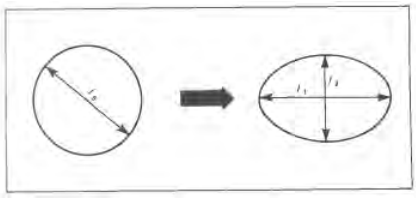
- ASME VIII Div. 2: 2023 (*paragrafo 6.1.2.1 e tabella 6.1*)
- CODAP 2005 Div. 2 (*parte F Fabrication*)

4. Formula della deformazione dei fondi curvi

La formula per il calcolo della deformazione dei fondi curvi in un sol pezzo, basata sul logaritmo del rapporto di imbutitura, è stata proposta da Bouhelier [4] e [5], basandosi sul testo di Hill [6] in cui si afferma che la deformazione equivalente in un punto qualsiasi della parte cilindrica di un disco imbutito è poco differente dal valore assoluto della deformazione circonferenziale.
Pertanto, Bouhelier [4] e [5] assume che la deformazione equivalente massima di un fondo curvo sia poco differente dalla deformazione massima circonferenziale al bordo del fondo stesso e propone le seguenti formule:

$$d = 100 \ln \frac{D_f}{D_e} \ [\%] \ per \ e \leq 10 \ mm \ e \ d = 100 \ln \left(\frac{D_f}{D_e - 2e} \right) \ [\%] \ per \ e > 10 \ mm \qquad (7)$$

con d deformazione percentuale massima di un fondo curvo o di una calotta sferica; e spessore; D_f diametro del disco iniziale; D_e diametro esterno del fondo.
Le formule (7) sono state verificate sperimentalmente da Marez e Bouhelier [7] per i fondi curvi; evidenziando altresì che per i fondi ottenuti in tutto o in parte per risbordatura la deformazione deve essere misurata.

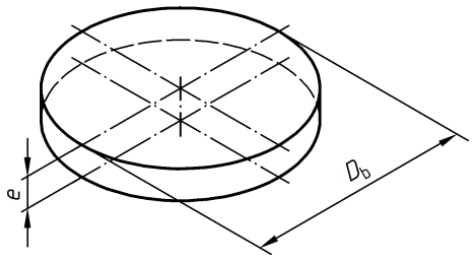


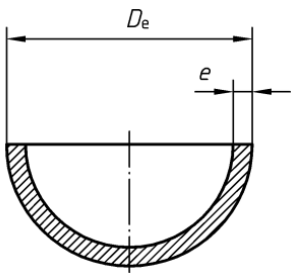
	ε_1	ε_2	$\bar{\varepsilon}$
Zône du pôle du fond	⩽ 0,04	⩽ 0,04	⩽ 0,04
Début du rayon de carre	0,04	− 0,04	0,04
Centre du rayon de carre	0,095	− 0,105	0,10
Début du bord droit	0,20	− 0,17	0,19
Bord du fond	0,21	− 0,22	0,22

Deformazione del cerchio in ellisse	Deformazioni misurate su un fondo ellittico diametro 1000 mm e spessore 7 mm

Figura 2. Deformazioni di un cerchio

La figura 2, tratta da [4], rappresenta le deformazioni di un cerchio tracciato su un disco prima dell'imbutitura per formare un fondo ellittico. Si nota che: a) nella zona del polo il cerchio subisce un allungamento uguale nelle due direzioni b) le deformazioni aumentano dal polo verso il bordo del fondo e sono di segno opposto c) i cerchi si trasformano in ellissi.
Premesso quanto sopra, si procede alla derivazione della formula per il calcolo della deformazione dei fondi curvi.
Siano D_b ed e rispettivamente il diametro iniziale o intermedio e lo spessore di un disco metallico e sia D_e il diametro esterno del fondo curvo da esso ottenuto, vedi figura 3 tratta dalla norma EN 13445-4: 2021.





Disco inziale	Fondo finale

Figura 3. Fondo ottenuto da disco

Si può dimostrare [4] e [5] che la massima deformazione, conseguente alla formatura, si verifica in corrispondenza della circonferenza del bordo del disco iniziale.

La deformazione ingegneristica della circonferenza del bordo F_i è data dalla seguente espressione, con l_f lunghezza finale e l_i lunghezza iniziale:

$$F_i = \frac{l_f - l_i}{l_i} = \frac{\pi(D_e - 2e) - \pi D_b}{\pi D_b} = \frac{(D_e - 2e) - D_b}{D_b} < 0$$

La deformazione è negativa, come era prevedibile, in quanto la circonferenza iniziale subisce una diminuzione di lunghezza.
La deformazione logaritmica della circonferenza del bordo F, che fornisce un valore più accurato per grandi deformazioni, quali sono quelle plastiche, è data dalla seguente relazione:

$$F = \ln\frac{l_f}{l_i} = \ln\frac{\pi(D_e - 2e)}{\pi D_b} = \ln\frac{D_e - 2e}{D_b} < 0 \qquad (8)$$

Si ritrova, anche qui, una deformazione negativa, essendo minore di uno l'argomento del logaritmo naturale.
Nelle norme relative alle attrezzature a pressione, i valori che determinano l'obbligatorietà del trattamento termico dopo formatura sono espressi da numeri positivi e in forma percentuale, tramite l'espressione

$$F = 100 \ln\frac{D_b}{D_e - 2e} \ [\%] \qquad (9)$$

che si ottiene dalla (8), invertendo l'argomento del logaritmo, e moltiplicando per 100.

4.1 Considerazioni sulla formula

a) La (9) riguarda la deformazione della circonferenza esterna del disco di partenza che si è contratta nella direzione circonferenziale; in effetti, la deformazione reale è di tipo triassiale, come si vedrà nel paragrafo 6.
b) La Raccolta M rev.1995 ed.1999, in assenza del valore del diametro del prodotto grezzo D_b indica (punto M.13.B.2.1) che lo stesso può essere assunto pari a:
   $D_b = 1{,}21D_e$ per fondi ellittici o torosferici
   $D_b = 1{,}57D_e$ per fondi sferici
   $D_b = 2Rarcsin(0{,}5D_e/R)$ per le calotte sferiche, essendo R il raggio interno della calotta.
   Al riguardo, si osserva che:
   - $D_b = 1{,}21D_e$ rappresenta la lunghezza di una semiellisse con asse maggiore pari a D_e e rapporto 2:1 tra gli assi e quindi la formula trascura la lunghezza del colletto; ciò comporta una sottostima del diametro iniziale per spessori elevati, ma i valori che si ottengono sono comunque superiori al 19%, come si evince applicando la formula per un valore dello spessore e trascurabile rispetto D_e, ossia $100 \ln(1{,}21D_e/D_e) = 19\%$.

- $D_b = 1{,}57D_e$ rappresenta la lunghezza di una semicirconferenza con diametro pari a D_e; anche in questo caso, per quanto detto sopra, i valori che si ottengono sono comunque superiori al 45%.
- $D_b = 2Rarcsin(0{,}5D_e/R)$ rappresenta la lunghezza di una calotta sferica di raggio R e corda D_e

c) Utilizzando la formula (9), tutti i fondi sferici, ellittici e torosferici di acciaio non austenitico e formati a freddo devono essere trattati termicamente in quanto la deformazione supera il 5% fissato dalle norme, salvo casi particolari previsti nelle norme stesse (vedi ad es. EN 13445-4: 2021 tabella 10.4-1). Per le calotte sferiche l'obbligo del trattamento termico dipende dalle dimensioni.

4.2 Obblighi Normativi

Per il calcolo della deformazione dei fondi curvi in un sol pezzo e, in generale, per i prodotti circolari in un sol pezzo a doppia curvatura e per tutti i tipi di processi di formatura, l'impiego della formula logaritmica (9) è obbligatorio nelle seguenti norme:

- EN 13445-4: 2021 (*punto 10.2.1 - formula 10.2-1*)
- ISPESL Raccolta M rev.1995 ed.1999 (*punto M.13.B.2.1 - formula 2.1*)
- ASME VIII Div. 2: 2023 (*paragrafo 6.1.2.1 e tabella 6.1*)
- CODAP 2005 Div. 2 (*vedi parte F Fabrication per le membrature di nickel e sue leghe, e di titanio e sue leghe, e spessori maggiori di 10 mm; mentre per spessori minori o uguali a 10 dei materiali anzidetti e per i materiali ferrosi nonché l'alluminio e sue leghe, si applica la formula* $F = 100\, ln\frac{D_b}{D_e}$).

5. Formula della deformazione dei tubi curvati

Con riferimento alla figura 4, tratta da [8], la massima deformazione del tubo si manifesta all'estradosso della curva e si calcola come segue:

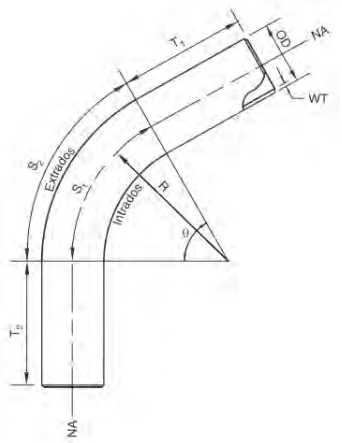
	R = raggio di curvatura θ = angolo di curvatura OD = diametro esterno NA = asse neutro S_1 = lunghezza della curva all'estradosso S_2 = lunghezza della curva all'asse neutro *T_1 e T_2 = lunghezze delle tangenti* *W_T = spessore del tubo* Deformazione = (S_2 – S_1)/ S_1= [(R + OD/2) – R]/R
Tubo curvato	Significato dei simboli

Figura 4. Deformazione di un tubo curvato

$$Deformazione\ Estradosso = \frac{S_2 - S_1}{S_1} = \frac{(R + OD/2)\theta - R\theta}{R\theta} = \frac{OD/2}{R}$$

da cui, indicata con F la deformazione all'estradosso, posto $OD = D_e$ e moltiplicando per 100, si ottiene la formula per la deformazione percentuale dei tubi curvati:

$$F = 100\frac{D_e}{2R}\ [\%] \qquad (10)$$

5.1 Obblighi normativi

La (10) è obbligatoria nelle seguenti norme:

- EN 13445-4: 2021 (*punto 10.2.4 - formula 10.2-4*)
- ISPESL Raccolta M rev.1995 ed.1999 (*punto M.13.B.2 - formula 2.4*)
- ASME VIII Div. 2: 2023 *(paragrafi 6.1.2.1 e tabella 6.1)*, in cui è presente anche la seguente formula che calcola la deformazione nella direzione dello spessore sulla base delle misure degli spessori prima e dopo la formatura:

  $$F = 100\frac{t_A - t_B}{t_A}\ [\%] \qquad (11)$$

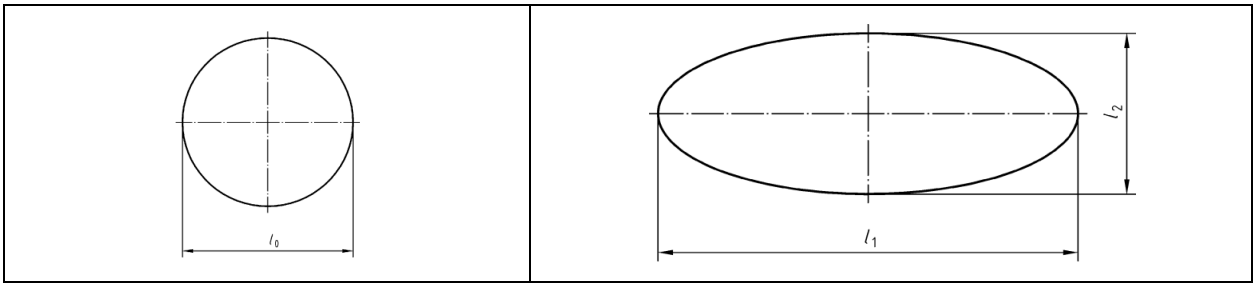
  dove t_A è il valore medio degli spessori misurati del tubo e t_B è il valore minimo dello spessore misurato del tubo all'estradosso della curva. La deformazione che determina il trattamento termico è la maggiore tra quelle ricavate con le formule (10) e (11).
- ASME B31.1: 2022 (*paragrafo 129.3 punto 129.3.4.1)*
- ASME I: 2023 (*paragrafo PG 19 solo per materiali austenitici*)

6. Formula della deformazione di altri tipi di prodotti

Per il calcolo della deformazione di prodotti di tipo diverso da quelli visti sopra, le norme EN 13445-4: 2021, Racc. M rev.1995 Ed.1999 e CODAP 2005 Div. 2 hanno introdotto la formula seguente:

$$F = \frac{200}{\sqrt{3}}\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_1F_2}\ [\%] \qquad (12)$$

in cui $F_1 = \ln\frac{l_1}{l_0}$, $F_2 = \ln\frac{l_2}{l_0}$, con ln logaritmo naturale.
l_0 è il diametro di un cerchio tracciato sulla lamiera prima della formatura nell'area in cui si ha la massima deformazione. Dopo la deformazione, il cerchio di diametro l_0 si trasforma in una ellisse con asse maggiore l_1 e asse minore l_2.



Cerchio di diametro l_0 tracciato sul prodotto iniziale	Asse maggiore l_1 e minore l_2 misurati sul prodotto formato

Figura 5. Lunghezze per il calcolo della deformazione di altri tipi di prodotti

La figura 5, tratta dalla EN13445-4: 2021, chiarisce il significato delle lunghezze sopra definite.
Nel seguito, si espone la derivazione della formula (12), sulla base delle pubblicazioni di Bouhelier [4] e [5].
Ricordando che la deformazione equivalente secondo Von Mises, nello stato plastico, è data da (vedi appendice):

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \tag{13}$$

nella quale le deformazioni nelle tre direzioni principali, ε_1 , ε_2 , ε_3 , avendo indicato con h e h_0 rispettivamente lo spessore iniziale e finale della lamiera, sono pari a:

$$\varepsilon_1 = \ln\frac{l_l}{l_0} \quad \varepsilon_2 = \ln\frac{l_2}{l_0} \quad \varepsilon_3 = \ln\frac{h}{h_0}$$

la (13), con l'ipotesi di conservazione del volume $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$, valida nella deformazione plastica, diventa:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1\varepsilon_2} \tag{14}$$

che, ponendo $\bar{\varepsilon} = F$ ed esprimendo la deformazione in percentuale, coincide con la (12).

6.1 Considerazioni sulla formula

a) La formula (14) è stata proposta da Bouhelier nel 1982 all'interno della pubblicazione [4] e meglio ribadita nel 1988 nella pubblicazione [5].
b) Essa è valida in generale e quindi applicabile ad ogni tipo di prodotto, in quanto la deformazione è ottenuta attraverso la misurazione di due deformazioni ortogonali tra loro e quindi principali; mentre la terza deformazione è legata alle prime due mediante la conservazione del volume nella deformazione plastica.
c) Bouhelier [4] eseguendo prove sperimentali sulla formatura di fondi e misurando le deformazioni reali, ricava che la deformazione massima equivalente corrisponde con ottima approssimazione a quella ottenuta con la formula (14).
d) Nella figura 6, tratta da Bouhelier [4], sono riportate le deformazioni dei cerchi tracciati su un disco iniziale prima dell'imbutitura a caldo. Nell'ingrandimento sono chiaramente visibili le ellissi in cui si sono deformati i cerchi, sempre più eccentriche verso il bordo del fondo.

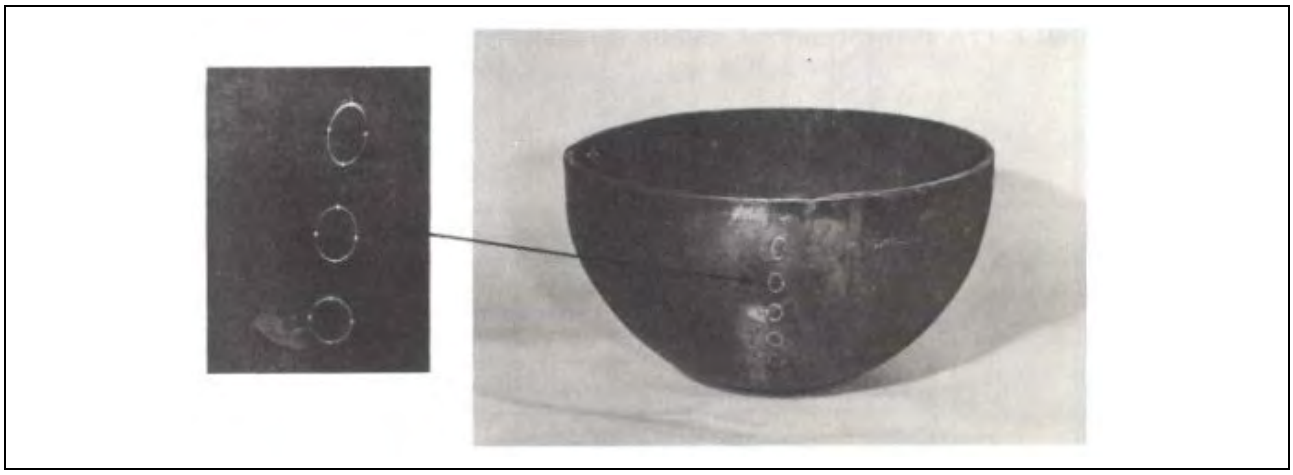


Figura 6. Deformazione dei cerchi tracciati sul disco iniziale prima dell'imbutitura

e) È evidente che nella formatura di membrature a doppia curvatura, sono presenti sia allungamenti che contrazioni delle fibre; in particolare, lungo i paralleli le fibre si accorciano e lungo i meridiani si allungano, e queste deformazioni aumentano dal polo all'equatore.

6.2 Obblighi Normativi

La formula appena derivata è obbligatoria nelle seguenti norme:

- EN 13445-4: 2021 (*punto 10.2.3 - formula 10.2-3*)
- ISPESL Raccolta M rev.1995 ed.1999 (*punto M.13.B.2 - formula 2.3*)
- CODAP 2005 Div. 2 (*vedi parte F Fabrication*)

7. Formula della deformazione dei segmenti sferici e toroidali

Per i segmenti sferici e toroidali di fondi sferici e torosferici in più pezzi, vedi figura 7 tratta da EN 13445-4: 2021, si utilizza la formula:

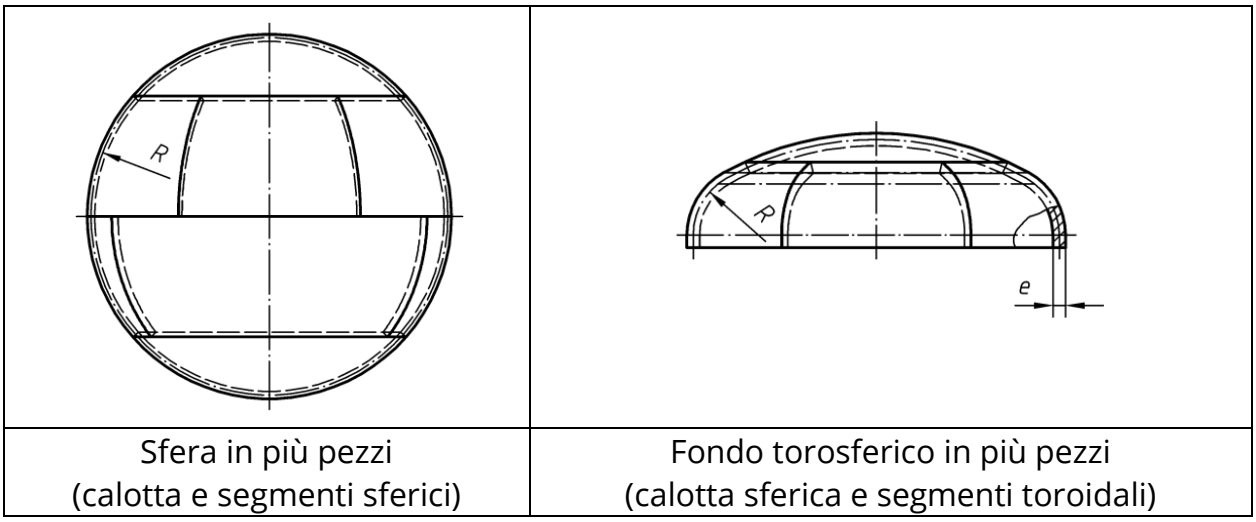
$$F = \frac{100e}{R}\ [\%] \qquad (15)$$

in cui

e è lo spessore del prodotto iniziale

R è il più piccolo raggio medio del segmento (raggio medio del segmento sferico oppure raggio medio del ginocchio del segmento toroidale di un fondo torosferico).

La derivazione della formula che segue, in assenza di specifiche indicazioni desunte dalla letteratura, è una deduzione degli autori che qui si espone.



Sfera in più pezzi (calotta e segmenti sferici)	Fondo torosferico in più pezzi (calotta sferica e segmenti toroidali)

Figura 7. Segmenti sferici e toroidali

Applicando la formula generale (12), valida per tutti i tipi prodotti, con l'ipotesi che le due deformazioni siano uguali e pari alla deformazione cilindrica, ossia $F_1 = F_2 = \frac{50e}{R}$ [%], si ottiene la relazione seguente, che coincide con la (15):

$$F = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{3F_1^2} = 2F_1 = 2\frac{50e}{R} = \frac{100e}{R}\ [\%]$$

7.1 Considerazioni sulla formula

a) Nelle norme prese in considerazione, la (15) è presente solo nella EN 13445-4: 2021 e nella Raccolta M rev.1995 ed.1999 dell'ISPESL. Nel CODAP 2005 Div. 2 e nelle ASME VIII-2: 2023 per il calcolo della deformazione di segmenti sferici e toroidali (membrature a doppia curva non assialsimmetriche) si impiega la formula già vista per i fondi sferici (6), che qui si riporta con la simbologia del CODAP:

$$\%d = \frac{75e}{R_m}\left(1 - \frac{R_m}{R_0}\right) \qquad (16)$$

b) La deformazione ottenuta con la formula (15) fornisce valori che superano del 33% quelli che risultano dalla (16).

7.2 Obblighi normativi

La formula appena derivata è obbligatoria nelle seguenti norme:

- EN 13445-4: 2021 (*punto 10.2.5 - formula 10.2-5*)
- ISPESL Raccolta M rev.1995 ed.1999 (*punto M.13.B.2 - formula 2.5*)

8. Discussione

Nella tabella 1 sono riassunte le formule prescritte nei codici esaminati per il calcolo della deformazione, con la simbologia della EN 13445-4 e della Racc. M rev. 1995.

Deformazione %	EN 13445-4	Racc. M rev. 95	CODAP 2005	ASME VIII-2	ASME VIII-1	ASME B31-1	ASME VIII-3
Cilindri e Coni Calandrati(1)	$F = \frac{50e}{R_m}\left(1 - \frac{R_m}{R_{m0}}\right)$						
Fondi Curvi in un sol pezzo(2)	$F = 100 \ln \frac{D_{b(x)}}{D_e - 2e}$				$F = \frac{75e}{R_m}\left(1 - \frac{R_m}{R_{m0}}\right)$		
Segmenti Sferici e	$F = \frac{100e}{R}$		$F = \frac{75e}{R_m}\left(1 - \frac{R_m}{R_{m0}}\right)$				
Tubi Curvati(3) (4)	$F = 100\frac{D_e}{2R}$						///
Altri Tipi di Prodotti	$F = \frac{200}{\sqrt{3}}\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_1F_2}$			////			
Note: (1) nelle PD 5500 e ASME I solo per acciai austenitici; nella ASME VIII-3 solo per acciai temprati e rinvenuti; (2) nella PD 5500 la formula logaritmica solo per gli acciai austenitici; (3) nella ASME I solo per acciai austenitici							

Tabella 1. Formule per il calcolo della deformazione nei codici

Premesso che l'obbligatorietà del trattamento termico dopo formatura a freddo per i prodotti piani di acciaio non austenitico si ha quando la deformazione supera il 5% (es. tabella 10.4.1 della EN 13445-4: 2021), dalla tabella 1 discendono le seguenti considerazioni distinte per tipologia di membratura:

a) Cilindri e Coni calandrati

La formula è la stessa in tutti i codici esaminati; pertanto, non vi sono differenze per l'obbligatorietà del trattamento termico dopo formatura a freddo e lo stesso è necessario quando $50e/R_m > 5$, ossia quando $e/D_m > 0{,}05 = 1/20$ che è pari al limite previsto dalla norma AD 2000 Merkblatt: 2009 capitolo HP 7/2 (D_m e D_i sono rispettivamente il diametro medio e quello interno del cilindro). Si nota che $e/D_i > 1/20$ rappresenta il criterio che distingue, convenzionalmente, i recipienti a spessore sottile da quelli a spessore grosso [9].

b) Fondi Curvi in un sol pezzo

Le norme europea, italiana, francese e il codice americano ASME VIII-2 prescrivono la formula (9) che dà risultati ampiamente superiori al 5%: per i fondi ellittici e torosferici si hanno valori superiori al 19% e per quelli sferici superiori al 45%, come si è visto al paragrafo 4.1 applicando le formule suggerite dalla Raccolta M rev. 1995. Anche per i fondi torosferici decinormali per i quali è più corretto assumere $D_b = 1{,}11D_e$ si ottiene comunque una deformazione superiore al 10%. Per le calotte sferiche la deformazione assume valori sia inferiori che superiori al 5%, in dipendenza delle dimensioni della lunghezza dell'arco e della corda. Quindi, ad

eccezione delle calotte sferiche e tranne i casi previsti nelle norme, i fondi sferici e torosferici in un sol pezzo formati a freddo devono subire un trattamento termico atto a ripristinare le caratteristiche meccaniche del materiale prima della formatura.
Per i codici americani ASME VIII-1, VIII-3 e 31-1, l'applicazione della formula (6) coincidente con la (16) dà risultati sia inferiori che superiori al 5%, e pertanto il trattamento termico non è sempre obbligatorio. Ad esempio, con le misure tratte da un catalogo commerciale, per un fondo semiellittico con $D_e = 2000\,mm$, raggio al ginocchio $r = 310\,mm$ e spessore $e = 20\,mm$, con l'applicazione della formula in questione si ottiene $F = 75 * \frac{20}{310} = 4{,}8\,\%$, mentre con spessore $e = 22\,mm$ si ottiene $F = 75 * \frac{22}{310} = 5{,}3\,\%$. Da quanto sopra, discende che la formula logaritmica (9) per il calcolo della deformazione è più cautelativa della formula (6).
La PD 5500: 2021 (*punto 4.2.2.3.1*) obbliga al trattamento dopo formatura a freddo tutti i fondi curvi in acciaio ferritico, a meno che il fabbricante dimostri che le proprietà del materiale non sono significativamente alterate rispetto a quelle assunte in progetto.
La AD 2000 Merkblatt: 2009 (*HP 7/2 punto 2.3)* obbliga al trattamento dopo formatura a freddo tutti i fondi curvi, a meno che il fabbricante dimostri la capacità di resistenza alle sollecitazioni previste e ad eccezione di alcuni casi particolari.
c) Segmenti Sferici e Toroidali
Come evidenziato al paragrafo 7.1, la deformazione ottenuta con la formula (12) prevista dalla EN 13445-4 e dalla Racc. M rev.1995, supera del 33% quella che risulta dalla formula (16) del CODAP Div. 2 e delle ASME VIII-1; VIII-3 e B31.1.
d) Tubi curvati
Tutti i codici presi in esame calcolano la deformazione utilizzando la medesima relazione (10) tranne l'ASME VIII-3 che non prescrive formule specifiche; inoltre, l'ASME VIII-2, prevede una seconda formula il cui risultato deve essere confrontato con quello della (10), scegliendo il maggiore dei due.
Nella norma EN 13445-5 e nella Racc. M rev.1995, la deformazione massima per non effettuare il trattamento termico è data in maniera implicita (tabella 10.4.2 della EN 13445-4: 2021), ossia si prescrive che debba essere $R \geq 2{,}5\,D_e$ con D_e diametro esterno e R raggio di curvatura che equivale a una deformazione del 20%; infatti

$$R \geq 2{,}5\,D_e \quad 2R \geq 5\,D_e \quad \frac{D_e}{2R} \leq \frac{1}{5} = 0{,}20 = 20\%$$

La prescrizione precedente vale per tutti i diametri, mentre per diametri $D_e \leq 142\,mm$ vale la relazione $R \geq 1{,}3\,D_e$
e) Altri Tipi di Prodotti
Per tali prodotti, solo la norma EN 13445-4, la Raccolta M rev.1995 e il CODAP Div.2 prevedono una formula per calcolare la deformazione equivalente secondo Von Mises, previa misura di due deformazioni principali sulla superficie del pezzo iniziale. La deformazione così determinata è quella più aderente alla realtà, poiché lo stato di tensione e quello di deformazione in una attrezzatura cimentata dalla pressione è, in generale, triassiale.

9. Conclusioni

Sono state prese in esame le formule per il calcolo della deformazione, dopo formatura, di membrature metalliche costituenti le attrezzature a pressione.
Dopo aver analizzato il background delle suddette formule contenute nei codici di progettazione e fabbricazione nazionali, europei e internazionali, si è proceduto al confronto dei risultati nel caso dei fondi in un sol pezzo e in quello dei segmenti sferici e toroidali in quanto le norme prevedono relazioni differenti.
Sono risultate più conservative, ai fini dell'obbligatorietà del trattamento termico:

- per i fondi in un sol pezzo, le norme EN 13445-4, Racc. M rev. 95, CODAP 2005 e ASME VIII-2 rispetto ad ASME VIII-1, ASME VIII-3 e ASME 31-1;
- per i segmenti sferici e toroidali, le norme EN 13445-4, Racc. M rev. 95 rispetto a CODAP 2005, ASME VIII-1, ASME VIII-2, ASME VIII-3 e ASME 31-1.

Per i cilindri/coni e i tubi curvati la formula è la stessa per tutte le norme esaminate.
Per altri tipi di prodotti la formula è presente solo nella EN 13445-4 e nella Raccolta M Rev.1995 e nel CODAP 2005.

Appendice

La deformazione equivalente di Von Mises $\bar{\varepsilon}$ è quella deformazione che corrisponde alla tensione equivalente di Von Mises $\bar{\sigma}$, ossia:

$$\bar{\sigma} = E\bar{\varepsilon} \tag{1a}$$

Ricordando che la tensione equivalente di Von Mises è [10] e [11]:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \tag{2a}$$

e che le tensioni principali sono [12], con $m = 1/\nu$ ed $e = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$:

$$\sigma_1 = \frac{m}{m+1} E\left(\varepsilon_1 + \frac{e}{m-2}\right);\ \ \sigma_2 = \frac{m}{m+1} E\left(\varepsilon_2 + \frac{e}{m-2}\right);\ \sigma_3 = \frac{m}{m+1} E\left(\varepsilon_3 + \frac{e}{m-2}\right) \tag{3a}$$

Sostituendo le (3a) nella (2a) si trova:

$$\bar{\sigma} = \frac{m}{m+1} E \sqrt{\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}{2}} \tag{4a}$$

che, tenendo conto della (1a) e che $m = 1/\nu$, consente di scrivere:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{1+\nu} \sqrt{\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}{2}} \tag{5a}$$

Quest'ultima, essendo $\nu = 0{,}5$ nella deformazione plastica, diventa:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \tag{6a}$$

10. Bibliografia

[1] Carpenter, O.R. e Floyd, C., “Heat Treatment Of Carbon And Low Alloy Steels”, Welding Journal Research Suppl., 1957, Vol. 36 (2), pag. da 67 a 76.

[2] Zick, L.P., Chicago Bridge & Iron Co., Comunicazione Privata.

[3] Bunk, A..P., ”Sez. 3 – Fabbication and Environmental Considerations”, Welding Research Bullettin, 1971, Vol. 158, pag. da 4 a 14 e 36.

[4] Bouhelier, C., “Le Formage des Toles Fortes”, CETIM, Bayeux., 1982, pag. da 22 a 31.

[5] Bouhelier, C., “Chaudronnerie Lourde”, Techniques de l’Ingenieur, 1988, pag. da 17 a 18.

[6] Hill, R., “The Mathematical Theory of Plasticity”, Oxford University Press, New York., 1967, pag. da 282 a 287.

[7] Marez Y. e Bouhelier, C., “Determination des Deformation Engendrees par les Operation de Formage des Toles Epaisses”, CETIM, 1981, n. 72.

[8] Woods, G.E., e Baguley, R.B., “Pratical Guide to ASME B31.1 – Process Piping”, CASTI Publishing, Vol. 3, 1997, Alberta, pag. da 138 a 141.

[9] Vullo, V., “Circular Cylinders and Pressure Vessels”, Springer, Vol. 3, 2014, Roma, pag. da 1 a 3.

[10] Moss, D.R. e Basic, M., “Pressure Vessel Design Manual”, Elsevier, 2013, Great Britain, pag. da 3 a 7.

[11] Iurzolla, E., “Il Calcolo dei Recipienti a Pressione”, Libreria Cortina, 1981, Padova, pag. da 1 a 3.

[12] Belluzzi, O., “Scienza delle Costruzioni”, Vol. 3, Zanichelli, 1980, Bologna, pag. da 4 a 5.

Analisi descrittiva e verifica sperimentale delle catene di sicurezza (safety loops) a protezione di un generatore di vapore del termovalorizzatore di Acerra

P. Addonizio[1], E. Opromolla[1], N. Pedicini[1], L. Tassan Pagnochit[2], A. Baccichet[2], A. Cocchiaro[3]

[1] Inail - Uot di Napoli
[2] A2A Ambiente S.p.A.
[3] consulente A2A Ambiente S.p.A.

Abstract

Il Termovalorizzatore di Acerra è un impianto di recupero energetico dai rifiuti, progettato per produrre energia elettrica. È costituito da tre caldaie a tubi d'acqua per la produzione di vapore collegate ad un unico turbo-generatore.
L'impianto è controllato, oltre che da sistemi convenzionali di tipo meccanico, da un sistema DCS (Distributed Control System). Tale sistema rileva le condizioni di funzionamento delle singole sezioni dell'impianto regolando specifici parametri operativi per garantire il corretto funzionamento delle attrezzature.
Le protezioni da sovrappressione dei generatori di vapore sono realizzate con valvole ad azionamento diretto (PSV) e da catene di protezione software (safety loops) operanti nell'ambito del sistema DCS.
Nello specifico ogni catena di protezione software è un insieme costituito da: dispositivi di rilevazione di parametri operativi, trasmettitori di segnale, attuatori e PLC gestiti da specifico software.
Le logiche sono implementate con elevato grado di ridondanza al fine di garantirne l'affidabilità.
Alla stregua delle protezioni meccaniche anche i safety loops sono elencati tra le protezioni di caldaia denunciate dal fabbricante in fase di messa in servizio. Tali catene di protezione sono quindi soggette a verifiche periodiche di funzionamento.
Il presente lavoro intende descrivere le logiche di funzionamento di tali protezioni software e le relative procedure di verifica.

Keywords: energia elettrica, verifica, sovrappressione.

1. Configurazione del generatore

La caldaia a vapore è costituita da quattro passaggi fumi verticali. I fumi lasciano la camera di combustione primaria e cedono parte del loro calore in due passaggi radianti. Nel secondo passaggio fumi, addizionali pannelli scambianti servono quali surriscaldatori finali del vapore con temperature fino a 480 °C in esercizio e 507 °C

di progetto. La temperatura dei fumi scende fino a circa 700 °C prima dell'ingresso nel terzo passaggio nel quale sono posizionate le superfici di scambio per convezione (banchi surriscaldatori addizionali SH1). Nel quarto passaggio fumi sono posizionati i banchi economizzatori.
La temperatura dei fumi in uscita dalla caldaia è compresa tra 170 ÷190 °C in relazione al carico termico ed al grado di sporcamento (*fouling*) delle superfici di scambio.
Le pareti laterali dei primi tre passaggi sono costitute da tubi membranati evaporatori. Nel quarto passaggio le pareti sono costituite da piastre in acciaio.
La caldaia è sostenuta dall'alto da una struttura in acciaio che permette la dilatazione termica in verticale.
L'acqua di alimento è preriscaldata nell'economizzatore, fatta evaporare nelle pareti membranate e surriscaldata nel surriscaldatore, come nel seguito descritto.
L'acqua di alimento è immessa in caldaia attraverso l'economizzatore situato nel quarto passaggio in controcorrente rispetto ai fumi. Una parte della portata d'acqua di alimento, variabile a seconda delle esigenze di processo, viene deviata attraverso uno scambiatore di calore a serpentina inserito all'interno del corpo cilindrico, dove viene preriscaldata, per poi ritornare nel flusso principale dell'acqua di alimento a monte dell'economizzatore. Questa configurazione del circuito dell'acqua di alimento serve a controllare la temperatura dei fumi all'uscita della caldaia, mantenendola entro un prefissato intervallo al variare delle condizioni di carico e del grado di sporcamento delle superfici di scambio.
L'acqua preriscaldata fluisce, tramite tubazioni collegate al collettore di uscita dell'economizzatore, al corpo cilindrico, dal quale, attraverso i tubi di caduta esterni ("*downcomers*") e successive tubazioni di collegamento, viene distribuita nei tubi vaporizzanti delle pareti membranate.
In tali tubazioni si forma una miscela liquido/vapore che ritorna al corpo cilindrico per circolazione naturale (ossia per la differenza di densità tra il fluido circolante nei tubi di caduta esterni e quello all'interno dei tubi di risalita riscaldati). Nel corpo cilindrico avviene la separazione acqua-vapore.
Il vapore saturo fluisce dal corpo cilindrico al surriscaldatore 1, costituito da 5 sezioni di tubi di scambio convettivi disposti all'ingresso (SH 1.0) del terzo passaggio fumi, nel secondo passaggio fumi (SH1.05) ed all'interno del terzo passaggio fumi (SH1.1, SH1.2, SH1.3).
Dal surriscaldatore 1.3 il vapore passa al 3 (SH3), con attemperamenti intermedi.
Gli attemperatori consentono di mantenere costante la temperatura del vapore anche in caso di cambiamenti nel carico termico o cambiamenti nello scambio termico dovuti al *fouling* delle superfici di scambio.
I surriscaldatori 1.05 e 3 sono costituiti da file di tubi ("pannelli") verticali, sospesi all'interno del secondo passaggio fumi, protetti esternamente da rivestimento refrattario ed Inconel 625.

La caldaia e la linea vapore ad alta pressione sono protette da due valvole di sicurezza, situate sulla sommità del corpo cilindrico e sull'uscita del surriscaldatore.
Durante l'avviamento della caldaia il valore permesso di variazione della pressione è controllato da valvola di start-up di controllo e il vapore prodotto viene scaricato in atmosfera attraverso un silenziatore di avviamento.
Durante condizioni normali di esercizio, il vapore di alta pressione è inviato alla turbina e la valvola di controllo dell'ammissione vapore in turbina regola la pressione di esercizio.

2. Il sistema DCS

Le caldaie di un generatore di vapore sono dispositivi complessi con una varietà di sistemi di sicurezza integrati nel sistema di controllo DCS. Tali sistemi automatici di controllo sono progettati per prevenire danni alle persone e alle strutture. Le logiche di controllo monitorano costantemente le condizioni operative del sistema per garantire un funzionamento sicuro. In un generatore di vapore come il Termovalorizzatore di Acerra le condizioni operative dei parametri quali pressione, temperatura, livello dell'acqua, velocità di flusso del vapore, condizioni chimiche dell'acqua, portata aria primaria e secondaria, pressione in camera di combustione e relativa temperatura, ed altri parametri, sono monitorate in continuo dal sistema DCS. Se i sensori rilevano deviazioni dei parametri operativi rispetto a quelli impostati, il DCS interviene con sistemi di controllo in retroazione, attuando interventi correttivi per mantenere il sistema in condizioni di sicurezza.
I componenti che costituiscono il DCS hanno un alto grado di affidabilità allo scopo di assicurare, anche in caso di guasto interno, la sicurezza delle macchine principali dell'impianto e del personale d'esercizio.
La logica di protezione viene eseguita tramite processori in configurazione ridondante.
Durante lo sviluppo dell' ingegneria di base e di dettaglio del sistema di controllo, sono state valutate le precauzioni necessarie per limitare le conseguenze dei guasti singoli sui componenti del sistema, ed evitare che avvenga un altro guasto prima che il precedente sia stato rilevato e riparato.
Adeguate ridondanze vengono adottate sui circuiti e componenti particolarmente critici.
La sicurezza dell' impianto e degli equipaggiamenti viene assicurata dalle seguenti scelte funzionali:

- Tutti i dispositivi di protezione sono operativi, indipendentemente dal modo di funzionamento (automatico o manuale).
- Le protezioni sono, per quanto possibile, funzionalmente e fisicamente segregate allo scopo di minimizzare il rischio di propagazione del guasto.
- Tutte le protezioni di rilevante importanza, sono basate sulla logica due su tre o uno su due.

- In generale, i segnali dal campo sono acquisiti usando strumenti dedicati a scopi di protezione e specificamente certificati (trasmettitori analogici o elementi primari d'allarme come livellostati, flussostati, termostati ecc., se accettati).
- I segnali di blocco che devono essere scambiati tra sistemi di protezione diversi (es. forno e caldaia) sono realizzati per via cablata.
- I segnali di protezione digitali sono generati dall'apertura di contatti di relè normalmente eccitati relativi alle schede di uscite digitali.
- Nella Sala Controllo sono previsti pulsanti d'emergenza per funzioni di blocco delle parti d'impianto più critiche (Caldaie, turbina a vapore, alternatore ecc.).

Relativamente alle linee forno e caldaia, il DCS effettua interventi di arresto di pre-emergenza, senza giungere al blocco totale dell' impianto, sulla base di valori di primo intervento dei segnali di controllo e supervisione provenienti dal campo.

3. Safety loops

In aggiunta alle logiche di controllo, che mantengono i parametri operativi all'interno di intervalli prestabiliti dall'operatore, il sistema DCS implementa ulteriori logiche di controllo, dette "safety loops" che bloccano il processo di combustione o singoli sistemi, se i parametri operativi sopra menzionati superano dei limiti prefissati.

Tale sistema di sicurezza è indipendente da quello di regolazione ed è costituito da un sistema certificato di protezione indipendente (PLC-failsafe).

Questo sistema interviene a valori di secondo intervento delle variabili di processo ritenute essenziali per la salvaguardia dell'impianto e del personale d'esercizio.

Il sistema di protezione impiega elementi primari d'allarme (pressostati, livellostati, ecc.) separati da quelli utilizzati per compiti di regolazione ed ha il compito di:

- Proteggere le linee forno-caldaia-depurazione fumi.
- Controllare eventuali valvole generali di blocco combustibile.

Questo PLC "failsafe" è interfacciato con il Sistema di Controllo Distribuito (DCS) nel modo seguente:

- Tramite linea seriale bidirezionale ridondante, per assicurare le funzioni di supervisione.
- Tramite via cablata per segnali di particolare importanza (es. comandi di blocco e relative risposte ecc.).
- Tramite via cablata verso il campo.

E' inoltre collegato, sempre per via cablata, con i PLC dedicati al controllo dei singoli bruciatori per lo scambio dei segnali relativi alla sicurezza generale (es. comandi di blocco e relative risposte).

I safety loops intervengono alla stregua di un dispositivo di sicurezza quando le logiche di controllo del DCS non hanno potuto mantenere i parametri monitorati all'interno degli intervalli massimi ammessi a seguito di un malfunzionamento o manovre manuali degli operatori.

I “safety loops” sono delle protezioni di caldaia realizzate per via Software ed in quanto tali sono denunciati quali protezioni del generatore ai sensi del DM 329/04. Per garantire il funzionamento ottimale dei safety loops, è fondamentale eseguire regolarmente la manutenzione ed i test di funzionamento come previsto dal DM 329/04 e dal D.Lgs. 81/2008.
I sensori, le valvole, le pompe e altri componenti chiave devono essere ispezionati e testati per assicurare che rispondano correttamente quando necessario. La frequenza di queste operazioni di manutenzione e test dipende da vari fattori, tra cui il tipo di generatore di vapore, il suo utilizzo, le specifiche operative le norme tecniche e le leggi.
Secondo il D.Lgs. 81/2008, l'obbligo di garantire la sicurezza dei lavoratori ricade sul datore di lavoro. Questo comprende la messa a punto e la manutenzione dei dispositivi di sicurezza necessari per prevenire incidenti sul lavoro. In un contesto industriale che utilizza un generatore di vapore, i safety loops svolgono un ruolo fondamentale in questo aspetto.
La verifica degli accessori di sicurezza del generatore di Acerra è prevista con periodicità biennale.
Ogni generatore del Termovalorizzatore di Acerra è dotato di 11 protezioni software (safety loops). Nel seguito vengono presentate le sequenze di intervento, le reazioni del sistema ed i metodi di verifica per le principali protezioni.

4. Protezione 1.1 - Basso livello acqua corpo cilindrico

La protezione interviene quando il livello acqua corpo cilindrico risulta <=-120mm.
Il livello acqua del corpo cilindrico viene considerato <=-120mm quando 2/3 dei TAG dei livellostati sottoelencati non sono attivi
A1HDA10CL101
A1HDA10CL102
A1HDA10CL103
L’attivazione di tale protezione determina lo spegnimento e inibizione alla partenza di:

- ventilatori aria primaria
- ventilatori aria secondaria regolata
- ventilatori aria secondaria non regolata
- bruciatore a gasolio dx
- bruciatore a gasolio sx
- bruciatori DeNOx

La verifica della protezione viene eseguita abbassando manualmente il livello del corpo cilindrico e verificando l’intervento della protezione al raggiungimento di -120mm.
Nella figura successiva è rappresentato lo stato del livello acqua prima dell’inizio prova e la condizione di regolare esercizio dei ventilatori e bruciatori ausiliari.

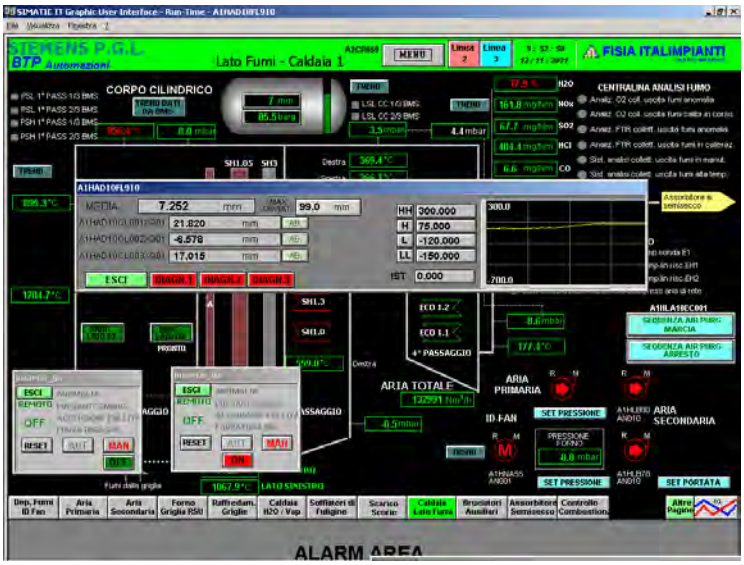


Figura 1. Livello Corpo cilindrico prima dell'intervento della protezione

Si procede all'abbassamento manuale del livello acqua causando l'intervento della protezione.
Nella figura successiva si vede il livello medio rilevato a -171mm e l'intervento di 2/3 dei livellostati corpo cilindrico (led rosso a destra del corpo cilindrico LSL CC 2/3 BMS)

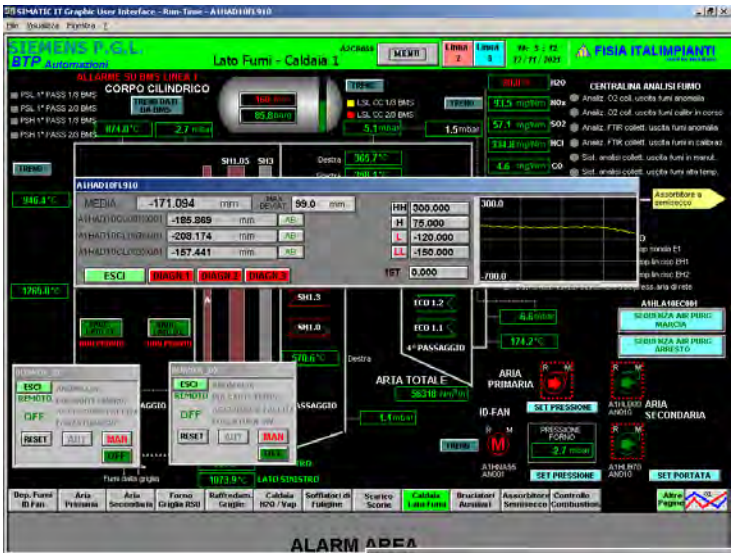


Figura 2. Intervento della protezione

Il safety loop ha prodotto, come previsto, il blocco dei ventilatori aria primaria, dei ventilatori aria secondaria regolata, dei ventilatori aria secondaria non regolata, dei bruciatori di gasolio destro e sinistro, e del bruciatore DENOX. Il ventilatore di estrazione fumi (ID fan) viene lasciato in esercizio per evacuare i fumi della combustione che rallenta in quanto non è alimentata dall'aria comburente ma non si interrompe completamente.

La ripartenza della caldaia può avvenire solo dopo aver identificato ed eliminato la causa dell'intervento per poi procedere al reset manuale, da parte di un operatore, dei bruciatori di gasolio e degli altri sistemi ausiliari.

5. Protezione 1.3.1 – Rischio esplosione del generatore in accensione

L'accensione a freddo del generatore avviene con l'ausilio di bruciatori di gasolio che nebulizzano ed innescano il combustibile all'interno della camera di combustione.
All'interno della camera di combustione potrebbero essere tuttavia presenti gas combustibili dovuti precedenti processi di combustione del rifiuto oppure dovuti a precedenti accensioni fallite.
Per evitare il rischio dovuto all'accensione di gas combustibili in quantità eccessiva è necessario realizzare la preventilazione del generatore prima dell'accensione.
La preventilazione (purging) elimina eventuali gas combustibili presenti in caldaia e consente l'accensione dei bruciatori con l'esatta quantità di gasolio prevista da progetto.
La sequenza automatica di avviamento eseguita dal DCS aumenta la portata d'aria ed effettua i successivi passaggi.
Il safety loop verifica che il purging venga eseguito con una portata d'aria, primaria e secondaria, sufficiente a realizzare il ricambio completo di 3 volte il volume d'aria della caldaia e della linea fumi nel tempo limite di 20 minuti.
Se tale portata d'aria non raggiunge entro 600 secondi la portata minima richiesta, fissata in 84000 Nm^3/h, il processo si interrompe e, eliminate le cause del malfunzionamento, bisogna far ripartire dall'inizio la sequenza automatica di accensione del generatore.

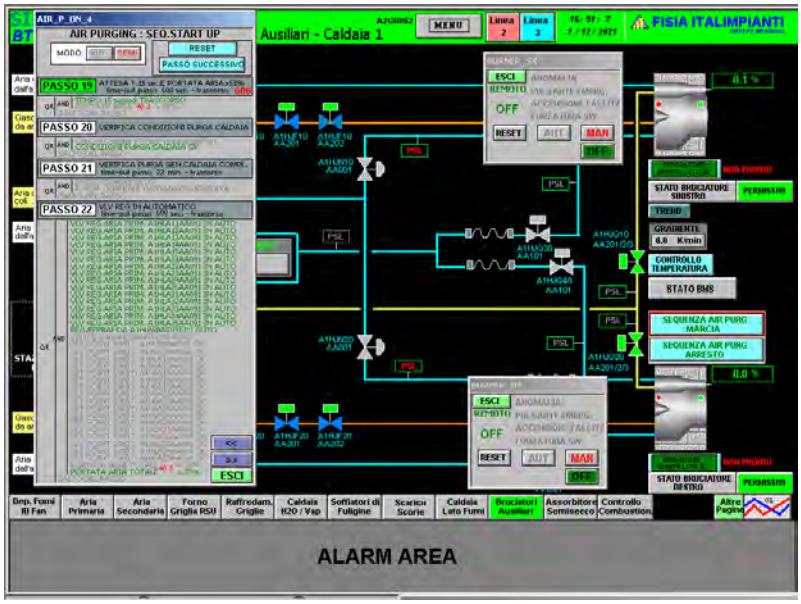


Figura 3. Portata d'aria purging non sufficiente

Nella figura precedente, allo scadere del time-out di 600 sec, la portata d'aria non ha raggiunto il valore prescritto ed il processo di avviamento è stato interrotto e bloccato dalla protezione software che inibisce l'accensione dei bruciatori. Si noti il "non pronto" in corrispondenza dei bruciatori destro e sinistro. Tali bruciatori devono essere resettati manualmente da operatore in campo.

6. Protezione 1.3.2 – Rischio esplosione del generatore in accensione

Tale protezione è correlata alla precedente e verifica che sia stata eseguita la preventilazione completa del generatore.
Allo scadere del tempo previsto di 20 min, se la ventilazione è stata completata il sistema abilita l'accensione dei bruciatori come da figura successiva.

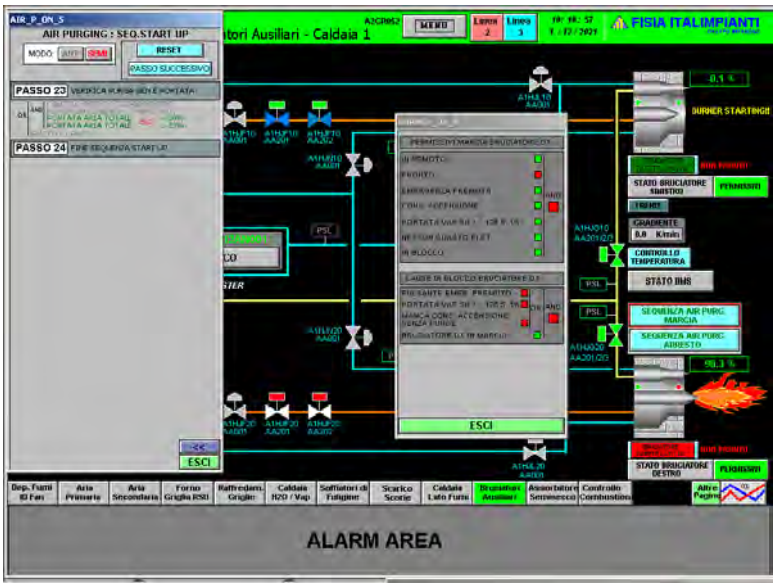


Figura 4. Abilitazione ed accensione bruciatori

7. Protezione 2.2.1 – Doppio fallimento accensione bruciatori

Durante la fase di accensione del generatore è consentito solamente un doppio fallimento di accensione dei bruciatori senza ripetere la fase di purging del boiler.
Eventuali ulteriori accensioni fallite lascerebbero all'interno del generatore una eccessiva quantità di combustibile.
Tale protezione inibisce l'accensione dopo il fallimento di due accensioni dei bruciatori.
Per provare nuovamente l'accensione del bruciatore è necessario far ripartire la sequenza di avviamento e completare la sequenza di purging.
Tale protezione è attiva per temperature in camera di combustione inferiori a 550 °C. Il progettista ha ritenuto che per temperature superiori non vi possano essere miscele incombuste perché esse verrebbero innescate dalla temperatura.
Per verificare tale "safety loops" viene chiusa manualmente la valvola di alimentazione gasolio e viene avviata la sequenza di start del generatore.

Il doppio fallimento dell'accensione determina il "non pronto" dei bruciatori.

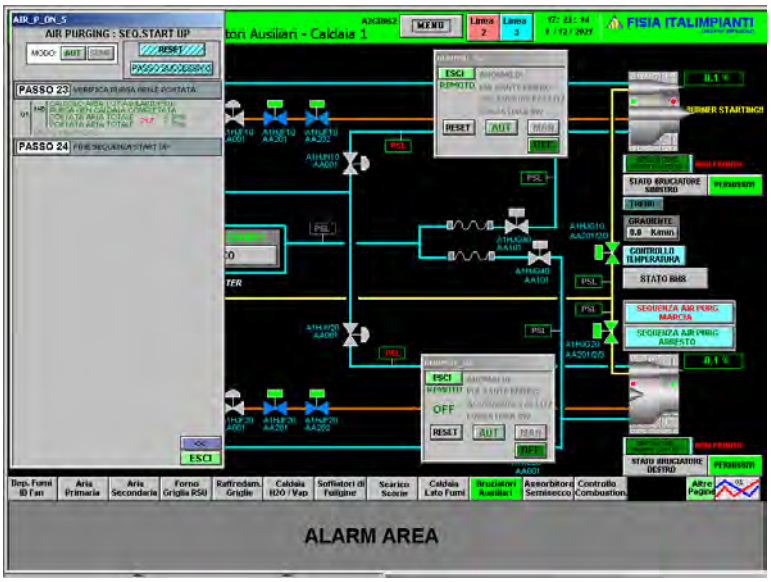


Figura 5. Prova accensione bruciatore sinistro

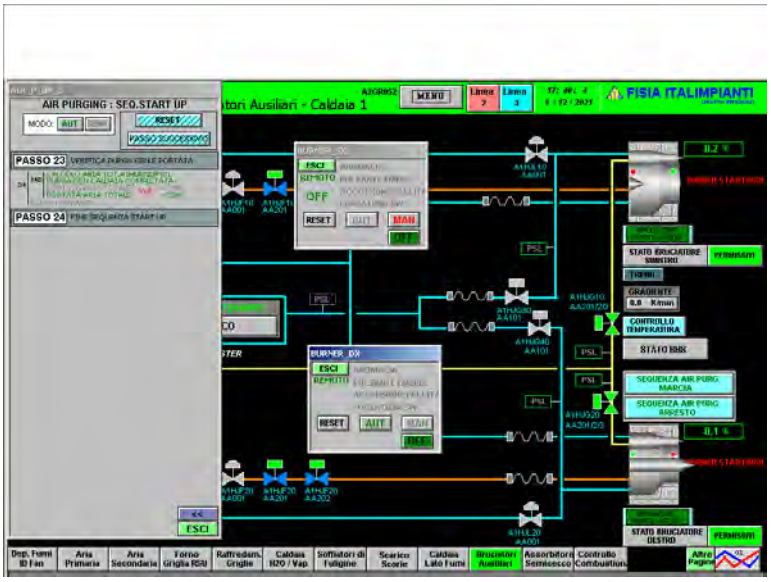


Figura 6. Prova accensione bruciatore destro

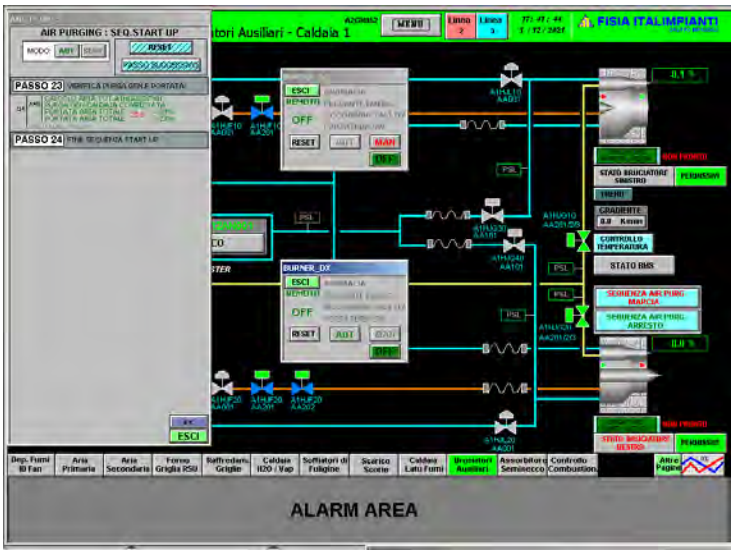


Figura 7. Fallimento e “non pronto” bruciatori

8. Protezione 2.3.2– Bassa pressione in camera di combustione

La protezione interviene quando la pressione in camera di combustione è <-10mbar.
La pressione viene considerata <-10mbar se 2/3 dei pressostati sottoelencati segnalano tale condizione
A2HBK10CP102
A2HBK10CP104
A2HBK10CP106
L’attivazione della condizione determina lo spegnimento e l’inibizione alla partenza di:

- ventilatori aria primaria
- ventilatori aria secondaria regolata
- ventilatori aria secondaria non regolata
- ventilatore ID-FAN
- bruciatore a gasolio dx
- bruciatore a gasolio sx
- bruciatori DeNOx

La prova viene eseguita simulando con una specifica apparecchiatura una pressione inferiore a -10mbar su due dei tre pressostati.

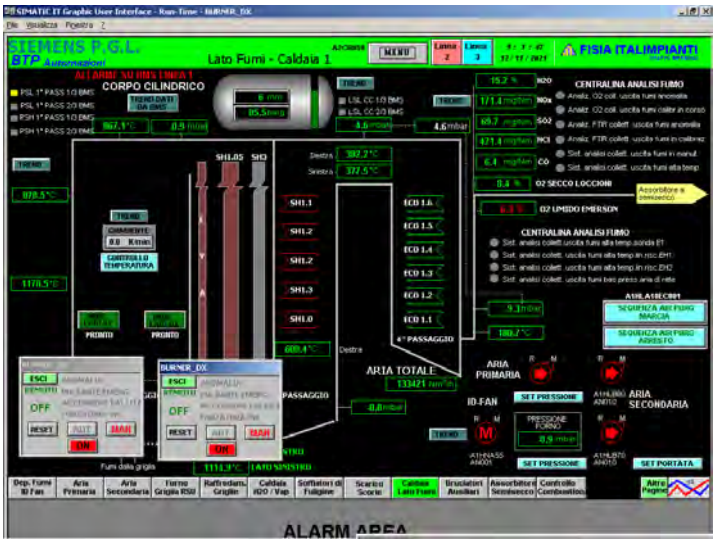


Figura 8. Attivazione di un solo pressostato di minima

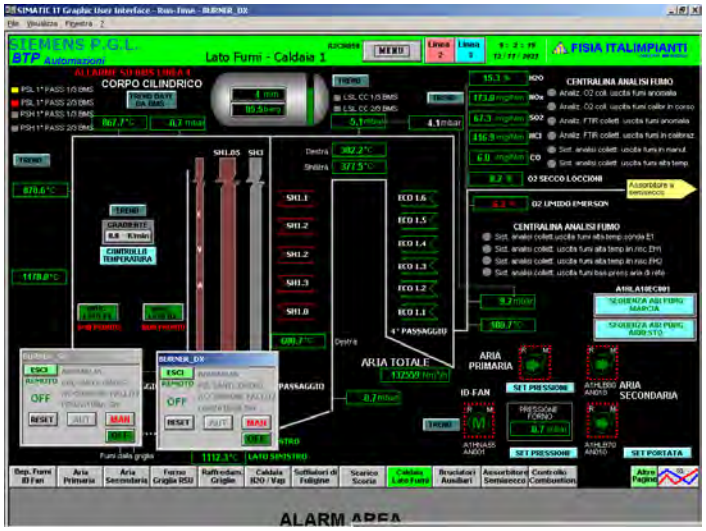


Figura 9. Attivazione di un secondo pressostato di minima

A seguito dell'attivazione del segnale di bassa pressione di due sensori su tre si ottiene il blocco dei ventilatori aria primaria e secondaria, ID fan, DENOX e bruciatori come previsto dalla procedura.

9. Protezione 2.3.3– Alta pressione in camera di combustione

La protezione interviene quando la pressione in camera di combustione è superiore a 10mbar. Tale condizione viene realizzata con l'intervento di due pressostati dei tre di seguito indicati per un tempo superiore a 5 sec.:
A2HBK10CP101
A2HBK10CP103
A2HBK10CP105
L'attivazione della protezione determina lo spegnimento ed inibizione alla partenza di:

- ventilatori aria primaria
- ventilatori aria secondaria regolata
- ventilatori aria secondaria non regolata
- bruciatore a gasolio dx
- bruciatore a gasolio sx
- bruciatori DeNOx

La condizione di alta pressione viene indotta sui pressostati con un calibratore.

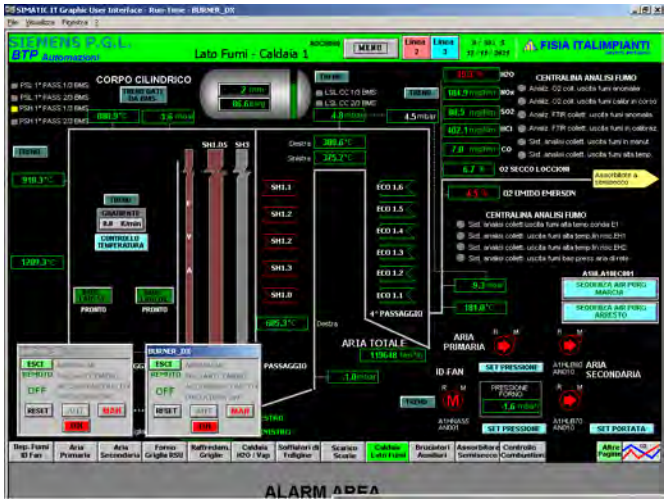


Figura 10. Attivazione di un primo pressostato di massima

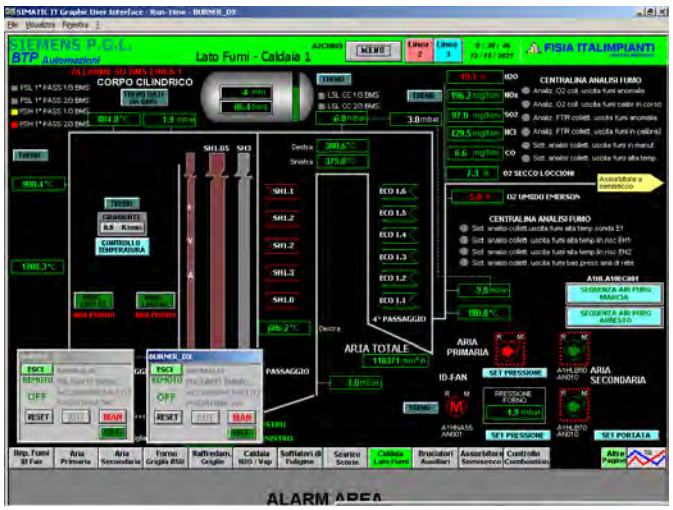


Figura 11. Attivazione di un secondo pressostato di massima

L'attivazione del secondo pressostato di massima determina il blocco dei ventilatori aria primaria e secondaria, DENOX e bruciatori come previsto dalla procedura.

10. Conclusioni

Le catene di protezione software vengono denunciate all'atto della messa in servizio del generatore ed assumono il ruolo di accessori di sicurezza nei termini previsti dal DM 329/04 e D.Lgs. 81/2008.
Tali protezioni sono quindi soggette alle verifiche periodiche di funzionamento previste per legge con cadenza biennale.
Data la complessità delle verifiche da eseguire è importante che la procedura da seguire sia formalizzata per permettere una precisa esecuzione delle sequenze operative e verifica dei risultati attesi.
La relazione ha voluto presentare, in maniera sintetica, le principali procedure di verifica utilizzate presso un generatore del termovalorizzatore di Acerra.

11. Bibliografia

[1] Zaniboni L., Moretti D., Cocchiaro A. - Elenco degli accessori di sicurezza doc n. ACER-CER-01-D-MMA-M-EL-008, 2014, Documento interno A2A Ambiente S.p.a.

[2] Tassan P.L. Liccardo C, Cocchiaro A - Check list di controllo per verifica delle catene di sicurezza di caldaia 1, A1HAY02, 2021, Documento interno A2A Ambiente S.p.a.

[3] Zaniboni L., Moretti D., Cocchiaro A. – Relazione tecnica opere elettromeccaniche, doc n. ACER-CER-01-D-MMA-M-RT-001, 2014, Documento interno A2A Ambiente S.p.a.

[3] Zaniboni L., Moretti D., Cocchiaro A. – Relazione tecnica sulle catene di protezione realizzate via software, doc n. ACER-CER-01-D-MMA-M-RT-002, 2014, Documento interno A2A Ambiente S.p.a.

[4] Norma CEI EN IEC 62061:2022 Sicurezza del macchinario - Sicurezza funzionale dei sistemi di comando e controllo relativi alla sicurezza.

[5] Norma UNI EN ISO 13849-1:2016 Sicurezza del macchinario - Parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza - Parte 1: Principi generali per la progettazione

[6] Norma UNI EN 12952-2011

Innovazione tecnologica negli impianti di riscaldamento ad Acqua Calda: Telegestione degli impianti con sistemi di espansione a vaso prepressurizzato e Sistemi di sicurezza integrativi telegestiti

L. Carta, M. Maurino

Inail – Uot Cagliari

Abstract

La crescente diffusione dei sistemi di espansione a vaso prepressurizzato senza diaframma e il contestuale maggior interesse di un certo tipo di utenza specializzata verso una gestione sempre più automatizzata e remotizzata degli stessi, induce a ritenere che gli impianti termici del futuro e quelli già in corso di installazione siano orientati verso un sempre più ampio sviluppo dei sistemi di telegestione anche in combinazione con i sistemi di espansione citati.
In questa memoria si presenta lo studio di un progetto di aggiornamento di un impianto di riscaldamento caratterizzato da entrambi i sistemi tecnologici e sue possibili evoluzioni.
L'impianto di riferimento principale di tale studio è installato presso il Complesso universitario-ospedaliero di Monserrato (CA) ed è previsto un suo aggiornamento per la parte relativa alla telegestione. Lo sviluppo del lavoro di seguito illustrato è stato condotto con la collaborazione delle ditte Ely Sistemi SrL e Zetaesse Impianti Srl, che hanno provveduto all'installazione attuale dell'impianto di riferimento principale e degli altri impianti, già installati e in corso di installazione e/o di aggiornamento, di seguito citati.

Keywords: telegestione, prepressurizzati, risparmio energetico, sicurezza.

1. Introduzione

L'obiettivo generale del progetto è quello di assicurare l'assiduità di funzionamento e di mantenimento dell'impianto, garantendo la continuità e l'efficienza dello specifico servizio di manutenzione e allarme, consentendo, anzi determinando, un maggior risparmio energetico, salvaguardando le condizioni microclimatiche degli ambienti ad utenza "fragile", riducendo o addirittura eliminando le situazioni di pericolo e di guasto e ripristinando automaticamente le condizioni ottimali di servizio non appena un "disturbo" compare nel sistema.
La maggior parte delle utenze prese in considerazione in questo studio sono, come accennato, di tipologia "fragile"; quindi, in particolar modo, si considerano utenze ospedaliere, con relative sale di degenza, e stabulari per ricerca scientifica, di

competenza di Istituti Scientifici, di industrie di settore e di Università. Gli stabulari possono essere, a loro volta, molto eterogenei, sia per quanto riguarda le "cavie" oggetto delle ricerche, sia per quanto riguarda il tipo di ricerca in corso, sia per quanto riguarda le condizioni microclimatiche necessarie.
Da quanto sopra emerge che, solitamente, impianti che soddisfano le esigenze di tal tipo di utenze possono richiedere volumi d'acqua considerevoli e condizioni climatiche differenti, a seconda dell'ambiente specifico, nello stesso impianto.
Per tale motivo, con la scelta dei due sistemi tecnologici citati (sistema di espansione prepressurizzato a pressione costante senza diaframma e sistema di controllo telegestito), i relativi vantaggi vengono ulteriormente amplificati e percepiti.
Vediamoli di seguito in maniera sintetica.

2. Caratteristiche dei sistemi di espansione a vaso prepressurizzato a pressione costante e livello variabile

Il vaso di espansione prepressurizzato a pressione costante (PC) e livello variabile (LV) è un recipiente metallico, con la funzione di assorbire le espansioni di volume d'acqua dovute agli aumenti di temperatura, corredato di misuratori di livello, di almeno un pressostato e di una sorgente di pressione, solitamente esterna (compressore). Nel corso degli anni ha subito una notevole evoluzione costruttiva che ha consentito un ulteriore risparmio degli spazi di installazione prima necessari.

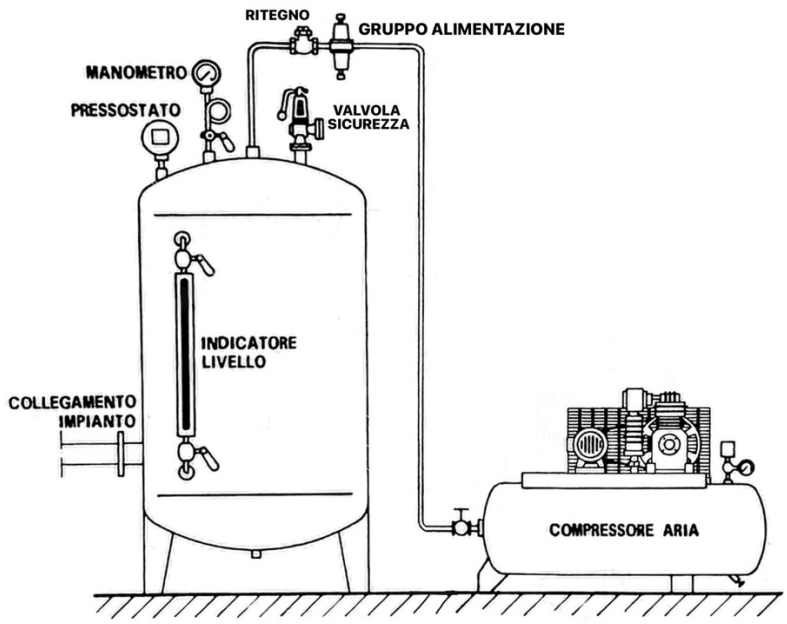


Figura 1. Schema funzionale vaso prepressurizzato a PC e LV con un modello di compressore tradizionale. [1]



Figura 2. Vaso moderno Prepressurizzato a PC e LV.

Nella Figura 1 è evidente il maggiore ingombro, rappresentato dal compressore "tradizionale", rispetto alle installazioni odierne più moderne (Figura 2). La Figura 2 mostra uno dei vasi prepressurizzati installati nel Complesso universitario-ospedaliero di Cagliari.

Il vaso di espansione prepressurizzato a pressione costante offre diversi vantaggi nel contesto di un impianto di riscaldamento. Ecco alcuni vantaggi teorici:

2.1. Stabilità del sistema: *Il vaso di espansione prepressurizzato a pressione costante* contribuisce a mantenere una pressione costante all'interno dell'impianto di riscaldamento. Ciò significa che l'espansione termica dell'acqua calda durante il funzionamento viene gestita in modo efficiente senza variazioni significative di pressione. Questo garantisce un funzionamento stabile e affidabile dell'intero sistema di riscaldamento.

2.2. Protezione dalla sovrappressione: *L'espansione termica dell'acqua calda può* portare ad un aumento della pressione nell'impianto di riscaldamento. Il vaso di espansione prepressurizzato a pressione costante assorbe l'eccesso di volume d'acqua causato dall'espansione termica, evitando così l'accumulo di pressione e la possibilità di danni al sistema. Questo aiuta a proteggere la caldaia, le tubazioni e gli altri componenti dell'impianto da potenziali guasti o rotture.

2.3. Riduzione dell'usura e degli interventi di manutenzione: *Grazie alla gestione* efficiente dell'espansione termica, il vaso di espansione prepressurizzato riduce lo stress meccanico sugli altri componenti dell'impianto di riscaldamento. Ciò si traduce in una minore usura e una riduzione della necessità di interventi di manutenzione correttiva, contribuendo a prolungare la vita utile dell'impianto e a risparmiare sui costi di manutenzione nel lungo termine.

2.4. Efficienza energetica: *Un vaso di espansione prepressurizzato a pressione* costante permette di mantenere l'efficienza energetica dell'impianto di riscaldamento. La stabilità della pressione riduce le perdite di calore attraverso valvole di sicurezza o rilasci automatici di pressione. Ciò significa che l'energia termica prodotta viene utilizzata in modo più efficiente per il riscaldamento degli ambienti, contribuendo a ridurre i consumi energetici complessivi. In sintesi, l'utilizzo di un vaso di espansione prepressurizzato a pressione costante nell'impianto di riscaldamento offre stabilità, protezione dai danni da sovrappressione, riduzione dell'usura, maggiore efficienza energetica e minori costi di manutenzione. Questi vantaggi contribuiscono a garantire un funzionamento affidabile, duraturo ed efficiente dell'impianto di riscaldamento.

2.5. Risparmio spazi di installazione e costi di manutenzione: *È evidente che il* vantaggio pratico più immediato per un installatore, soprattutto per impianti che, come già sottolineato, impegnano grossi volumi d'acqua, è quello di consentire volumi di espansioni minori, a parità di temperature del fluido termovettore, ed evitare contestualmente di occupare spazi enormi nei locali caldaie. Una soluzione con tipologia "a diaframma", ad esempio, implicherebbe una ramificazione della mandata in un eccessivo numero di collegamenti, ognuno dei quali con un numero a sua volta eccessivo di vasi. Si comprende inoltre che, se già un vaso a diaframma è di per sé più facilmente usurabile di un vaso prepressurizzato, la richiamata "ramificazione" amplificherebbe esponenzialmente l'usurabilità, la probabilità di guasto, la necessità di sostituzione e la frequenza della stessa.
Per quanto riguarda la capacità di espansione, appare utile richiamare la Raccolta R, Ed. 2009, al Cap. R3B e applicare le norme e le formule previste, evidenziando le differenze.
Prendendo come esempio l'impianto termico del Complesso universitario-ospedaliero di Monserrato (CA), caratterizzato da due generatori di potenza al focolare pari 4310 kw ciascuno, un volume circuitale interessato all'espansione pari a 120.000 litri, una pressione massima ammissibile pari a 6 bar e una pressione minima di 2,39 bar, otterremo:
Se utilizzassimo vasi con diaframma:

$$V_{min} = V_e / (P_1/P_2) = 10.717 \text{ lt} \qquad (1)$$

Se utilizzassimo vasi autopressurizzati:

$$V_{min} = V_e / [Pa \cdot (1 / P_1 - 1 / P_2)] = 36.330 \text{ lt} \qquad (2)$$

Utilizzando invece Vasi senza diaframma, di tipo prepressurizzato a pressione costante e livello variabile durante il funzionamento:

$$V_{min} = V_e \cong 5.000 \text{ lt} \qquad (3)$$

Con V_e calcolato allo stesso modo in tutte le casistiche, come previsto nella Raccolta R citata.
Comparando i tre risultati, appare subito evidente il vantaggio relativo alle dimensioni e all'ingombro.
Si evidenzia che per l'effettuazione del calcolo di cui alla formula (3), e quindi per le relative verifiche istituzionali, è necessaria una serie di dati integrativi ed informazioni, previsti dalla Raccolta ma non evidenziati nei Modelli R, che devono essere forniti da progettisti e/o installatori. È stata redatta all'uopo una relazione sintetica, che si ritiene generalmente esaustiva, che contempla tutto ciò che è richiesto in tal senso dalla normativa vigente.

3. Caratteristiche dei sistemi di controllo telegestito

Gli impianti di riscaldamento con telegestione rappresentano una tecnologia in continua innovazione che offre numerosi vantaggi in termini di efficienza energetica,

comodità e controllo remoto. In questo articolo, esploreremo i principali aspetti degli impianti di riscaldamento con telegestione, compresi i loro componenti, il funzionamento e i vantaggi che offrono agli utenti, prendendo a riferimento gli impianti installati nel Complesso universitario-ospedaliero di Monserrato (CA), destinati a riscaldamento ambienti per studio (aule), sperimentazione e analisi (stabulari) e sale di degenza ospedaliere, ma prevedendo anche implementazioni e migliorie (peraltro attualmente già in corso di studio).

3.1. Che cos'è la telegestione.

La telegestione è un sistema che consente il controllo e la gestione a distanza degli impianti di riscaldamento. Attraverso una connessione Internet o un'infrastruttura di rete dedicata, gli utenti possono monitorare e regolare i parametri del sistema di riscaldamento da remoto, utilizzando dispositivi come smartphone, tablet o computer.

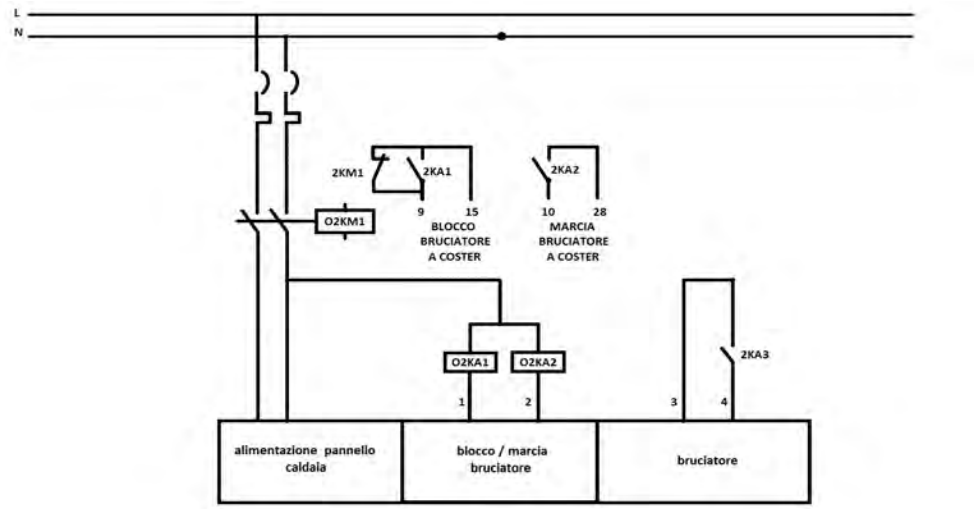


Figura 3. Schema funzionale semplice di un sistema di telegestione applicato direttamente ad un bruciatore a due stadi.

3.2. Componenti di un impianto di riscaldamento con telegestione.

Un impianto di riscaldamento con telegestione “semplice” è composto da diversi elementi chiave, tra cui:

- Termostato intelligente: sostituisce il tradizionale termostato e consente la programmazione e il controllo del riscaldamento tramite una connessione Internet.
- Sensori: rilevano la temperatura ambientale e altri parametri dell’impianto, fornendo dati all'unità di controllo per ottimizzare il funzionamento del sistema di riscaldamento.
- Unità di controllo: collegata al termostato intelligente, agli altri sensori e all'impianto di riscaldamento, permette la comunicazione tra di essi e l'invio di comandi remoti.
- Connettività: un elemento essenziale per la telegestione è la connessione a Internet, che consente la comunicazione tra gli utenti e il sistema di riscaldamento.

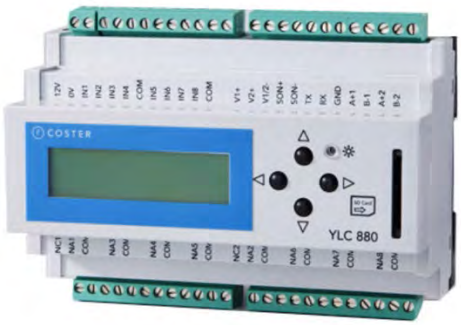


Figura 4. Regolatore multi-configurabile per impianti di riscaldamento.



Figura 5. Sonda di temperatura e umidità ambientale (tipo radio).

3.2.1. Unità di controllo.

La prima basilare unità di controllo, che possiamo definire "unità di controllo di primo livello", è un modulo "Master", solitamente un regolatore multi-configurabile (Figura 4).

Le caratteristiche fondamentali di un buon regolatore sono:

Adattabilità: deve essere adattabile a diverse e numerose tipologie d'impianto (non solo ad acqua calda), da una semplice centrale termica a sistemi più complessi ed elaborati;

Integrabilità: deve consentire l'integrazione di ulteriori moduli (moduli di espansione) che svolgano la funzione di incrementare il numero di ingressi e uscite riferite al singolo regolatore.

Semplicità: la configurazione e la programmazione dovrebbero essere le più semplici e meno equivocabili possibili e dovrebbero potersi applicare nello stesso modo in tutti gli impianti, anche di diversa tipologia;

Connettività: deve essere possibile effettuare il controllo remoto del regolatore con un modem GSM/GPRS, 3G/5G o una scheda di rete, conoscere lo stato dell'impianto e configurare l'invio di specifici messaggi di allarme.

L'unità di controllo "superiore", che possiamo definire "unità di controllo di secondo livello", può essere, per un impianto semplice a telegestione, un termostato intelligente come sopra descritto, oppure, per impianti più avanzati, un'interfaccia

web più elaborata da cui l'utente, o un operatore umano incaricato, può ricevere, modificare e trasmettere segnali o comandi all'impianto.

3.3. Funzionamento di un impianto di riscaldamento con telegestione

Un impianto di riscaldamento con telegestione funziona attraverso una serie di passaggi. Inizialmente, gli utenti impostano le preferenze di temperatura desiderate, direttamente, tramite l'applicazione mobile, oppure indirettamente, tramite programmazione da parte di personale esperto dell'unità di primo livello o intervento sull'interfaccia web del sistema. Questi comandi vengono inviati ai dispositivi o al modulo master di controllo, che a sua volta attiva o disattiva la caldaia o il sistema di riscaldamento centrale oppure ne consente la disattivazione al raggiungimento del nuovo valore di temperatura impostato.
I sensori monitorano costantemente la temperatura ambientale e trasmettono all'unità di controllo. Quest'ultima, utilizzando gli algoritmi di controllo appropriati, regola la temperatura del sistema di riscaldamento, in base alle impostazioni ricevute, per raggiungere gli obiettivi prefissati. Gli utenti possono anche ricevere notifiche e aggiornamenti in tempo reale sul funzionamento del sistema e sull'efficienza energetica ed intervenire nuovamente, direttamente o indirettamente, modificando i parametri di sistema tramite l'interfaccia web.

3.4. Vantaggi degli impianti di riscaldamento con telegestione

Gli impianti di riscaldamento con telegestione offrono numerosi vantaggi agli utenti. Uno dei principali vantaggi è costituito dall'efficienza energetica migliorata. Grazie alla possibilità di programmazione e controllo a distanza, gli utenti possono ottimizzare l'utilizzo del riscaldamento, riducendo gli sprechi energetici e riducendo i costi.
Inoltre, la telegestione offre un controllo comodo e flessibile del sistema di riscaldamento. Gli utenti possono regolare la temperatura, programmare il funzionamento del sistema in base agli orari e ricevere notifiche in tempo reale sullo stato del sistema. Questo consente un'esperienza personalizzata e una maggiore comodità nell'utilizzo.
In questo lavoro si vogliono evidenziare anche i vantaggi relativi alla sicurezza, anche tramite una maggiore rapidità di adeguamento degli impianti alle disposizioni della relativa normativa.
L'argomento verrà maggiormente dettagliato nel paragrafo 5.

4. Evoluzioni e sviluppi

Ovviamente quelli che abbiamo visto sopra sono solo gli elementi base dei sistemi di telegestione ma, specialmente se l'impianto è complesso, e l'impianto esistente che abbiamo preso principalmente a riferimento fino ad adesso lo è, i dispositivi necessari aumentano e il sistema di telegestione si complica.

4.1. Espansioni

In genere, per quanto evoluta, l'unità di controllo non può essere collegata ad un numero elevato di sonde, soprattutto se di tipologia diversa. Nel caso ci siano varie tipologie di sonde, per impianti complessi, e un elevato numero di differenti indicatori di segnale (paragrafo 4.4), è necessario utilizzare moduli di espansione plurimi e differenti. Il modulo di espansione è inoltre un convertitore di segnale in modo che l'informazione in esso contenuta possa essere letta ed elaborata più facilmente dall'unità di controllo.



Figura 6. Modulo di espansione costituito da 4 sotto-moduli.



Figura 7. Concentratore sonde.

4.2. Sonde radio e Concentratori

A volte la logistica non consente dei collegamenti via cavo tra le varie sonde e l'unità o le unità di controllo del sistema. Ecco che vengono a soccorrere, in questi casi, dispositivi che trasmettono o ricevono il segnale tramite onde radio, rendendo il sistema ancora più tecnologicamente avanzato. In taluni casi possono essere utilizzati, in combinazione, sistemi di telegestione ad onde radio e sistemi di telegestione esclusivamente cablati (a valle del regolatore).

Nella piscina di Terramaini a Cagliari, costituita da due vasche, di cui una olimpionica e l'altra adibita a trattamenti terapeutici, è presente questo tipo di opzione, per cui il sistema di trattamento dell'aria degli ambienti è dotato di sonde radio, mentre il sistema di riscaldamento dell'acqua della piscina è costituito da sonde collegate fisicamente, tramite cavi, ai quadri dei locali della centrale termica. In questa direzione è allo studio un aggiornamento anche dell'impianto di riscaldamento, prima menzionato, in esercizio presso il Complesso Universitario-Ospedaliero di Monserrato (CA).

Tali dispositivi devono essere dotati di una certa autonomia energetica proprio per evitare completamente la dipendenza da cavi (anche di alimentazione). Per questo motivo sono dotati di batterie sostituibili di lunga durata (anni).

Il segnale radio inviato dalla sonda radio non può essere letto direttamente dall'unità di controllo e per questo motivo sono necessari dei dispositivi in grado di ricevere il segnale radio, di renderlo leggibile e di ritrasmetterlo, tramite collegamento fisico, all'unità di controllo. Questi dispositivi si chiamano "concentratori" ed hanno una funzione analoga a quella dei moduli di espansione già visti, salvo il fatto che hanno la caratteristica di essere dei ricetrasmettitori di onde radio (e quindi di segnali via

etere). Un sistema dotato di sonde radio e concentratori presenta un livello di telegestione ancora più avanzato.

4.3. Interfaccia web e remotizzazione

L'unità di controllo costituita dal Regolatore (Figura 4) può essere riconfigurata in loco dai manutentori della centrale termica, ma la sua caratteristica più interessante è che può trasmettere le informazioni e lo stato del sistema via internet ad un'altra unità di controllo di livello superiore, ovvero più remota. La gestione iniziale infatti può avvenire direttamente dall'utente, o, nel caso di impianti complessi e ad utenza "fragile", come quella a cui si rivolge principalmente questo lavoro, può essere demandata a personale specializzato e dedicato che presta un'assistenza affidabile e al bisogno. L'operatore, in questo caso, potrà intervenire per soddisfare le esigenze particolareggiate dell'utenza (umana e/o ambientale) e soprattutto qualora gli vengano notificati telematicamente dei segnali di allarme.

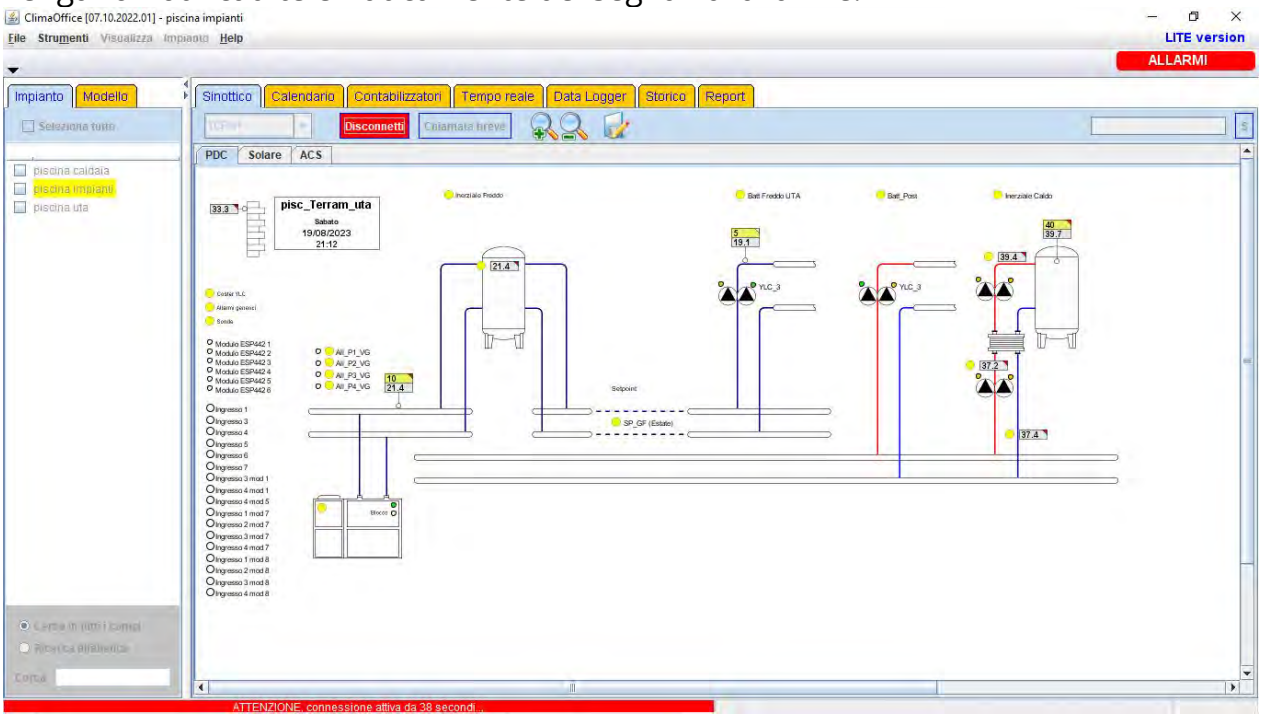


Figura 8. Pagina web dell'interfaccia remota.

4.4. Tipologie di segnale

Bisogna tenere in considerazione due macro-tipologie di segnale da gestire con questi sistemi. Una prima macro-tipologia comprende i "segnali di stato": acceso, spento, attivo, disattivo (sono i segnali che possono arrivare, ad esempio dal bruciatore della caldaia, oppure dal funzionamento di una pompa, o ancora dall'apertura di una valvola).

La seconda è costituita da segnali più modulabili e modulati in ampiezza: pressione, temperatura, umidità (sono i segnali che derivano dall'acqua della mandata di un generatore di calore, oppure dall'aria degli ambienti riscaldati).

4.5. Network Manager (Modulo di inter-gestione reti)

Appare interessante accennare, almeno brevemente per ragioni di sintesi, ai dispositivi che consentono di trasmettere i segnali di centrali distinte e disomogenee dello stesso impianto (ad esempio: "riscaldamento acqua caldaie" e "trattamento aria ambienti"), installate in postazioni distanti, allo stesso router internet per confluire nella stessa interfaccia remota e consentire la visualizzazione e la gestione completa dell'impianto. Tali dispositivi consentono di elevare il sistema ad un livello ancora più avanzato di telegestione.

5. Sicurezza

5.1. Un sistema di telegestione, soprattutto se complesso e avanzato, è già di per sé in grado di fornire informazioni relative allo stato di sicurezza dell'impianto, anche riguardo alle normative di sicurezza (incluse quelle oggetto di verifica da parte dell'INAIL).
L'intervento di una valvola di intercettazione del combustibile, ad esempio, comporta necessariamente il blocco del bruciatore e quest'ultimo è un segnale diretto che viene automaticamente rilevato. L'elaborazione di tutti i segnali e la loro "interpretazione" da parte del sistema (ad es. Tes > 100 °C combinata a "Bruciatore spento") può già fornire, tra le opzioni possibili, quella relativa all'intervento della suddetta valvola.

5.2. Un altro aspetto che va considerato è che un sistema telegestito è solitamente programmato per intervenire sul bruciatore prima che i livelli massimi di temperatura impostata, inferiori a quelli di intervento dei dispositivi di sicurezza, vengano raggiunti. Ciò comporta un incremento del livello di sicurezza rispetto ad un impianto dotato dei soli dispositivi previsti dalla Raccolta R.

5.3. Un'applicazione più diretta, allo studio in questo lavoro assieme alle ditte citate, consiste nel collegare opportuni indicatori di stato ai dispositivi di sicurezza "INAIL". In quelli dotati di parti elettriche, come i termostati e i pressostati, l'adeguamento in tal senso è ovviamente più semplice ed immediatamente realizzabile, in quelli con sola azione meccanica (valvola di sicurezza e valvola di intercettazione del combustibile) il procedimento è più complesso e occorre applicare un sensore attivabile dal movimento della parte mobile.
In un sistema così predisposto viene resa possibile la trasmissione diretta degli "stati" dei dispositivi "INAIL", in modo che l'operatore remoto abbia contezza, e molto in anticipo rispetto agli operatori addetti alla manutenzione di presenza, dell'anomalia occorsa, reagendo tempestivamente in seguito alla visualizzazione dei relativi "allarmi".
In quest'ottica appare evidente il vantaggio, anche in termini di sicurezza, dell'implementazione di un sistema di telegestione negli impianti termici soggetti al D.M. 1/12/75 in quanto si realizzerebbe una manutenzione più "pronta" e specifica, evitando maggiormente anche eventuali "dimenticanze". Va sottolineato inoltre,

come conseguenza di quanto appena detto, anche un altro tipo di sicurezza, soprattutto negli impianti ad utenza "fragile" a cui maggiormente ci riferiamo. In questi casi un ritardo nell'intervento di manutenzione, che potrebbe a sua volta comportare, ad esempio, il ritardo nel riarmo del termostato di blocco, potrebbe causare la morte delle cavie di laboratorio, il fallimento di un esperimento in corso, o eventualità ancora peggiori.

5.4. Un'ulteriore evoluzione potrebbe essere quella di dotare i dispositivi di sicurezza contemplati dall'INAIL, compresi quelli ad azione meccanica, di sensori ed interruttori elettrici che consentano, anche da remoto, prima la rilevazione diretta dell'intervento del dispositivo, e dopo, ripristinato o verificato lo stato di sicurezza, il suo riarmo. Si evidenzia che, oltre agli ovvi vantaggi di una tale attività da remoto, non verrebbe comunque disattesa la ratio della disposizione normativa anche quando giustamente prevede l'intervento umano per l'effettuazione del suddetto riarmo.
In un imminente futuro è realistico pensare che tutti i dispositivi di regolazione e sicurezza contemplati dall'INAIL vengano fabbricati e commercializzati già predisposti per un tale tipo di integrazione nella telegestione.

6. Conclusioni

Il nostro impianto di riscaldamento di riferimento è, in conclusione, un impianto che coinvolge ingenti volumi d'acqua e serve sale di degenza ospedaliera e stabulari di ricerca (utenze "fragili"). Ognuna di queste utenze sono monitorate attraverso sonde, tradizionali e radio, che trasmettono a dispositivi master, che abbiamo chiamato unità di controllo di primo livello, a seconda dei casi, segnali di stato, di umidità, di temperatura e di pressione, dove vengono, in prima analisi elaborati e gestiti. La trasmissione avviene tramite opportuni recettori e decodificatori che abbiamo chiamato espansioni e concentratori che consentono alla suddetta unità di elaborare segnali multipli e disomogenei.
L'unità di controllo di primo livello ha il compito di ritrasmettere lo stato complessivo del sistema (incluse anomalie rappresentate da opportuni segnali di allarme) ad uno specifico indirizzo web, dove viene sintetizzato in un'interfaccia gestita da operatore umano, addetto al coordinamento tra le esigenze dell'utente finale (inclusa la sua sicurezza), e le necessità dell'impianto (inclusa la relativa integrità e sicurezza). Contestualmente, l'unità di primo livello può intervenire direttamente, riportando l'impianto alle condizioni di esercizio previste dalla propria programmazione, oppure interpretare l'input in arrivo dall'interfaccia web, adeguando in tal senso l'impianto in base alle (nuove) esigenze dell'utente. L'interfaccia web consente anche l'intervento diretto sui dispositivi. Opportuni termostati intelligenti possono essere gestiti sia da locale che da remoto, sempre tramite interfaccia web specifica (es. sale di degenza comuni, sale per terapia intensiva, ecc.).
Questo sistema di controllo remotizzato costituisce l'unità di controllo di secondo livello ed è il cuore della telegestione.

Come già accennato, un impianto così complesso (almeno in quanto ad esigenze specifiche dell'utenza), è attualmente in fase di aggiornamento e realizzazione nel Complesso Universitario-Ospedaliero di Cagliari ed è in corso la programmazione di un software di simulazione che evidenzia le "reazioni" del sistema ad ogni anomalia proveniente dall'impianto o richiesta specifica dell'utente.

Di seguito è illustrato uno schema a blocchi rappresentativo e semplificato delle caratteristiche di tale impianto.

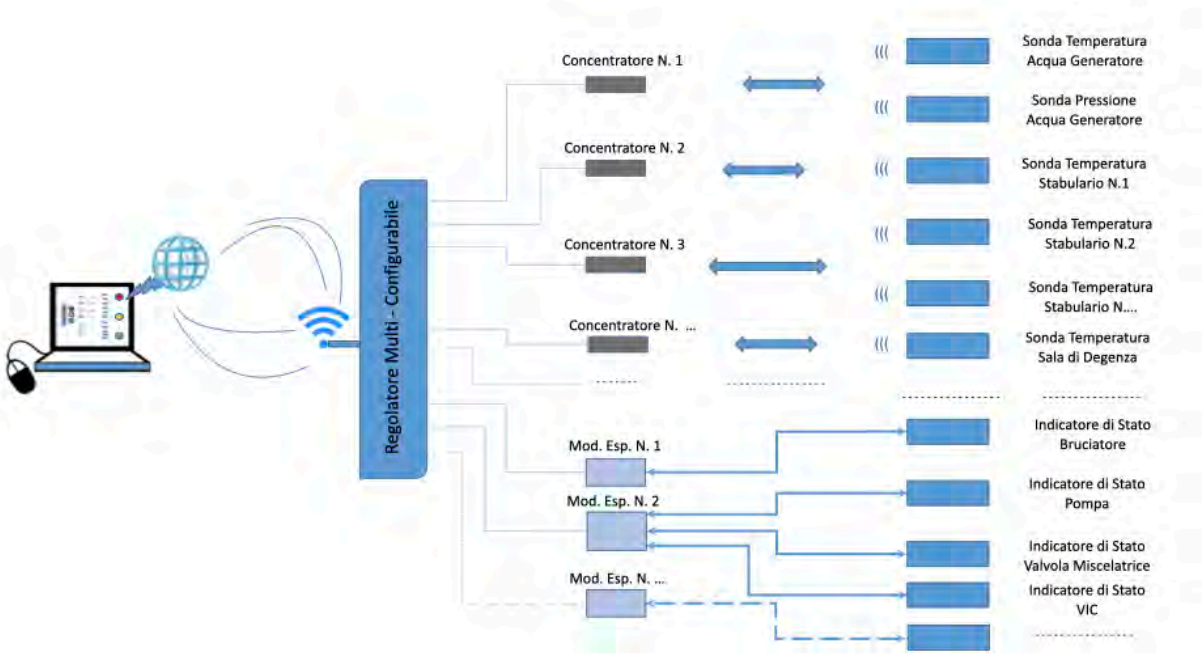


Figura 9. Schema a blocchi dell'impianto oggetto di studio.

6. Bibliografia

[1] P. Andreini, L. Iaria. Conduzione Controllo e Manutenzione degli Impianti di Riscaldamento. Hoepli. Edizioni varie.

[2] INAIL. Raccolta R. Edizione 2009.

[3] Manuali della Coster Group.

Aria compressa nell'azienda vitivinicola, usi innovativi per le produzioni di alta qualità

R. Modestino[1], M. P. Gatto[1], G. Aversa[1], D. Strollo[2], G. Floridia[3]

[1] Inail Uot di Avellino
[2] Azienda vinicola Mastroberardino
[3] Parsec srl

Abstract

La provincia di Avellino è conosciuta in tutto il mondo per una enologia di spiccata tipicità; il territorio è uno dei più antichi nuclei di insediamento della vite, custodisce antichi e pregiati vitigni, dai quali prendono vita dei veri e propri capolavori enologici.
Tali ricchezze, abbinate a sofisticate tecniche produttive, permettono di raggiungere elevati livelli di qualità del prodotto.
Questo studio si concentra sull'analisi della centrale di aria compressa di un'azienda vinicola della provincia di Avellino che, tra le altre cose, alimenta un nuovo metodo di iniezione dell'aria compressa all'interno dei serbatoi per la follatura del cappello di vinacce nella macerazione delle uve rosse.
La soluzione sviluppata e brevettata da una società italiana specializzata nella progettazione e realizzazione di impianti e sistemi di controllo integrati per la vinificazione e l'affinamento dei vini, abbinata ad un efficiente impianto di generazione dell'aria compressa, permette di realizzare processi enologici innovativi e sistemi di automazione avanzati per la cantina moderna garantendo elevati standard di qualità conformemente all'approccio dell'industria 4.0.

Keywords: air mixing, aria compressa, sovrappressione.

1. Introduzione

L'azienda vinicola è gestita da una famiglia che vive il contesto socioculturale vitivinicolo da oltre due secoli, in base alle più attendibili ricostruzioni storiche. Le prime tracce della presenza in Irpinia risalgono al catasto borbonico, a metà del Settecento, epoca in cui la famiglia elesse il villaggio di Atripalda a proprio quartier generale, ove sono tuttora situate le antiche cantine, e di lì ebbe origine una discendenza che legò indissolubilmente le proprie sorti al culto del vino. Dieci generazioni, da allora, hanno condotto le attività di famiglia, tra alterne vicende, come sempre accade nelle storie delle imprese familiari di più antica origine.



Figura 1. Particolare dell'azienda

La mission dell'azienda è quella di assicurare la salvaguardia della viticoltura autoctona, a difesa dei valori vitivinicoli tradizionali, con occhio attento all'innovazione ed all'interpretazione moderna dei propri vini, in una sapiente sintesi tra il carattere e lo stile della cultura antica e le più avanzate tecnologie qualitative.

L'azienda pone particolare attenzione al processo produttivo, regolato da specifiche procedure e certificazioni sempre nell'ottica del miglioramento continuo. I processi di produzione si compongono di alcune fasi di lavorazione in sequenza tra di loro e strettamente interconnesse tanto che l'imperfetta esecuzione di una fase o l'utilizzazione di una materia prima o di un prodotto non rispondente ai requisiti specificati compromettono la qualità e la sicurezza alimentare del prodotto finale.
Premesse fondamentali all'esecuzione dei processi e ai relativi controlli sono:

- la disponibilità di personale qualificato e competente;
- l'esistenza di apparecchiature e attrezzature di produzione e controllo idonee a garantire la qualità e la sicurezza alimentare del prodotto finito;
- la pianificazione dei controlli del prodotto e del processo di produzione.

2. L'aria compressa del settore vinicolo nel contesto dell'industria 4.0

L'aria compressa può essere pressurizzata fino a raggiungere una pressione superiore a quella atmosferica e diventare un importante e versatile mezzo di trasmissione di energia.
L'impiego dell'aria compressa è ampiamente diffuso negli stabilimenti e nelle officine; il 90% delle industrie utilizzano l'aria compressa nei propri processi, come vettore d'energia per utensili e macchinari, ed è una parte importante e ben integrata di molti processi produttivi.
Un sistema per la produzione e l'utilizzo di aria compressa industriale è di solito composto da cinque macro-elementi:

- il compressore che contiene il motore, il sistema di compressione, i sistemi di raffreddamento, la centralina di controllo e la trasmissione;
- il serbatoio d'accumulo;
- il sistema di trattamento dell'aria dove si ritrovano l'essiccatore e i filtri;
- la rete di distribuzione;
- le utenze.

Una buona progettazione dell'impianto, tuttavia, richiede un'approfondita analisi del fabbisogno di aria compressa dell'azienda – livello di pressione, qualità e fabbisogno nel tempo – e un'integrazione nel processo produttivo aziendale in modo da trovare il sistema più efficiente per il caso specifico.
Inoltre, ottimizzando le prestazioni dell'intero sistema, configurandolo come un impianto dinamico ed intelligente, si può raggiungere un elevato livello di ottimizzazione della produzione e automazione.
Nel processo produttivo della azienda vinicola in esame, si pone particolare enfasi sulla qualità del prodotto, ma anche su una accurata gestione aziendale attenta alle sfide lanciate dell'Industria 4.0, che nell'ottica dell'interconnessione tra uomo e macchina, tra sistemi e componenti, punta a trarre vantaggi competitivi riducendo i costi di gestione e a ottenere una maggiore efficienza e facilità nelle operazioni.
Nella fase di progettazione dell'impianto, pertanto, l'attenzione si è concentrata su due aspetti fondamentali:

- Il possibile contatto accidentale dell'aria con il prodotto; è importante scegliere la qualità dell'aria compressa in base alle normative vigenti e alla politica di qualità aziendale, in quanto l'aria compressa, generalmente, può contenere sostanze indesiderate, come polvere, acqua sotto forma di gocce o di vapore e olio sotto forma di gocce e aerosol, che possono ripercuotersi negativamente sui risultati della produzione.
- La coerenza con i dettami dell'Industria 4.0, che richiedono una buona efficienza nell'uso degli impianti e una manutenzione ridotta al minimo che anticipi ed eviti i problemi.

2.1. Descrizione dell'impianto aria compressa dell'azienda vinicola

L'impianto di aria compressa dell'azienda vinicola è destinato alla produzione e distribuzione di aria compressa alla pressione di esercizio di 16 bar. A partire dal locale adibito alla sala compressione, il gas viene inviato, tramite opportuno sistema di distribuzione, all'utenza e ai servizi presenti all'interno dello stabilimento, come rappresentato in Figura 2.

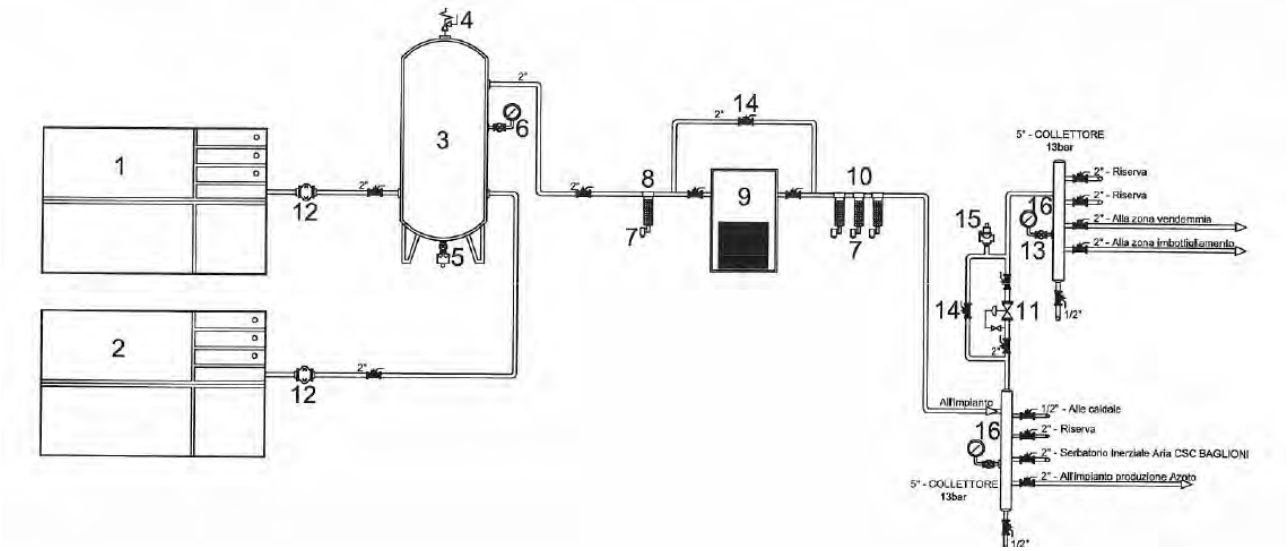


Figura 2. Schema dell'impianto di aria compressa

L'aria atmosferica viene aspirata dai due compressori rotatori a vite a iniezione d'olio a trasmissione diretta che la comprimono nel blocco compressore azionato da un motore elettrico. La portata massima dell'impianto è di 10200 L/min, data dal funzionamento in parallelo di entrambi i compressori. L'aria, una volta compressa, spinge l'olio all'interno del serbatoio e lo costringe a defluire attraverso la tubazione verso la valvola termostatica.

Se la temperatura dell'olio è inferiore alla temperatura di taratura dell'elemento termostatico, l'olio ritorna al gruppo vite. Se invece la temperatura dell'olio è superiore alla temperatura di taratura dell'elemento termostatico, l'olio defluisce nel radiatore dove viene raffreddato. Successivamente l'olio attraversa il filtro olio e giunge al compressore, miscelandosi all'aria aspirata e creando quindi una miscela aria/olio che garantisce la tenuta e la lubrificazione degli organi in movimento del compressore. La miscela aria/olio torna all'interno del serbatoio, dove l'aria subisce una pre-separazione centrifuga ed una definitiva separazione dall'olio, tramite il filtro disoleatore.

Dal serbatoio esce quindi soltanto aria, che tramite la tubazione giunge al radiatore aria e quindi al serbatoio aria esterno con capacità di 2000L.

La regolazione dei compressori è di tipo compensato: raggiunto il massimo valore di rotazione del motore, il sensore di pressione manda un segnale che avvia il timer e toglie corrente all'elettrovalvola del regolatore. Il regolatore si chiude ed il compressore cessa il lavoro di compressione ed entra in marcia a vuoto. Il timer continua il conteggio fino al valore impostato, raggiunto il quale, se non vi è stata variazione di pressione, comanda l'arresto del motore elettrico. nel caso la pressione sia scesa fino al valore minimo impostato sul controller, prima che il timer abbia terminato il conteggio l'elettrovalvola riceve corrente e apre. Il regolatore si apre ed il compressore riprende il carico normale; il timer si azzera.

L'analisi delle esigenze aziendali e delle prestazioni dei compressori disponibili in commercio ha veicolato la scelta verso compressori dotati di essiccatori a

refrigerazione, che rimuovono l'umidità dall'aria raffreddandola mediante olio alimentare.

Questa scelta soddisfa le due esigenze aziendali citate precedentemente:

- L'essiccatore e refrigerazione è progettato per ridurre al minimo la caduta di pressione e avere dunque un basso consumo energetico. Inoltre, il controllo remoto del compressore consente di memorizzare dati, monitorare lo stato della macchina, segnalando eventuali allarmi o necessità di manutenzione, in piena ottica di industria 4.0.
- L'olio alimentare, con certificazione NSF H1, consente di eliminare il potenziale rischio di contaminazione, salvaguardando la qualità dei prodotti, e riducendo al minimo il rischio di contaminazione dell'intera produzione e del processo logistico.
  La National Sanitary Foundation International è un'organizzazione creata per standardizzare i requisiti di igiene e sicurezza alimentare. Come risultato della certificazione, i prodotti ricevono il marchio NSF, in particolare per i lubrificanti si distinguono due tipi di certificazione: H – per le formulazioni finite, e HX – per gli ingredienti da cui sono ricavate le formulazioni finite. Entrambi i tipi di certificazione includono 3 sottocategorie la prima delle quali è la NSF H1 per i prodotti insapori, inodori che hanno un contatto accidentale con gli alimenti. La contaminazione consentita dei prodotti alimentari può essere al massimo di 10 ppm di olio.

2.2. Innovativo sistema di follatura/rimontaggio a getti di aria modulati sequenziali

Fra le fasi di processo più importanti, la conduzione della fermentazione alcolica rappresenta un momento nevralgico, e all'interno di essa nel caso della fermentazione di uve rosse rivestono un ruolo determinante il rimontaggio, la follatura e l'arieggiamento dei mosti. L'efficacia di queste procedure era ben nota già dalla fine del XIX secolo, ma dal 1950 sono stati condotti i primi studi scientifici documentati che ne hanno dimostrato l'importanza.



Il rimontaggio e la follatura sono procedimenti che hanno lo scopo di facilitare l'estrazione dei costituenti delle bucce (antociani e tannini), di evitare che batteri acetici e muffe sulle vinacce possano proliferare, di migliorare la fase di macerazione-fermentazione, permettendo, tra l'altro, la dissoluzione di sostanze azotate presenti nel cappello di vinacce e dell'ossigeno, facilitando l'azione fermentativa dei lieviti (Fig. 3).

Figura 3. Serbatoio per vinificazione

Al fine di perseguire questi risultati è stato ideato e brevettato, da una società specializzata nel settore, un nuovo sistema, che, utilizzando una sequenza di piccoli getti d'aria combinati e modulati nella loro successione, permette di mantenere completamente disgregato il cappello per tutto il corso della macerazione.
Il sistema non solo ottimizza l'estrazione, ma elimina le cause di stratificazione ed eterogeneità all'interno del serbatoio e rende più costanti e omogenei i processi di distribuzione del calore e di avanzamento della fermentazione. Con questa modalità di gestione della vinaccia si ottengono anche altri vantaggi, ad esempio la riduzione dei tempi di svinatura, che avviene in modo più semplice e senza maltrattamento delle bucce.
Le parti solide perfettamente mescolate al liquido sono facilmente pompabili direttamente all'interno della pressa per essere sgrondate, senza necessità di coclee o altri organi meccanici che richiedono talvolta tempi lunghi per le operazioni di pulizia. Ogni tecnologia infatti deve essere valutata, al momento della sua introduzione in cantina, tenendo conto non solo del costo di acquisto ma anche dei tempi operativi che essa richiede per la pulizia e della sicurezza degli operatori.
Questo innovativo metodo di iniezione del gas crea delle onde disgreganti cioè delle onde di liquido che rompono e affondano efficacemente il cappello, inondandolo completamente di mosto.
Non sono, quindi, le bolle di gas che vanno a rompere il cappello ma una opportuna movimentazione della parte liquida del mosto che va a sgretolare il cappello di vinaccia dal basso, facendolo affondare e quindi sommergere dal liquido stesso. Il risultato è ottenuto mediante una speciale tecnica di iniezione dell'aria costituita dall'azione sinergica di un sistema di ugelli montati sulla parte laterale del serbatoio, Figura 4, ognuno singolarmente azionato tramite una forma d'onda preimpostata. Ogni singola iniezione di gas da ciascun ugello è una particolare combinazione di pause e getti e tutti gli ugelli sono azionati in una opportuna sequenza uno rispetto all'altro. Questa azione combinata e sequenziale di getti crea all'interno del serbatoio una movimentazione del liquido assimilabile a delle onde.



Figura 4. Sistema a getti di aria modulati

Questo nuovo metodo è stato accolto nell'azienda vinicola avellinese da alcuni anni.
Il sistema è alimentato dalla centrale di aria compressa aziendale mentre il processo di ossigenazione viene monitorato e gestito da un opportuno modulo di controllo in grado di garantire una corretta ossigenazione sia per quanto riguarda l'uniformità di iniezione che per la precisione di dosaggio.
Il modulo di ossigenazione, infatti, ha programmi differenziati per: la micro-ossigenazione (mg/Lt/mese), la macro-ossigenazione (mg/Lt/giorno) o dose singola (mg/Lt) breve e lunga e riesce a

segnalare eventuali errori come l'anomalia nella pressione in entrata o l'intasamento del diffusore.
La vinificazione, con la fermentazione, l'estrazione del colore e l'affinamento, è un insieme di processi estremamente complessi e come tale, per essere gestito, necessita di tecnologie avanzate e precise, associate a un'elevata capacità di calcolo e di elaborazione.
Il supporto di una tecnologia informatica specifica e di un software di controllo e programmazione integrato orientato al processo, è possibile una automazione e una vera comprensione del processo, questo consente di cogliere la complessità e le interazioni tra i vari parametri e di trarre il massimo dell'informazione. Condizione indispensabile per ottenere una gestione ottimale del processo produttivo attuale e futuro.
La possibilità di gestione da remoto, garantita dal sistema, offre infine sicuri vantaggi anche in termini di tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori addetti.

3. Sicurezza dell'impianto e tutela della salute

Nell'analisi dei rischi può considerarsi, quale causa di sovrappressione del circuito di adduzione e del serbatoio di accumulo, principalmente il mancato intervento di blocco dei regolatori elettronici, una volta raggiunto il valore di taratura della pressione. Si suppone quindi, in una condizione ipotetica di primo guasto, di superare il valore di taratura della pressione e di sopravanzare anche quello di taratura della valvola di sicurezza a protezione del serbatoio.
Si stanno trascurando, in questa analisi di caso peggiore a favore della sicurezza, la somma improbabile di due eventi negativi contemporanei strettamente correlati al superamento della pressione massima di erogazione di questo tipo di compressore.
In queste condizioni estreme, la valvola di sicurezza a protezione del recipiente deve essere capace di scaricare la portata massima producibile dai compressori alle condizioni di targa.
Nel caso in esame la portata totale suddetta è di 10200 L/min, data dal funzionamento contemporaneo dei due compressori mentre, la valvola di sicurezza ha una portata di scarico di 54147 L/min, ovvero di gran lunga superiore alla portata totale dei compressori. I recipienti utilizzati per la vinificazione non sono apparecchi a pressione, né l'iniezione di gas determina alcun rischio di sovrappressione poiché devono essere necessariamente aperti per poter garantire la fuoriuscita della CO_2 di fermentazione prodotta durante la trasformazione dello zucchero in alcool.
Per quanto concerne i rischi per la salute, nell'industria enologica i lavoratori possono essere esposti al rischio chimico, data la presenza, spesso simultanea, ma comunque generalmente a basse dosi, di sostanze chimiche pericolose dovute alla fermentazione del vino, all'uso di additivi o a prodotti chimici utilizzati per la pulizia e/o sterilizzazione delle attrezzature per la vinificazione. Alcuni degli additivi, come solfiti e metabisolfiti, possono provocare reazioni allergiche, tra cui l'asma

professionale, mentre i prodotti detergenti/sterilizzanti possono avere un'azione caustica e irritante per pelle, mucose e vie respiratorie.
Uno dei rischi professionali più gravi affrontati dai lavoratori della produzione vinicola è, però, quello associato alla condizione di lavorare in ambienti confinati, costituiti principalmente da serbatoi di stoccaggio e fermentazione, ove possono verificarsi, a causa dell'attività biologica dei vini in fermentazione, bassi livelli di concentrazione di ossigeno e alte concentrazioni di CO_2. L'ingresso in queste aree senza il rispetto delle misure e le procedure di sicurezza appropriate (ad esempio l'utilizzo, ove necessario, dei respiratori isolanti) può provocare una rapida ipossiemia con ridotta capacità di esercizio e capacità mentale. La perdita di coscienza, l'apnea e l'arresto cardiaco possono verificarsi rapidamente in un'atmosfera con meno del 6% di O_2.
Oltre a un ambiente a basso contenuto di ossigeno, la fermentazione del vino può produrre grandi quantità di CO_2 che a concentrazioni moderate si comporta come un semplice asfissiante in sostituzione dell'ossigeno, ma a concentrazioni più elevate, facilmente raggiungibili in spazi confinati, può essere direttamente tossica per la funzione del sistema nervoso centrale, portando alla narcosi. Respirare CO_2 a concentrazioni superiori al 10% può determinare perdita di coscienza in meno di 1 minuto e, in mancanza di soccorso, morte. Analogamente, possono costituire pericolo elevato per i lavoratori l'azoto e l'argon, utilizzati per la protezione del vino dalla ossidazione lenta, in quanto gas asfissianti. Sulla base di queste premesse, il sistema di rimontaggio/follatura adottato può essere particolarmente utile per l'eliminazione e/o riduzione del rischio chimico: l'automazione del processo di rimontaggio/follatura, rispetto allo svolgimento "tradizionale" con attrezzi ad azionamento manuale; infatti, permette di ridurre in modo sostanziale l'esposizione dei lavoratori alla CO_2 anche attraverso la gestione e il controllo da remoto.
Prima del 2014, anno del brevetto, l'utilizzo dell'aria compressa nelle cantine durante la vinificazione era assolutamente marginale e occasionale.
Svinare, cioè svuotare dalle vinacce esauste, un serbatoio di grandi dimensioni voleva dire giorni di lavoro e obbligatoriamente che gli operatori entrassero dentro il serbatoio con delle vanghe e a mano spalare la vinaccia dura e maleodorante.
Oggi, grazie a questo sistema, non è più così. La vinaccia non è più maleodorante (qualità del prodotto) e in poche ore (il tempo della pompa) si svuota qualsiasi serbatoio senza più la necessità di entrarci dentro (grandissimo risultato in termini di salute e sicurezza dei lavoratori).
Inoltre, le scelte aziendali, concordemente con le politiche di sviluppo dell'industria 4.0, permettono di ridurre i livelli di esposizione al rumore prodotti dall'impianto di aria compressa. Questo sia scegliendo attrezzature con appropriate caratteristiche tecniche che riducendo il tempo di esposizione grazie alla possibilità di gestione remota del sistema.

Conclusioni

Gli impianti di aria compressa hanno raggiunto ormai uno standard consolidato; i componenti e i rischi collegati al loro utilizzo sono noti e gestibili con una corretta analisi e valutazione del contesto e delle esigenze aziendali.
L'utilizzo dell'aria compressa è considerata una fonte di energia pulita e sicura che può essere facilmente utilizzata per diversi scopi industriali. Inoltre, i vantaggi dati dal suo utilizzo sono numerosi, e quando tutto questo si associa ad un uso attento delle smart technologies i benefici possono essere notevoli.
Il sistema qui descritto permette non solo di migliorare il prodotto finale, di ottimizzare l'utilizzo della manodopera durante la fase critica della vendemmia, di minimizzare potenzialmente i rischi per i lavoratori ma anche di risparmiare fino all'80% dell'energia complessiva normalmente utilizzata per vinificare, riducendo al contempo i relativi quantitativi di CO_2 immessi nell'ambiente.
Il caso esaminato è esempio di sostenibilità e di applicazione dei dettami dell'industria 4.0: la disponibilità di dati in rete che possono essere elaborati, permettendo di tracciare, storicizzare e pianificare i processi futuri e l'interconnessione dei servizi con un elevato livello di automazione dei processi aziendali. Questi aspetti sono oggi fondamentali per migliorare gli standard di certificazione della qualità.

Bibliografia

[1] Atlas Copco AirPower NV. Manuale dell'aria compressa. Atals Copco AirPower NV. Belgio, 2016

[2] Francesco Mirone. Impresa familiare e longevità. I driver per vincere la sfida del tempo. Franco Angeli Edizioni, 2022

[3] Parsec. Il controllo integrato parsec la tecnologia al servizio degli obiettivi enologici. oicce times. anno xxi; Numero 83; pag 9-12

[4] Parsec. Air Mixing M.I. Parsec - qualcosa è cambiato nella macerazione delle uve rosse. TecnAlimentaria.it International Magazines. 2018; pag 2

[5] P.Ribéreau – Gayon, D.Dubourdieu, B. Donéche, A. Lonvaud. Trattato di enologia I. Microbiologia del vino Vinificazioni. Edagricole. 2004

[6] Youakim S. Occupational health risks of wine industry workers. *B C Med J*. 2006; 48 (8):386-391.

[7] Guillemin MP, Horisberger B. Fatal intoxication due to an unexpected presence of carbon dioxide. *Ann Occup Hyg.* 1994; 38:951-957

Rischio Legionella in impianti per la produzione di acqua calda ad uso sanitario

R. Iovene[1], R. Vasile[1], A. Morettini[2]

[1] Inail –Uot di Pescara
[2] Inail – Uot di Campobasso

Abstract

In concomitanza con lo sviluppo dei sistemi di produzione di acqua calda da fonti rinnovabili, trovano sempre più ampia diffusione impianti dotati di sistemi di accumulo dell'acqua sanitaria (ACS) di notevoli dimensioni, al cui interno si possono creare le condizioni ideali per lo sviluppo dei batteri del genere Legionella. Il quadro normativo nazionale attualmente vigente in Italia è costituito essenzialmente dalla "Linee guida per la prevenzione ed il controllo della legionellosi" e dal Titolo X del d.lgs. n. 81/2008, rivolti ai luoghi pubblici e di lavoro; pertanto, gli impianti installati in luoghi non classificabili come tali e cioè gli impianti privati per civile abitazione, risultano sprovvisti di una specifica normativa di riferimento. Attraverso un'analisi della normativa italiana e della letteratura scientifica internazionale, supportata da una ricognizione effettuata su un campione significativo di impianti installati nella regione Abruzzo, si è cercato di individuare possibili indicazioni impiantistiche e metodologie nell'ambito della gestione degli accumuli di acqua calda sanitaria (ACS) ad uso domestico, al fine di ridurre il rischio di proliferazione di Legionella. Sono state raccolte, quindi, una serie di indicazioni utili al fine della progettazione e della gestione degli impianti per la produzione di ACS ad uso civile privato, caratterizzati dalla presenza di accumuli di acqua calda, al fine di ridurre tale rischio.

Keywords: Legionella, ACS, Linee guida.

1. Impianti di riscaldamento con produzione di acqua calda sanitaria ad uso civile privato

Un impianto termico può essere definito, secondo quanto indicato nel Titolo II del d.m. 01/12/1975, come un impianto tecnologico utilizzante acqua calda sotto pressione, con temperatura dell'acqua non superiore alla temperatura di ebollizione alla pressione atmosferica, destinabile al riscaldamento degli ambienti ed alla produzione di acqua calda ad uso sanitario o per processi produttivi.
Gli elementi fondamentali e comuni costituenti un impianto termico sono rappresentati da:

- un generatore atto alla produzione di calore e al riscaldamento del fluido termovettore, corredato dai sistemi di controllo, protezione e sicurezza;

- tubazioni costituenti il sistema di distribuzione del fluido termovettore;
- sistemi di utilizzazione finale del fluido termovettore.

Nei sistemi di utilizzazione finale rientrano anche i sistemi di accumulo per la produzione di acqua calda sanitaria, in seguito denominati ACS.
Questi ultimi possono essere costituiti da semplici serbatoi di accumulo dell'acqua calda (puffer) prodotta tramite uno scambiatore di calore, o da bollitori, cioè serbatoi di accumulo dotati di scambiatori a serpentino interni alimentati dai fluidi termovettori dei generatori di calore presenti sull'impianto (es. caldaie a combustione, pannelli per solare termico, etc.)
Dai rilievi condotti in campo, effettuati in sede di verifica di primo impianto ai sensi dell'art. 22 del d.m. 01/12/1975, su impianti termici ad uso domestico integrati con impianti solari aventi potenza inferiore a 35 kW, è emerso che, per la quasi totalità degli stessi, è stata scelta una soluzione impiantistica così costituita:

- generatore di calore alimentato a gas metano;
- pannelli solari con fluido termovettore costituito da glicole;
- bollitore ACS a doppio serpentino, con serpentino superiore collegato al generatore di calore e serpentino inferiore collegato al circuito solare, munito di termometro, vaso di espansione e valvola di sicurezza;
- per il controllo della temperatura del fluido termovettore nel circuito solare, a monte dello scambiatore, sono installati un gruppo pompe di circolazione, delle sonde termiche atte al rilevamento della temperatura del fluido termovettore poste in prossimità dei pannelli, una valvola termoregolatrice, comandata dalle suddette sonde termiche e adibita alla modulazione/blocco del flusso del fluido termovettore nello scambiatore, un manometro, un termometro, un vaso di espansione e una valvola di sicurezza;
- per il controllo della temperatura dell'ACS sul circuito utilizzatore, in corrispondenza della linea di mandata in uscita dal bollitore, sono installate delle sonde termiche atte al rilevamento della temperatura del fluido ACS e una valvola miscelatrice, comandata dalle suddette sonde termiche, adibita a mantenere il fluido ACS inviato all'utenza alla temperatura di utilizzo mediamente compresa nell'intervallo tra 40°C e 65°C;
- pompa di ricircolo ACS con collegamento di ritorno a circa metà altezza del bollitore;
- sistema programmato di shock termico settimanale, alla temperatura di circa 60-70°C, della durata media di 15 min.

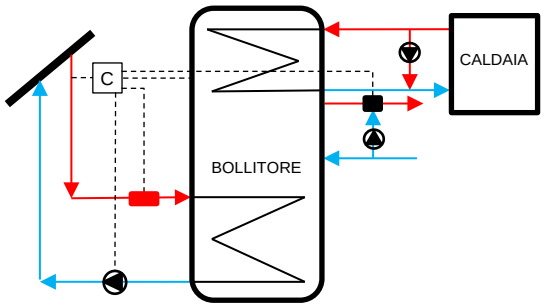


Figura 1. Impianto per la produzione ACS integrato con solare termico

Tali scelte impiantistiche presentano delle criticità in termini di rischio dello sviluppo di Legionella, dovute sia alla mancanza di periodicità e durata imposte per l'effettuazione dello shock termico e sia al fatto che l'innalzamento della temperatura per lo shock termico all'interno dell'accumulo ACS viene effettuata mediante l'impiego del generatore di calore che, come si nota nella Figura 1, è collegato alla sola serpentina superiore. Tale condizione fa sì che, in assenza di un idoneo sistema di movimentazione dell'acqua all'interno dell'accumulo, in questo caso rappresentata dalla pompa di ricircolo con ritorno a metà altezza del bollitore, la stratificazione verticale della stessa, in base alla temperatura, possa creare delle zone meno riscaldate nella parte bassa del serbatoio con conseguente inefficacia del processo.

2. La normativa italiana sulla prevenzione ed il controllo della Legionella

In Italia, pur rappresentando la Legionellosi un problema sanitario rilevante, ad oggi si hanno limitati riferimenti legislativi in merito alla prevenzione ed al controllo della sua proliferazione. La legislazione vigente è rappresentata dal "Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro" ovvero dal d.lgs. del 09/04/2008 n. 81, come modificato dal d.lgs. del 3 agosto 2009 n. 106, e dalle "Linee guida per la prevenzione e il controllo della Legionellosi" presenti nell'allegato A dell'accordo Stato-Regioni del 7 maggio 2015.

2.1 Il d.lgs. del 09/04/2008 n. 81 e s.m.i.

Come indicato all'art. 3 del Titolo I, capo I, il decreto si applica a tutti i settori delle attività lavorative, sia privati che pubblici, e a tutte le tipologie di rischio; nello specifico si applica a tutti i lavoratori e le lavoratrici, subordinati e autonomi, nonché ai soggetti ad essi equiparati. Nell'ambito di ogni attività lavorativa, il datore di lavoro, ha in capo gli obblighi sanciti dagli articoli 17 e 18 del Titolo I, Capo III, Sezione I.
Al fine di preservare la salute e la sicurezza dei propri dipendenti, il datore di lavoro ha il dovere di redigere, ai sensi dell'art. 28, il documento di valutazione dei rischi della propria attività lavorativa e dei luoghi in cui questa viene svolta, al fine di valutare tutti i rischi correlati e di determinare le misure preventive e/o protettive da adottarsi in funzione dei rischi individuati. Nello svolgimento della valutazione dei rischi il datore

di lavoro deve prendere in considerazione, tra tutti i possibili rischi, anche quelli derivanti dall'eventuale presenza di agenti biologici.
L'allegato X del d.lgs. n. 81/2008 fornisce una classificazione degli agenti biologici e le opportune indicazioni in merito all'esecuzione della valutazione del rischio biologico e alle misure preventive e protettive da adottarsi.
Gli agenti biologici vengono ripartiti come di seguito in funzione del rischio di infezione:

- agente biologico del gruppo 1 - un agente che presenta poche probabilità di causare malattie in soggetti umani;
- agente biologico del gruppo 2 - un agente che può causare malattie in soggetti umani e costituire un rischio per i lavoratori; è poco probabile che si propaghi nella comunità; sono di norma disponibili efficaci misure profilattiche o terapeutiche;
- agente biologico del gruppo 3 - un agente che può causare malattie gravi in soggetti umani e costituisce un serio rischio per i lavoratori; l'agente biologico può propagarsi nella comunità, ma di norma sono disponibili efficaci misure profilattiche o terapeutiche;
- agente biologico del gruppo 4 - un agente biologico che può provocare malattie gravi in soggetti umani e costituisce un serio rischio per i lavoratori e può presentare un elevato rischio di propagazione nella comunità; non sono disponibili, di norma, efficaci misure profilattiche o terapeutiche.

Nell'allegato XLVI del d.lgs. n. 81/2008 è riportato un elenco degli agenti biologici classificati nei gruppi 2, 3 e 4, in cui ritroviamo le specie di Legionella di maggiore interesse sanitario (Tabella 1):

Legionella pneumophila subsp. *fraseri*	2
Legionella pneumophila subsp. *pascullei*	2
Legionella pneumophila subsp. *pneumophila*	2
Legionella spp.	2

Tabella 1. Estratto allegato XLVI del d.lgs. n. 81/2008

2.2. Linee guida per la prevenzione e il controllo della Legionellosi", allegato A dell'accordo Stato-Regioni del 7 maggio 2015.

Le "Linee guida per la prevenzione e il controllo della Legionellosi", aggiornate alla luce delle nuove conoscenze scientifiche, sono state approvate dalla Conferenza Stato Regioni nella seduta del 07 maggio 2015.
Il documento è stato pubblicato con l'intento di riunire, aggiornare e integrare quanto previsto da tutte le precedenti linee guida nazionali e normative vigenti. Le linee guida si compongono di 6 capitoli di 13 allegati.
Il primo ed il secondo capitolo sono dedicati agli aspetti generali della Legionellosi (ovvero fonti di infezione, modalità di trasmissione di Legionella, sintomi, etc.) e al funzionamento del sistema di sorveglianza e di indagine epidemiologica.

Il terzo capitolo focalizza l'attenzione sul protocollo di controllo del rischio Legionellosi che si fonda su 3 fasi sequenziali tra loro correlate, ovvero:

- valutazione del rischio;
- gestione del rischio;
- comunicazione del rischio.

Nel capitolo vengono fornite le istruzioni per l'effettuazione della valutazione del rischio e se ne dispone l'obbligatorietà nelle strutture con impianti a rischio Legionellosi quali strutture turistico-ricettive, stabilimenti termali e strutture sanitarie.

Il quarto capitolo è dedicato ai metodi di prevenzione e di controllo della contaminazione da Legionella da adottarsi in un sistema idrico.

Le misure, suddivise in due categorie principali, misure a breve termine e misure a lungo termine, vengono descritte in modo puntuale nell'allegato 13 delle linee guida.

Gli ultimi due capitoli trattano rispettivamente le indicazioni per la progettazione, la realizzazione e la gestione di diverse tipologie di impianti a rischio (idro-sanitari, aeraulici, termali e di raffreddamento a torri evaporative), ed il rischio Legionellosi correlato a specifiche attività professionali.

Nel quinto capitolo meritano evidenza le istruzioni riportate al p.to 5.2 per la realizzazione di impianti idro-sanitari, da applicarsi in tutte le strutture di nuova edificazione ed in quelle soggette a ristrutturazione totale, che prevedono:

- le reti idriche devono essere realizzate nel modo più lineare possibile e prive di rami ciechi o di zone senza circolazione di acqua;
- i boiler e i serbatoi di accumulo devono essere ispezionabili e dotati di un rubinetto sul fondo per lo spurgo del sedimento; un secondo rubinetto per il prelievo di campioni d'acqua deve essere previsto ad un'altezza non superiore ad 1/3 di quella dei serbatoi qualora il primo rubinetto non risulti adatto allo scopo;
- i materiali utilizzati nella realizzazione degli impianti devono avere caratteristiche tali da consentire i trattamenti di disinfezione;
- negli impianti centralizzati viene raccomandata la realizzazione di un sistema di ricircolo utile a garantire nella rete idrica una temperatura dell'acqua non inferiore ai 50°C, pertanto negli impianti centralizzati con sistema di ricircolo la temperatura dell'acqua deve risultare non inferiore ai 60°C nei serbatoi di accumulo e non inferiore ai 50°C alla base delle colonne di ricircolo;
- al fine di prevenire le ustioni, devono essere installati dei dispositivi per la miscelazione collocati in corrispondenza dei punti di erogazione o al più ad una distanza di 2 metri da questi ultimi.

Le disposizioni dettate dalle linee guida sono applicabili in regime di obbligatorietà soltanto in impianti siti presso attività lavorative, e appaiono limitate soprattutto per quanto è inerente alla gestione degli impianti.

3. Linee guida internazionali per la prevenzione ed il controllo della legionellosi

In ambito internazionale diversi paesi hanno adottato linee guida e/o disposizioni legislative in merito alla realizzazione e alla gestione degli impianti al fine della prevenzione ed il controllo della proliferazione di Legionella.
In particolare, sono state esaminate le indicazioni per il controllo della proliferazione di Legionella negli impianti ad uso civile privato utilizzate in Germania, nel Regno Unito, negli Stati Uniti e in Australia, ritenute tra le diverse esaminate le più dettagliate, al fine di individuare possibili strategie applicabili, nella medesima tipologia di impianti, nel nostro paese.
Di seguito vengono evidenziati sinteticamente gli aspetti di particolare rilevanza delle disposizioni estere considerate.
Le disposizioni vigenti in Germania si concentrano sull'importanza di un adeguato flusso di ricircolo dell'acqua calda sanitaria e sulla corretta manutenzione generale degli impianti e, inoltre, pongono particolare attenzione alla gestione e alla manutenzione degli impianti solari termici integrati ai sistemi di riscaldamento, con specifica considerazione dei collettori solari, della corretta pulizia e disinfezione e dei serbatoi di accumulo. Su quest'ultimo aspetto meritano menzione le linee guida per la gestione dei serbatoi di accumulo di acqua calda, Technische Regel für Trinkwasser-Installationen (TRWI), che richiedono la pulizia regolare dei serbatoi, il monitoraggio dei livelli di Legionella e l'implementazione di misure di sicurezza, come l'isolamento termico e la disinfezione periodica dell'acqua. La temperatura dell'acqua calda sanitaria dovrebbe essere mantenuta tra 55°C e 60°C.
Le linee guida del Regno Unito si concentrano sulla progettazione, l'installazione e la gestione degli impianti al fine di prevenire la proliferazione di Legionella. Sono incoraggiate le pratiche di progettazione che riducono la formazione di punti morti e garantiscono un flusso adeguato dell'acqua oltre che l'utilizzo di apparecchiature che limitano la crescita di biofilm al loro interno. Nel Regno Unito, di particolare rilievo si riscontrano le linee guida fornite dall'Health and Safety Executive (HSE), descritte nel documento di riferimento HSG274. Queste linee guida offrono indicazioni specifiche sulla pulizia, la disinfezione e la manutenzione dei serbatoi di accumulo di acqua calda per prevenire la proliferazione di legionella. Viene raccomandata una temperatura di mandata per l'acqua calda sanitaria tra i 50°C e i 60°C.
Negli Stati Uniti le raccomandazioni applicate si basano su standard e linee guida pubblicate da organizzazioni come ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) e CDC (Centers for Disease Control and Prevention). Le linee guida enfatizzano l'importanza della progettazione, installazione e manutenzione adeguata degli impianti idrici e incoraggiano misure preventive come la pulizia regolare degli impianti, il controllo del biofilm e la corretta gestione dei serbatoi di accumulo. La temperatura raccomandata per l'acqua calda sanitaria varia tra i 49°C e i 60°C.

In Australia, trattandosi di uno stato federale, le linee guida sono fornite dagli Health Department o dalle Health Authority a cui si aggiungono disposizioni specifiche dettate dai diversi Stati o Territori. In via generale, tutte le disposizioni legislative e tutte le linee guida vigenti nei diversi territori australiani rivolgono attenzione al monitoraggio dei sistemi di acqua calda sanitaria e alla prevenzione delle contaminazioni attraverso la pulizia e la disinfezione periodica degli impianti. Nelle diverse disposizioni viene sottolineata l'importanza di una corretta progettazione e manutenzione degli impianti e la necessità di un sistema di ricircolo per evitare punti morti e garantire un flusso adeguato dell'acqua. I serbatoi di accumulo dell'acqua calda sanitaria devono essere sottoposti a disinfezione regolare utilizzando metodi appropriati, come l'uso di cloro o altri agenti disinfettanti. In Australia viene infine raccomandato il mantenimento della temperatura dell'acqua calda sanitaria tra i 60°C e i 65°C e viene consigliato un monitoraggio regolare della temperatura dell'acqua e un controllo dei sistemi di ricircolo al fine di garantire sia il rispetto dei valori di temperatura che il corretto funzionamento degli impianti.

4. Linee guida per il controllo della Legionella del South Australia

Tra le diverse linee guida per il controllo della Legionella vigenti in Australia è stato posto particolare interesse all'analisi delle "Guidelines for the control of Legionella in Manufactured water system in South Australia", Revised 2013, poiché risultate più complete e di particolare interesse per quanto concerne le strutture private residenziali. Le linee guida forniscono indicazioni su sistemi ed impianti di acqua calda, oltre che su sistemi di raffreddamento ad acqua, e sono strettamente correlate alle norme nazionali australiane AS/NZS 3666 a cui tutti gli impianti, di nuova costruzione o modificati, devono comunque essere conformi. Le linee guida oltre a definire ruoli e responsabilità delle figure coinvolte nella realizzazione e gestione degli impianti, forniscono indicazioni in merito a:

- progettazione, installazione e messa in servizio degli impianti;
- funzionamento e manutenzione dei sistemi idrici;
- test microbiologici per il rilevamento e monitoraggio della Legionella da effettuarsi sugli impianti;
- procedure di decontaminazione da effettuarsi sugli impianti;
- manuali d'uso e manutenzione e registri di manutenzione degli impianti.

Focalizzando l'attenzione sugli impianti ad acqua calda, questi vengono considerati nel documento di due tipologie:

- Impianti di tipo A, costituiti da un sistema idrico che distribuisce o ricircola acqua calda ad una temperatura di 60°C, tipicamente utilizzati per fornire acqua riscaldata negli edifici per diversi scopi (ad es. bagni o pulizie);
- Impianti di tipo B, costituiti da un sistema idrico che distribuisce o ricircola acqua calda ad una temperatura di 45°C, tipicamente utilizzati in strutture di assistenza

come ospedali, centri per la prima infanzia, scuole primarie e secondarie, case di cura e altre strutture sanitarie.

Relativamente alla progettazione, installazione e messa in servizio degli impianti, il testo dà disposizioni sia di carattere generale, da applicarsi a tutti gli impianti, e sia di tipo specifico, da applicarsi alle diverse tipologie di impianto. In via generale, la messa in servizio di ogni impianto deve prevedere un'accurata pulizia e la fornitura di manuali e registri di manutenzione. La progettazione di un impianto deve prevedere una serie di valutazioni preliminari come l'individuazione del corretto posizionamento delle componenti, che deve tener conto dell'accessibilità e delle problematiche correlate ad operazioni di pulizia e di disinfezione. Nella definizione di un impianto ad acqua calda, inoltre, devono essere utilizzate componenti aventi caratteristiche di resistenza alla corrosione e alle condizioni dettate tanto dalla qualità dell'acqua utilizzata nell'impianto quanto dalle sostanze chimiche che potranno essere utilizzate nei trattamenti di disinfezione. Devono anche essere evitati i rami ciechi e, nel caso di modifiche, questi devono essere rimossi se presenti. Le condutture di derivazione non devono avere lunghezza superiore ai 6 metri, così come le tubazioni a valle di dispositivi termostatici di miscelazione.

Per gli impianti di tipo A, di interesse del presente lavoro, per inibire lo sviluppo di Legionella, nei serbatoi di accumulo il fluido deve essere mantenuto ad una temperatura sempre superiore ai 60°C. Negli accumuli e nei riscaldatori, inoltre, deve essere impedita la stratificazione della temperatura del fluido; a tal fine, per tali attrezzature, deve essere previsto l'utilizzo di un agitatore o, in alternativa, l'installazione di un sistema di ricircolo/miscelazione. Il programma di manutenzione deve prevedere ispezioni almeno mensili con misurazione della temperatura dell'acqua in corrispondenza dei sistemi di accumulo e di tutti i punti di erogazione; nel caso di punti di erogazione poco utilizzati, questi devono essere sciacquati a pieno flusso par almeno 15 secondi. Almeno ogni 12 mesi, inoltre occorre che vengano effettuate:

- una manutenzione secondo le indicazioni del fabbricante con successiva decontaminazione prima della rimessa in servizio (con soluzione di cloro o pastorizzazione) dei dispositivi di controllo della temperatura, compresi miscelatori e valvole miscelatrici;
- una decontaminazione delle tubazioni poste a valle dei dispositivi di cui sopra.

5. Linee guida per il controllo della Legionella del UK

Sono risultate di particolare interesse anche le disposizioni inglesi dettate dalle HSG274 Parte 2 (ed. 2014), che vengono applicate sia agli impianti idrici presenti nei luoghi di lavoro ad alto rischio, quali strutture sanitarie, case di cura, case residenziali etc. e sia agli impianti ad uso domestico.

Il documento fornisce informazioni dettagliate:

- sulle tipologie di impianti per acqua fredda e calda;

- sulla progettazione degli impianti e sulle caratteristiche delle loro componenti;
- sulle procedure per la messa in servizio degli impianti;
- sulle modalità di esecuzione e sugli aspetti da considerare nella valutazione del rischio Legionella da effettuarsi sugli impianti;
- sulle procedure di monitoraggio e controllo degli impianti;
- sui metodi di disinfezione;
- sulle procedure da applicare in caso di riscontro di focolai di Legionella.

Nella fase di progettazione di un impianto, oltre ad aspetti di carattere generale come la qualità dell'acqua da utilizzare o le situazioni che possono portare a stagnazione del fluido termovettore, le linee guida invitano il progettista a valutare:

- i sistemi di accumulo da installare strettamente necessari, che non devono essere eccessivi rispetto alle necessità;
- le componenti e i punti di erogazione dell'impianto che non devono essere causa di tratti di impianto in cui si verifichino ristagni d'acqua;
- le temperature di esercizio nelle diverse parti dell'impianto che non devono favorire lo sviluppo della Legionella;
- i materiali impiegati per le componenti di impianto che non devono favorire la crescita microbica o la manifestazione di fenomeni corrosivi, anche in relazione alla qualità dell'acqua utilizzata;
- la collocazione delle componenti di impianto che devono risultare facilmente accessibili e ispezionabili, oltre che favorire tanto le operazioni di manutenzione quanto le operazioni di pulizia e disinfezione;
- l'utilizzo di raccordi e tubazioni flessibili che sono indicati come da evitare (se non strettamente necessari) in impianti considerati ad alto rischio.

Da un punto di vista tecnico, e in particolare negli impianti ad acqua calda, il progettista deve inoltre rispettare le seguenti indicazioni:

- la temperatura dell'acqua deve risultare non inferiore ai 60°C in corrispondenza delle mandate di generatori e serbatoi di stoccaggio, e non inferiore ai 50°C (55°C per locali ad uso sanitario) in corrispondenza dei ritorni ai serbatoi di accumulo;
- devono essere predisposti apparecchi per la misurazione della temperatura sulle mandate e sui ritorni dei bollitori oltre che alla base di questi ultimi;
- le tubazioni di erogazione dell'acqua devono avere una lunghezza il più possibile limitata e devono essere coibentate al fine di garantire una temperatura di uscita dell'acqua pari ad almeno 50-55°C;
- nel caso di utilizzo di più bollitori per ACS, questi devono essere sempre collegati in parallelo e in modo da garantire una temperatura di mandata dell'acqua di 60°C;
- i sistemi di intercettazione o le pompe presenti sul circuito devono essere posizionati in modo da risultare facilmente monitorabili e da non generare tratti di circuito in cui il fluido permanga in stagnazione in caso di guasto;
- i vasi di espansione eventualmente presenti devono:

- essere dimensionati in modo da favorire il flusso d'acqua all'interno o minimizzare il volume d'acqua trattenuto all'interno;
- essere collocati in aree sufficientemente fresche;
- essere installati su tratti di tubazione a fluido freddo e possibilmente in corrispondenza dell'ingresso della rete idrica;
- essere installati verticalmente sulle tubazioni al fine di evitare l'accumulo di detriti;
- essere corredati di una valvola che ne consenta l'intercettazione e lo svuotamento al fine di permettere interventi di pulizia e manutenzione;
- essere preferibilmente con un design a "flusso passante", che garantisce minore possibilità di ristagno dell'acqua, come nell'ultimo caso della Figura 2.

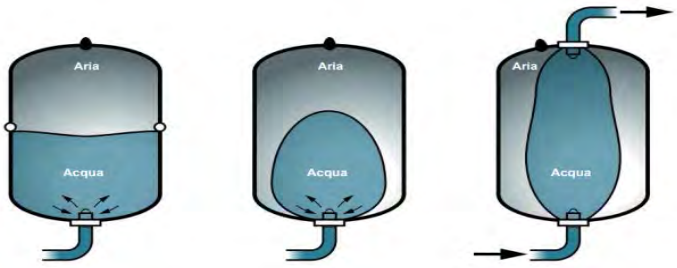


Figura 2. Vasi di espansione

- per i bollitori a riscaldamento indiretto (Figura 3), poiché in questi recipienti l'acqua fredda entra tipicamente alla base del bollitore, creando un'area sotto la serpentina dove la temperatura iniziale dell'acqua miscelata può favorire la crescita microbica, si deve evitare tale stratificazione mediante l'installazione di una pompa di ricircolo temporizzata, per far circolare l'acqua dalla parte superiore del boiler alla base durante il periodo di minore richiesta. La pompa di circolazione dovrebbe essere attivata quando la domanda di ACS è al minimo e di conseguenza probabilmente la temperatura all'interno del bollitore è massima, condizione che spesso si verifica durante le prime ore del mattino. Il generatore di calore deve essere funzionante mentre la pompa di ricircolo è attiva per garantire il raggiungimento di una temperatura di almeno 60 °C in tutto il serbatoio per almeno un'ora al giorno. Inoltre, il collegamento della tubazione di ritorno della pompa di ricircolo dovrà essere collegata il più in basso possibile sul bollitore. In alternativa alla pompa di ricircolo, alcuni bollitori sono dotati di serpentine estese fino alla base per favorire la miscelazione convettiva durante il riscaldamento. Il particolato può accumularsi alla base del bollitore, quindi il design deve includere una valvola di scarico facilmente accessibile.

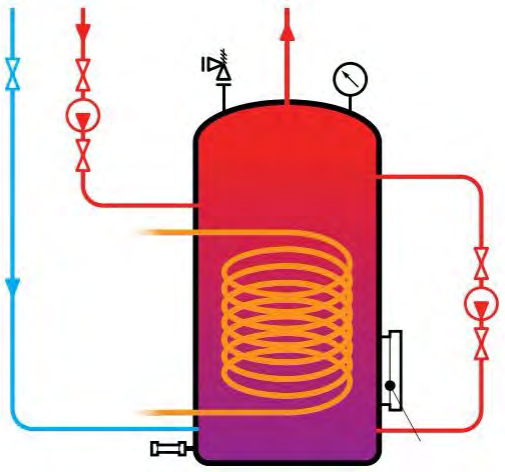


Figura 3. Bollitore a riscaldamento indiretto

- nei bollitori collegati a sistemi di riscaldamento con pannelli solari (Figura 4), che hanno due serpentine di riscaldamento, una alimentata dalla fonte di calore convenzionale (caldaia, scambiatore di calore, etc.) e una dai pannelli solari, il serpentino solare è solitamente posizionato nella parte inferiore del bollitore e viene utilizzato per preriscaldare il "volume solare dedicato", ovvero il volume d'acqua che può essere riscaldato solo dall'apporto solare, invece il serpentino collegato al generatore di calore è montato sopra il serpentino solare e pertanto riscalda a 60°C solo l'acqua presente nella parte superiore del bollitore. Pertanto, come per i bollitori convenzionali, anche in questo caso si creerà una stratificazione della temperatura dell'acqua contenuta nel bollitore che fornisce condizioni favorevoli per la crescita microbica, inclusa Legionella, alla base del recipiente; inoltre, nei periodi in cui la produzione di calore dai pannelli solari è minima, potrebbe addirittura esserci un volume maggiore di acqua a una temperatura ridotta, rispetto ai sistemi convenzionali. Ne deriva che questi sistemi devono essere progettati in modo tale che la temperatura dell'acqua calda nel bollitore non sia compromessa durante i periodi in cui vi è poca produzione di calore dai pannelli solari. Se il serpentino solare non genera temperature tali da provocare l'inattivazione termica del batterio della legionella e il tempo di permanenza dell'acqua a contatto con il serpentino della caldaia a 60°C è inferiore a quello necessario per effettuare l'inattivazione termica, deve essere previsto un ulteriore livello di controllo. Ad esempio, deve essere presa in considerazione la programmazione della serpentina della caldaia per riscaldare l'intero contenuto del serbatoio dell'acqua calda solare una volta al giorno, preferibilmente durante il periodo in cui vi è poca richiesta di acqua calda. Inoltre può essere utilizzata una pompa di ricircolo per spostare l'acqua calda dalla parte superiore del bollitore alla base, tuttavia non dovrebbe essere utilizzata continuamente ma per circa un'ora al giorno e controllata mediante un orologio. Laddove il controllo della

temperatura all'interno del bollitore non viene garantito, devono essere prese in considerazione misure alternative come l'uso di biocidi appropriati.

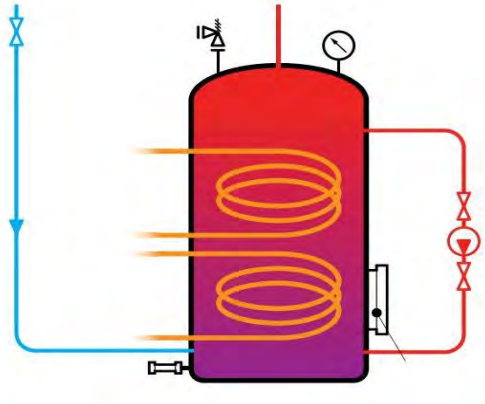


Figura 4. Bollitore a riscaldamento solare

6. Conclusioni

Dai sopralluoghi condotti in campo è emerso che la soluzione impiantistica prescelta, per la quasi totalità degli impianti per la produzione ACS ad uso domestico, alimentati da generatore di calore a gas metano ed integrati da impianto solare termico, presenta dei rischi legati alla proliferazione di Legionella all'interno dei bollitori, dovuti essenzialmente ad una cattiva gestione dello shock termico in termini di periodicità e durata e ad un inadeguato sistema di ricircolo. Poiché la normativa italiana vigente è obbligatoria per i soli impianti a servizio dei luoghi di lavoro o di strutture soggette a rischi particolari quali ospedali, case di cura, impianti termali etc. mentre per gli impianti civili ad uso privato non esistono delle linee guida specifiche, è stato condotto uno studio delle linee guida internazionali. Tra queste sono risultate particolarmente efficaci e dettagliati gli accorgimenti impiantistici previsti dalle linee guida del South Australia e dalla HSG274 inglese. In entrambi i casi viene posta un'attenzione particolare al sistema di ricircolo/miscelazione del bollitore ACS, che deve impedire che al suo interno l'acqua si stratifichi secondo temperatura, generando una zona inferiore a rischio proliferazione di Legionella. Inoltre, nelle linee guida del Regno Unito si fa riferimento anche al vaso di espansione a servizio del bollitore ACS che può esso stesso rappresentare un punto di proliferazione batterica. In conclusione, si auspica che le linee guida nazionali vengano estese agli impianti ad uso civile privato ed implementate con accorgimenti tecnici atti a prevenire la proliferazione di Legionella anche in tale tipologia di impianti.

Bibliografia

[1] d.m. 01/12/1975 e Raccolta R ed.2009.
[2] d.lgs. del 09/04/2008 n. 81 e Accordo Stato Regioni n.79/CSR del 7 maggio 2015.
[3] AS/NZS 3666. Air-handling and water systems of buildings – Microbial control. Standards Association of Australia.

[4] Guidelines for the control of Legionella in Manufactured Water Systems in South Australia. Health Protection Programs, Public Health Services, Public Health and Clinical Systems, Department for Health and Ageing. Rev. 2013.
[5] HSG274 part 2: Legionnaires' disease: The control of legionella bacteria in hot and cold water systems. HSE. 2014.
[6] ASHRAE Guideline 12-2000: Minimizing the Risk of Legionellosis Associated with Building Water Systems. ASHRAE Standard Project Committee 12-2000. 2000.

Sicurezza nell'utilizzo di serbatoi GPL

M. del Gaudio[1], R. Modestino[1], C. Festa[2], J. Pardi[3]

[1] Inail - Uot di Avellino
[2] Comando VV.F. di Avellino
[3] Energas Q8 S.p.A.

Abstract

Nelle aree non raggiunte da reti di gas metano vengono normalmente installati serbatoi di gas GPL riforniti periodicamente con autocisterne. Il serbatoio può essere esterno oppure interrato e viene normalmente messo a disposizione in comodato dall'azienda fornitrice del gas che provvede all'installazione e garantisce la manutenzione e le verifiche di sicurezza necessarie.
L'installazione di serbatoi di GPL prevede un iter burocratico ormai standardizzato ma, nonostante ciò, alcuni infortuni occorsi agli addetti durante l'utilizzo hanno dimostrato che non sempre la correttezza dei documenti garantisce la sicurezza degli impianti.
Con questo lavoro si vuole ribadire quale è il corretto iter autorizzativo cercando di evidenziare le criticità, spesso causa di incidenti, e evidenziare il contributo che può dare l'utilizzatore finale al fine di aumentare l'utilizzo in sicurezza dell'impianto.

Keywords: serbatoi, gpl, sicurezza.

1. Introduzione

L'impianto di stoccaggio del GPL è costituito essenzialmente da uno o più serbatoi, progettati e costruiti secondo quanto previsto dalla Direttiva Europea 2014/68/UE sugli apparecchi a pressione. I serbatoi, a seconda delle caratteristiche costruttive, possono essere interrati (collocato totalmente sotto il piano di campagna), ricoperti (collocato totalmente o parzialmente sopra il piano di campagna) o fuori terra.
Generalmente il serbatoio di GPL viene concesso in comodato d'uso gratuito dal fornitore, oppure il serbatoio può essere di proprietà dell'utilizzatore. In base alla scelta effettuata dall'utilizzatore finale si possono individuare le figure responsabili della gestione dell'impianto, della sua manutenzione e degli aspetti legati alla sicurezza. Generalmente la concessione in comodato d'uso è la più frequente. In questo caso sarà il fornitore a seguire tutto l'iter di installazione e manutenzione periodica dell'impianto come previsto dal comma 4 dell'art. 10 del Decreto Legislativo 11 febbraio 1998 n° 32, modificato dall' art. 5 del D.Lgs. 8 settembre 1999, n° 346, che prevede che le aziende distributrici di GPL assicurino i servizi di installazione e di manutenzione riforniti, rilasciando apposita certificazione ai sensi del D.M. Sviluppo Economico n° 37 del 22 gennaio 2008 che sostituisce gli adempimenti dettati dalla Legge n. 46 del 5 marzo 1990. Il medesimo riferimento normativo prevede inoltre la

possibilità che “Gli utenti possono richiedere la medesima certificazione a uno dei soggetti previsti dal D.M. S.E. n° 37/2008 (già Legge n° 46/1990), anziché alle aziende distributrici, esonerandole espressamente”.

2. Gli adempimenti relativi alla installazione degli impianti di stoccaggio gpl

2.1 Adempimenti antincendio

Il GPL è un fluido caratterizzato da un’elevata infiammabilità; è costituito da una miscela di idrocarburi formata principalmente da propano e butano e di per sé è inodore, ma viene addizionato con odorizzanti caratteristici onde rendere immediatamente avvertibili perdite anche di piccole entità.
IL GPL miscelato con l'aria in determinate proporzioni, forma una "miscela esplosiva" che si accende istantaneamente se si raggiunge la “temperatura di accensione” corrispondente a 515°C.
In condizioni ambientali affinché si generi l’accensione della miscela GPL/aria è necessario, quindi, un innesco che può essere di vario tipo ossia, a titolo esemplificativo e non esaustivo si menzionano, una scintilla, una fiamma, un corpo incandescente o una resistenza elettrica accesa.
L'accensione di una miscela di questo tipo ha carattere esplosivo e se si verifica all’interno di un locale chiuso può determinare un’onda di pressione o onda d’urto capace di causare il crollo strutturale di edifici oppure anche soltanto di parti di essi (ad es. pareti o soffitti).
In relazione ai sopra rappresentati rischi, anche se l’art. 17 del D.Lgs. n° 128 del 22 febbraio 2006 connota ai fini urbanistici l’installazione dei serbatoi di GPL come “edilizia libera”, quindi soggetta alla sola comunicazione, l’installazione dei serbatoi per GPL è soggetta al controllo del C.N.VV.F. e soggiace al rispetto di specifiche procedure e normative antincendio.
Ai fini della prevenzione di tali eventi e scenari incidentali trova applicazione lo specifico D.M. Interno 14 maggio 2004 “Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per l’installazione e l’esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 13 m^3 ” (come modificato dal D.M. Interno 14 marzo 2014), nonché il D.P.R. 1 agosto 2011, n. 151 anche nei contesti più articolati e complessi presenti in tutte le attività soggette al controllo del C.N.VV.F. ai fini della prevenzione incendi così come elencate nell’Allegato I al predetto decreto.
Nell'allegato I al D.P.R. n° 151/2011 i serbatoi con capacità uguale o **superiore a 0,3 m^3**, vengono classificati in 3 categorie in base al loro volume:

1. **Categoria A:**
depositi di GPL **fino a 5 m3**
2. **Categoria B:**
depositi di GPL **da 5 m^3 fino a 13 m^3**
3. **Categoria C:**
depositi di GPL **oltre i 13 m^3**

Partendo da questa categorizzazione, è possibile citare gli adempimenti antincendio da osservare per mantenere in sicurezza sia la zona di installazione del serbatoio che i relativi impianti da esso alimentati: per legge il proprietario del serbatoio (o in alternativa, in caso di comodato d'uso, il fornitore), deve presentare la "Segnalazione Certificata di Inizio Attività (SCIA) ai fini della sicurezza antincendio" al Comando provinciale dei Vigili del Fuoco competente per territorio, che costituisce una certificazione attestante che il serbatoio Gpl rispetta le regole ed i requisiti di prevenzione incendi.

Punto	attività	Obblighi
Punto 4 sottocategoria 3 **Categoria A** dell'Allegato I al d.P.R. n° 151/2011	attività dove il serbatoio ha una capacità geometrica da 0,3 m^3 fino a 5 m^3	. soggiace all'obbligo di presentazione della SCIA, ai sensi dell'art. 4 del D.P.R. n° 151/2011, conseguentemente alla quale può darsi corso all'inizio dell'esercizio dell'attività.
Punto 4 sottocategoria 5 **Categoria B** dell'Allegato I al d.P.R. n° 151/2011	attività dove il serbatoio ha una capacità geometrica da 5 m^3 e fino a 13 m^3	. soggiace all'obbligo di richiedere la valutazione progetto, ai sensi dell'art. 3 del D.P.R. n° 151/2011, per ricevere il **parere di conformità favorevole** dal Comando dei Vigili del Fuoco per presentare la SCIA, ai sensi dell'art. 4 del D.P.R. n° 151/2011, una volta acquisito il parere favorevole sul progetto ed ultimati i lavori.
Punto 4 sottocategoria 7 **Categoria C** dell'Allegato I al d.P.R. n° 151/2011	attività dove il serbatoio ha una capacità geometrica superiore ai 13 m^3	. soggiace all'obbligo di richiedere la valutazione progetto, ai sensi dell'art. 3 del D.P.R. n° 151/2011, per ricevere il parere di conformità favorevole dal Comando dei Vigili del Fuoco per presentare, una volta acquisito il parere favorevole sul progetto ed ultimati i lavori, la SCIA, ai sensi dell'art. 4 del D.P.R. n° 151/2011. In questo caso, il Comando dei Vigili del Fuoco entro 60 giorni dall'avvenuta presentazione ossia ricezione della istanza effettuerà un sopralluogo per eseguire i controlli di conformità; in caso di esito positivo a seguito del sopralluogo, Il Comando VV.F. rilascia il Certificato di Prevenzione Incendi.

Tabella 1. Classificazione D.P.R. n° 151/2011

È utile porre in risalto, per sgomberare il comune pensare da ogni sorta di interpretazione o impropria considerazione, che la su indicata classificazione in Categorie A, B e C, deriva ed è frutto di quanto sancito dall'art. 2 comma 3. del d.P.R. n° 151/2011 il cui testo per celerità di consultazione si ritrascrive nel seguito: "Le attività sottoposte ai controlli di prevenzione incendi si distinguono nelle categorie A, B e C, come individuate nell'Allegato I, in relazione alla dimensione dell'impresa, al settore di attività, alla esistenza di specifiche regole tecniche, alle esigenze di tutela della pubblica incolumità".
Ebbene nel caso dei serbatoi per GPL l'esistenza di una specifica regola tecnica (ndr, D.M. Interno 14/05/2004 modificato/integrato dal D.M. Interno 14/03/2014), che regolamenta attività di tale tipo, appare senza dubbio l'elemento principe che fa ricondurre tale deposito di gas (liquefatto), altamente infiammabile, nella Categoria A seppure limitatamente ai serbatoi di capacità geometrica fino a 5 m^3, mentre nel caso di capacità geometriche superiori (dai 5 m^3 ai 13 m^3 od anche superiori ai 13 m^3) rientra rispettivamente nelle Categorie B e C; classificazioni queste ultime che appare verosimile siano state concepite dal legislatore in relazione alla dimensione dell'impresa ed alle esigenze di tutela della pubblica incolumità, in quanto i depositi GPL di maggiori dimensioni asservono, di regola, attività più complesse come utenze industriali, luoghi di lavoro oppure edifici plurifamiliari e non singole utenze in fabbricati non plurifamiliari come invece avviene nella stragrande maggioranza dei casi di installazione di serbatoi fino a 5 m^3.
Non certamente può semplicisticamente valutarsi in materia di prevenzione incendi, un'attività a rischio basso sol perché classificata in Categoria A; difatti, per un deposito di GPL (da 0,3 m^3 e fino a 5 m^3) in relazione al potenziale rischio di esplosione in caso di fuoriuscita di gas, non può escludersi che possa creare atmosfere potenzialmente esplosive che qualora innescate da una sorgente di accensione rendano elevata la possibilità di un danno atteso, ossia prevedibile, significativo finanche in termini di perdita di vite umane oltre che di beni.

2.2 Denuncia di messa in servizio

Per questa tipologia di attrezzatura, trattandosi di recipienti a pressione che soggiacciono anche alla Direttiva PED, l'esonero delle verifiche è concesso dall'ISPESL/INAIL (art. 9 del D.M. 21/05/1974) limitatamente alle sole verifiche di funzionamento biennali previste dall'art. 13 D.M. n° 329/2004.
Rimane in ogni caso l'obbligo della verifica di integrità (decennale).
La disciplina degli esoneri è la seguente:
- Decreto del Ministero per lo Sviluppo Economico, 29 febbraio 1988, "Norme di sicurezza per la progettazione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 5 m^3" (G.U. 9 marzo 1988 n° 57);
- Decreto del Ministero delle Attività Produttive, 23 settembre 2004, "Modifica del decreto del 29 febbraio 1988, recante norme di sicurezza per la progettazione,

l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas, di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 5 m^3 e adozione dello standard europeo europeo UNI EN 12818 per i serbatoi di gas di petrolio liquefatto di capacità inferiore a 13 m^3. (G.U. Serie Generale n° 243 del 15/10/2004).
Nel 2019 lo standard UNI EN 12818 è stato sostituito dalla norma UNI EN 12817 "Ispezione e riqualifica dei serbatoi per gas di petrolio liquefatti (GPL) di capacità geometrica minore o uguale a 13 m^3".

3. I dispositivi di regolazione, controllo e sicurezza a corredo del serbatoio

L'analisi dei rischi di un impianto di stoccaggio gpl non può che partire dalla descrizione dei dispositivi di sicurezza di uno schema classico d'impianto.
Per quanto concerne la fabbricazione immissione sul mercato del serbatoio possono presentarsi diversi casi:

- Serbatoi fabbricati in accordo alla vecchia normativa nazionale, collaudati ex ISPESL, che potevano essere commercializzati fino alla data del 29/05/2002 ed essere messi in servizio anche dopo tale data.
- Serbatoi fabbricati in accordo alla Direttiva PED e marcati CE come attrezzature a pressione.
- Serbatoi fabbricati in accordo alla Direttiva PED e marcati CE come insiemi con i relativi accessori a corredo (accessori a pressione ed accessori di sicurezza).
- Serbatoi fabbricati in accordo alla vecchia normativa nazionale collaudati ex ISPESL, ricertificati in accordo alla Direttiva PED (tramite Organismi Notificati) e marcati CE come insiemi con i relativi accessori a corredo (accessori a pressione ed accessori di sicurezza).

Sul serbatoio è posizionata una targa identificativa sulla quale sono riportati tutti i dati caratteristici del serbatoio e il marchio CE identificativo dell'organismo notificato che ha effettuato la verifica di conformità.
Il serbatoio è equipaggiato con la seguente strumentazione per l'esercizio, controllo, sicurezza:

- 1 Valvola di riempimento



Progettata con lo scopo di permettere il rifornimento di gpl, superiormente presenta una filettatura idonea per l'allacciamento della manichetta di travaso, mentre inferiormente è presente un otturatore in posizione normalmente chiusa. All'atto del rifornimento, la pressione esercitata dalla pompa di travaso dell'autobotte provoca l'apertura di tale otturatore. Alla fine del riempimento, venendo a mancare la spinta dell'autobotte, l'otturatore di tenuta torna in sede assicurando la chiusura della valvola.

- 2 Gruppo di servizio per erogazione in fase gassosa.

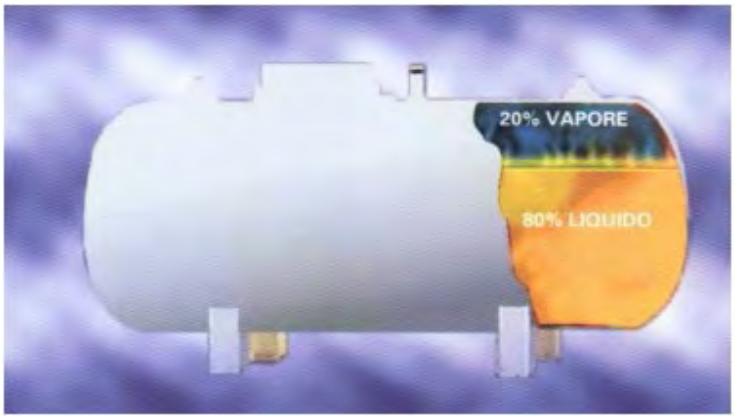
Sul serbatoio è montato un gruppo di servizio che risponde a diverse necessità di esercizio e di sicurezza. Si presenta in un unico blocco ed è formato dai seguenti dispositivi:

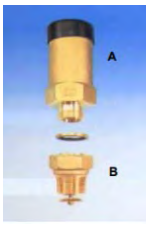


- Manometro di controllo (A). La scala di tale strumento di controllo va da 0 a 25 bar, con segno rosso su 17,65 bar corrispondente alla pressione massima di esercizio del piccolo serbatoio.
- Flangia (B) nella quale viene applicato dagli Organi di controllo il manometro campione per il controllo della taratura del manometro (A).
- Valvola di intercettazione sulla linea prelievo (C). Mediante tale valvola è possibile interrompere l'erogazione del gas dal serbatoio. Questa valvola serve all'utente per la messa in sicurezza dell'impianto (chiusura) in caso di anomalie o al termine della utilizzazione del GPL.
- valvola di eccesso di flusso che ha il compito di bloccare automaticamente l'erogazione del gas nel caso in cui la richiesta di gas diventi immediatamente molto elevata (ad esempio accidentale rottura della tubazione di prelievo).
- valvola di troppo pieno collegata ad un tubetto pescante posto all'interno del serbatoio di lunghezza tale da rilevare il raggiungimento di un grado di riempimento pari all'80%.



• 3 Prelievo in fase liquida
Sul serbatoio è realizzato un attacco, con tubo pescante fino sul fondo del serbatoio, sul quale è posizionata una valvola per il prelievo del gas in fase liquida.
• 4 Indicatore di livello a galleggiante
L'indicatore di livello fornisce in ogni momento la % di GPL in fase liquida contenuto all'interno del serbatoio. Il livello deve essere controllato periodicamente per conoscere la quantità di prodotto stoccato.
Durante il rifornimento l'indicatore di livello deve essere tenuto sotto controllo dall'autista della società distributrice del gas, il quale non dovrà superare il valore massimo dell'80%.



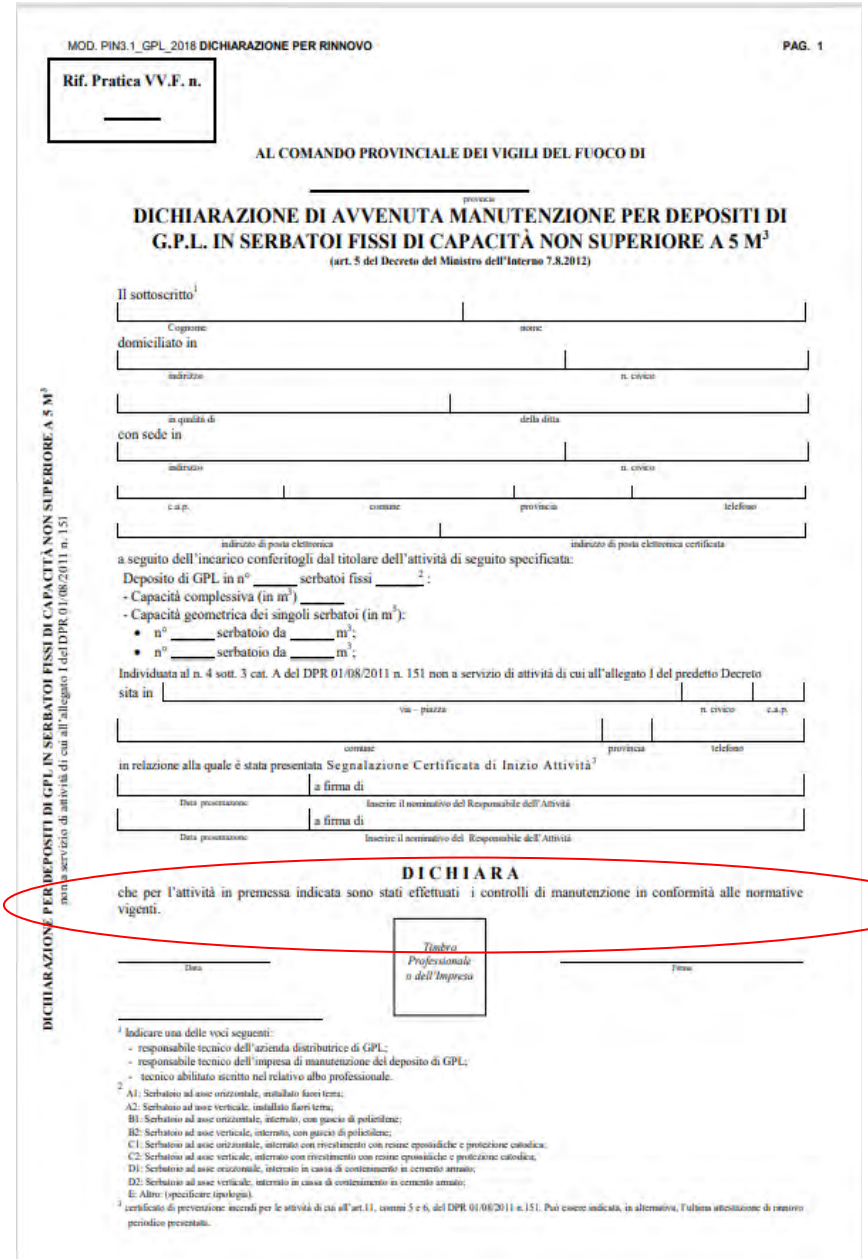


• 5 Valvola di sicurezza con sottovalvola
Scopo della valvola di sicurezza è quello di garantire che all'interno del serbatoio, per qualsivoglia motivo, non si superi la max pressione di esercizio per la quale il serbatoio è stato progettato e realizzato.

4. Misure di sicurezza

4.1 Adempimenti del fornitore

Tutte le parti dell'impianto hanno delle specifiche criticità. Il personale specializzato deve essere opportunamente formato in modo da poter gestire i singoli componenti e comprenderne eventuali malfunzionamenti, fornendo un'adeguata manutenzione periodica agli impianti.
I dispositivi di protezione debbono essere verificati ogni due anni ed il serbatoio ogni dieci anni. In occasione del rifornimento l'addetto (opportunamente formato) può comunque fare delle verifiche come previsto dalla Lettera-Circolare del Dipartimento VV.F. prot. n. 2720 del 07/04/2009 che ammette la possibilità che gli autisti delle autocisterne che provvedono al rifornimento del serbatoio possano rilasciare la certificazione di manutenzione di cui al comma 4. dell'art. 10 del D.Lgs. n° 32/1998 richiamata in introduzione.
In linea con la previsione legislativa appena richiamata l'art. 5 del D.M. Interno 07/08/2012 attribuisce al fornitore, per il tramite del responsabile tecnico dell'azienda di distribuzione del gpl o dell'impresa di manutenzione del deposito (in alternativa da parte di tecnico abilitato) l'onere di redigere una specifica dichiarazione al momento di presentare al Comando provinciale dei VV.F. l'Attestazione di Rinnovo Periodico della Conformità Antincendio, ossia il mod. PIN3.1_GPL_Dichiarazione per Rinnovo (Foto 1), che "sono stati effettuati i controlli di manutenzione in conformità alle normative vigenti" ad ulteriore dimostrazione della significativa valenza assegnata agli aspetti manutentivi.



MOD. PIN3.1_GPL_2018 **DICHIARAZIONE PER RINNOVO** PAG. 1

Rif. Pratica VV.F. n. _____

AL COMANDO PROVINCIALE DEI VIGILI DEL FUOCO DI _____ (provincia)

DICHIARAZIONE DI AVVENUTA MANUTENZIONE PER DEPOSITI DI G.P.L. IN SERBATOI FISSI DI CAPACITÀ NON SUPERIORE A 5 M³

(art. 5 del Decreto del Ministro dell'Interno 7.8.2012)

Il sottoscritto[1]

(Cognome) (nome)

domiciliato in

(indirizzo) (n. civico)

(in qualità di) (della ditta)

con sede in

(indirizzo) (n. civico)

(c.a.p.) (comune) (provincia) (telefono)

(indirizzo di posta elettronica) (indirizzo di posta elettronica certificata)

a seguito dell'incarico conferitogli dal titolare dell'attività di seguito specificata:

Deposito di GPL in n° _____ serbatoi fissi _____[2]:

- Capacità complessiva (in m³) _____
- Capacità geometrica dei singoli serbatoi (in m³):
  - n° _____ serbatoio da _____ m³;
  - n° _____ serbatoio da _____ m³;

Individuata al n. 4 sott. 3 cat. A del DPR 01/08/2011 n. 151 non a servizio di attività di cui all'allegato I del predetto Decreto

sita in (via – piazza) (n. civico) (c.a.p.)

(comune) (provincia) (telefono)

in relazione alla quale è stata presentata Segnalazione Certificata di Inizio Attività[3]

(Data presentazione) a firma di (Inserire il nominativo del Responsabile dell'Attività)

(Data presentazione) a firma di (Inserire il nominativo del Responsabile dell'Attività)

DICHIARA

che per l'attività in premessa indicata sono stati effettuati i controlli di manutenzione in conformità alle normative vigenti.

(Data) *Timbro Professionale o dell'Impresa* (Firma)

DICHIARAZIONE PER DEPOSITI DI GPL IN SERBATOI FISSI DI CAPACITÀ NON SUPERIORE A 5 M³ per n. servizio di attività di cui all'allegato I del DPR 01/08/2011 n. 151

[1] Indicare una delle voci seguenti:
- responsabile tecnico dell'azienda distributrice di GPL;
- responsabile tecnico dell'impresa di manutenzione del deposito di GPL;
- tecnico abilitato iscritto nel relativo albo professionale.

[2] A1: Serbatoio ad asse orizzontale, installato fuori terra;
A2: Serbatoio ad asse verticale, installato fuori terra;
B1: Serbatoio ad asse orizzontale, interrato, con guscio di polietilene;
B2: Serbatoio ad asse verticale, interrato, con guscio di polietilene;
C1: Serbatoio ad asse orizzontale, interrato con rivestimento con resine epossidiche e protezione catodica;
C2: Serbatoio ad asse verticale, interrato con rivestimento con resine epossidiche e protezione catodica;
D1: Serbatoio ad asse orizzontale, interrato in cassa di contenimento in cemento armato;
D2: Serbatoio ad asse verticale, interrato in cassa di contenimento in cemento armato;
E: Altro: (specificare tipologia).

[3] certificato di prevenzione incendi per le attività di cui all'art.11, commi 5 e 6, del DPR 01/08/2011 n.151. Può essere indicata, in alternativa, l'ultima attestazione di rinnovo periodico presentata.

Foto 1. Art. 5 del D.M. Interno 07/08/2012 Dichiarazione di avvenuta manutenzione.

Per i serbatoi interrati è importante verificare l'efficienza dell'impianto di protezione catodica che permettono la protezione del serbatoio dalla corrosione.
Devono essere rispettate tutte le disposizioni previste dal Titolo II del D.M. Interno 14 maggio 2004 (come modificato dal D.M. Interno 14 marzo 2014) relativi al luogo di installazione, agli elementi pericolosi e alle distanze di sicurezza e protezione.
Inoltre, i serbatoi GPL sono soggetti anche alla Direttiva 2014/34/UE (Atex); infatti rientrano nel campo di applicazione di tale direttiva le apparecchiature che da sole o combinate, per via delle potenziali sorgenti di innesco che sono loro proprie, rischiano di provocare un'esplosione. Pertanto, tali attrezzature/insiemi devono

essere conformi anche a questa direttiva e riportare l'appropriata marcatura Ex sulla targa dati.

Tuttavia, la letteratura ci fornisce alcuni spunti di riflessione su incidenti che hanno riguardato questa tipologia di impianti:

- Alcuni incidenti hanno provocato lo scoppio del serbatoio nella fase di carico. Successive indagini hanno evidenziato l'esistenza di cedimenti del serbatoio in prossimità delle linee di saldatura che sono punti che per primi si degradano e pertanto devono essere effettuati dei controlli non distruttivi periodici più specifici, come ad esempio ispezioni con liquidi non penetranti, metodo particolarmente idoneo per evidenziare e localizzare discontinuità superficiali.
- I serbatoi di Gpl sono stati spesso coinvolti in incendi boschivi dato che normalmente sono installati in aree rurali. La presenza di erba secca arbusti ecc. può creare un collegamento diretto e pertanto è sempre necessario mantenere l'area circostante libera da qualsiasi materiale infiammabile. Il D.M. 14 maggio 2004 impone, infatti, che i serbatoi fuori terra debbono aver un'area non minore di 5 m completamente sgombra e priva di vegetazione, mentre vicino ai serbatoi è vietata la presenza di alberi ad alto fusto per un raggio di 5 mt. dal contorno del serbatoio da intendersi come tali le piante che possono sviluppare l'apparato radicale in modo da poter arrecare danni al deposito; per tale motivo può considerarsi un utile riferimento la definizione indicata nella legge Forestale della Regione Marche n. 6 del 23/02/2005 che considera piante ad alto fusto quelle aventi un diametro di almeno 15 cm ad 1.30 mt da terra all'uopo precisando che la valutazione debba avvenire a prescindere dal grado di sviluppo della pianta stessa.
- Una particolare cura bisogna avere per manutenzione delle tubazioni avendo cura di proteggerle da eventuali danneggiamenti. La loro corretta installazione in un terreno sabbioso ad una profondità di almeno 60 cm. dovrebbe favorire, in caso di perdite, la dispersione in aria e scongiurare l'accumulo di sacche di gas.
- Gli incidenti avvenuti all'interno dell'abitazione riguardano normalmente fughe di gas attribuibili a scarsa manutenzione dell'impianto e degli apparecchi utilizzatori. Questi ultimi dovrebbero essere ormai dotati di sistemi automatici di interruzione del flusso in assenza di fiamma (termocoppie). Vale la pena ricordare che l'incendio del Gpl avviene quando c'è una miscela di gas ed aria in cui il Gpl ha una percentuale compresa fra il 2 e l'11 %. Il gas si deposita verso il basso e le zone potenzialmente più a rischio di esplosione sono quelle distanti dal punto di emissione dove la concentrazione può raggiungere i livelli di infiammabilità. Il gas GPL non ha un rischio di tossicità per chi lo inala ma in ogni caso può risultare asfissiante in ambienti confinati stante la caratteristica di stratificare in basso per il suo peso specifico superiore a quello dell'aria.
- È bene ricordare che l'impianto domestico deve sempre essere corredato da una dichiarazione di Conformità rilasciata, ai sensi dell'art. 7 del D.M. Sviluppo

Economico n° 37/2008, dall'installatore che dichiara di aver utilizzato scelte tecniche e materiali conformi alla normativa tecnica di riferimento (ndr, la UNI 7129 e la UNI 7131 riferite agli impianti per uso domestico e similari – vedasi anche Legge n. 1083/1971).

4.2 Accortezze dell'utilizzatore

Sebbene la normativa di riferimento sia molto chiara sulle procedure che un fornitore di impianti di stoccaggio gpl deve seguire per realizzare un impianto sicuro, limitando quasi totalmente gli oneri dell'utilizzatore finale a riguardo, è comunque importante che questi conosca almeno a grandi linee il contesto sia per evitare incidenti sia per un corretto impiego del gas, il suo contributo può infatti essere fondamentale per la corretta gestione del sistema.
In particolare, deve:

· curare che il serbatoio, le valvole di equipaggiamento, i regolatori di pressione non vengano manomessi, sottoposti a urti accidentali o a interventi empirici che ne possono inficiare la funzionalità e la sicurezza;

· evitare qualsiasi intervento, che non sia previsto nelle presenti istruzioni, e nel dubbio, richiedere l'intervento di personale specializzato;

· evitare qualsiasi modifica dell'impianto;

· rispettare le limitazioni previste per l'area immediatamente circostante il serbatoio;

· assicurarsi che la posizione del serbatoio sia chiaramente individuabile e realizzare cordoli di protezione di altezza minima pari a 20 cm nel caso in cui il serbatoio interrato ad una distanza inferiore di 5 metri da aree transitabili da autoveicoli;

· assicurarsi, da parte dell'utente che terminato l'uso del gas, tutti i rubinetti degli apparecchi utilizzatori siano perfettamente chiusi e, se prevede di non doverlo riutilizzare entro breve tempo, chiudere anche le valvole del serbatoio;

· prestare sempre la massima attenzione alle aperture di ventilazione permanente (protette da griglie), poste in alto e in basso della parete perimetrale esterna del locale in cui è installato l'utilizzatore a gpl, che dovranno essere mantenute sgombre ossia non ostruite da mobili, oggetti o quant'altro;

· appurare, se viene rilevata una diminuzione dell'erogazione del gas non dovuta all'esaurimento del prodotto nel serbatoio, che essa non sia cagionata dai bruciatori di utilizzazione sporchi o starati;

· qualora si dovesse rilevare anche un lieve odore di gas nell'ambiente, è necessario arieggiare il locale creare correnti d'aria, ed evitare assolutamente di azionare interruttori elettrici, accendere fiamme o fumare;

· qualora si dovesse rilevare anche un lieve odore di gas nell'intorno del serbatoio, nel caso di serbatoi interrati è necessario arieggiare il pozzetto perché, potrebbe essere saturo di gas dato che il gpl è più pesante dell'aria e tende a depositarsi nelle

cavità. È necessario vigilare e segnalare i pericoli con apposita segnaletica affinché nessuno nelle vicinanze del serbatoio, possa accendere fiamme o fumare;

· periodicamente dovrà far sottoporre da parte di un tecnico specializzato ed abilitato ai sensi del D.M. Sviluppo Economico n° 37/2008 ad una prova a pressione l'impianto per accertarne l'integrità e la tenuta.

L'utilizzatore deve anche accertarsi che l'impianto domestico sia stato realizzato conformemente alle norme vigenti e sia stata rilasciata una dichiarazione di conformità.
Le norme di riferimento per gli impianti per uso domestico e similari sono la UNI 7131:2014 e la UNI 7129:2015 che danno indicazioni sui materiali da utilizzare, la modalità di installazione e le soluzioni tecniche da adottare ai fini della sicurezza.
Degno di nota risulta ciò che viene stabilito dal Dipartimento dei VV.F. nella modulistica SCIA (PIN 2 gpl- 2018 S.C.I.A. le cui immagini si riportano in appresso) che prevede "l'impegno della ditta che fornisce il serbatoio in comodato d'uso ad effettuare i rifornimenti solo previa verifica della corretta manutenzione del serbatoio e della perfetta efficienza e funzionalità dei relativi dispositivi accessori, nonché del possesso, da parte del titolare dell'attività, della documentazione prevista dalle vigenti disposizioni in materia di prevenzione incendi".
La richiamata modulistica prevede altresì che il titolare del serbatoio (colui che lo riceve in comodato d'uso oppure la ditta proprietaria e rifornitrice nel caso di contratto di fornitura) dichiari: "Dichiara, inoltre, che la restante documentazione tecnica e la dichiarazione di conformità di cui al decreto del Ministro dello sviluppo economico 22 gennaio 2008, n. 37, dell'impianto utilizzatore sono raccolte in apposito fascicolo, custodito presso l'indirizzo di seguito indicato, e sarà reso prontamente disponibile in occasione dei controlli delle autorità competenti".

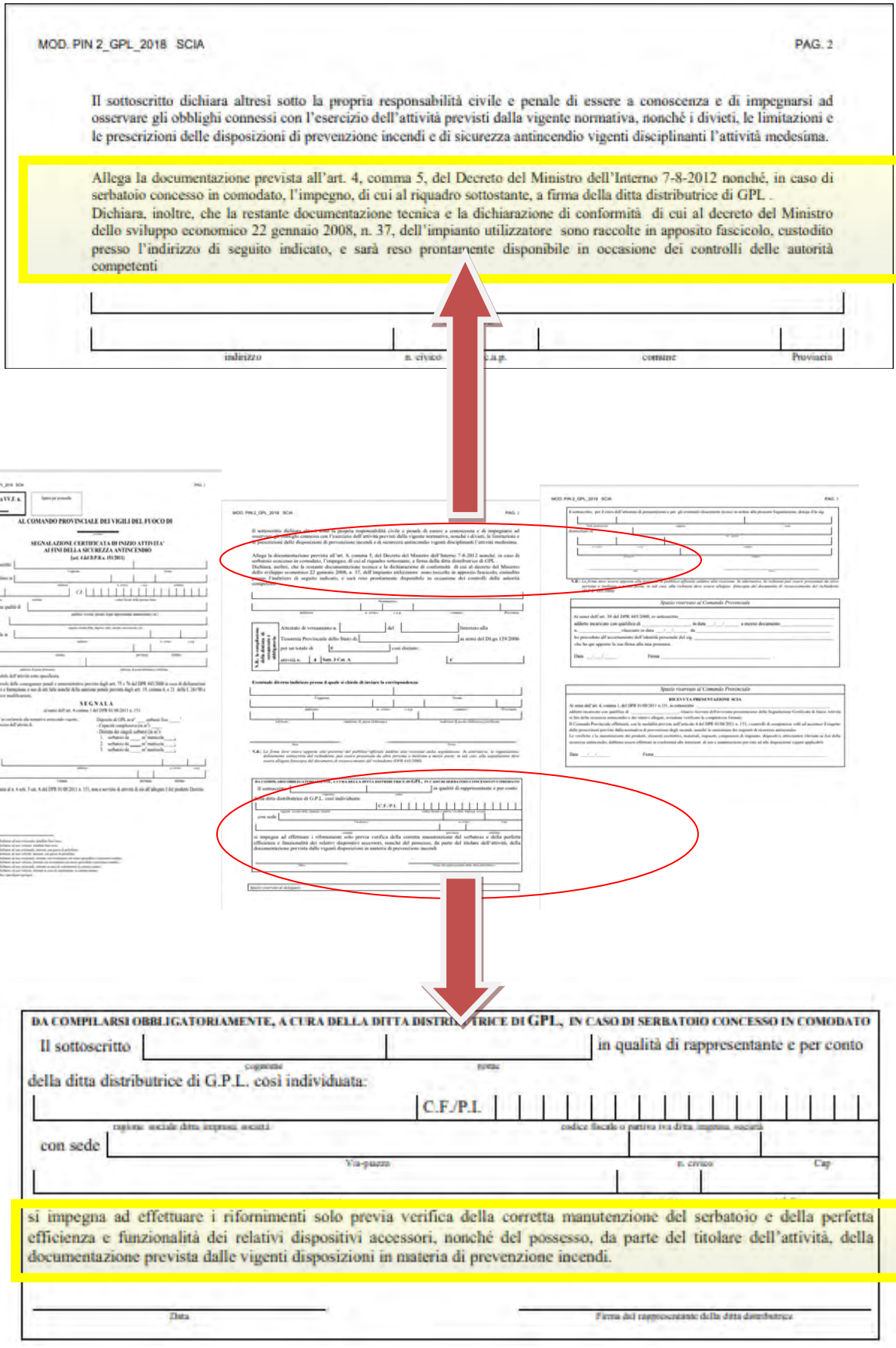


Foto 2. Modulistica SCIA (PIN 2 gpl- 2018 S.C.I.A)

Condizioni di esercizio innanzi poste in risalto che laddove (entrambe) rispettate consentono di elevare il grado di sicurezza e di garantirlo nel tempo, mentre di contro laddove disattese anche solo in parte, ad esempio omettendo il controllo sull'avvenuto adempimento di presentazione della SCIA (art. 4 D.P.R. n° 151/2011) rifornendo di GPL ugualmente il serbatoio o di non possesso delle dichiarazioni di conformità (art. 7 D.M. Svil. Econ. N° 37/2008) per gli impianti di utilizzazione asserviti dal serbatoio in questione, costituiscono un rilevante elemento di rischio per la sicurezza antincendio.
Fondamentale, quindi, risulta la sensibilizzazione di tutti gli attori operanti nel campo, nessuno escluso, dalle Ditte proprietarie e rifornitrici dei serbatoi, agli installatori degli impianti di adduzione fino agli utenti, affinchè venga prestata la giusta attenzione ad ogni singolo adempimento dettato dallo specifico quadro normativo che oltre ogni ragionevole dubbio si fonda sul principio della prudenza definendo la regola dell'arte da rispettare per garantire la incolumità delle persone e la preservazione dei beni; quadro normativo che ritiene priritaria finanche la raccolta da parte del titolare dell'attività delle dichiarazioni di conformità degli impianti (tutti) alimentati dal serbatoio in un apposito fascicolo da custodire e da rendere disponibile in occasione dei controlli delle autorità competenti.

5. Conclusioni

La mera produzione di documenti da parte dei vari soggetti coinvolti non sempre garantisce che l'impianto sia completamente sicuro. È necessario aumentare la consapevolezza di tutti i soggetti coinvolti sulla necessità di rispettare pedissequamente le procedure e le normative vigenti in materia di corretta installazione e manutenzione degli impianti di stoccaggio, prestando particolare attenzione alla documentazione rilasciata dal fabbricante dei vari componenti, come dichiarazione di conformità, targa dati e manuale d'uso, in modo tale da poter anche istruire l'utilizzatore finale su semplici misure di controllo da adottare pur non essendo un esperto del settore.
In tutto questo contesto la somministrazione di informazioni e di una semplice prova d'uso di un estintore portatile agli utenti finali –in un unico incontro di 2/3 ore e per gruppi di 15-16 persone per volta- potrebbe contribuire affinché si riesca a veicolare informazioni ritenute utili per istruire al meglio gli utilizzatori finali sulle procedure di autorizzazione, di installazione, di manutenzione nonché sui rischi e sulle azioni da porre in essere in caso di anomalie di funzionamento e di perdite accidentali di gas compreso l'utilizzo di un estintore portatile. D'altronde non appare ragionevole imporre la collocazione di estintori portatili senza che se ne istruisca all'uso.

6. Bibliografia

[1] C. Piccolo*, J. Pardi**, G. Russo***, D. Salzano****, A. De Cristofaro - L'analisi del rischio di incendio nella installazione dei serbatoi di GPL.

[2] Definizione di un programma di manutenzione in relazione allo stato di conservazione del recipiente Atti safap 2018.

[3] Cannerozzi De Grazia M. - Normative di costruzione ed esercizio per i depositi di GPL fino a 13 m^3 e problematiche procedurali d'installazione. Atti SAFAP 2008, Cagliari 12 e 13 giugno 2008.

[4] D.M. 14 Maggio 2004 - Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 13 m^3.

[5] Procedure operative ENERGAS – SGS Edizione Aprile 2016.

[6] d.P.R. 1 agosto 2011, n° 151. Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione degli incendi, a norma dell'articolo 49, comma 4-quater, del decreto-legge 31 maggio 2010, n° 78, convertito, con modificazioni, dalla legge 30 luglio 2010, n. 122.

Il Technical Repository: modello di gestione digitale di flussi documentali relativi alle attrezzature a pressione

S. Anastasi[1], F. Ceruti[1], P. De Cillis[1], C. La Gioia[2], R. Modestino[3], V. Mordanini[4], A. Nebbioso[1], L. Ricciardi[1]

[1] Inail – Dit
[2] Inail – Dcod
[3] Inail – Uot di Avellino
[4] Inail – Cit

Abstract

Lo sviluppo del Technical Repository (TR) nasce dall'esigenza di rendere fruibile, attraverso una vera e propria banca dati online dedicata ai tecnici che espletano attività di certificazione e verifica su attrezzature e impianti nei luoghi di vita e di lavoro, tutto il patrimonio conoscitivo e la documentazione tecnica prodotta nel corso degli anni sia dall'Istituto che dalle altre strutture competenti relativa a tale ambito. L'archivio elettronico, organizzato e strutturato su base semantica, in questa prima fase, raccoglie in particolare circolari, regolamentazioni tecniche, note tecniche, pareri e decreti inerenti al settore delle attrezzature a pressione.
L'applicazione web-based scelta per il TR è il software open source DSpace. L'obiettivo del lavoro è quello di descrivere gli interventi di personalizzazione del software e di popolamento del Repository, in relazione alle diverse attività condotte dall'Inail afferenti alle attrezzature a pressione.
L'obiettivo finale è quello di rendere fruibile il Technical Repository a tutto il personale adottando la tecnologia istituzionale, in conformità alle politiche della PA di nuovi percorsi di digitalizzazione dei sistemi e l'utilizzo di strumenti tecnologici innovativi.

Keywords: archivio elettronico, open access, digitalizzazione, attrezzature a pressione.

1. Introduzione

Il Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza di impianti, prodotti ed insediamenti antropici, in conformità con le politiche delle istituzioni e delle accademie nazionali e internazionali sulla digitalizzazione gestione e diffusione della documentazione informatizzata, ha evidenziato la necessità di rendere accessibile e fruibile in formato elettronico e in tempo reale tutto il patrimonio conoscitivo e la documentazione tecnica inerente alle attività di certificazione e verifica prodotti nel corso degli anni dall'Istituto e da altri soggetti a vario titolo interessati e coinvolti.
A tal fine, è stato costituito uno specifico gruppo di lavoro composto da diverse professionalità multidisciplinari, che ha studiato e analizzato la letteratura in ambito

biblioteconomico e documentalistico sull'information retrieval e sulla gestione digitale di documentazione tecnico-scientifica a livello nazionale e internazionale, quindi verificato lo strumento più adeguato alle esigenze dell'utenza intranet del DIT e alle caratteristiche dei contenuti di riferimento.

2. La digital trasformation

In Italia, gli ultimi anni hanno portato importanti novità nel campo della gestione informatica dei documenti e conservazione digitale.
I processi di dematerializzazione e digitalizzazione, alla base della digital transformation, hanno subito, inoltre, una decisa accelerazione con la pandemia, in parallelo allo sforzo dei singoli enti di rendere i propri sistemi conformi alle normative nazionali di riferimento.
Oggi le "Linee Guida sulla formazione, gestione e conservazione dei documenti informatici" pubblicate da AgID (Agenzia per l'Italia Digitale) costituiscono il documento normativo di riferimento in materia, e sostituiscono i d.p.c.m. 2013/2014, contenenti le regole tecniche su formazione, protocollo, conservazione, trasmissione, copia, duplicazione, riproduzione e validazione temporale.
La normativa a riguardo è in continua evoluzione e cerca di gestire al meglio le difficoltà che si incontrano durante questo percorso di digitalizzazione e dematerializzazione del documento informatico. In questo contesto si colloca lo standard UNI 11386:2020 (che supera la precedente UNI 11386:2010): "Supporto all'interoperabilità nella conservazione e recupero degli oggetti digitali (SInCRO)", norma tecnica che specifica le caratteristiche del cosiddetto file di chiusura dei pacchetti di conservazione.
il SInCRo definisce l'insieme dei dati, la loro semantica e la loro struttura, a supporto della conservazione dei file, intendendo il file come elemento logico e materiale di formazione di un documento o di aggregazione di più documenti.
L'emanazione di una norma tecnica è da inquadrarsi in un contesto nazionale, sempre più sovranazionale, all'interno del quale i dati, i documenti e le loro relazioni rappresentano dei valori da conservare e preservare nel tempo, non come patrimonio di soggetti singoli, ma come bene comune da rendere disponibile e fruibile. È necessario, dunque, che parole ed espressioni come interoperabilità, condivisione, collaborazione, riuso, best practice, al di là delle implicazioni tecniche e tecnologiche, costituiscano il punto di riferimento all'interno di un quadro che faccia della comunicazione in ambiente digitale l'obiettivo da perseguire per una Open Knowledge.
In generale, la mancanza di interoperabilità rappresenta un limite sia rispetto all'evoluzione dei sistemi (i documenti devono poter sopravvivere ai sistemi e agli strumenti attraverso i quali sono prodotti) sia rispetto all'accesso (i documenti devono poter essere accessibili nel tempo, sia come fonte di diritti sia come fonte di studio e ricerca).

Processi di conservazione di questo tipo sono affidati alle competenze di bibliotecari documentalisti in team con altri professionisti, coinvolti nella valutazione del database da utilizzare e nella progettazione per la realizzazione dell'interoperabilità tra sistemi e contenuti e soluzioni di conservazione digitale all'avanguardia.
In questo quadro, i repositories svolgono un ruolo essenziale: da strumenti accessori sono diventati strumenti strategici. Per questo motivo, in molte istituzioni e università sono stati costituiti gruppi di lavoro specifici che seguono la loro gestione.
In sintonia con questa tendenza, si inserisce perfettamente il nostro gruppo di lavoro per la realizzazione del Technical Repository.

3. Technical Repository: Struttura e Ricerca

Il Repository è un archivio, ma anche una banca dati e una biblioteca digitale oltre che un modello di comunicazione scientifica.
Una banca dati acquista valore se è di tipo fattuale o primaria, in quanto fornisce direttamente dati e documenti integrali a testo completo e aumenta la sua importanza in base alla consistenza dei suoi contenuti, all'estensione temporale e spaziale e al grado di aggiornamento che avviene in tempo reale.
Uno dei software più usati a livello nazionale e internazionale per un repository è il DSpace in open source, corrispondente ai criteri di interoperabilità, condivisione, conservazione a lungo termine, supporto del protocollo OAI-PMH e dei metadati standard Dublin Core per un più agevole harvesting ed export dei dati.
Per il recupero del documento in versione elettronica in pdf, obiettivo finale del nostro utente, è necessario strutturare il Repository del corredo di metadati descrittivi e semantici, dati indispensabili affinché l'item sia rintracciabile in fase di ricerca. Un lavoro indispensabile quello del controllo dei metadati, svolto da tutte le figure del gruppo di lavoro: dall'esperto nell'ambito biblioteconomico, informatico, della comunicazione e ai settori disciplinari a cui la comunità si riferisce, in questo contesto del settore della pressione.
Lo schema attualmente più diffuso per l'organizzazione dei metadati delle risorse digitali e quindi utilizzato per il nostro Repository è il Dublin Core secondo lo standard ISO 15836:2009.
Il set di metadata DCMES – costruito su protocollo OAI PMH – scelto per il nostro Repository, assicura la descrizione e l'identificazione della risorsa digitale, la gestione e l'accesso alla risorsa, e la sua preservazione.
Partendo da questi presupposti, consolidati negli anni con un'attenta fase di analisi del sistema, l'attività di ricerca è passata ad una fase successiva sperimentale del Technical Repository, che ha comportato l'installazione, in un ambiente di prova su Workstation di pertinenza del Dipartimento Innovazioni Tecnologiche, del software scelto.
Tale installazione è stata possibile attraverso l'estrazione e il posizionamento nella Workstation di altri software specifici. L'installazione approcciata sulla postazione Inail è risultata da subito articolata e, di conseguenza, per avere il controllo delle

criticità, si è creato un termine di paragone attraverso una installazione su postazione personale e fuori dal dominio Inail. A seguito di specifiche verifiche, non avendo riscontrato problematiche sulla postazione personale, si è riusciti ad identificare e superare le criticità per l'istallazione sulla postazione di dominio Inail. Tutto ciò anche con la collaborazione di esperti informatici afferenti alla competente direzione centrale dell'Istituto, che ha consentito di rimanere nei margini delle policy Inail e di riuscire ad installare il prodotto sulla Workstation.
La gestione del prodotto DSpace e lo sviluppo del Repository al suo interno, con la relativa interfaccia desiderata (JSPUI o XMLUI) avviene perlopiù tramite il browser web ed è possibile accedere anche da remoto, esclusivamente dalla Intranet per ragioni di policy, utilizzando uno specifico IPAddress. L'accesso all'area DSpace avviene con le credenziali pre-configurate.
Una volta in esecuzione, è stato necessario effettuare delle personalizzazioni alla versione di default del Dspace per renderlo idoneo ai requisiti funzionali individuati dal gruppo di lavoro.
Inizialmente l'intervento ha riguardato gli aspetti più critici, indispensabili per procedere al popolamento della banca dati.
In particolare, si è proceduto alla modifica del codice relativo alla scheda dei metadati (Figura 1).

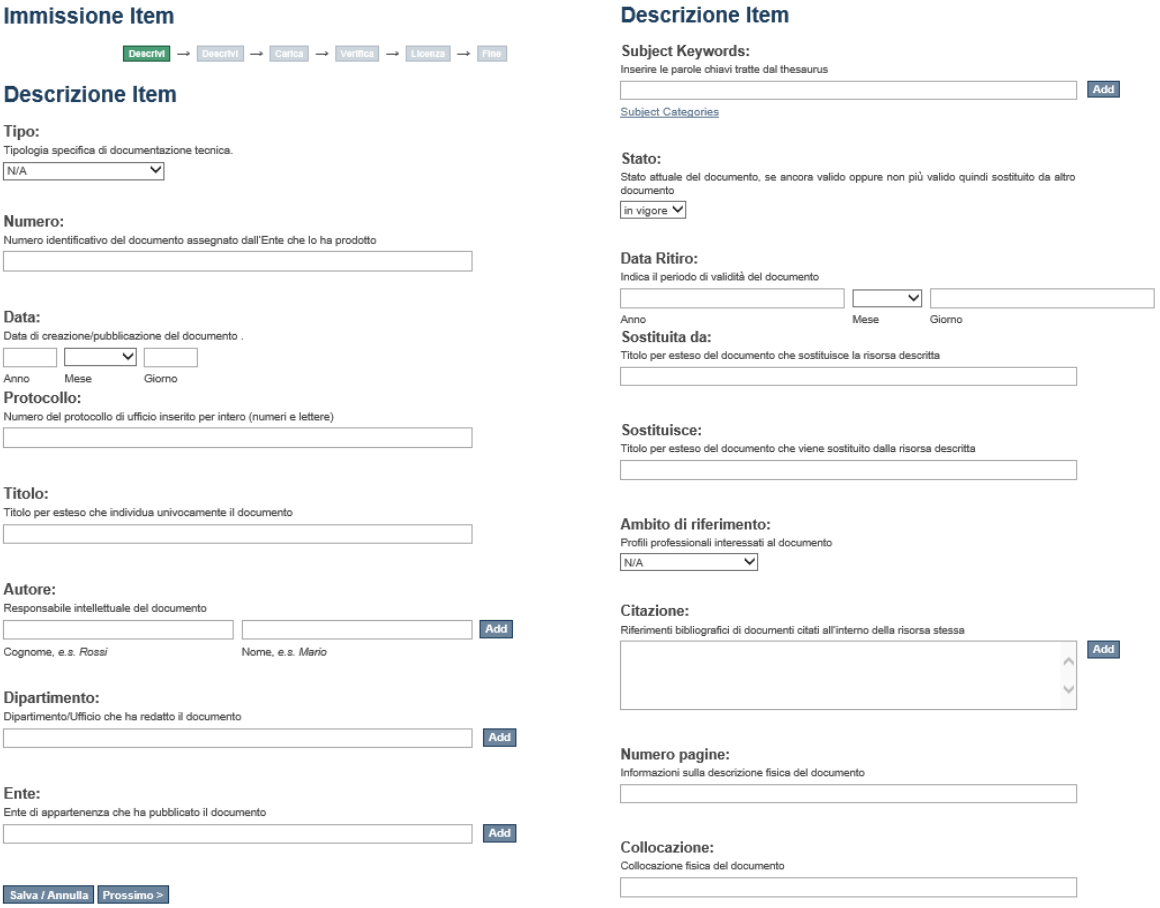


Figura 1. Form di immissione metadati

I metadati individuati per il Technical Repository (Tabella 1) sono stati selezionati rispettando i criteri individuati per la specificità di documento oggetto di catalogazione; essi stessi diventano i filtri per effettuare la ricerca, semplice e/o avanzata, da parte dell'utente.

METADATO	DESCRIZIONE
dc.type	Tipologia specifica di documentazione tecnica.
dc.identifier	Numero identificativo del documento assegnato dall'Ente che lo ha prodotto
dc.date.issued	Data di creazione/pubblicazione del documento
dc.relation.ispartofseries	Numero del protocollo di ufficio inserito per intero (numeri e lettere)
dc.title	Titolo per esteso che individua univocamente il documento
dc.contributor.author	Responsabile intellettuale del documento
dc.contributor.creator	Dipartimento/Ufficio che ha redatto il documento
dc.publisher	Ente di appartenenza che ha pubblicato il documento
dc.subject	Voci soggettario
dc.coverage.temporal	Stato
dc.date.available	Data ritiro
dc.relation.isreplacedby	Sostituita da
dc.relation.replaces	Sostituisce
dc.audience	Ambito di riferimento
dc.relation.haspart	Citazione
dc.foramt.extend	Numero pagine

Tabella 1. Metadati DublinCore del TR

L'utente che non può utilizzare nessun filtro di ricerca, perché non ha conoscenza di alcuna informazione bibliografica, potrà ugualmente recuperare il documento attraverso l'attività di browsing all'interno delle collezioni del repository o utilizzando le parole chiavi e le voci dei thesauri tramite i quali è stato indicizzato l'item.
Infatti, nella fase di indicizzazione il catalogatore fornisce le parole chiavi più appropriate per descrivere l'item, dal generico allo specifico, per facilitare gli utenti nelle loro ricerche.
L'intero contenuto del repository è organizzato attorno alle Comunità che corrispondono ai settori delle attività di certificazione e verifica espletate dai tecnici dell'Istituto.

Ogni Comunità ha la sua home page che mostra informazioni dettagliate ed esplicative sulla stessa.
All'interno di ogni Comunità sono presenti sotto- comunità, ognuna con le proprie Collezioni che possono contenere un numero illimitato di items.
Questa organizzazione ad albero offre al repository la massima flessibilità per rispondere alle differenti necessità delle comunità che di volta in volta potranno essere modificate ed ampliate.

4. Catalogazione e Indicizzazione dei documenti

Personalizzato il workflow del submission, per poter procedere alla catalogazione dei documenti relativi agli impianti a pressione, si è proceduto alla creazione della struttura ad albero individuata in precedenza come organizzazione logica dell'informazione; quindi, sono state create le Comunità, sotto-comunità e Collezioni definite in fase di analisi.
Tale procedura è stata effettuata da remoto dal gruppo di lavoro, in quanto il Technical Repository è attualmente in rete, raggiungibile tramite intranet dal personale coinvolto nella progettazione che, autenticandosi mediante opportune credenziali, può svolgere numerose attività senza accedere fisicamente alla macchina che ospita il software.
L'attuale struttura ad albero del repository (a cui potranno, nel tempo, aggiungersene altre) è composta, per le Comunità, dalle seguenti voci:

- sollevamento;
- impianti di riscaldamento;
- pressione;
- impianti di messa a terra e protezione dalle scariche atmosferiche.

Le sotto-comunità del Technical Repository sono state, invece, strutturate in base alle attività svolte dall'Inail nei diversi settori, mentre le Collezioni coincidono con le diverse tipologie di attrezzature.

4.1 Comunità "Pressione"

Attualmente è stata sviluppata la Comunità relativa agli impianti a pressione (Figura 2-3) che si riferisce specificatamente al settore "Attrezzature a pressione".

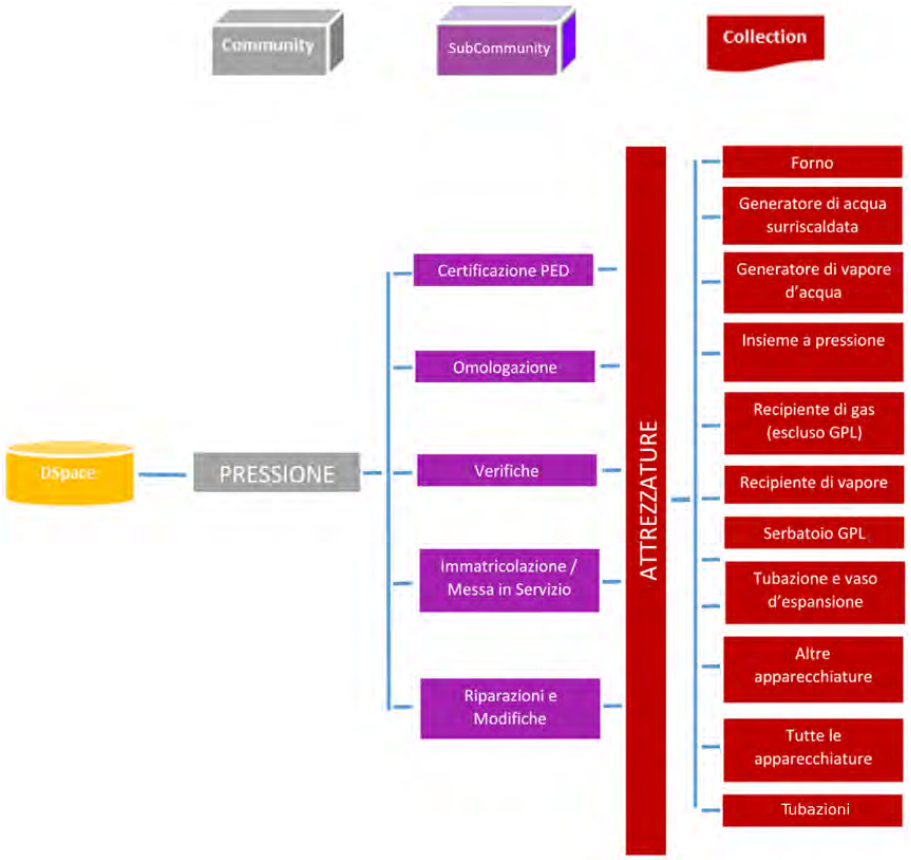


Figura . Struttura ad albero della comunità Attrezzature a pressione

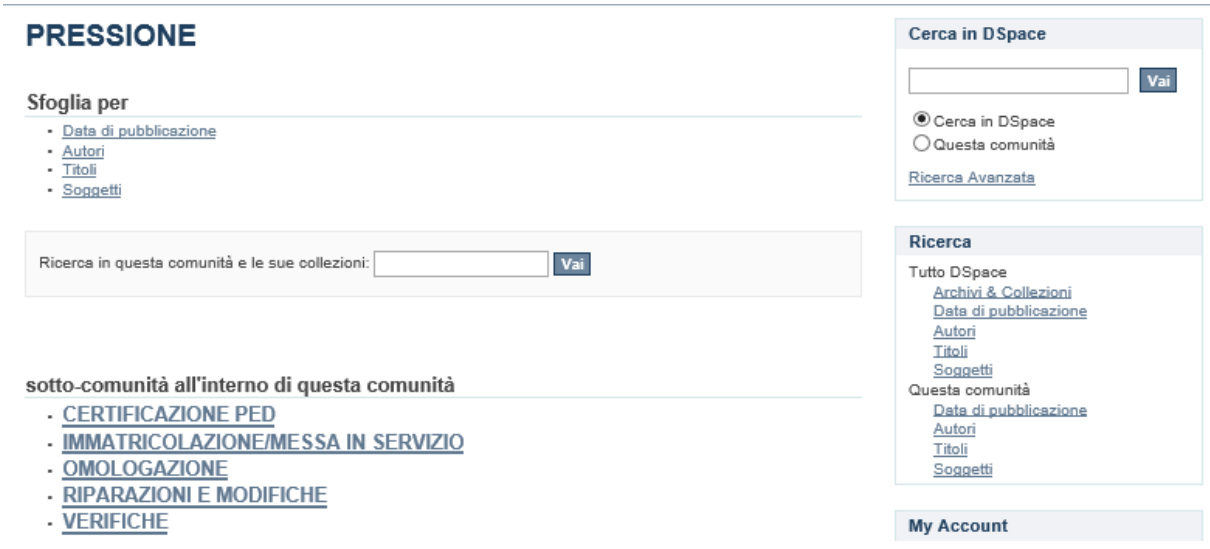


Figura 2. Comunità Pressione del Technical Repository

Le attrezzature a pressione sono tutte quelle attrezzature (come ad esempio generatori di vapore, recipienti, colonne di raffinazione, reattori chimici, tubazioni) soggette ad una pressione relativa superiore a 0,5 bar. L'immissione sul mercato delle attrezzature a pressione è regolamentata, a livello comunitario, dalle direttive europee: PED (*Pressure Equipment Directive*), SPVD, (*Simple Pressure vessel Directive*)

che è specifica per i recipienti semplici a pressione fabbricati in serie e destinati a contenere aria o azoto, e TPED (*Transportable Pressure Equipment Directive*) che si applica alle attrezzature a pressione trasportabili. Sono da considerare attrezzature a pressione anche gli insiemi, ovvero gli assemblaggi di attrezzature a pressione certificati UE in conformità alla Direttiva PED. Le attrezzature a pressione per usi nucleari e i contenitori a pressione di gas con membrature miste di materiale isolante e di materiale metallico contenenti parti attive di apparecchiature elettriche, escluse dal campo di applicazione della direttiva di prodotto PED, sono coperte dalle normative nazionali.
Le attrezzature a pressione che rientrano nel campo di applicazione delle direttive UE devono soddisfare i requisiti essenziali elencati nelle direttive stesse e recare la marcatura CE, seguita dal numero di notifica dell'organismo notificato.
Mentre le direttive di prodotto, come la PED, definiscono i requisiti essenziali di sicurezza che le attrezzature/impianti a pressione devono soddisfare perché ne sia consentita la libera circolazione nel mercato comunitario, l'utilizzo di attrezzature/impianti a pressione è regolamentato dalle cosiddette direttive sociali, che definiscono i requisiti minimi di sicurezza che i datori di lavoro devono rispettare nell'uso dei prodotti, prevedendo, per ciascun paese membro, la possibilità di normare con discipline più stringenti.
La norma che regolamenta la messa in servizio e l'utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione è il d.m. 329/04, cui deve aggiungersi il d.lgs. 81/08 e s.m.i., qualora detta attrezzatura/insieme si configuri come attrezzatura di lavoro ovvero sia adottata durante il lavoro per la realizzazione di un processo produttivo.
Per quanto riguarda le verifiche periodiche da effettuare sull'attrezzatura a pressione, i riferimenti normativi sono, oltre che i d.lgs. 81/08 e d.m. 329/04, il d.m. 11 aprile 2011.

4.2 Le Sotto-Comunità

Per la comunità pressione sono state individuate delle sotto-comunità che corrispondono alle attività che Inail, col Dipartimento Innovazioni Tecnologiche e Sicurezza degli Impianti, Prodotti e Insediamenti Antropici e le Unità Operative Territoriali, svolge nell'ambito del settore delle attrezzature e degli insiemi a pressione. Si tratta di funzioni attribuite all'Inail per legge, con possibilità, per alcune specifiche attività, di delega a soggetti abilitati pubblici o privati. Le attività contemplate nelle sotto-comunità considerano i molteplici aspetti della vita dell'attrezzatura o impianto a pressione, dalla progettazione, fabbricazione, esercizio, manutenzione, verifiche di sicurezza, fino alla dismissione.
A decorrere dal 2019, la maggior parte dei servizi appartenenti alle sotto-comunità individuate per la comunità pressione possono essere richiesti unicamente sul portale Inail, attraverso l'applicativo CIVA.
Di seguito si elencano le diverse sotto-comunità di cui si compone la comunità "Pressione";

- Certificazione PED: riguarda le modalità di certificazione di attrezzature a pressione secondo le direttive PED e T-PED. La PED disciplina la progettazione, la costruzione, l'equipaggiamento e l'istallazione in sicurezza di attrezzature e insiemi a pressione, la T-PED riguarda la commercializzazione, la messa in esercizio e la certificazione delle attrezzature a pressione trasportabili (bombole, tubi, fusti a pressione, recipienti criogeni, incastellature di bombole, cisterne). In questo ambito Inail opera in qualità di organismo notificato (ON 0100), effettuando la verifica di conformità per le attrezzature a pressione progettate e fabbricate secondo le direttive 2014/68/UE PED e 2010/35/UE T-PED e svolgendo attività di ispezione periodica per la verifica del mantenimento dei requisiti di sicurezza per il riutilizzo di attrezzature a pressione trasportabili T-PED.
- Omologazione: si riferisce all'omologazione dei contenitori a pressione di gas con membrature miste di materiale isolante e di materiale metallico contenenti parti attive di apparecchiature elettriche, la cui normativa di riferimento è il d.m. 01/12/1980 e all'omologazione di attrezzature a pressione inserite negli impianti nucleari che, in caso di malfunzionamento, possono determinare la fuoriuscita di fluidi radioattivi. L'attività è di esclusiva competenza Inail;
- Immatricolazione/messa in servizio: riguarda l'analisi e la raccolta delle istanze di dichiarazione di messa in servizio di attrezzature e insiemi a pressione, disciplinata dal d.m. 329/04 e dal d.m. 11 aprile 2011
- Verifiche: interessa le attività di controllo prima della messa in esercizio (d.m. 329/04) e le ispezioni periodiche successive, volte a verificare l'adeguatezza all'esercizio ed il buono stato di conservazione di attrezzature e insiemi a pressione (d.m. 11 aprile 2011). In quest'ultimo caso le verifiche possono essere effettuate sia da Inail (titolare della prima verifica periodica) che da Asl/Arpa o soggetti pubblici e privati abilitati. Altre tipologie di verifiche contemplate nella sotto-comunità e di esclusiva competenza Inail sono la riqualificazione periodica dei piccoli serbatoi interrati per GPL con la metodologia di emissione acustica, le verifiche di primo impianto e periodiche sulle attrezzature a pressione installate negli impianti nucleari, la verifica di riqualificazione di attrezzature a pressione soggette a scorrimento viscoso e altre tipologie di verifica volte a valutare il degrado dell'attrezzatura dopo un determinato tempo d'esercizio.
- Riparazioni e modifiche: si riferisce alle richieste di riparazione di attrezzature a pressione, per cui la direttiva PED rimanda alla legislazione e alle normative nazionali (raccolte VSR, VSG, M e S) e alle modifiche, effettuate in conformità alla direttiva PED. Rientrano nella sotto-comunità anche le istanze per la demolizione, la comunicazione di disinstallazione e la approvazione di membrature di ricambio.

4.3 Le Collezioni

La fase di analisi, che ha determinato l'organizzazione logica delle risorse da indicizzare, ha portato alla definizione di una struttura gerarchica ad albero in cui le comunità e sotto-comunità, descritte in precedenza, coincidono con la radice e i nodi.

Le collezioni sono, invece, le foglie dell'albero e rappresentano le diverse apparecchiature oggetto di intervento da parte dell'Istituto. Da un esame sommario della documentazione in possesso è emerso che solo alcune tipologie di attrezzature possiedono molta documentazione specifica, mentre alcune hanno solo pochi documenti a corredo.
Pertanto, al fine di evitare soprattutto durante l'attività di browsing, una navigazione dell'albero il cui risultato potrebbe essere composto da pochi item, si è preferito creare le seguenti collezioni generiche:

- "Tutte le apparecchiature" in cui inserire la documentazione tecnica di interesse comune a tutte le attrezzature a pressione, come ad esempio il d.m. 329/2004;
- "Altre apparecchiature" in cui raccogliere diverse tipologie per le quali i riferimenti normativi risultano essere esigui.

L'attività di catalogazione può essere considerata anche come una fase di testing del prodotto, in quanto la revisione dei singoli documenti, anche da parte di personale non competente del settore degli impianti a pressione, ha permesso di individuare alcune criticità e nuove idee per sviluppi futuri. Particolarmente interessante è risultato, ad esempio, l'implementazione della funzionalità di suggerimenti di ricerca o ricerche correlate per rendere il sistema più dinamico e offrire all'utente ulteriori percorsi da seguire per la consultazione del Technical Repository.
Al momento sono stati indicizzati item riguardanti prevalentemente Circolari ISPESL/INAIL e Decreti Ministeriali.
La Tabella 2 sintetizza i documenti oggi consultabili, con relativo documento pdf scaricabile, sul Technical Repository sviluppato.

	Numero Item
Certificazione PED	7
Omologazione	4
Verifiche	21
Riparazione e Modifiche	20
Immatricolazione/messa in servizio	22

Tabella 2. Documenti attualmente indicizzati nel TR

5. Conclusioni

L'attività di ricerca condotta in questi anni, partendo da una fase teorica di studio e definizione dei requisiti software del prodotto da realizzare, è giunta oggi ad uno stadio pratico con la realizzazione di un ambiente di prova e di sperimentazione del Technical Repository attualmente configurato solo per alcuni settori dell'Istituto, come quello specifico della pressione.

L'obiettivo più prossimo è rendere fruibile al personale interno Inail che a vario titolo è coinvolto nell'attività di certificazione e verifica tutto il patrimonio conoscitivo e la documentazione tecnica prodotta nel corso degli anni e relativa a vari ambiti mediante lo strumento del Technical Repository.
Questo richiede la validazione, da parte delle figure competenti, della conformità e adeguatezza del software su cui si basa il Technical Repository alle policy di sicurezza Inail, mentre il gruppo di lavoro provvederà al popolamento della banca dati mediante l'indicizzazione dei documenti afferenti a tutte le comunità individuate.
Le attività di validazione del software e di indicizzazione dei documenti nell'ambiente di test si possono svolgere in parallelo.
Una volta ultimata la fase di validazione e individuato il software conforme ai requisiti Inail, grazie alle caratteristiche impostate in fase di analisi, l'utilizzo dei metadati standard e la funzione di export dei metadati permetteranno di importare tutti gli item indicizzati nel prodotto definito.
L'intero progetto si inquadra nella strategia di digitalizzazione della Pubblica Amministrazione, nell'ambito delle politiche europee, prevista dal Piano Triennale per la Transizione Digitale.

6. Bibliografia

[1] AgID, Linee Guida sulla formazione, gestione e conservazione dei documenti informatici, Maggio 2021

[2] https://www.agid.gov.it/sites/default/files/repository_files/linee_guida_sul_documento_informatico.pdf

[3] A. M. Tammaro. Open Source, Open Access ed Open Content: verso sistemi aperti di condivisione della conoscenza. Convegno su Open Culture. Accessing and sharing knowledge. Milano, 27-29 giugno 2005

[4] https://www.repository.unipr.it/bitstream/1889/1198/1/Siel%20Tammaro%202005.pdf

[5] A. M. Tammaro. Open Source, Open Access e repositories: verso sistemi aperti di condivisione della conoscenza. Progettisti di e-learning. Firenze, 10 marzo 2007

[6] https://www.repository.unipr.it/bitstream/1889/1199/1/Netform%20Tammaro%202007.pdf

[7] A. Trombone. Collezioni di beni comuni: banche dati, repository, biblioteche digitali. DigItalia: Rivista del digitale nei beni culturali. 2018; 2:17-27

[8] Corrie Marsh, Dillon Wackerman D, Jennifer A.W. Stubbs. Creating an Institutional Repository: Elements for Success! The Serials Librarian. 2017; 72(1-4):3-6

[9] https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/0361526X.2017.1297587?needAccess=true

[10] DSpace 6.0 < DSpace Home - DSpace (lyrasis.org)

[11] L. Salvatori. La comunicazione scientifica dal preprint al repository: il caso dello Scientific Information Service del CERN. Ledizioni, Milano, 2013, pp. 275-276

[12] https://books.openedition.org/ledizioni/1568?lang=it

[13] M. Guerini. Repository istituzionali per le biblioteche delle facoltà teologiche italiane. Bollettino d'informazione ABEI. 2019; 28(2):7-8

[14] P. De Castro. Accesso aperto ai risultati della ricerca: un imperativo morale. Il Presidente dell'ISS, insieme ai presidenti di altri enti di ricerca e della CRUI, firmano, il 21 marzo 2013, un position statement per l'Open Access (in allegato Testo integrale: Position statement sull'Accesso Aperto ai risultati della ricerca scientifica in Italia). Notiziario dell'Istituto Superiore di Sanità. 2013; 26(4):7-10

[15] P. A. Marzotti. Metadata profiles for interoperability. The E-ARK specifications for e-archiving. JLIS.it. 2021;12(3):105−118

[16] https://www.jlis.it/index.php/jlis/article/view/377/376

[17] S. Anastasi, F. Ceruti, P. De Cillis, R. Modestino, V. Mordanini, A. Nebbioso, L. Ricciardi. Technical Repository: un passo verso la digitalizzazione nel mondo della sicurezza. Atti di Convegno SAFAP 2021 Sicurezza e Affidabilità delle attrezzature a pressione. INAIL, 2021:258-268

Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro d.lgs. 81/08 art. 71 e del d.m. 11 aprile 2011. Panoramica relativa alle denunce delle attrezzature/insiemi a pressione. Operatività nelle attività di riqualificazione periodica, formazione e informazione delle figure della sicurezza.

M. Babbo[1], P. Morucchio[1], R. Acerboni[2], J. Longo[2], G. Saputi[3]

[1] Triveneto – Certificazioni e Verifiche;
[2] Inail - Uot di Venezia;
[3] Inail - DC Ricerca

Abstract

Le attività di verifica di messa in servizio e di riqualificazione periodica, a più di quindici anni dall'entrata in vigore dell'art.71 del d.lgs. 81/08, hanno portato in evidenza alcune difficoltà da parte di piccole imprese artigiane, familiari e agricole ad individuare le attrezzature/insiemi da denunciare ed effettuare successivamente le verifiche periodiche obbligatorie. In alcune di queste imprese, dopo molteplici sopralluoghi per la verifica delle attrezzature/insiemi a pressione presenti, è emersa la difficolta da parte dell'ispettore di confrontarsi con figure all'interno della stessa non esperte del settore. La memoria presenterà pochi casi tipici che sono comunque sempre ricorrenti.

Keywords: verifiche, verbali.

1. Introduzione

Le attrezzature da lavoro ed in particolare quelle a pressione hanno nel d.lgs. 81/08, nel d.m. 329/04 e nel d.m. 11 aprile 2011 i decreti di riferimento per la loro messa in servizio, l'utilizzo e le relative verifiche periodiche.
Per le attrezzature/insiemi a pressione non escluse dal d.m. 329/04, l'utilizzatore deve dichiarare la messa in servizio ad USL e INAIL, quest'ultimo gli attribuirà la matricola e nei casi previsti dal dm.329/04 dovrà eseguire la verifica di messa in servizio.
Inoltre, il 23 maggio 2012 è entrato in vigore il d.m. 11 aprile 2011 che disciplina le modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'allegato VII del d.lgs. 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo.

2. Dati INAIL VMS e PVP attrezzature/insiemi a pressione

A più di dieci anni dall'entrata in vigore dell'art. 71 del d.lgs. 81/08, è in alcuni casi evidente la difficoltà da parte di piccole imprese artigiane, familiari e agricole ad individuare le attrezzature/insiemi da denunciare e su cui effettuare successivamente le verifiche periodiche obbligatorie.
A conferma di quanto sopra, sono interessanti i dati INAIL relativi alle denunce e alle richieste di messa in servizio delle attrezzature/insiemi a pressione oltre a quelli relativi alle richieste di prime verifiche periodiche.
Nei grafici sotto riportati è possibile confrontare le denunce di messa in servizio di singole attrezzature, di insiemi unità indivisibili (UI) e di insiemi unità non indivisibili (Non UI) (Grafico 1) con le richieste di prime verifiche periodiche (Grafico 2).

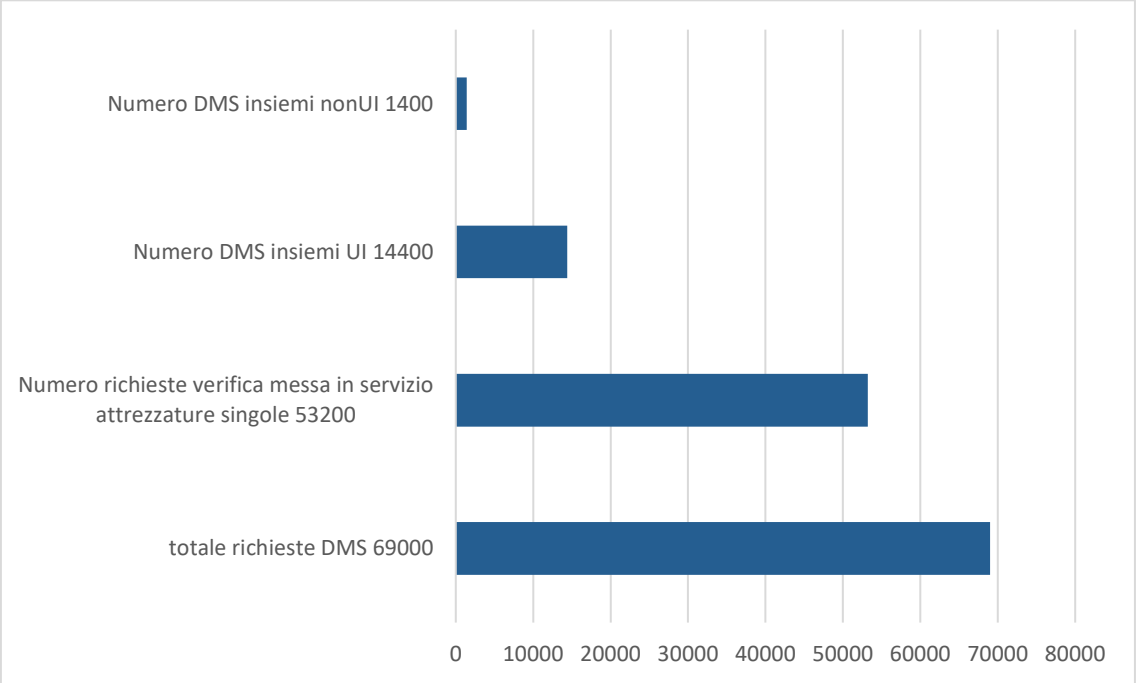


Grafico 1. Richieste di DMS dal 27/05/2019 al 27/05/2023

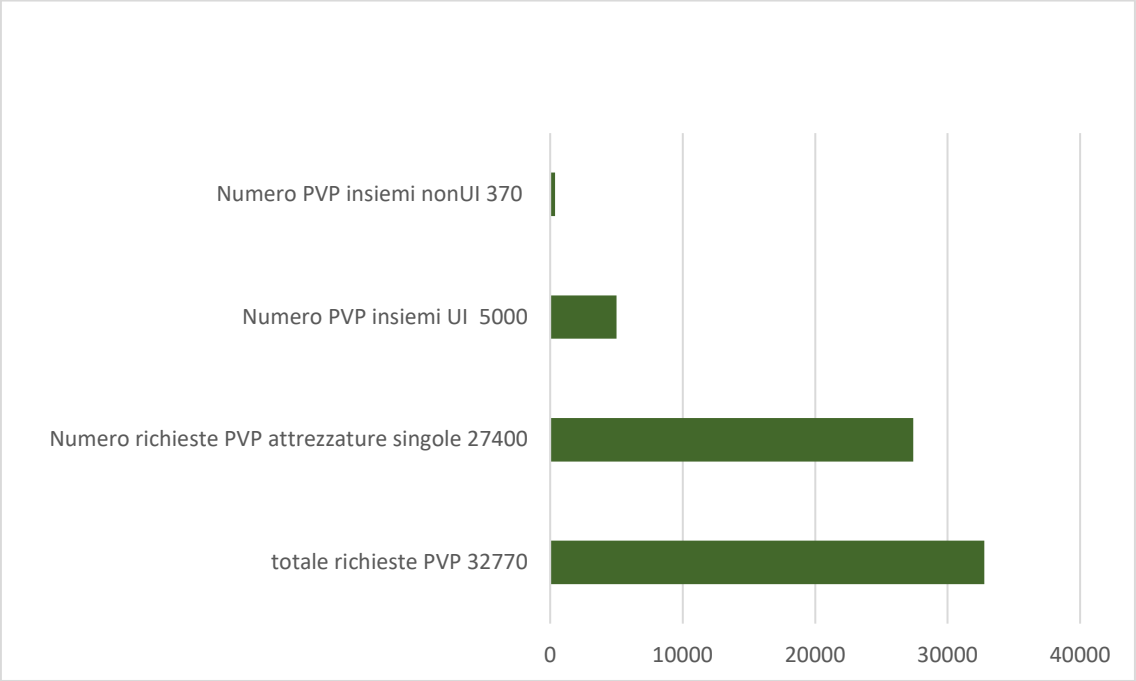


Grafico 2. PVP dal 27/05/2019 al 27/05/2023

Dall'entrata in vigore dell'obbligo dell'inserimento delle istanze verso INAIL nel portale CIVA, sono trascorsi ormai circa 4 anni e anche tenendo conto delle diverse periodicità della verifica delle attrezzature/insiemi e dell'esclusione di verifica di alcune attrezzature/insiemi emerge una piccola dispersione di richieste fra le denunce di messa in servizio e le prime verifiche periodiche.
Il grafico 2 evidenzia che le richieste di prima verifica periodica sono percentualmente inferiori rispetto a quelle di messa in servizio nel complessivo per circa il 35% tenendo conto delle attrezzature/insiemi escluse. Questa difficoltà nella gestione delle richieste relative alle prime verifiche periodiche nelle piccole imprese artigiane, familiari e agricole è probabilmente dovuta alla limitata esperienza delle figure interne impiegate nella filiera della sicurezza e dalla minima formazione ed informazione sui decreti di riferimento da parte di quest'ultimi. Per quanto sopra, molto spesso si ritardano le denunce e/o le richieste di verifica di messa in servizio e dopo aver completato il relativo iter con l'INAIL, lasciando passare a volte anche un anno prima di richiedere la prima verifica periodica.

3. Stato attuale delle verifiche di riqualificazione periodiche

Saltuariamente durante lo svolgimento della prima o successiva verifica periodica in impianto, si riscontrano situazioni diverse rispetto a quanto descritto nei verbali di messa in servizio delle attrezzature/insiemi.
Questo avviene ad esempio, per il cambio di un compressore per esigenze produttive con caratteristiche tecniche di pressione massima e portata diversa, oppure sempre per esigenze produttive l'aumento del numero dei compressori con

il conseguente aumento delle portate, senza una valutazione sulla idoneità e sufficienza della valvola di sicurezza installata.
Seppur raramente, succede che, le valvole di sicurezza vengono sostituite con valvole non idonee per pressione e portata, creando dei potenziali pericoli per la sicurezza nei luoghi di lavoro, nonché delle problematiche nella gestione della verifica periodica al tecnico sia esso pubblico o privato.
Possiamo vedere alcuni esempi nelle figure 1 e 2 e nella tabella 1 riportate di seguito.

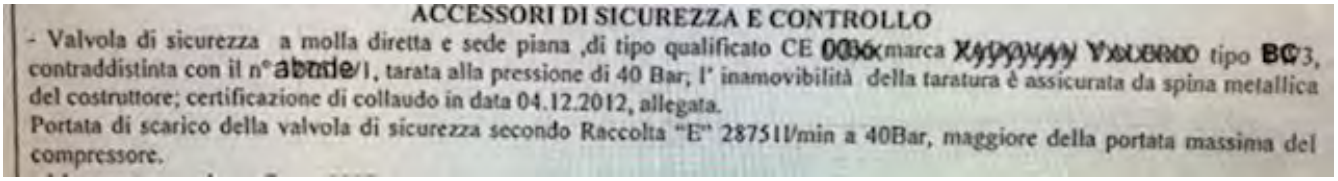

ACCESSORI DI SICUREZZA E CONTROLLO
- Valvola di sicurezza a molla diretta e sede piana ,di tipo qualificato CE 0036 marca [illegible] tipo BC3, contraddistinta con il n° abcde/1, tarata alla pressione di 40 Bar; l' inamovibilità della taratura è assicurata da spina metallica del costruttore; certificazione di collaudo in data 04.12.2012, allegata.
Portata di scarico della valvola di sicurezza secondo Raccolta "E" 28751l/min a 40Bar, maggiore della portata massima del compressore.

Figura 1. Stralcio verbale primo impianto o messa in servizio

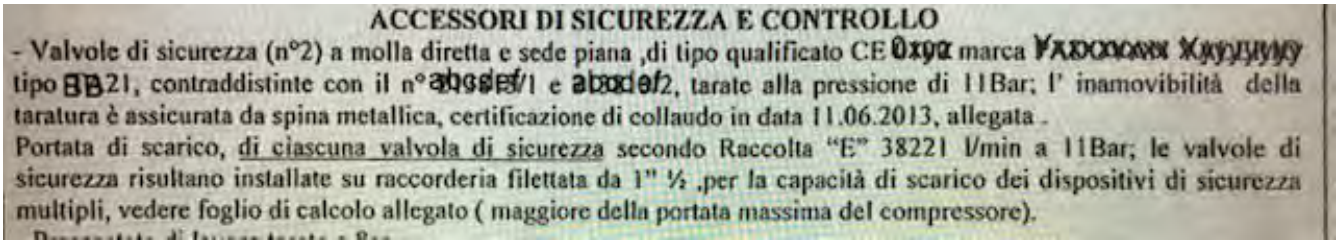

ACCESSORI DI SICUREZZA E CONTROLLO
- Valvole di sicurezza (n°2) a molla diretta e sede piana ,di tipo qualificato CE 0xxx marca [illegible] tipo BB21, contraddistinte con il n° abcdef/1 e abcdef/2, tarate alla pressione di 11Bar; l' inamovibilità della taratura è assicurata da spina metallica, certificazione di collaudo in data 11.06.2013, allegata .
Portata di scarico, di ciascuna valvola di sicurezza secondo Raccolta "E" 38221 l/min a 11Bar; le valvole di sicurezza risultano installate su raccorderia filettata da 1" ½ ,per la capacità di scarico dei dispositivi di sicurezza multipli, vedere foglio di calcolo allegato (maggiore della portata massima del compressore).

Figura 2. Stralcio verbale primo impianto o messa in servizio

VS installata nel VMS INAIL	VS installata all'atto della PVP
VS tarata a 11bar portata di scarico 38.221 lt/min.	**VS** tarata a 11bar portata di scarico 8.315 lt/min.
VS tarata a 40 bar portata di scarico 28.751 lt/min.	**VS** tarata a 42 bar portata di scarico 16.690 lt/min.

Tabella 1. Confronto con le valvole di sicurezza riportate nel verbale di primo impianto e quelle riscontrate all'atto (rappresentato)della verifica periodica.

Rispetto a quanto sopra rappresentato, le problematiche più importanti seppur raramente, si possono riscontrare negli insiemi dove la sostituzione della valvola di sicurezza o di altri accessori o dispositivi di controllo, protezione e sicurezza vengono eseguite senza consultare il manuale uso e manutenzione rilasciato dal fabbricante. Altre sostituzioni più rilevanti ed impattanti per gli insiemi sporadicamente, sono quelle di attrezzature inserite nella dichiarazione di conformità degli stessi che, a seguito di rotture e/o corrosione vengono sostituite dall'utilizzatore.

Per parlare di sostituzione o modifica in una attrezzatura/insieme si deve tener conto delle linee guida della PED ed in particolare della Guideline A-03 che dà la seguente definizione di modifica: "*la sostituzione completa di un'attrezzatura a pressione da una nuova è coperta dalla PED".*
Per le modifiche o sostituzioni, la Guideline H-03 chiarisce che le informazioni e indicazioni sulle parti sostituibili devono essere riportate nel manuale uso e manutenzione e in eventuali note integrative. Il marchio CE dell'attrezzatura e/o insieme viene garantito dalla clausola 2.7 della suddetta Guideline.
Inoltre, la guida blu all'attuazione della normativa UE sui prodotti 2016 (2016/C 272/01*)* riporta *"Se le prestazioni originarie di un prodotto vengono modificate (nell'ambito dell'uso previsto, della gamma di prestazioni e della manutenzione come concepiti inizialmente nella fase di progettazione) in quanto i pezzi di ricambio utilizzati per la riparazione offrono prestazioni migliori grazie al progresso tecnico, questo prodotto non deve essere considerato nuovo ai sensi della normativa di armonizzazione dell'Unione. Ne consegue che gli interventi di manutenzione sono sostanzialmente esclusi dal campo di applicazione della normativa di armonizzazione dell'Unione. Nella fase di progettazione è però necessario tenere conto dell'uso previsto e della manutenzione del prodotto"*.

4. Stato attuale delle verifiche periodiche di integrità

All'atto della verifica di integrità seppur raramente, le difficoltà maggiori sono quelle di reperire la documentazione di costruzione dell'attrezzatura/insieme (disegno di costruzione e materiali utilizzati) che, ormai occasionalmente viene consegnata, a meno di accordi commerciali che la indichino come documento accompagnatorio alla dichiarazione di conformità e al manuale d'uso e manutenzione.
In alcuni casi "fortunatamente", i fabbricanti nel manuale d'uso e manutenzione, riportano gli spessori relativi alle principali membrature (fondi e fasciame), indicando talvolta quelli minimi di progetto a seguito di eventuale corrosione.
L'utilizzatore si trova quindi ad avere delle attrezzature/insiemi che devono effettuare e superare positivamente la verifica di integrità e sulle quali non è possibile eseguire la prova idraulica o, in alternativa prove di CND, per la mancanza dei dati tecnici e di fabbricazione specifici.
Non essendo talvolta più reperibili queste informazioni, in quanto il fabbricante, che ha seguito la costruzione, e che secondo la Direttiva 2014/68/UE all'art. 6 è tenuto a conservare la relativa documentazione per almeno 10 anni, magari è fallito o ha chiuso, pertanto l'attrezzatura/insieme non può essere sottoposta alla verifica di integrità e di conseguenza deve essere messa fuori servizio ai sensi dell'art. 7 del d.m. 329/04 da parte dell'utilizzatore.

5. Conclusioni

Da quanto sopra esposto e dall'esperienza maturata durante le verifiche e nei corsi di formazione per le figure coinvolte nella filiera che parte dalla costruzione passando all'esercizio per arrivare infine verifiche delle attrezzature/insiemi a pressione possiamo dire che la formazione di base è sicuramente il primo passo affinché, nei luoghi di lavoro, si possa avere quella sicurezza a tutela della salute e dell'integrità dei lavoratori che tutti noi auspichiamo. Ad oggi gli Ispettori dell'INAIL, dell'USL e dei soggetti abilitati alle verifiche periodiche, costituiscono l'unico supporto alle imprese che andrebbe rafforzato per consolidare la rete di prevenzione e sicurezza nei luoghi di lavoro nel settore specifico delle attrezzature/insiemi a pressione.

6. Bibliografia

[1] d.lgs. 81/08

[2] r.d. 827/1924

[3] d.m. 11.04.2011

[4] d.m. 329/04

[5] banca dati INAIL CIVA

[6] L.G.B. (2016/C 272/01)

[7] d.e. 2014/68UE

[8] Guidelines related to the Pressure Equipment Directive 2014/68/EU (PED)

Analisi di stabilità dei sistemi di sicurezza: confronto tra le normative EU ed extra EU

D. Sallustio[1], G. De Gennaro[1], G. Ianziti [2], M. Guerrieri [3]

[1] Inail - Uot di Bari
[2] Techne Solutions S.r.l.
[3] SAIPEX S.r.l.

Abstract

Nella stesura di un'analisi dei rischi uno degli scenari maggiormente rilevanti sul quale concentrarsi è quello legato al superamento dei limiti massimi di pressione stabiliti dal progettista. La misura di mitigazione principalmente utilizzata a salvaguardia di tale evento è l'installazione di un accessorio di sicurezza correttamente selezionato, dimensionato ed installato. La norma cardine che descrive i requisiti dei sistemi di sicurezza è la UNI EN 764-7 [1], la quale rimanda alla UNI EN ISO 4126-1 [3] per la progettazione degli accessori di sicurezza necessari. In ambito API le analoghe normative sono la API 520 [4] [5] e la API 521 [6].

Keywords: analisi dei rischi, sistemi di sicurezza.

1. Sistemi di sicurezza per attrezzature in pressione

Le valvole di sicurezza sono dispositivi progettati secondo la direttiva 2014/68/EU [7], conosciuta con l'acronimo PED (Pressure Equipment Directive), principale riferimento per chiunque progetti ed immetta sul mercato europeo un'attrezzatura in pressione.
Per sistemi di sicurezza la norma intende: dispositivi di sicurezza quali valvole di sicurezza, dispositivi a disco di rottura, aste pieghevoli, sistemi di sicurezza pilotati per lo scarico della pressione (CSPRS) oppure sistemi di misurazione, controllo e regolazione per la sicurezza (SRMCR), che fungono da protezione di base per garantire che non siano superati i limiti di esercizio massimi ammissibili. I sistemi di sicurezza o i rispettivi componenti devono essere indipendenti da altre funzioni, a meno che la loro funzione di sicurezza non sia influenzata da dette funzioni.
La PED impone l'installazione di opportuni dispositivi di sicurezza qualora esista il rischio di superare i limiti ammissibili di progetto (pressione, temperatura, livello, portata o in una combinazione di tali valori, stabiliti in fase di progettazione). Il fabbricante dell'attrezzatura o del dispositivo dovrà soddisfare i requisiti essenziali di sicurezza, servendosi, se necessario, delle molteplici norme armonizzate citate dalla PED stessa. Tra queste troviamo la UNI EN 764-7, riferimento per la protezione delle attrezzature in pressione e la UNI EN ISO 4126-1 per la progettazione degli accessori di sicurezza.

Ma come lavora un dispositivo di sicurezza e a quale pressione deve intervenire? La risposta dei sistemi di regolazione, monitoraggio e sicurezza in relazione alla PS è descritta in maniera classica dal diagramma riportato a seguire e che lega il tempo alla pressione:

Legenda
X Tempo
Y Pressione
A Nessun funzionamento continuo in questa zona
B Pressione massima ammissibile *PS* □ 1,10
C Pressione massima ammissibile
D Intervallo di esercizio normale
1 Reazioni del sistema di controllo della regolazione
2 Reazioni del sistema di monitoraggio
3 Reazioni del sistema di sicurezza

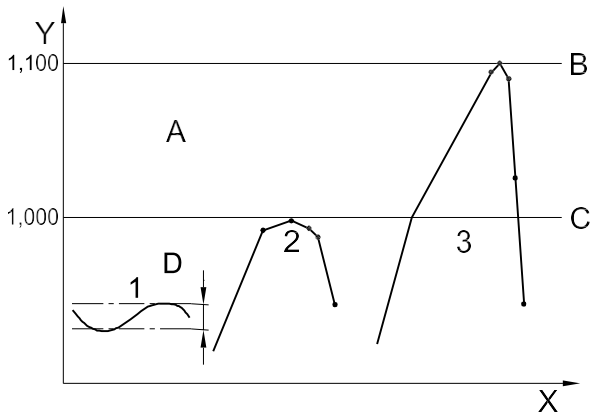


Figura 1. Andamento caratteristico di un accessorio di sicurezza

Come si evince, la sovrapressione massima ammissibile alla quale può avvenire l'apertura dei dispositivi di sicurezza è pari al 10% della PS. Tale valore massimo, non deve però essere mantenuto con costanza ma deve essere un valore di picco. È comunque possibile superare tale valore in alcuni casi come indicato nei punti 2.11.2 e 7.3 dell'allegato I della direttiva 2014/68/EU (Direttiva PED) e nei par. 6.2.2.2 e 6.2.2.3. della UNI EN 764-7. Per quanto riguarda infine, la progettazione ed il dimensionamento delle valvole di sicurezza la UNI EN 764-7 indica come principale riferimento la UNI EN ISO 4126.

2. Quadro normativo per il dimensionamento dei dispositivi di sicurezza

In ambito europeo, come anticipato nel paragrafo precedente, la norma armonizzata alla direttiva PED per quanto concerne il dimensionamento dei dispositivi di sicurezza è la UNI EN ISO 4126. In 10 parti illustra e descrive i principali accessori che

compongono un sistema di sicurezza, fornendo ad i tecnici tutti gli strumenti per la scelta, il dimensionamento e l'installazione degli accessori.
In ambito extra europeo invece, la norma più utilizzata è la API 520. Realizzata in 2 parti, vede nella prima tutti i criteri di scelta e progettazione dei sistemi di sicurezza mentre la seconda parte è relativa ai requisiti da rispettare in fase di installazione di un accessorio.

2.1 Campo di applicazione, punti in comune e principali differenze tra l'approccio EU ed extra EU

La norma UNI EN ISO 4126 è valida per tutte le valvole che hanno un diametro di efflusso di almeno 4 mm e con una pressione di taratura minima di 0.1barg.
La API 520 è valida invece in tutti i settori industriali nei quali ci sono attrezzature con una pressione massima ammissibile di 1,03 barg o superiore.
Per entrambe la pressione di scarico utilizzata per calcolare l'area minima di una valvola di sicurezza deve essere pari alla pressione di taratura incrementata della sovrapressione (di solito è pari al 5% o 10%) per tutte le situazioni di sovrapressione, valore che non deve mai superare 1.1 volte la PS. Fanno eccezione i rischi legati alle fiamme esterne in cui è ammessa una pressione di scarico maggiore. Questa non ha valori di riferimento nella UNI EN ISO 4126 mentre nella API 520 vede come valore massimo una sovrapressione ammissibile di 1,21 volte la PS, valida come già detto, solo per le attrezzature esposte a fiamma (vedi Fig. 15 API 520-1). Nel mercato europeo una norma tecnica di solito passa in secondo piano rispetto una di prodotto il riferimento principale, quindi, resta la UNI EN ISO 4126-1.
Per quanto riguarda il dimensionamento, descritto rispettivamente nella parte 7 [3] della UNI EN ISO 4126 e nella API 520 parte 1, abbiamo delle piccole differenze nelle relazioni analitiche utilizzate per il calcolo dell'area minima di scarico. Relazioni che però nascono dalle medesime leggi gasdinamiche.

2.2 Principali differenze nel dimensionamento

Andremo ad analizzare di seguito il dimensionamento di una valvola di sicurezza adibita allo scarico di un gas ideale in regime critico. Ricordiamo che tale condizione si raggiunge se:

$$\frac{P_b}{P_o} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\left(\frac{k}{k-1}\right)} \qquad (1)$$

Secondo la UNI EN ISO 4126-1 il calcolo dell'area minima avviene tramite la relazione:

$$A = \frac{\dot{Qm}}{P_o C K_{dr} \sqrt{\frac{M}{ZT_o}}} \qquad (2)$$

Nella API 520 invece la relazione diventa:

$$A = \frac{W}{P_1 C K_d K_b K_c} \sqrt{\frac{TZ}{M}} \qquad (3)$$

UNI EN ISO 4126-1		
mbolo	escrizione	Unità di isura
	linima sezione di passaggio	m^2
	ortata massima	g/h
o	ressione di scarico	arA
	oefficiente di comprimibilità	
Kdr	Coefficiente di scarico corretto (0,9 x Kd)	/
l	lassa molare	g/kgmol
	attore di comprimibilità alla pressione e temperatura di scarico	
o	emperatura di scarico	
b	ontropressione	arA
c	ressione critica	arA

Tabella 1. Nomenclatura norma UNI EN ISO 4126-1

API 520		
Simbolo	Descrizione	Unità di misura
A	Area di scarico minima	mm2
W	Portata di passaggio	Kg/h
P1	Pressione di scarico	KPa
C	Coefficiente di comprimibilità	/
Kd	Coefficiente di scarico effettivo	/
Kb	Fattore di correzione della contropressione	/
Kc	Fattore di correzione relativo al tipo di installazione	/
T	Temperatura di scarico	K
Z	Fattore di comprimibilità alla pressione e temperatura di scarico	/
M	Massa molare	kg/kgmol

Tabella 2. Nomenclatura norma API 520

Nell'API sono inseriti alcuni coefficienti che nella UNI EN ISO 4126-1 non figurano. La logica che utilizza la norma americana è quella di inserire costanti aggiuntive al fine di adattare il calcolo a seconda della tipologia di dispositivo di sicurezza da dimensionare. Abbiamo infatti, come mostrato nell'equazione 3, il coefficiente K_d che diventa 0.975 quando una PSV è installata con o senza un disco di rottura a valle (installazione combinata), oppure diventa 0.62 quando andiamo a dimensionare soltanto un disco di rottura.

Troviamo K_b che invece è un coefficiente correttivo dovuto alla contropressione a valle del dispositivo. Questo assume valore unitario se abbiamo una valvola di sicurezza standard mentre può variare nel caso in cui si utilizza una soluzione con soffietto.
K_c è da utilizzarsi nel caso in cui la valvola sia installata dopo un disco di rottura. Diventa pari a 1 se il disco non è presente e pari a 0.9 quando avviene la combinazione. Nella UNI EN ISO 4126-1 non vengono aggiunte tali costanti ad eccezione del K_{dr} (0.9xKd) che la norma impone essere dichiarato dal fabbricante (Kd) e di solito citato all'interno della dichiarazione di conformità PED della valvola.
Questa è una differenza fondamentale tra le due norme poiché tale parametro in ambito API è costante mentre in ambito europeo deve essere calcolato e comunicato dal fabbricante, questo fa sì che in Europa potremmo acquistare delle valvole di sicurezza con un coefficiente di efflusso molto più basso di 0.975. Andando ad effettuare un calcolo utilizzando i medesimi parametri di progetto e la stessa tipologia di fluido (azoto allo stato gassoso):

UNI EN ISO 4126-1	**API 520**
P_o = 10 barg	P_1 = 10 barg = 1000KPa
M = 28.02 Kg/Kgmole	
K = 1.4	
T = 20°C = 293 K	
Z = 1	
Kdr = 0.87	Kd=0.975
N.A.	K_b = 1
N.A.	K_c = 1

Tabella 3. Parametri di calcolo

Otteniamo le seguenti aree minime di scarico:

API 520 A=1840 mm2
UNI 4126 A=2062 mm2

Come ci si aspettava, l'utilizzo di un coefficiente di efflusso costante fa sì che l'area minima di scarico che viene calcolata tramite l'API sia minore, frutto della maggiore efficienza e minore perdita di carico tramite l'orifizio.

3. Fenomeni di instabilità delle valvole di sicurezza (par 7 api 520 pt 2)

Il flusso attraverso l'orifizio di una valvola di sicurezza è fortemente influenzato dalle pressioni che ci sono a monte e a valle della valvola. Ciò accade poiché il flusso si trova raramente in condizioni stazionarie se non durante l'apertura iniziale dell'otturatore. L'instabilità di una valvola di sicurezza è quel fenomeno che porta ad un non corretto funzionamento della valvola stessa, generando quindi oscillazioni più o meno rilevanti della portata di scarico e l'innesco di vibrazioni.

Prima di approfondire occorre definire alcuni parametri fondamentali che caratterizzano le prestazioni di una valvola di sicurezza e che incontreremo nelle analisi successive:

- *Contropressione (backpressure)*: pressione che si ha alla sezione di uscita della valvola di sicurezza. Tale valore è dato dalla somma della pressione statica e quella dinamica che si hanno a valle del dispositivo.
- *Contropressione imposta (superimposed pressure)*: pressione statica nella sezione di uscita della valvola di sicurezza. Con scarico diretto in ambiente tale valore coincide con la pressione atmosferica. Nel caso di scarico in blowdown coincide la pressione statica del sistema.
- *Perdite di carico linea (built-up pressure)*: pressione dinamica derivante dalle perdite di carico nei tratti a monte e a valle del dispositivo.

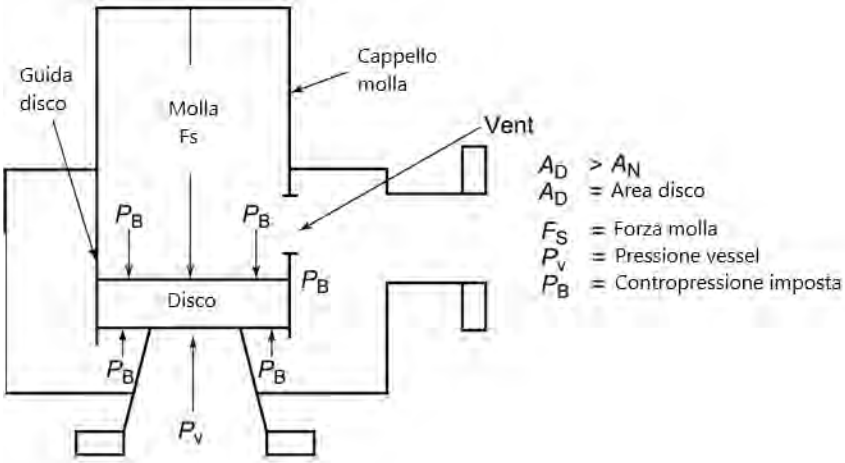


Figura 2. Pressioni che agiscono sull'otturatore di una PSV a molla con cappello

Queste grandezze ricoprono un ruolo fondamentale e spesso sottovalutato. Come vedremo in seguito, infatti, il trascurare questi effetti nelle fasi progettuali del sistema di sicurezza potrebbe generare fenomeni di instabilità sulla/e valvola/e.
La norma API 520 ne descrive tre principali:

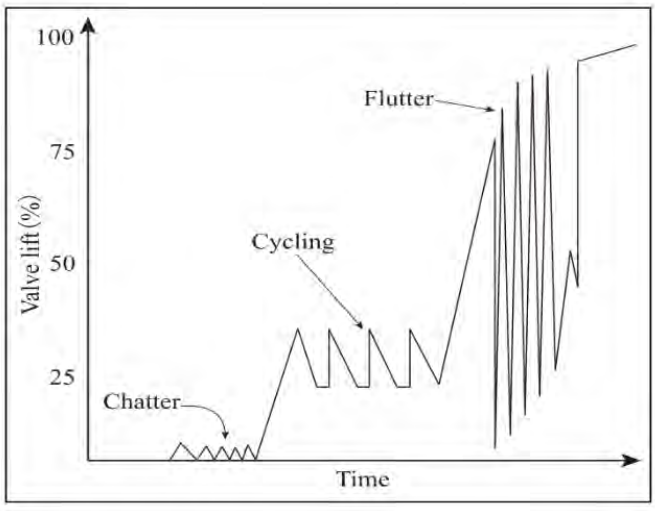


Figura 3. Fenomeni di instabilità

3.1 Fenomeno del "Cycling"

Il fenomeno consiste nell'apertura e nella chiusura con bassa frequenza della valvola di sicurezza. Questo di solito accade quando la capacità di scarico della valvola è molto maggiore rispetto alla portata da scaricare.
In questo caso l'otturatore si alza e la valvola scarica una portata che è superiore rispetto a quella generata nello scenario critico. Si innesca così un fenomeno ciclico in cui la valvola si riaprirà ogni qual volta si raggiungano le condizioni di scarico per poi richiudersi. La frequenza di questa oscillazione è funzione della capacità del fluido di tenere aperta la sede ed è di molto inferiore della pulsazione naturale della valvola stessa (frequenza di risonanza del sistema). In via del tutto generale, tale fenomeno non genera danni rilevanti ma a lungo andare potrebbe innescare un deterioramento sulla superficie dell'otturatore, ostacolando quindi la corretta adesione dello stesso sulla sede.

3.2 Fenomeno del "Flutter"

In questo caso si ottiene un'oscillazione rapida dell'otturatore che però non raggiunge mai le condizioni di chiusura. Questo è causato dalla dinamica del sistema che fa muovere l'otturatore vicino la frequenza naturale della valvola e può portare all'usura dei componenti mobili ed il blocco della valvola nelle posizioni di completamente chiusa o parzialmente aperta. Tale fenomeno è più frequente nelle valvole di sicurezza a molla.

3.3 Fenomeno del "Chattering"

Il fenomeno è simile a quello del cycling ma, l'oscillazione possiede una frequenza molto alta, il cui ordine di grandezza è prossimo alla pulsazione naturale del sistema. La prima conseguenza è la possibile perdita di tenuta dei vari elementi (tiranti sugli accoppiamenti flangiati o rottura dei componenti a causa della fatica) a causa delle vibrazioni dovute allo sbattere dell'otturatore sulla propria sede.

4. Principali cause dell'instabilità

I fenomeni vibratori possono avere la stessa origine e si possono instaurare solo se l'otturatore non riesce a raggiungere la piena alzata. Quando l'otturatore della valvola di sicurezza si porta contro l'arresto meccanico rimanendovi appoggiato è molto difficile che si inneschino vibrazioni dell'otturatore. Se invece l'otturatore non raggiunge il fermo meccanico della valvola, si trova esposto ad eccitazioni meccaniche dovute alla turbolenza del fluido che possono provocarne la vibrazione. In questo caso la valvola si comporta come un sistema massa-molla e quindi è soggetto ai modelli fisici che ne regolano il comportamento.
Tra questi ricopre un ruolo fondamentale quello che porta al raggiungimento della frequenza di risonanza del sistema. Un sistema massa-molla, infatti, sottoposto ad un carico ciclico genera un movimento vibratorio che al raggiungimento di una determinata frequenza, denominata pulsazione naturale del sistema, può far sì che si

raggiunga il fenomeno della risonanza, il quale amplifica in maniera progressiva l'oscillazione. Questo è lo scenario peggiore poiché la vibrazione generata è crescente e si propaga su tutti gli elementi interni alla valvola ed in contatto con essa innescando rotture o fenomeni di fatica ciclica.

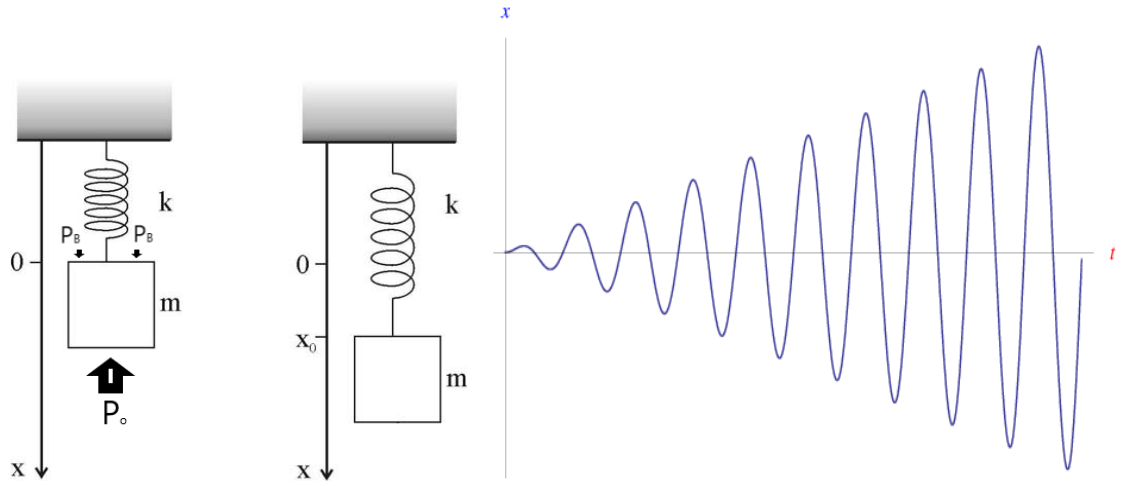


Figura 4. Sistema massa molla in risonanza

L'evoluzione della tecnologia, le continue ricerche nell'ambito dell'ingegneria di processo e l'attenta vigilanza del mercato e dei luoghi di lavoro ha fatto sì che gli incidenti dovuti all'instabilità delle valvole di sicurezza siano molto rari. Nel corso della storia però ci sono stati alcuni accadimenti che hanno portato sotto i riflettori questa problematica. Tra i principali troviamo sicuramene l'incidente avvenuto nell'impianto ICAM di Priolo Gargallo (Siracusa) nel 1985 [8]. e più recentemente, quello avvenuto presso lo stabilimento Chempark di Zaluzi in Repubblica Ceca, nel 2015 [9] [10].
In entrambi i casi le ricerche e le indagini successive hanno confermato come tra le causa principali che poi hanno innescato il cosiddetto "effetto domino", ci fosse l'apertura dell'accoppiamento flangiato che collegava la valvola di sicurezza all'impianto. Questo fenomeno, indotto dalle forti vibrazioni che si sono innescate in prossimità dell'otturatore della/e valvola/e di sicurezza ha permesso la fuoriuscita di sostanze infiammabili in ambiente, alimentando il successivo incendio. Andremo ora ad analizzare le principali cause dell'instabilità.

4.1 Valvola sovradimensionata

Disporre di una valvola con un'elevata portata di scarico è sicuramente un aspetto che tutela l'utilizzatore ma cosa succede se lo scenario di sovrapressione genera una portata molto inferiore? La valvola scarica la massima portata senza effettuare tutte la corsa (soprattutto nel caso dei liquidi) oppure apre e chiude ripetutamente, innescando fenomeni vibratori. Ovviamente il rimedio consiste nell'adottare una valvola con un orifizio più piccolo sfruttando l'intera corsa dell'otturatore e portandolo a battuta.

4.2 Perdite di carico sulla linea in ingresso alla valvola

La valvola di sicurezza si apre quando sull'otturatore la pressione statica raggiunge il valore di taratura. Una volta che l'otturatore si solleva si passa alle condizioni dinamiche in cui la pressione, a monte dell'area di scarico, è fortemente influenzata dalle perdite di carico che si hanno durante il percorso. La valvola dovrebbe essere posizionata il più vicino possibile all'attrezzatura in pressione in modo da preservare i valori ammissibili di pressione. Tale soluzione è comunque da evitare qualora ci siano fluttuazioni di pressione abbastanza ampie da generare fenomeni di fatica ed è per questo motivo che le valvole andrebbero installate in una zona a pressione stabile.

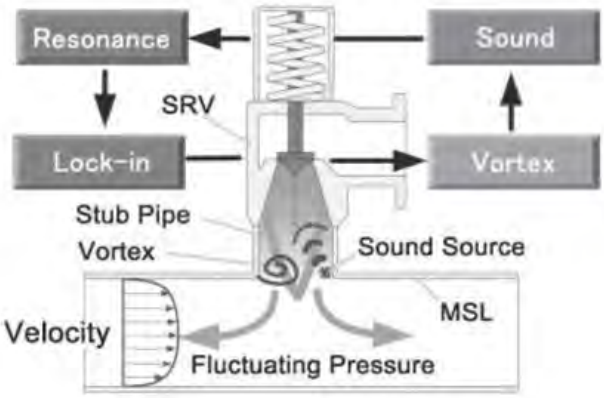


Figura 5. Effetti della pressione flottante

D'altro canto, installare il dispositivo di sicurezza troppo lontano dall'attrezzatura potrebbe innescare effetti simili. Se analizziamo il tratto che collega la valvola all'attrezzatura, osserviamo che le perdite di carico dissipano parte dell'energia del fluido stesso riducendo la pressione che agisce sull'otturatore.
In pratica, le perdite di carico, se non valutate correttamente, potrebbero generare fenomeni di chiusura ciclica dell'otturatore della valvola (cycling o chattering) o addirittura, nel caso in cui siano molto grandi, far si che si vada a superare, all'interno dell'attrezzatura il valore massimo consentito di 1.1 volte la PS. A tal proposito ci vengono incontro le norme UNI EN ISO 4126-1 ed API 520.
Entrambe suggeriscono di limitare le perdite di carico in ingresso al dispositivo ad un valore non superiore al 3%. Al di sotto di tale soglia gli effetti delle perdite di carico possono essere trascurati mentre nel caso in cui venga superata occorrerà tenerla in considerazione nel dimensionamento ed eventualmente abbassare la pressione di taratura del dispositivo. Recenti studi hanno però dimostrato che limitare la perdita di carico ad uno specifico valore non è sufficiente a garantirne la stabilità.

4.3 Contropressione e perdite di carico sulla linea di uscita

La pressione di taratura, la capacità di scarico e le caratteristiche operative devono tenere in considerazione gli effetti della pressione a valle del dispositivo. Come abbiamo detto in precedenza, secondo la norma UNI EN ISO 4126-1, questa è data dalla somma di due contributi, un valore statico che è pari alla pressione dell'ambiente

di scarico ed un valore dinamico che è dato dalle perdite di carico che il flusso incontra durante il suo percorso. Di solito il valore limite che deve raggiungere la "back pressure" è indicato dal fabbricante della valvola stessa che lo esprime in termini percentuali della differenza tra la pressione di taratura e la pressione statica. Nel caso in cui ciò non fosse esplicitato o riportato nella documentazione la norma ci dice di calcolare la pressione di uscita usando la capacità di efflusso, la quale è la capacità di un dispositivo di sicurezza calcolata usando il coefficiente di scarico certificato diviso per un fattore di 0.9. Come si evince anche dalla Figura 1 l'azione della contropressione è quella di ostacolare l'apertura dell'otturatore, generando una forza contraria a quella esercitata dal fluido da scaricare. La soluzione che di solito viene applicata, quando abbiamo forti valori di contropressione nel sistema di blowdown, è quella di installare una valvola di sicurezza con soffietto. Questa evita che la contropressione entri in contatto diretto con l'otturatore e quindi non ci saranno forze che ostacolano l'apertura se non quella della molla.

4.4 Effetto onde d'urto

Questa è sicuramente la causa più complessa da analizzare poiché e descritta da complesse relazioni analitiche, frutto delle leggi fisiche che governano la gasdinamica ed è tutt'ora in corso di studio nei principali centri di ricerca. Quando il salto di pressione che avviene attraverso una sezione raggiunge le condizioni soniche viene generata un'onda d'urto che si propaga tramite onda sfruttando il movimento delle molecole d'aria. Ovviamente l'onda ha una velocità di propagazione e quando incontra un ostacolo reagisce variando la sua direzione. Può accadere che a seguito di una riflessione, magari a causa di un componente vicino oppure dell'arrivo in un ambiente espansivo (ad esempio un serbatoio), l'onda ritorni in prossimità dell'area di scarico. Per semplicità ipotizziamo che l'area coincida con l'orifizio della valvola stessa. Quando l'onda ritorna innesca una variazione istantanea della pressione a valle dell'orifizio che potrebbe favorire la richiusura dell'otturatore ma soprattutto generare fenomeni vibratori ad alta frequenza portando ad i fenomeni di instabilità prima descritti. Le principali soluzioni, qualora ci sia la possibilità che tale rischio avvenga, sono quelle, o di sfruttare sistemi che riescano a smorzare le vibrazioni prodotte, soluzione che di solito è applicata sulla carpenteria di supporto del piping, oppure prevedere delle opportune rondelle di sicurezza autosmorzanti. Queste ultime, infatti, proteggono la tiranteria dalla riduzione del precarico durante il fenomeno vibratorio.

5. Analisi dell'incidente di Zaluzi

Il 13 Agosto 2015, nella centrale Chempark di Zaluzi, una delle principali raffinerie della nazione è avvenuto il più grande incidente degli ultimi venti anni di storia della Repubblica Ceca. L'incidente è iniziato con un'interruzione del sistema di raffreddamento, che ha portato ad una forte produzione di vapore di propilene. Le valvole di sicurezza in Cuma alla colonna si sono aperte, scaricando però, un flusso

altamente instabile che ha portato allo smontaggio dei tiranti posizionati sugli accoppiamenti flangiati permettendo la fuoriuscita di vapore, altamente infiammabile. L'incidente avvenuto presso il Chempark di Zaluzi ha portato ad una serie di indagini ed analisi per risalire alle cause che hanno portato all'esplosione. Tra queste spicca l'articolo accademico rilasciato dalla rivista Elsevier [8] condotta dall'Università di Praga insieme all'azienda utilizzatrice dell'impianto. Tramite il software Hysys (Aspen Technology) sono state ricreate le condizioni che hanno portato all'incidente al fine di trovarne le cause.

5.1 Risultati ottenuti

L'analisi ha mostrato come la progettazione iniziale del sistema di sicurezza fosse in linea con le indicazioni principali della norma API 520:

- La taratura delle 4 valvole di sicurezza era in linea con le attrezzature protette.
- Le perdite di carico sulla linea di ingresso rispettavano il 3% della taratura.
- La capacità di scarico delle valvole erano più che sufficienti (767 605 Kg/h rispetto ad un valore minimo necessario di 330 000 Kg/h).
- Erano installate valvole con soffietto, per le quali la contropressione totale era all'interno dei valori ammissibili (pari al 17% della pressione di taratura rispetto al valore ammissibile del 50 % indicato dalla norma).
- I supporti delle tubazioni sono stati verificati e non hanno presentato criticità.

Non venne però considerato l'effetto che hanno le onde d'urto sul sistema. La frequenza naturale della valvola di sicurezza installata era di 19,6 Hz, il software ha permesso di calcolare la frequenza massima raggiunta in prossimità della valvola e tale valore è risultato essere prossimo a 19,42 Hz.

6. Conclusione

Come si è cercato di descrivere e dimostrare la sola applicazione delle norme tecniche di riferimento a volte non è sufficiente per risolvere tutti gli eventuali rischi possibili all'interno di un impianto in pressione. Nonostante l'elevato dettaglio e le notevoli informazioni che sono a disposizione dei progettisti occorre sempre essere aggiornati sugli ultimi sviluppi in ambito scientifico. Gli incidenti citati in questo articolo sono frutto dell'obsolescenza degli impianti stessi, il che dimostra la necessità di rendere i processi in linea con gli ultimi sviluppi delle norme tecniche. Non è sufficiente scegliere le valvole di sicurezza soltanto valutando i parametri ammissibili da preservare, ricoprono un ruolo chiave anche la posizione di esse sulla linea di scarico e la loro resistenza ai carichi meccanici, fortemente influenzati dagli ambienti di utilizzo e dalle attività manutentive indicate dai rispettivi fabbricanti.

7. Bibliografia

[1] UNI EN 764-7, edizione Maggio 2002;

[2] EN ISO 4126-1, edizione 2019 - *EC1-2020 UNI EN ISO 4126-1:2019;*

[3] EN ISO 4126-7, edizione 2019, pag. 4;

[4] API STANDARD 520 part I, tenth edition, ottobre 2020.

[5] API STANDARD 520 part II, tenth edition, ottobre 2020;

[6] API STANDARD 521, seventh edition. giugno 2020.

[7] Direttiva 2014/68/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 15 maggio 2014 concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione;

[8] Ministero dell'Interno, Direzione generale della Protezione Civile e dei servizi antincendio, Servizio Tecnico Centrale, Rassegna comparata incidenti di notevole entità (incendi, esplosioni e scoppi, loro evoluzione ed effetti prodotti), Roma: Servizio Documentazione e Relazioni Pubbliche dei Vigili del Fuoco, 1986;

[9] Unipetrol, 2017, root Cause Analysis of Explotion and Fire at. Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=FssYuQCZtEs.

[10] Tomas Herink, Jan Doskočil, Martin Růžička, Philp A.Henry, Robert A. Sadowski, Petr Zámostný, Propylene column pressure relief valves chattering resulting in explosion and fire of the Steam Cracker unit, Elsevier, 2022, volume 74.

Esercizio di generatori di vapore con almeno 45 anni di vita: considerazioni su casi studio

C. Grazioli, P. Sergi

Inail - Uot di Messina

Abstract

I Generatori di Vapore sono una tipologia di apparecchi a pressione le cui caratteristiche peculiari di funzionamento e per i rischi ad esso connessi, sono sempre stati oggetto di specifici interventi a livello normativo, dal R.D. 824 del 1927 al Testo Unico 81 del 2008, passando per le circolari tecniche dell'ANCC e dell'ISPESL.
In questo lavoro viene fatto il punto sullo stato dell'arte della normativa tecnica, al fine di analizzare e gestire l'invecchiamento di tali apparecchi.
L'invecchiamento è funzione di vari parametri, in particolare delle condizioni di installazione e di esercizio; la sua gestione permette di prolungare il più possibile la vita dell'impianto in condizioni di sicurezza.
Viene dapprima presentata la procedura tecnico-amministrativa ad oggi vigente sul territorio nazionale per consentire l'ulteriore esercizio di generatori di vapore che abbiano raggiunto o superato il 45° anno di vita. La circolare Ispesl n.60/97, che costituisce lo strumento operativo nel caso in esame, prevede che sia il Gestore ad effettuare tutti i controlli e le valutazioni di integrità, e sia poi l'Inail a rilasciare l'autorizzazione all'ulteriore esercizio, valutato l'esito delle indagini fatte.
Successivamente, attraverso alcuni casi studio, viene messa a fuoco la tipologia dei controlli da effettuare o eventualmente disponibili per meglio valutare lo stato di conservazione degli apparecchi.
In conclusione, si analizzano i possibili scenari inerenti il prosieguo delle attività di manutenzione e verifica a cui sottoporre l'apparecchiatura per garantire l'esercizio.

Keywords: Generatori di Vapore – invecchiamento – stato di conservazione**.**

1. Introduzione

I generatori di vapore (GV) sono attrezzature esposte alla fiamma con rischio di surriscaldamento, e quindi storicamente soggetti, a livello normativo, a indicazioni specifiche, come l'autorizzazione all'installazione e l'abilitazione alla conduzione.
I GV sono presenti in numerosi settori industriali, dal petrolchimico al farmaceutico o alimentare, cartiere, ancora settore sanitario o metalmeccanico.
Questo lavoro si focalizza sulla normativa italiana che prevede, per queste attrezzature di lavoro, una procedura di valutazione del degrado dei materiali, oltre i 45 anni di esercizio. Si tratta quindi della gestione dell'invecchiamento, in quanto

per motivi economici e produttivi, sembra utile riutilizzare i vecchi impianti, anziché smantellare; la problematica riveste un certo interesse per i grandi stabilimenti industriali a ciclo continuo, dati gli elevati costi di realizzazione di nuovi impianti, la carenza di siti disponibili ed i tempi lunghi per effettuare la sostituzione di quelli esistenti. Sul nostro territorio sono presenti molti impianti installati tra fine anni '60 e inizio anni '80, che hanno quindi raggiunto o sono prossimi a raggiungere tale soglia.
L'ulteriore esercizio oltre i 45 anni è piuttosto raro invece nella piccola e media industria, dove vengono utilizzati apparecchi di potenzialità contenuta e quindi di dimensioni ridotte, inseriti in processi produttivi più facilmente intercettabili; in questo caso risulta più semplice l'eventuale sostituzione di un generatore soggetto a fenomeni di invecchiamento qualora manifesti perdita di efficienza e/o sicurezza.

2. Lo sviluppo normativo

Forniamo una breve panoramica sull'evoluzione della normativa italiana con riguardo ai generatori di vapore:

- R.D. 1331 del 9 luglio 1926, originario riferimento normativo per le attrezzature a pressione;
- R.D. 824 del 12 maggio 1927 e ss.mm.ii., regolamento per l'esecuzione, fornisce per la prima volta indicazioni inerenti la costruzione, la riparazione e l'esercizio con le relative verifiche;
- D.M. 21 maggio 1974, norme integrative al decreto precedente, con aggiornamento del regime delle verifiche;
- D.Lgs. 93 del 25 febbraio 2000, "Attuazione della direttiva 97/23/CE (PED) in materia di attrezzature a pressione", modifica il quadro normativo per quanto concerne la progettazione, fabbricazione, valutazione di conformità, immissione sul mercato ed esercizio delle attrezzature a pressione;
- D.M. 329 del 1° dicembre 2004, norme di attuazione a livello nazionale per la messa in servizio ed utilizzazione delle stesse attrezzature;
- D.Lgs. 81 del 9 aprile 2008, T. U. per la sicurezza, regolamenta il regime delle verifiche periodiche e la loro scadenza, fatta salva la messa in servizio e/o la dichiarazione di messa in servizio per apparecchi di nuova installazione;
- Decreto Ministeriale 11 aprile 2011, disciplina le nuove modalità di esecuzione delle verifiche periodiche delle attrezzature a pressione.

A completamento di questo quadro normativo ci sono le circolari esplicative e le norme tecniche, ossia:

- Specifica Tecnica Applicativa VSG (ISPESL – ed.1999), fornisce le formule di calcolo inerente la verifica di stabilità dei GV;
- Circolare Ispesl n.60 del 14 luglio 1997 (sostituisce la precedente circolare ANCC n. 7367 del 21 agosto 1957), procedura per la valutazione dello stato di conservazione e l'autorizzazione all'ulteriore esercizio di generatori che abbiano raggiunto o superato il 45° anno di età';

- Circolari Ispesl n.4 e n.5 del 2005 relative alla procedura tecnico-amministrativa inerente l'installazione di GV, sia come apparecchi che come insiemi;
- specifica tecnica UNI/TS 11325-3:2021, Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione – Parte 3: Sorveglianza dei generatori di vapore e/o acqua surriscaldata;
- Norma UNI 11706:2018, Attrezzature a pressione – Valutazione dello stato di conservazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione a seguito del degrado strutturale e metallurgico da esercizio dei materiali, di componenti di generatori di vapore o di altre tipologie di apparecchi.

3. Gestione dell'invecchiamento

L'invecchiamento di un'apparecchiatura non si riferisce semplicemente al tempo trascorso dalla data di produzione o di messa in servizio, ma si manifesta come una forma di deterioramento generale, che fa aumentare il rischio di presenza di difetti o guasti, con conseguente perdita di contenimento. La gestione dell'invecchiamento è prioritaria per l'utilizzatore al fine di evitare un cattivo rendimento o un fuori servizio dell'impianto, o peggio eventuali incidenti, con le relative conseguenze anche in termini di responsabilità diretta.
Questa gestione oggi è possibile grazie allo sviluppo tecnico-scientifico che si applica in tutte le fasi del ciclo di vita di un impianto, a partire dalla progettazione che può contare sulle maggiori conoscenze riguardo la costituzione dei materiali impiegati, ai metodi di saldatura, dall'analisi dei rischi e dei componenti più sollecitati, alla valutazione preventiva dell'incidenza e dell'evoluzione di fenomeni quali corrosione ed erosione, creep, ecc.
L'invecchiamento e, più in generale l'integrità di un generatore, va valutato attraverso un'attività continua, in quanto è funzione di svariati parametri, condizioni operative, condizioni di installazione e condizioni al contorno.

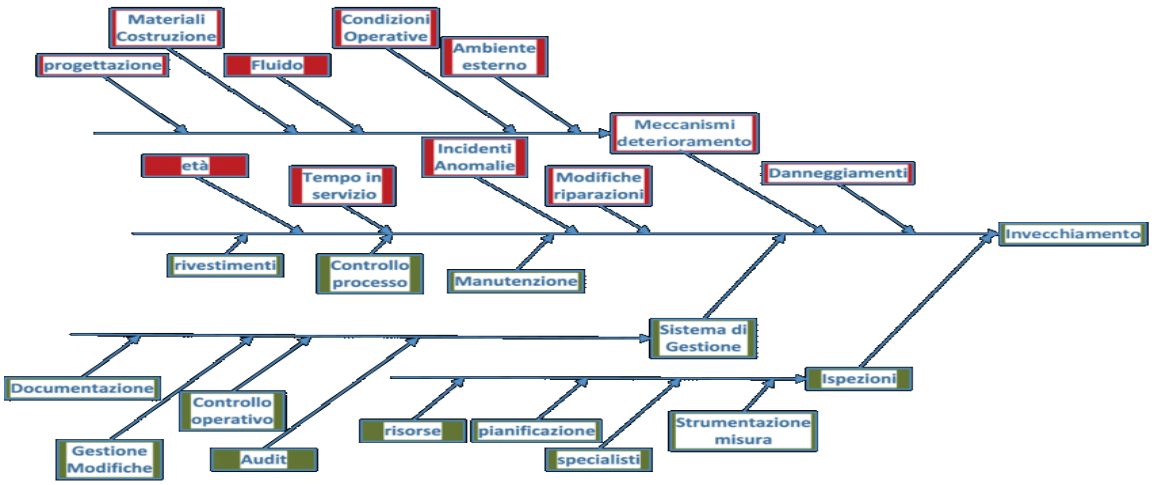


Figura 1. Fattori che determinano l'invecchiamento

Sulla base dell'esperienza e dello stato dell'arte, è opportuno eseguire una dettagliata analisi di rischio, che tenga conto di diversi meccanismi di danno, connessi sia al degrado del componente stesso che al degrado microstrutturale del materiale; analisi basata quindi su diversi elementi:

- informazione e documentazione di tutta la storia dell'attrezzatura, a partire dai codici di progettazione adottati, dai materiali utilizzati, comprese le diverse condizioni di utilizzo, le riparazioni e modifiche intervenute nel corso degli anni;
- conoscenza approfondita dei meccanismi di deterioramento (chimici e fisici, interni ed esterni, continui o occasionali), ai quali può andare incontro l'attrezzatura, legati ad aspetti tecnici, o anche gestionali;
- monitoraggio dei parametri significativi per le condizioni di integrità e funzionalità dell'impianto, tramite misurazione, controlli e prove non distruttive, ed opportuna elaborazione di eventuali dati indiretti.

In un impianto a ciclo continuo per esempio i meccanismi più presenti e significativi di degrado possono essere i seguenti (approccio RBI, Risk-Based Inspection, secondo API, American Petroleum Institute):

- fattori fisici: ambiente corrosivo (corrosione interna ed esterna, erosione), surriscaldamento interno, superamento limiti di pressione, fatica termica e meccanica;
- fattori costruttivi/di processo: tenuta irregolare di flange o guarnizioni, uso di acqua contaminata per le prove in pressione, deterioramento dei dispositivi di sicurezza, temperature/sollecitazioni eccessive;
- fattori operativi: progetto e realizzazione con standard superati, errori di fabbricazione ed installazione, variazione parametri di esercizio, riparazioni o modifiche effettuate.

Nella maggior parte dei casi il processo di deterioramento è un meccanismo lento; quindi, gli effetti si rilevano solo dopo un lungo tempo. I danni riscontrabili si manifestano in termini di riduzione di spessore, presenza di cricche o altri difetti simili, esfoliazione del materiale o perdita delle sue caratteristiche chimiche e quindi della sua affidabilità in termini di resistenza; di fatto questi difetti sono gli stessi di altre casistiche e, pertanto, vengono rilevati a prescindere dalla causa contingente.

4. La procedura tecnica

La circ. Ispesl n. 60/97, ad oggi, costituisce di fatto l'unico strumento operativo disponibile e riconosciuto dagli operatori del settore, anche se sono allo studio una revisione ed aggiornamento della stessa circolare ed una specifica tecnica UNI/CTI. Essa formalizza una procedura che consente di verificare sul piano pratico lo stato di conservazione dei generatori di vapore che abbiano raggiunto o superato il 45° anno di età, l'evoluzione del degrado e l'eventuale frazione di vita ancora utilizzabile, al fine di consentire l'ulteriore esercizio comunque in condizioni di sicurezza.

Perché la soglia dei 45 anni? Perché viene ereditata dalla precedente circ. ANCC n. 7367/57, che prevedeva tale riferimento per la revisione della pressione di bollo nel caso di GV con materiale certificato, a seguito del presumibile degrado delle caratteristiche meccaniche del materiale. Ma soprattutto perché risulta congruente con l'analisi, in termini probabilistici, dell'accadimento di un guasto in funzione dell'età dell'apparecchiatura, rappresentato dalla curva cosiddetta a "vasca da bagno" (Fig.2), secondo la quale, l'affidabilità di un componente è inizialmente costante nel tempo, ma decade man mano che l'età dell'apparecchiatura cresce, in quanto alcuni fenomeni presentano una frequenza non più trascurabile, proprio a causa dell'invecchiamento.

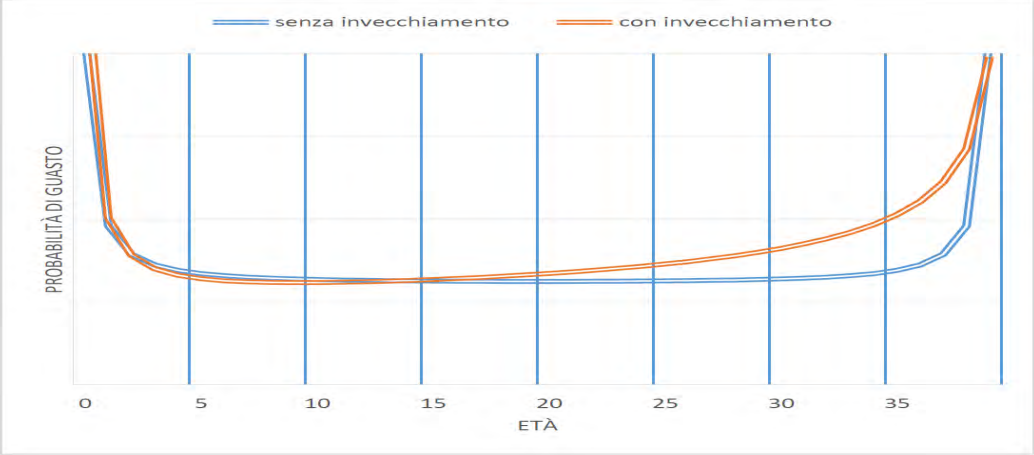


Figura 2. Dipendenza del rateo di guasto dall'età attrezzatura (curva a vasca da bagno)

La valutazione dello stato di conservazione, con riferimento al deterioramento dei materiali è demandata all'utilizzatore del generatore, che si avvale di un 'tecnico qualificato' per elaborare un piano di controlli, il quale deve prendere in esame l'analisi storica dell'attrezzatura, l'esito di precedenti verifiche e interventi (riparazioni, evoluzione del creep, verifiche periodiche, controlli di manutenzione, ecc.), nonché le diverse tipologie di sollecitazioni connesse all'esercizio, per individuare le parti del generatore presumibilmente più sollecitate ed avere un quadro chiaro dello stato d'integrità.
Indicativamente per generatori di vapore a tubi di fumo, i componenti rilevanti ai fini della sicurezza, da sottoporre quindi ad indagine, sono: camera di combustione, piastre tubiere, economizzatori; mentre per generatori di vapore a tubi d'acqua sono: corpo cilindrico, collettori, struttura portante.
Il piano dei controlli deve definire il tipo di controlli da effettuare, la loro localizzazione ed estensione, le tempistiche di esecuzione e, possibilmente, i criteri di accettabilità dei difetti; in ogni caso la circolare prescrive che vengano effettuati almeno i seguenti controlli:

a) esami con metodi non distruttivi volti a determinare lo spessore delle membrature e ad individuare la presenza di eventuali difetti;
b) micrografie per replica morfologica per analizzare il possibile invecchiamento del materiale;
c) misure di durezza sulle membrature più sollecitate;
d) analisi chimica, su trucioli o limature di materiale prelevati dalla caldaia, per verificare l'infragilimento del materiale.

Nei casi dubbi, la circolare prevede che vengano effettuate ulteriori indagini metallografiche, attraverso il prelievo di schegge o carotaggio del componente.
Il tutto subordinato al parere dell'Ente Istituzionale, ISPESL ora INAIL, in quanto lo stesso piano viene valutato in base allo stato generale del generatore, da riscontrare attraverso una sua accurata ispezione, sia interna che esterna, una prova idraulica ed una prova a caldo, con le modalità previste dalle norme vigenti.
A completamento della procedura, il tecnico incaricato dall'utilizzatore, redige una relazione, finalizzata alla valutazione dello stato di conservazione ed efficienza dell'intero generatore. La relazione deve riportare l'esito dei controlli, evidenziare i possibili meccanismi di danno e la loro localizzazione ed indicare, laddove necessario, eventuali azioni correttive da attuare, ossia interventi di riparazione/sostituzione delle membrature. È auspicabile che la relazione valuti anche le condizioni future di esercizio (es. flessibilità di conduzione, funzionamento a carico ridotto), ai fini dell'esercizio in sicurezza, ed eventualmente possa prevedere già un piano per il successivo monitoraggio nel tempo dell'integrità strutturale e dei materiali.
Infine, è sempre l'INAIL a rilasciare l'autorizzazione all'ulteriore esercizio dell'apparecchiatura.

5. Rivalutazione dopo i 45 anni

La circolare non esplicita l'iter successivo al rilascio della autorizzazione sopraindicata, ossia per quanto tempo? Con quale modalità di ricontrollo?
Proviamo pertanto a ragionare su alcune ipotesi di lavoro:

1. La valutazione dello stato di conservazione viene ripetuta ogni 45 anni, il che appare un'ipotesi forzata, in quanto le condizioni di efficienza saranno sicuramente ridotte e non è legittimo pensare ad altri 45 anni di pari esercizio con gli stessi parametri; sarebbe più opportuno rifarsi al concetto di vita utile dell'apparecchiatura, anche se sui GV degli anni '70 - '80, attualmente in esercizio, non era stato applicato in fase di progettazione, in quanto non previsto all'epoca della costruzione.
2. L'Inail rilascia l'autorizzazione e indica il periodo per l'ulteriore esercibilità del GV alla scadenza del quale dovrà essere ripetuto l'intero iter previsto dalla circolare, con tutti i controlli. Per i GV, che lavorano sempre in condizioni tali per cui possono verificarsi significativi fenomeni di scorrimento viscoso o di fatica oligociclica, si osservano già le prescrizioni tecniche vigenti in materia; di fatto si

verrebbe a creare un percorso parallelo ad altre procedure, con una modalità simile nella forma ma in parte anche nella sostanza. Questo tipo di approccio ci sembra comunque ridondante, nonostante la procedura relativa all'invecchiamento comprenda l'intero generatore, in tutte le sue parti, e non solo alcuni componenti, come avviene per esempio per lo scorrimento viscoso.

3. Rilasciata l'autorizzazione ai sensi della circ. ISPESL n.60/97, si rimanda al regime delle verifiche periodiche, già stabilito e cadenzato dalle norme in vigore, il controllo del GV ed il rilievo di eventuali problematiche che possano pregiudicare l'ulteriore esercizio. In effetti, ai sensi del D.M. 11 aprile 2011 all. II, è previsto che, qualora durante la verifica emergessero dubbi sulla condizione delle membrature o in caso di situazioni evidenti di danno, è consentito avvalersi di ulteriori esami e prove, al fine di accertare la permanenza delle condizioni di stabilità. Inoltre, a fronte di situazioni critiche, il soggetto incaricato deve ordinare il divieto d'uso del generatore, e se anche a seguito di riparazioni, sostituzioni o modifiche, non risultasse garantita la sicurezza di funzionamento, lo stesso deve essere declassato, utilizzato a pressione atmosferica o demolito. Questo percorso è di fatto quello applicato attualmente, sulla base della normativa vigente.
4. Possibilità di riomologazione del GV ai sensi della direttiva PED; vanno qui ricompresi i casi in cui il generatore ha subito, o deve subire, una variazione dei dati di targa, nonché una serie di interventi di sostituzione di membrature (corpi cilindrici, fasci tubieri del surriscaldatore, ecc.), tali da configurare una modifica. Il Fabbricante si assume l'onere di valutare i RES, tenendo conto che alcuni componenti hanno già un pregresso esercizio pari a 45 anni. Il fascicolo dell'attrezzatura dovrà documentare il buon stato di conservazione ed efficienza.

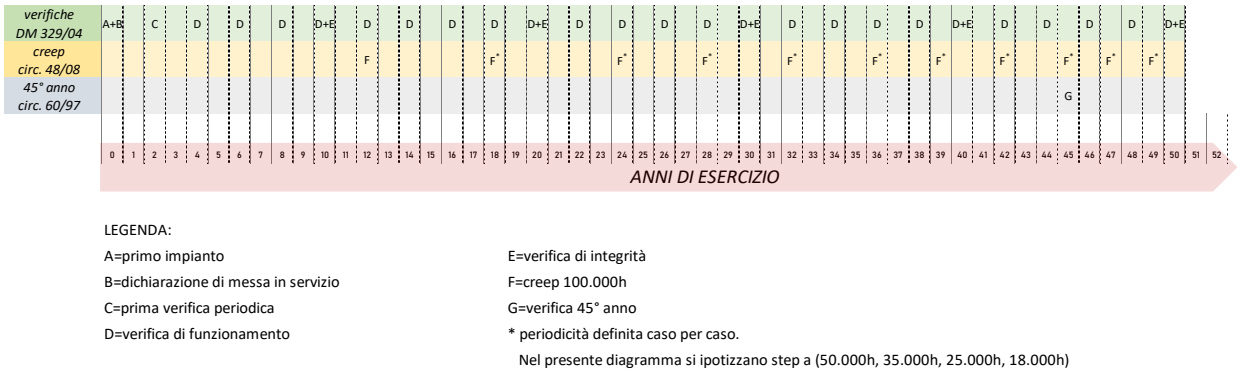


Figura 3. Adempimenti correlati all'esercizio di un generatore di vapore

6. Casi studio

A seguito della nostra esperienza diretta sul campo, presentiamo di seguito alcuni casi studio utili a formulare alcune considerazioni.

6.1 Caso 1 – GV a tubi d'acqua con 250.000 h di esercizio

Il primo caso riguarda due generatori gemelli installati in un impianto di produzione di energia elettrica, eserciti con continuità, senza sostanziali modifiche e/o sostituzioni dei principali componenti.

Durante i 45 anni di esercizio, sono stati eseguiti tutti i controlli di legge previsti per la valutazione di integrità strutturale dei due generatori; in particolare sono stati effettuati i controlli rivolti ai componenti operanti in regime di scorrimento viscoso ed alla verifica dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni (D.M. 329/2004, art. 16). Sono stati inoltre effettuati altri controlli, su base programmatica di manutenzione, che hanno riguardato altri componenti, quali la camera di combustione (in particolare i tubi di parete) e l'economizzatore.

Per la definizione del piano dei controlli, sono stati individuati i componenti più soggetti a degrado o non rientranti nei precedenti controlli ed è stata effettuata un'analisi dei principali meccanismi di danneggiamento a cui sono sottoposti i generatori di vapore del tipo in esame, ossia a tubi di acqua:

- fatica termomeccanica: con particolare riferimento al corpo cilindrico, in quanto caratterizzato da maggiori spessori del fasciame e soggetto alle maggiori pressioni, ed ai collettori finali, in quanto soggetti alle maggiori escursioni di temperatura;
- scorrimento viscoso: collettori e serpentini finali dei circuiti surriscaldamento (SH) e risurriscaldamento (RH);
- corrosione esterna/interna e ossidazione: corpo cilindrico, tubi di parete, serpentini SH e RH, serpentini ECO;
- surriscaldamento: tubi di parete, serpentini SH e RH;
- attacco da idrogeno: tubi di parete.

Negli ultimi anni, a causa delle nuove esigenze di servizio flessibile, con frequenti e rapide variazioni di carico e cicli di fermate/avviamenti sempre più ravvicinati, il meccanismo di danneggiamento più rilevante risulta determinato dalla fatica termomeccanica. I raffreddamenti e riscaldamenti sempre più frequenti inducono appunto nei materiali sforzi ciclici che determinano un veloce invecchiamento dell'impianto, riduzione dell'affidabilità e richiedono numerosi interventi di manutenzione.

I controlli eseguiti hanno evidenziato difetti in prossimità di alcune forature del corpo cilindrico, imputabili proprio a fatica termomeccanica. Utilizzando un modello ad elementi finiti, il progettista ha analizzato l'evoluzione dei difetti, che sono risultati stabili, con velocità di propagazione modeste; un ulteriore ricontrollo ad un anno di distanza delle stesse forature ha confermato il quadro, con assenza di propagazioni apprezzabili dei difetti già riscontrati. Sono quindi stati eseguiti gli interventi di riparazione necessari mediante barenatura delle forature, mantenendo l'asportazione di materiale entro i limiti previsti dalla verifica di stabilità effettuata in precedenza.



Figura 4. Esempio dei difetti riscontrati sul corpo cilindrico

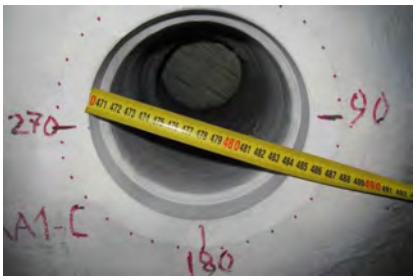


Figura 5. Esempio di bonifica dei difetti

6.2 Caso 2 – GV a tubi d'acqua con 200.000 h di esercizio

Riguarda un altro generatore di vapore della stessa tipologia precedente, a tubi d'acqua e con le stesse caratteristiche costruttive e funzionali.

In questo caso si è scelto in fase di pianificazione, di estendere i CND a tutti i componenti del GV mai oggetto di indagini precedenti e, parallelamente, di intensificare i controlli sui componenti più a rischio fino a percentuali molto alte, pari al 100% ove possibile. Questo ha consentito di osservare lo sviluppo dei difetti sui diversi componenti, in relazione alla loro funzione ed alla loro maggiore o minore sollecitazione, sulla base del confronto con i dati emersi dalle indagini precedenti, e infine poter confermare sostanzialmente l'andamento atteso nelle ipotesi preliminari.

Il fenomeno di corrosione, generalizzata o localizzata, è risultato ad oggi molto meno presente che in passato, grazie ad un migliore controllo della chimica e purezza dell'acqua del ciclo; d'altra parte, l'effetto, che è quello di ridurre lo spessore di parete, risultava già monitorato nell'ambito dei controlli di legge.

Significativo è invece risultato il controllo finalizzato ad indagare danni da infragilimento, generato dal carbonato di sodio utilizzato per addolcire l'acqua nei generatori più vecchi. Il fenomeno è dovuto alla formazione di idrossido di sodio che reagisce chimicamente con il ferro, determinando diminuzioni di spessore e/o formazione di microcricche che possono propagarsi sino a diventare critiche. Questo fenomeno, per la sua particolarità e per le posizioni ove in genere si manifesta, non veniva rilevato durante le normali verifiche periodiche ed inoltre, oggi con le nuove tecniche di addolcimento dell'acqua è molto meno rilevante.

Il meccanismo di danno connesso al degrado microstrutturale del materiale, determinato dalla permanenza alle alte temperature, è in genere estremamente lento, ma può avere delle accelerazioni non previste in caso di surriscaldamenti locali che possono portare il materiale oltre la temperatura massima ammessa. È risultato un fenomeno di norma non rilevabile nei controlli periodici, ma che può essere monitorato con normali controlli metallografici (repliche, durezze, ecc.).

6.3 Caso 3 – GV a tubi d'acqua con 340.000 h di esercizio

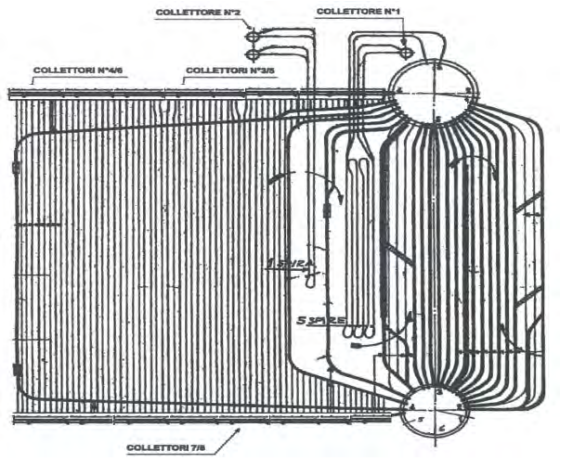


Figura 6. Schema di GV a tubi d'acqua

Riguarda una caldaia a tubi d'acqua utilizzata per il fabbisogno di vapore necessario al processo produttivo.
Dall'analisi degli esiti ispettivi eseguiti periodicamente nel tempo, risulta un discreto stato di conservazione dell'attrezzatura, compatibile con il lungo periodo di esercizio. Negli anni sono stati eseguiti alcuni interventi di riparazione e sostituzione che hanno interessato i tubi del corpo principale ed il collettore di uscita vapore del surriscaldatore SH, componente peraltro soggetto alla riomologazione per scorrimento viscoso. Nella stessa fermata programmata sono state quindi implementate entrambe le procedure, previste per legge, sia per i componenti soggetti a scorrimento viscoso che per i GV con 45 anni di esercizio.
E' stato quindi redatto il piano dei controlli per il collettore di uscita vapore SH, esercito in regime di scorrimento viscoso, e, parallelamente, per lo stato di conservazione relativo ai 45 anni, sono stati identificati i componenti più critici, alla luce dei dati disponibili e seguendo le indicazioni della circolare, che sono risultati essere, i due corpi cilindrici, superiore ed inferiore, i collettori superiori ed inferiori, il surriscaldatore ed i tubi perimetrali della camera di combustione.
I CND indicati in entrambi i piani sono del tipo esame visivo, magnetoscopico, ultrasonoro difettoscopico, spessimetrico, più repliche metallografiche e misure di durezza; per la riomologazione ai 45 anni sono stati previsti inoltre, controlli dimensionali di eventuali zone deformate e prelievo di trucioli di materiale (nel corpo cilindrico superiore e nel collettore inferiore), ottenendo una mappatura soddisfacente di tutti i componenti costituenti l'apparecchiatura.
Per avere una prima indicazione sullo stato di conservazione dei materiali, sono state effettuate le repliche metallografiche, le quali, ad una prima osservazione non hanno evidenziato fenomeni di danneggiamento o altre anomalie. È stato comunque eseguito un prelievo di materiale per l'analisi chimica, mettendo in luce una criticità operativa, ovvero la necessità di effettuare una misura dello spessore della membratura prima e dopo il prelievo, per valutare eventuali sottospessori residui e la necessità di eventuali interventi di ripristino.

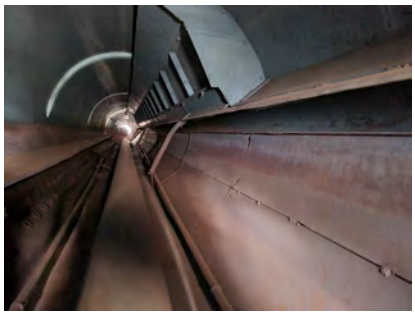


Figura 7. Vista interna di un corpo cilindrico



Figura 8. Esempio di CND sulle connessioni tubo-collettore

7. Conclusioni

A seguito delle esperienze riportate, possiamo sintetizzare alcune osservazioni in merito all'applicazione della circolare n.60/97.

Per la definizione del piano dei controlli, gli utilizzatori non devono circoscrivere le attività ai soli componenti ritenuti critici (esempio il corpo cilindrico) o già sottoposti alle verifiche periodiche (con esiti acquisiti nel tempo), ma devono analizzare l'intera attrezzatura con un dedicato studio preliminare di valutazione che prenda in esame tutti i possibili meccanismi di danno e la loro potenziale localizzazione.

Su un'esperienza riferita a n.6 GV, è stato evidenziato che non risulta particolarmente significativo il prelievo di materiale (trucioli o limatura), in quanto non ha fornito indicazioni degne di nota; pertanto, questo tipo di indagine si può effettuare solo nei casi in cui vengano rilevate anomalie o si presentino dubbi interpretativi.

Le prove previste, ossia visita interna, prova idraulica, prova a caldo per generatori di vapore (prova di funzionamento), mantengono la loro valenza anche se sono state eseguite in precedenza (ai sensi del D.M. 329/04 e del D.M. 11 aprile 2011), in quanto coinvolgono l'intera attrezzatura e forniscono importanti elementi per il rilascio dell'autorizzazione all'ulteriore esercizio. In definitiva, rispetto ad una normale verifica d'integrità, quella ai 45 anni si configura come una verifica più approfondita che copre tutti gli aspetti della vita dell'attrezzatura, poiché vengono condotti esami e prove ad un livello più approfondito e diffuso, e vengono estesi anche a zone che non sono normalmente oggetto di controllo durante le altre verifiche.

Le modalità ed i tempi tecnici tra inizio e conclusione della procedura possono subire delle variazioni anche significative e non note a priori, in quanto in corso d'opera possono subentrare esigenze di riparazioni o ulteriori indagini di approfondimento dettati dai risultati dei CND previsti. Pertanto è utile iniziare l'iter con un congruo anticipo rispetto alla scadenza dei 45 anni, in modo da compensare i tempi delle lavorazioni non preventivate e ritenute necessarie per il buon esito dell'autorizzazione all'ulteriore esercizio.

Nella previsione di aggiornamenti o nuove disposizioni che regolamentino la procedura in oggetto, si ritiene possa essere utile aggiungere almeno un paragrafo

sugli adempimenti da attuare successivamente al completamento della pratica dei 45 anni.

Bibliografia

[1] Circolare ISPESL n. 60 del 14.07.1997 “Degrado dei generatori di vapore in situ di vecchia costruzione non oggetto di trasferimento per nuovo impianto”

[2] F. Giacobbe, V. Mancuso, A. Branca, M. Lanzani, C. Sampietri, “Valutazione di integrità strutturale di generatori di vapore fabbricati ed installati da oltre 45 anni. Cenni ai principali meccanismi di danneggiamento Creep – Fatica ed utilizzo della metodologia FFS”. Atti del Convegno SAFAP Roma 2014

[3] C. Delle Site, F. Giacobbe, E. Artenio, C. Fossati, “Verifiche dello stato di conservazione di membrature di generatori di vapore eserciti da oltre 45 anni. gli effetti del degrado strutturale dovuto all’esercizio”. Atti 16°congresso AiPnD 2015

[4] Circolare ISPESL n. 15/92 del 27.02.1992 “Generatori di vapore e recipienti a pressione di vapore o di gas funzionanti in regime di scorrimento viscoso. Verifiche e controlli su impianti in esercizio”

[5] Circolare ISPESL n. 48/2003 “Procedura tecnica su verifiche di calcolo e controlli su componenti in pressione in regime di scorrimento viscoso del materiale”

[6] D.M. 329/2008 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93”

[7] UNI/TS 11325-9:2013 “Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione – Idoneità al servizio (FFS)”

[8] ASME FFS-1 API 579-1 “Fitness for Service” ed. 2021

[9] UNI 11706:2018 “Attrezzature a pressione - Valutazione dello stato di conservazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione a seguito del degrado strutturale e metallurgico da esercizio dei materiali”

[10] P. A. Bragatto, C. Delle Site, A. Faragnoli, M. F. Milazzo, “Valutazione sintetica dell’adeguatezza del programma di gestione dell’invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso”. Atti del Convegno SAFAP Milano 2016

Centrale Termoelettrica di Gissi (CH) – HP Interstage DSH

R. Iovene[1], R. Vasile[1], C. Pagano[2], M. Di Giacomo[2]

[1] Inail – Uot di Pescara
[2] A2A gencogas SpA

Abstract

Oggetto del lavoro è l'analisi delle attività svolte presso la Centrale Termoelettrica sita nel territorio comunale di Gissi (CH) per l'inserimento, tra i banchi di generazione del vapore surriscaldato di alta pressione di ciascuna sezione d'impianto, di un circuito di attemperamento intermedio, denominato HP Interstage DSH, con lo scopo di mantenere la temperatura del vapore, in uscita dai suddetti banchi, sempre ad un valore inferiore a 580°C in tutti i regimi di funzionamento delle turbine a gas, al fine di evitare fenomeni di creep sulle arpe costituenti i banchi e sui relativi collettori di distribuzione vapore.

Keywords: Attemperamento, Turbina a vapore, Creep.

1. Introduzione

La Centrale Termoelettrica di Gissi ha funzionamento a ciclo combinato ed è composta da due sezioni gemelle denominate Unità 1 e Unità 2, alimentate a gas naturale, con potenza elettrica complessiva di circa 840 MW. Ciascun gruppo produttivo è costituito da un generatore di corrente azionato da una turbina a gas e da una turbina a vapore alimentata da un Generatore di Vapore a Recupero (GVR).

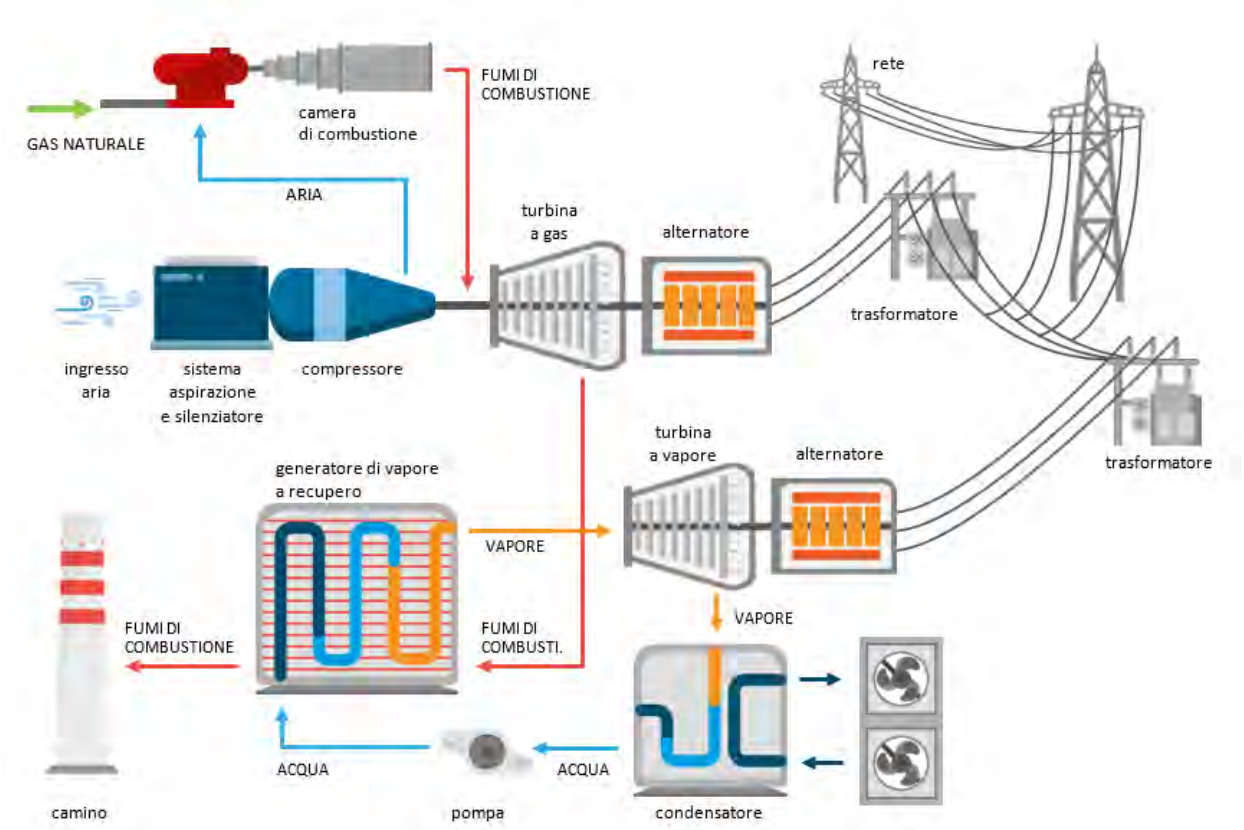


Figura 1. Schema centrale termoelettrica a ciclo combinato

Il Generatore di Vapore a Recupero è alimentato dai fumi provenienti dalla Turbina a gas metano, ed è composto da tre corpi cilindrici ed arpe a tubi d'acqua che producono vapore a tre livelli di pressione differenti. Il vapore prodotto dal GVR viene inviato alle tre turbine a vapore, una per ogni livello di pressione, per la produzione di energia elettrica. Durante la marcia dei GVR, ed in particolare nei transitori di avviamento di impianto, sono state nel tempo registrate temperature di esercizio sul collettore di distribuzione del vapore surriscaldato SH, prossime ai 625°C e pertanto, al fine di contenere entro i 580°C le temperature di esercizio e di conseguenza limitare i fenomeni di creep, è stato progettato l'inserimento di un circuito di attemperamento intermedio tra i banchi di risurriscaldato HPSH1 e HPSH2, realizzato mediante la modifica dei link di collegamento tra i collettori inferiori delle arpe dei banchi. I link di collegamento sono stati tagliati e collegati a dei nuovi manifold, ottenendo un circuito di loop, posto al di fuori del casing del GVR. Il nuovo attemperatore/desurriscaldatore è essenzialmente costituito da un tubo attraversato dal vapore nel quale, tramite un iniettore, viene spruzzata acqua di alimento, al fine di abbassare la temperatura del vapore, se questa supera un dato valore prestabilito (Fig. 2).

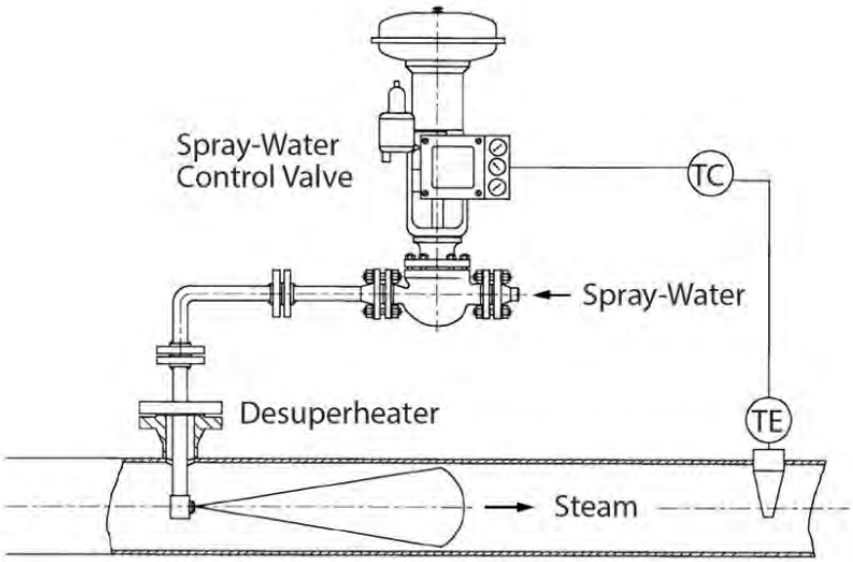


Figura 2. Schema tipico di attemperatore/desurriscaldatore

2. Progetto degli HP Interstage DSH

Il progetto dei sistemi HP Interstage DSH è stato sviluppato dalla società proprietaria, che è anche gestore dell'impianto, in sinergia con una ditta specializzata, incaricata della realizzazione dei lavori. Il sistema HP Interstage DSH è stato dimensionato per garantire che la temperatura del vapore in uscita dal banco HPSH1 sia sempre inferiore a 580°C, per tutti i carichi del GVR, sia in condizioni di esercizio stabile che in fase di transitorio (avviamenti d'impianto e variazioni di carico della Turbina a gas).
La temperatura in uscita dalla caldaia è invece controllata dall'attemperatore finale preesistente, installato sul collettore vapore surriscaldato SH, che viene utilizzato:

- in fase di avviamento, per la regolazione di precisione della temperatura del vapore surriscaldato in ingresso alla Turbina a vapore di alta pressione;
- durante il normale funzionamento, per mantenere il set Point di temperatura del vapore di passaggio nel collettore vapore principale del surriscaldato, secondo quanto richiesto dal sistema di supervisione e controllo della Turbina a vapore di alta pressione.

Il sistema HP Interstage DSH, entra quindi in funzione solo quando la temperatura del vapore in uscita dall'HPSH1 è prossima ai 580° e mantiene la temperatura a questo set point per tutto il funzionamento (sliding temperature system).
Il progetto per la realizzazione degli attemperatori ha previsto, per ciascun GVR, la modifica dei link di collegamento dei collettori inferiori delle arpe, che sono stati tagliati per inserire il nuovo circuito di attemperamento tra i due banchi come indicato nel seguente P&ID:

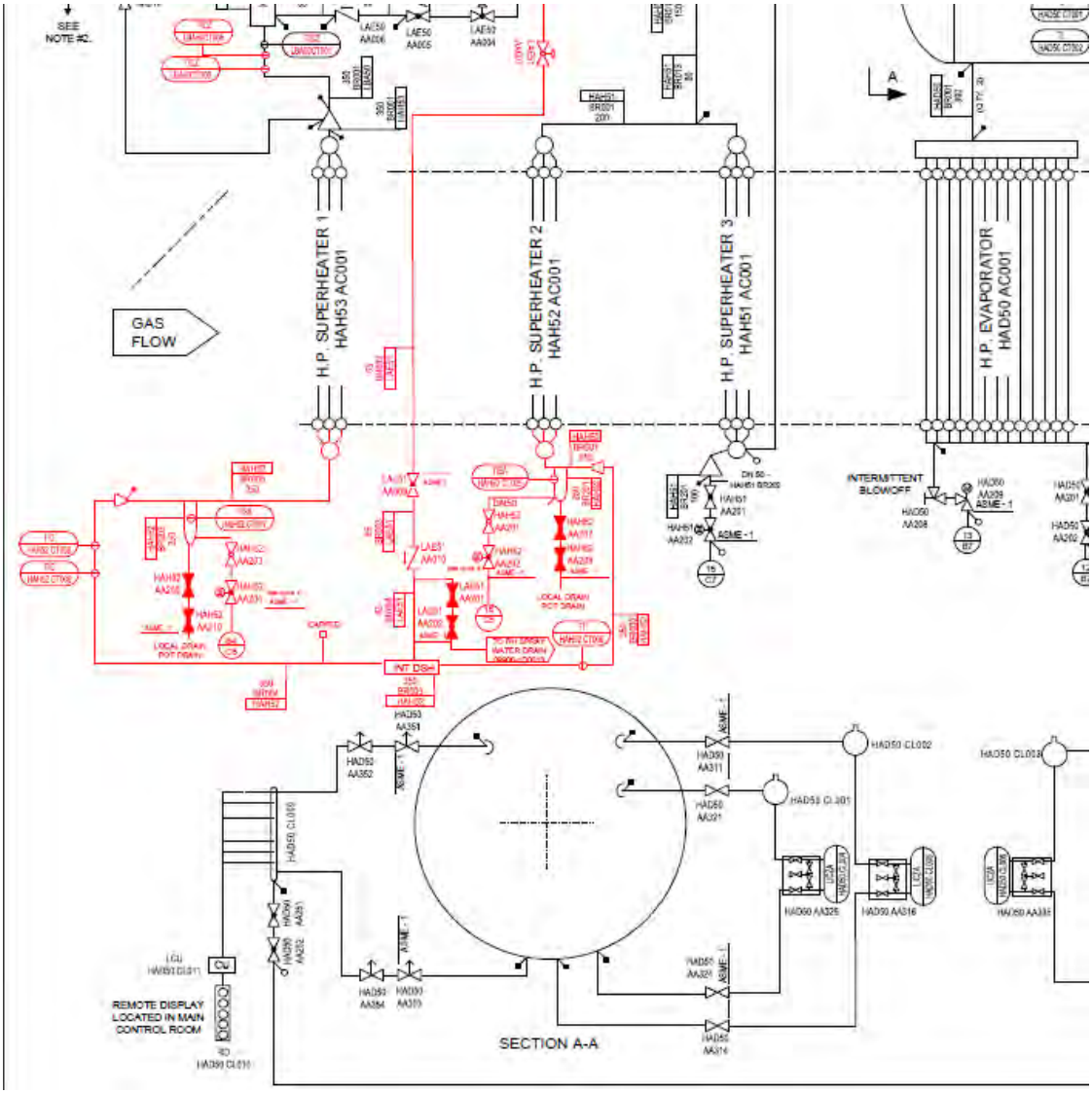


Figura 3. Progetto HP Interstage DSH

In tal modo il nuovo attemperatore intermedio riesce a controllare la temperatura del vapore in uscita dal banco HPSH1, sia in fase di avviamento che di funzionamento del GVR, attraverso la regolazione della portata d'acqua di attemperamento, realizzata tramite una valvola di regolazione azionata mediante una specifica logica di funzionamento.

Per l'alimentazione dell'acqua al nuovo attemperatore è stato creato uno stacco su una tubazione secondaria asservita all'alimentazione degli OTC "Once Through Cooler", quest'ultima direttamente interconnessa alla linea di alimento principale dell'acqua al GVR. Sono state impiegate le pompe di alimento esistenti, previa verifica che fossero in grado di sopperire alla maggiore richiesta di acqua del circuito.

Nella definizione delle logiche di funzionamento è stato previsto inoltre, a protezione del banco stesso, che la richiesta di apertura della valvola di

regolazione dell'acqua di attemperamento durante il funzionamento di impianto sia impedita nel caso in cui la temperatura in ingresso risulti inferiore a 20°C.
L'implementazione del nuovo attemperamento intermedio ha consentito di rivedere le logiche complessive di conduzione del GVR. Infatti, grazie all'innovativa gestione combinata dei due attemperatori (il preesistente e il nuovo), si assicura una temperatura quanto più omogenea sui materiali più sollecitati termicamente (banchi HPSH1 e HPSH2 e collettore principale SH) e si garantisce un valore ottimale di temperatura del vapore in ingresso alla turbina di alta pressione.

3. Definizione della temperatura limite (580°C)

Gran parte del piping del GVR, nello specifico il collettore principale del vapore surriscaldato SH e i banchi surriscaldatori HPSH1 e HPSH2, che sono stati coinvolti nell'intervento in oggetto, sono stati realizzati in acciaio ASTM A335 P91 Tipo 2 e risultano sottoposti ad elevate temperature, poiché investiti per primi dai fumi di scarico prodotti dalla turbina a gas.
Il P91 è un metallo in lega di cromo molibdeno che ha un'eccellente resistenza alla temperatura, inoltre è progettato come un ferritico potenziato con resistenza allo scorrimento viscoso. Questa lega viene normalizzata a 1050°C, raffreddata ad aria a 200°C e quindi temprata mediante riscaldamento a 760°C. Questo processo è la ragione principale alla base della resistenza allo scorrimento viscoso di questo materiale. La nomenclatura P91 sta ad indicare la composizione della lega costituita per il 9% di cromo e l'1% di molibdeno più vanadio. La presenza di cromo serve ad aumentare la resistenza alla temperatura e la resistenza all'ossidazione, mentre la presenza di molibdeno ne aumenta l'elasticità, la resistenza all'usura e la resistenza allo scorrimento ad alta temperatura.
Rispetto ai suoi predecessori, utilizzati nella realizzazione delle caldaie a vapore, di grado T22 o P22, il grado P91 mostra un'elevata resistenza a temperature fino a 600°C. Inoltre, per il P91 anche i limiti di temperatura di ossidazione sono più elevati, garantendo una migliore resistenza alla pressione e consentendo quindi di realizzare, a parità di pressione e temperatura di progetto, elementi con spessori inferiori. Queste caratteristiche del P91 contribuiscono a una durata a fatica termica di quasi 10 volte superiore, rispetto al T22 e P22, e grazie ai minori spessori in gioco consentono di innalzare la temperatura di esercizio a un livello superiore, aumentando di conseguenza l'efficienza nello scambio termico. Pertanto, ad oggi il P91 è diventato il materiale più usato nell'industria energetica e negli impianti petrolchimici, dove fluidi e gas vengono trasportati a temperature e pressioni estremamente elevate. La forza e la resistenza alle alte temperature del P91 lo rendono ideale per impianti che operano su base ciclica, come gli impianti a ciclo combinato.
La scelta progettuale adottata dalla ditta incaricata nella definizione della temperatura limite di funzionamento pari a 580°C, per i banchi di alta pressione dei GVR e per il collettore vapore surriscaldato, deriva quindi da considerazioni di

tipo cautelativo (20° gradi in meno della temperatura limite pari a 600°C) rispetto alle proprietà dell'acciaio P91, al fine di preservare nel tempo le caratteristiche tecniche del materiale impiegato e di conseguenza aumentare l'affidabilità e la vita utile del GVR.

4. Realizzazione e Certificazione degli HP Interstage DSH

Per la realizzazione dei nuovi HP Interstage DSH si è proceduto al taglio dei link a cui sono collegati i collettori inferiori della arpe dei banchi HPSH1 e HPSH2, che sono stati collegati a due nuovi manifold inferiori, del diametro esterno di 10", realizzati in acciaio A335 P91, prefabbricati in due parti, ai fini del montaggio, e testati in officina. Ciascun manifold è stato collegato al collettore della relativa arpa attraverso n.ro 24 branchetti, del diametro esterno di 4", sempre realizzati in acciaio A335 P91, prefabbricati in officina.

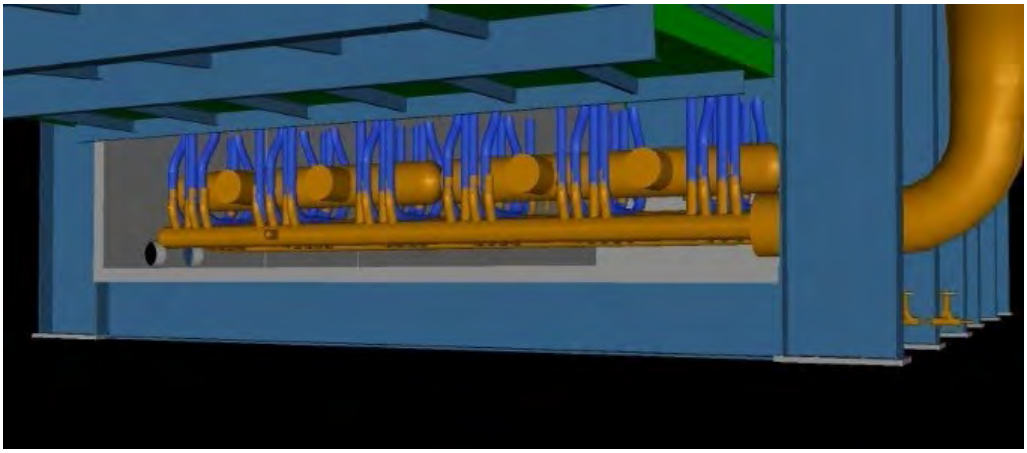


Figura 4. Nuovi Manifold

Il nuovo manifold del banco HPSH2 è stato saldato alla nuova linea vapore, sviluppata al di fuori del casing di caldaia, per realizzare il loop verticale di attemperamento. L'uscita del loop di attemperamento è stata saldata al nuovo manifold inferiore del banco HPSH1. La nuova linea vapore è stata realizzata in acciaio P91 ed è provvista di due mammelloni di drenaggio con valvole di intercetto (una manuale e una motorizzata) posti sia a monte che a valle dell'attemperatore.

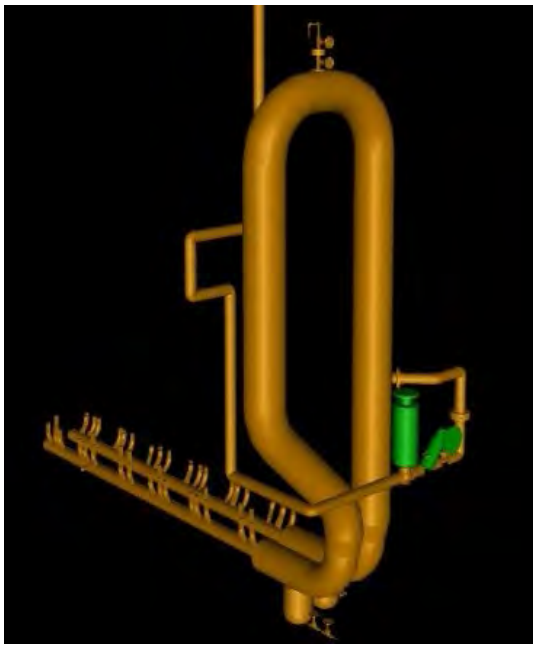


Figura 5. Loop di attemperamento

Il loop esterno è stato equipaggiato di attemperatore con ugello di spruzzamento, alimentato con acqua la cui portata è regolata per mezzo di una valvola di regolazione separata dal corpo attemperatore. L'ugello è alimentato da una nuova linea acqua, realizzata in acciaio al carbonio, con diametro esterno di 2" ed equipaggiata di valvola di intercetto manuale, filtro, valvola di stop pneumatica, valvola di regolazione, valvola di non ritorno e valvola di intercetto manuale a valle. Il sistema di attemperamento sia lato vapore che lato acqua è stato equipaggiato con idonea strumentazione di controllo e di monitoraggio, comprendente n.ro 3 trasmettitori per la misurazione della temperatura di pelle sui nuovi manifold e n.ro 6 trasmettitori di temperatura, con relativo pozzetto, sul loop di attemperamento, di cui n.ro 2 a monte attemperamento, n.ro 2 a valle attemperamento e n.ro 2 sul collettore SH.

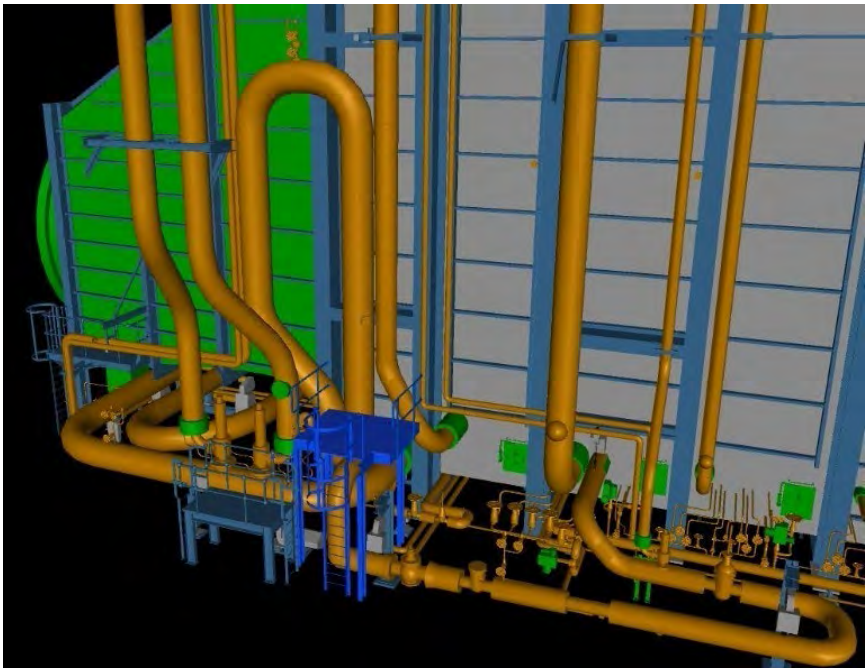


Figura 6. 3D HP Interstage DSH

Su tutta la componentistica prefabbricata in officina sono stati eseguiti i controlli non distruttivi come da Quality Control Plane del costruttore ed è stata eseguita la prova idraulica; invece, le saldature di interconnessione realizzate in campo sono state trattate come "golden joint" con l'esecuzione in loco dei seguenti controlli non distruttivi:
- Prove di durezza;
- LP 100% dei cianfrini;
- VT 100% su tutte le saldature;
- RT 100% e MT 100% sulle saldature testa a testa.

Questo perché la conformazione del circuito su cui è stato eseguito l'intervento di upgrade non consente l'intercettazione dello stesso per l'esecuzione di prova idraulica. Al termine dei lavori è stata effettuata la prova di funzionamento dell'intero sistema e dei dispositivi di sicurezza e controllo

I GVR così modificati sono stati certificati e dichiarati conformi alla Direttiva PED dalla società realizzatrice del lavoro, in qualità di costruttore, regolarmente denunciati, ai sensi del d.m. 329/04 art. 5 comma d, presso INAIL U.O.T. di Pescara e successivamente sottoposti a prima verifica periodica ai sensi del d.m. 11/04/2011.

5. Verifica dell'upgrade

La realizzazione degli HP Interstage DSH ha portato un effettivo miglioramento delle prestazioni dei GVR tali da garantire che la temperatura in uscita dai banchi HPSH1, misurata nella sezione a monte dell'attemperatore finale, non sia mai superiore a 580°C nell'intero range di funzionamento della turbina a gas. La

società proprietaria, nell'ambito della gestione dell'impianto provvede a registrare in continuo, con cadenza di 1 minuto, i dati di funzionamento dell'impianto.
Nel seguito sono riportate due tabelle con un estratto dei suddetti dati misurati sulla linea UP2, la prima riferita ai dati rilevati antecedentemente all'installazione del HP Interstage DSH e la seconda riferita ai dati rilevati successivamente all'installazione dello stesso, nelle quali sono evidenziate le temperature del vapore surriscaldato a monte (21LBA50CT901) e a valle (21LBA50CT902) dell'attemperatore finale preesistente. Dal confronto delle tabelle, in cui sono state evidenziate le temperature massime toccate in entrambi i casi durante i regimi più critici di funzionamento, risulta un netto miglioramento in termini di temperatura massime raggiunte che, a seguito dei lavori di modifica, si attestano al di sotto dei 580°C, e risultano nettamente inferiori ai 620°C raggiunti in precedenza, che oltretutto superavano la temperatura massima di progetto del P91 pari a 600°C.

	21MKA10CE602	21LBA50CT901	21LBA50CT902	21LAE50FF901
	CARICO DI PRODUZIONE	T VAP COLLETTORE AP – **MONTE** ATTEMP FINALE	T VAP COLLETTORE AP – **VALLE** ATTEMP FINALE	PORTATA ACQUA AGLI ATTEMPERATORI
	MW	°C	°C	kg/s
20-feb-19 14:00:00	254,9015656	619,0280151	568,286377	3,203407049
20-feb-19 14:01:00	261,4927063	619,2659302	568,4020386	3,211734056
20-feb-19 14:02:00	264,0060425	619,5554199	568,4050903	3,246511698
20-feb-19 14:03:00	265,3011169	619,8863525	568,3570557	3,279200315
20-feb-19 14:04:00	264,2601318	620,0546265	568,6915283	3,294344902
20-feb-19 14:05:00	266,33255	620,057251	568,2314453	3,323186874
20-feb-19 14:06:00	261,567627	620,0594482	568,2262573	3,37836504
20-feb-19 14:07:00	264,3969116	619,9072266	567,3969116	3,315809488
20-feb-19 14:08:00	263,8450623	619,7738037	568,1140747	3,378210545
20-feb-19 14:09:00	264,6640015	619,6488037	567,6312866	3,359408855
20-feb-19 14:10:00	266,4828186	619,583313	568,2007446	3,339426041

Tabella 1. Rilevazione temperature ingresso attemperatore finale prima dell'upgrade

	21MKA10CE602	21LBA50CT901	21LBA50CT902	21LAE50FF901
	CARICO DI PRODUZIONE	T VAP COLLETTORE AP – **MONTE** ATTEMP FINALE	T VAP COLLETTORE AP – **VALLE** ATTEMP FINALE	PORTATA ACQUA AGLI ATTEMPERATORI
	MW	°C	°C	kg/s
15-nov-22 13:10:00	250,4956512	567,5797119	560,5687256	7,580071926
15-nov-22 13:11:00	250,4226532	567,4284058	560,5994873	7,5461483
15-nov-22 13:12:00	253,6340942	567,3746948	560,7658081	7,590623856
15-nov-22 13:13:00	259,3209839	567,7366943	560,8590698	7,53885746
15-nov-22 13:14:00	260,937561	568,0528564	561,461792	7,43893528
15-nov-22 13:15:00	266,735199	568,5879517	561,6270752	7,612302303
15-nov-22 13:16:00	270,7532654	568,8278809	562,2270508	7,446522713
15-nov-22 13:17:00	277,1423035	568,8601074	562,916626	7,570099354
15-nov-22 13:18:00	276,8212891	569,4358521	563,3771362	7,183217525
15-nov-22 13:19:00	276,9207764	569,4391479	563,7203979	7,297334194
15-nov-22 13:20:00	275,6481934	569,7006226	564,2528076	7,295057297

Tabella 2. Rilevazione temperature ingresso attemperatore finale dopo l'upgrade

Nel seguito sono riportati i grafici con tutti i dati di temperatura rilevati a monte dell'attemperatore finale preesistente, sul collettore vapore SH (21LBA50CT901), registrati sulla linea UP2 nelle giornate relative alle tabelle sopra riportate e pertanto prima e dopo l'inserimento dell'attemperatore intermedio.
Dal primo diagramma (Figura 7), relativo a prima dell'installazione dell'attemperatore intermedio, si evince che per carichi medi di produzione la temperatura del vapore al collettore SH era di circa 615°C – 620°C. Nel secondo diagramma (Figura 8), relativo a dopo l'installazione dell'attemperatore intermedio, la stessa temperatura del vapore si attesta a circa 568°C – 570°C, per tutti i carichi di produzione.
Pertanto, è chiaro che il nuovo sistema di attemperamento intermedio garantisce un livello ottimale di regolazione della temperatura vapore, mantenendo detto valore sempre sotto i 580°C e lasciando all'attemperatore finale esclusivamente

l'onere della regolazione di precisione della temperatura del vapore all'ingresso della turbina.

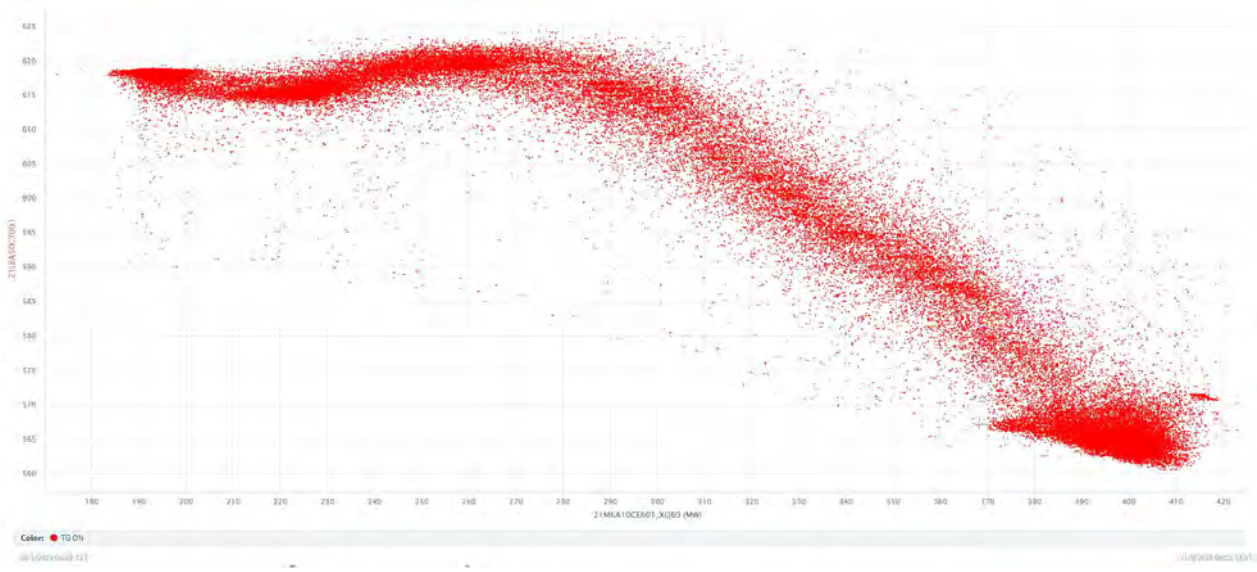


Figura 7. Temperatura ingresso "attemperatore finale" prima dell'upgrade

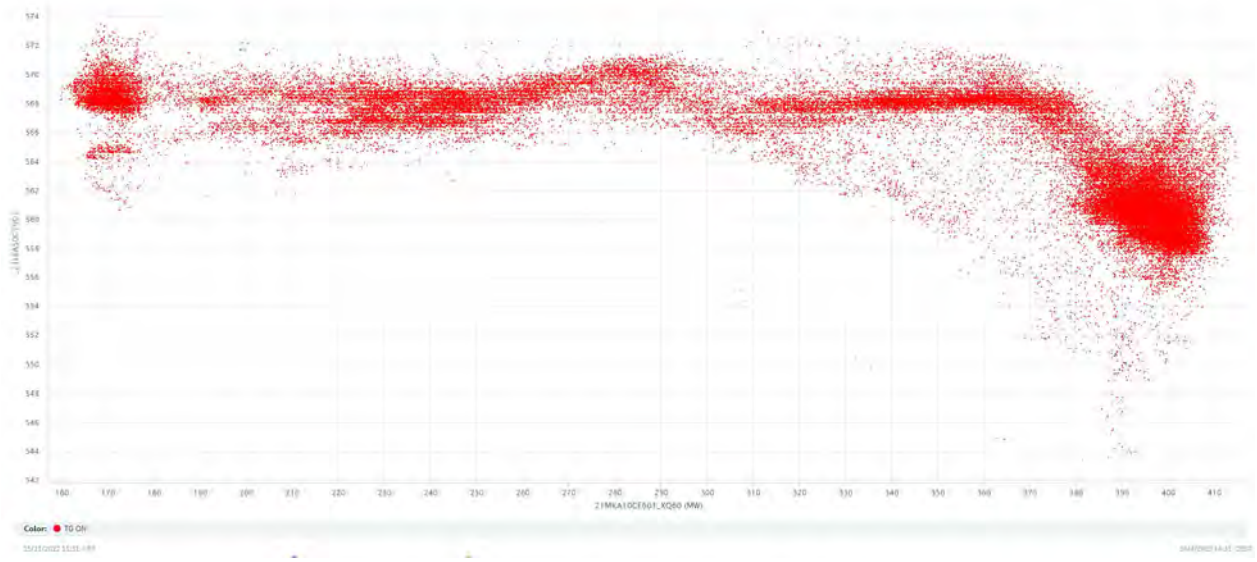


Figura 8. Temperatura ingresso "attemperatore finale" dopo l'upgrade

6. Conclusioni

Presso la Centrale Termoelettrica di Gissi, al fine di controllare la temperatura tra i banchi di alta pressione del GVR, il gestore, nonché proprietario, ha predisposto, a seguito di progetto redatto da ditta specializzata, la realizzazione di un nuovo circuito di attemperamento, posto al di fuori del casing di caldaia, grazie al quale si è ottenuto il controllo della temperatura del vapore tra i banchi HPSH1 e HPSH2, che viene mantenuta sempre al di sotto del valore prefissato pari a 580°C. Grazie a questo intervento, e al conseguente abbassamento delle temperatura del vapore dei banchi di alta pressione del GVR in tutti i regime di funzionamento della turbina, non solo è stato scongiurato l'instaurarsi di pericolosi fenomeni di creep,

ma si è ottenuto un miglioramento generale anche in termini di rendimento dell'impianto, grazie alla nuova possibilità di regolare con precisione la temperatura del vapore in ingresso alla turbina.

Bibliografia

[1] C. Belli. Le Centrali Termoelettriche. Università degli Studi di Pavia, 2022, Cap. 3;

[2] R. L. Klueh, D. R. Harries. High-Chromium Ferritic and Martenstic Steels for Nuclear Application. ASTM Stock Number: MONO3, 2013, Cap. 2, Cap. 3, Cap. 4, Cap. 5;

[3] General Electric. Installation of HP Interstage Desuperheater. April 2018;

[4] General Electric. Offerta tecnica di implementazione. Settembre 2016.

Intervento di riparazione di un debenzinatore per olio alimentare

A. Carro[1], M. Quadalti[2]

[1] Inail - Uot di Forlì
[2] qb STUDIO s.r.l. – Soc. di ingegneria

Abstract

Il debenzinatore è un'apparecchiatura di forma cilindrica, non in pressione, dove il prodotto viene essiccato e mantenuto in movimento mediante agitatori a pale. Il calore viene attinto da vapore saturo a 3 bar circa, mantenuto flussato in alcune camere a sezione cilindrica con fondi piani, interposte alle camere di lavorazione (che costituiscono le parti in pressione soggette agli obblighi di cui al d.m. 329/2004).
L'intervento di riparazione si è reso necessario per contrastare l'assottigliamento dovuto ad usura della lamiera superiore dei piani (quella a contatto del prodotto mantenuto in movimento dalle pale dell'agitatore) al fine di prolungare di almeno 10÷15 anni la vita residua dell'apparecchiatura, allineandola così alla vita attesa dagli altri componenti critici dell'apparecchiatura (albero, involucro non in pressione, ecc).
Valutate alcune alternative (riporto in lamiera, sostituzione dei piani, ricostruzione delle camere), si è optato per intervenire principalmente nell'irrobustire le pareti piane delle camere percorse da vapore, infittendo i perni di collegamento ("bottoni") fra le pareti dimensionate secondo ISPESL Raccolta VSG (in particolare Regola VSG.1.L.4), nel rispetto del progetto originario e in ottemperanza ai criteri espressi nella Lettera Circolare ISPESL 14/2005 (nessun peggioramento apprezzabile del "coefficiente di sicurezza globale ed originario della membratura modificata (e del resto della attrezzatura)").
La peculiarità del meccanismo di deterioramento e l'atipicità della soluzione adottata per il rinforzo hanno reso questo intervento di riparazione particolarmente interessante da essere approfondito andando oltre il semplice approccio autorizzativo.

Keywords: Corrosione delle attrezzature, Riparazioni.

Introduzione

Il debenzinatore in esame (detto anche toaster) è in esercizio dal 1992 presso lo stabilimento di Tampieri SpA a Faenza ed è stato utilizzato in maniera pressoché continua ed ininterrotta, salvo ovviamente le fermate tecniche di manutenzione, nella produzione di olio di semi alimentare (principalmente da girasole, vinacciolo e mais).
Le condizioni di impiego hanno portato alla luce situazioni di usura dei materiali;

situazioni che sono state sempre monitorate e contrastate mediante accorgimenti di tipo impiantistico.
In questo caso viene invece trattato un rimedio meccanico/strutturale adottato recentemente non tanto per "risolvere" un problema di degrado, ma per limitare gli effetti dei danni e aumentare la vita residua dell'apparecchiatura, agendo sul componente che si stava rivelando in questo momento il più debole.

1. Descrizione del sistema e del problema riscontrato

Il debenzinatore è costituito da un involucro cilindrico in acciaio inox austenitici, non in pressione, dove il prodotto viene essiccato e mantenuto in movimento mediante agitatori/raschiatori a pale collegati ad un unico albero azionato dal basso con un motore elettrico. Il calore viene attinto da vapore saturo a 3 bar circa (dalla rete di stabilimento), mantenuto flussato in camere a sezione cilindrica con fondi piani, in acciaio al carbonio, interposte alle zone di lavorazione.

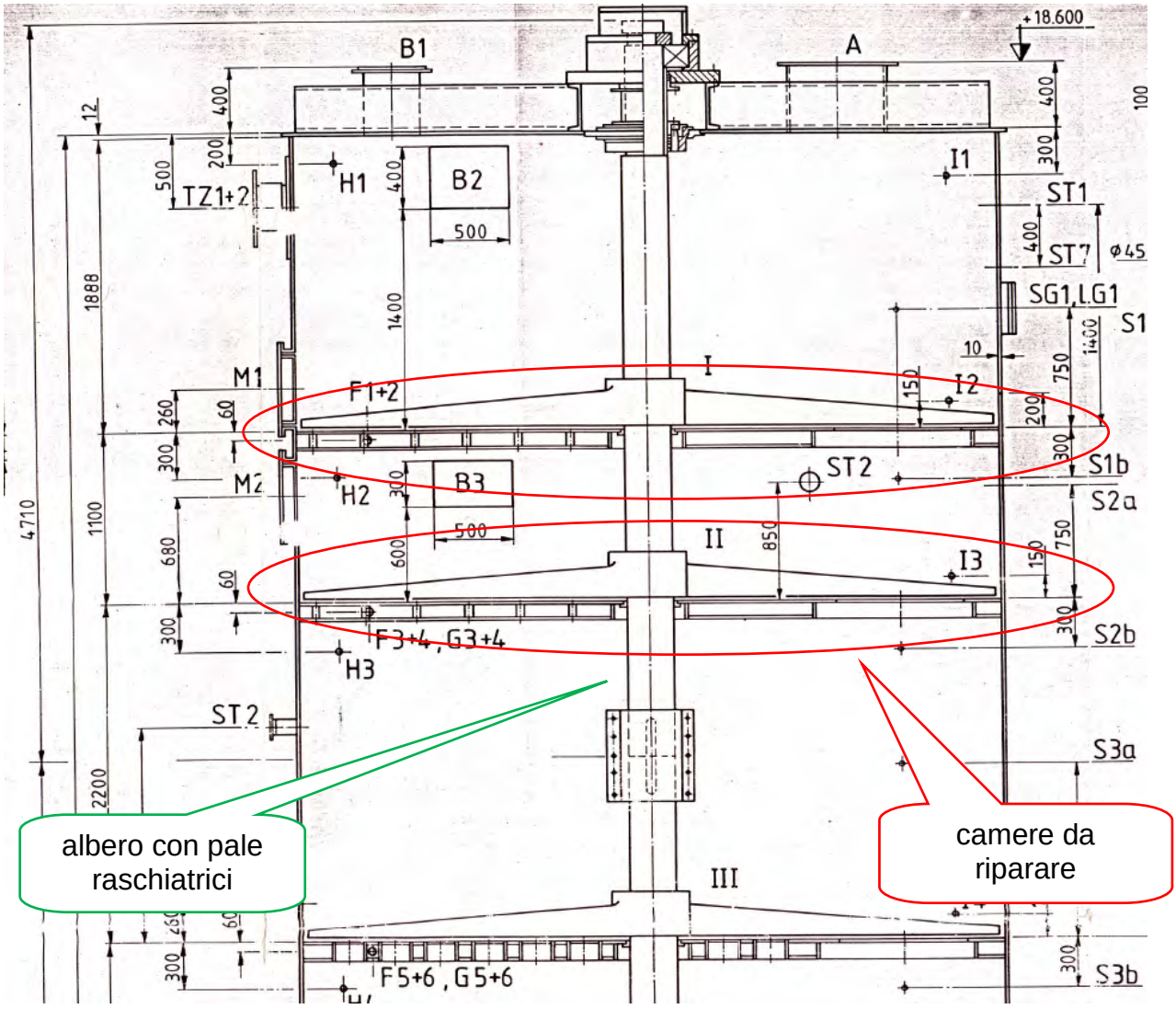


Figura 1. Debenzinatore (parte superiore).

Nel corso dell'ultima verifica di integrità, effettuata nel 2016, sono state effettuate delle verifiche spessimetriche in tutti i piani con la camicia.
Tali spessimetrie hanno evidenziato una diminuzione diffusa degli spessori in corrispondenza dell'erosione esercitata dal prodotto trascinato dalle pale (mentre il contributo corrosivo/erosivo del vapore si è mostrato essere trascurabile).
La diminuzione riscontrata negli spessori, che sono passati dai 15 mm originari anche a 12,5 mm, potrebbe portare a sottospessori pericolosi negli anni a venire, per cui si è deciso di intervenire in maniera preventiva.

2. Interventi proposti

L'elevata usura sembra dovuta all'erosione del prodotto schiacciato e trascinato sotto le pale (pale che non sono a contatto con il fondo).

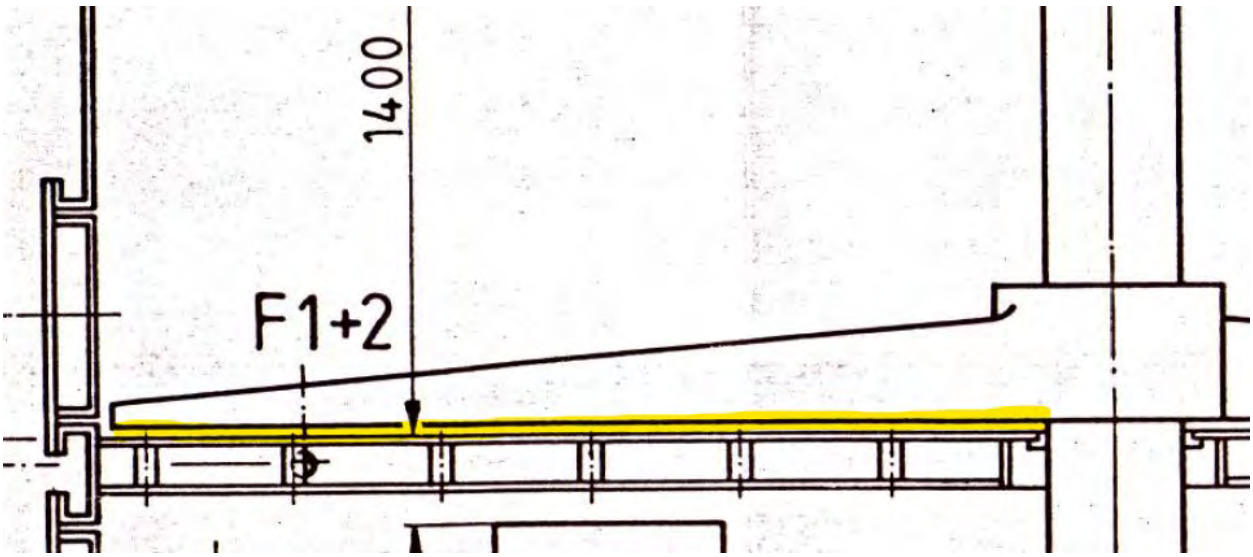


Figura 2. Zona di erosione.

Nell'impossibilità di raschiare utilizzando nelle zone di contatto materiali che si consumano, quali pattini o simili (dato che il prodotto lavorato è alimentare), si è presa in considerazione anche la possibilità di riportare nelle pale dei piccoli profili metallici elicoidali che favoriscano la movimentazione del prodotto verso l'alto (aumentando l'effetto di rimescolamento e riducendo lo schiacciamento del prodotto sotto le pale stesse).

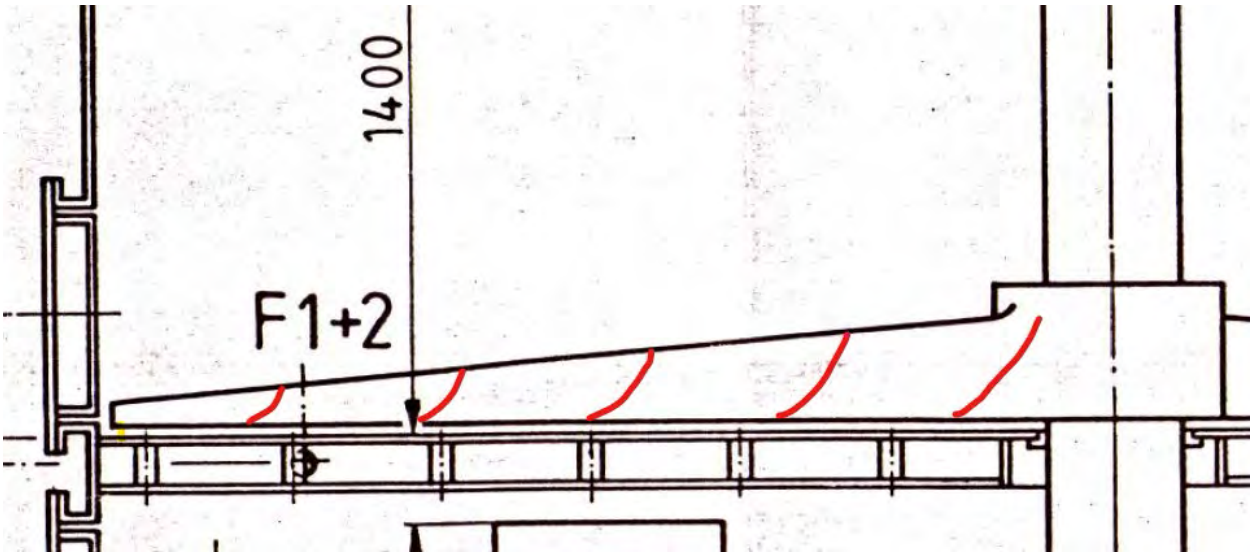


Figura 3. Proposta di intervento sulle pale.



Figura 4. Camere e pale.

Intervento di riparazione

Nelle immagini seguenti viene evidenziato il criterio secondo il quale sono stati determinati gli interventi.
Nella situazione originaria, il calcolo dello spessore minimo delle piastre di chiusura dei piatti era determinato, in base alla Regola VSG.1.L.4 (ISPESL Raccolta VSG), dalla circonferenza inscritta di diametro maggiore, che risultava la seguente [A]:

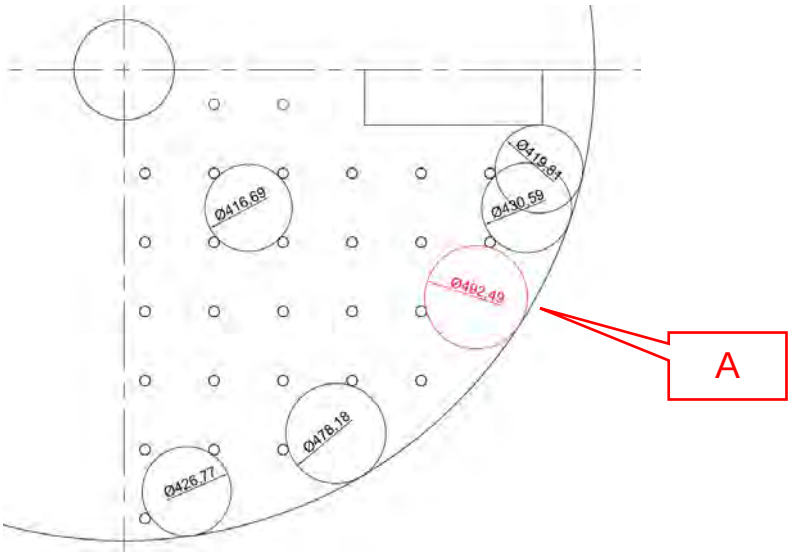


Figura 5. Geometria di calcolo originaria.

Applicando la formula 1.1 di VSG.1.L.4, si ottiene lo spessore minimo (in mm):

$$s_0 = 0{,}45 \cdot D \cdot \sqrt{\frac{p}{f}} = 0{,}45 \cdot 492{,}5 \cdot \sqrt{\frac{0{,}4}{136}} = 12{,}02$$

Per aumentare tale spessore minimo (visto l'assottigliarsi delle lamiere dovuto all'erosione), si infittiscono i perni di rinforzo, in modo che la circonferenza inscritta di diametro maggiore [A'] possa essere inferiore (passando da 492,5 a 417):

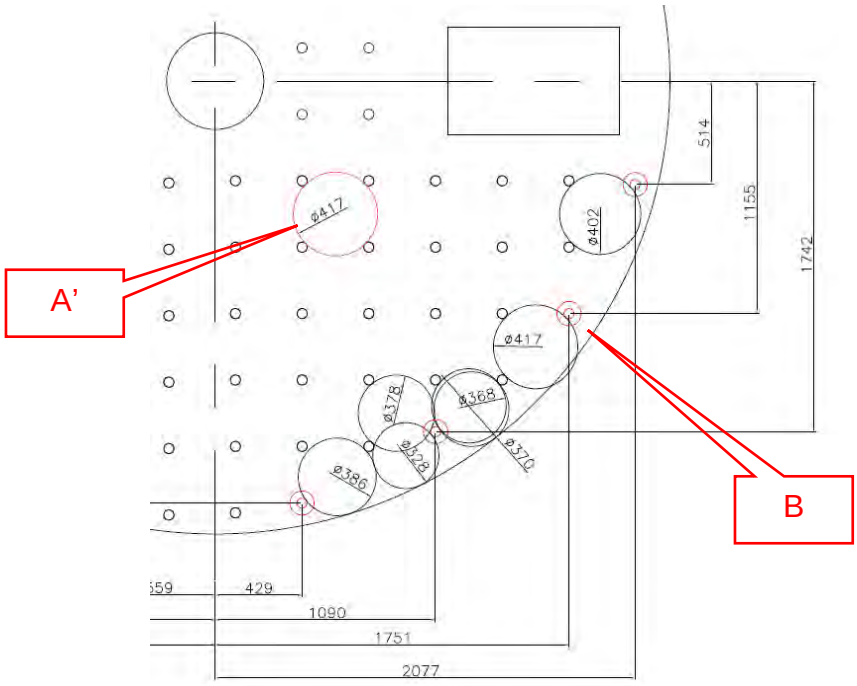


Figura 6. Geometria di calcolo modificata.

I vantaggi per la stabilità delle membrature sono evidenti riapplicando la formula 1.1 di VSG.1.L.4, il cui risultato passa ad un valore decisamente inferiore (sempre in mm):

$$s_0 = 0{,}45 \cdot D \cdot \sqrt{\frac{p}{f}} = 0{,}45 \cdot 417 \cdot \sqrt{\frac{0{,}4}{136}} = 10{,}17$$

Pertanto, nelle posizioni [B] indicate in rosso nell'immagine precedente (tratta dal disegno di riparazione) vengono aggiunti dei perni di rinforzo (14 per ogni piano), configurati nel modo seguente:

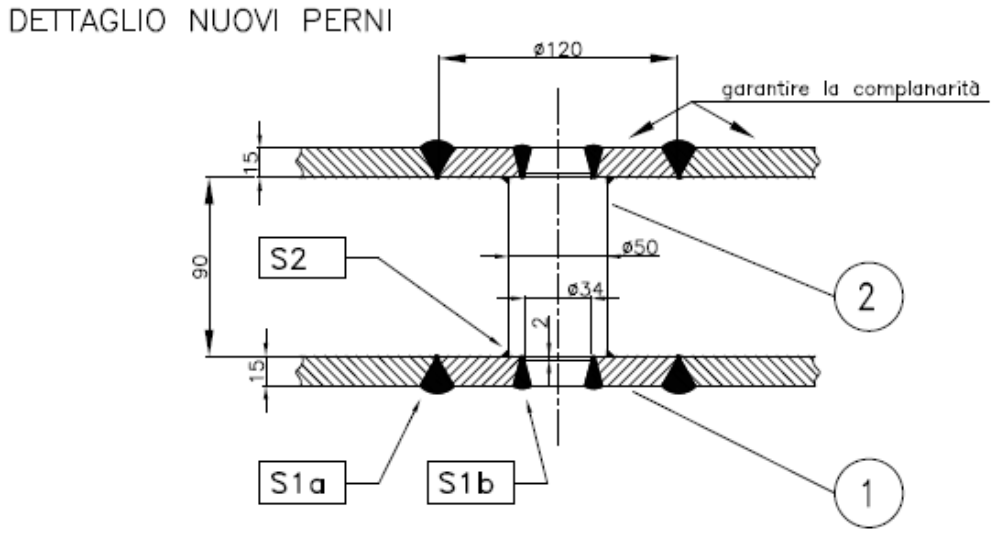


Figura 7. Dettaglio dei perni aggiunti.

L'irrobustimento avviene nel rispetto del progetto originario, infittendo i perni di collegamento ("bottoni") fra le due pareti piane delle due camere; perni già presenti nel progetto del fabbricante.
Il volume di fluido che potrà essere contenuto in ogni piatto verrà diminuito di una quota assolutamente trascurabile (indicativamente al di sotto dello 0,1%), non modificando quindi i dati di targa dell'apparecchiatura.
Per la costruzione dei dischi di lamiera, viene utilizzato acciaio P265GH EN 10028-2, avente le stesse caratteristiche relative alla saldatura e avente valori di resistenza non inferiori all'acciaio utilizzato dal costruttore originario per le pareti piane (Fe 410-1 KW UNI 5869), mentre i perni sono in ASTM A105, al pari del progetto originario.
In questo modo, l'intervento rientra nei criteri espressi nella Lettera Circolare ISPESL 14/2005 (nessun peggioramento apprezzabile del "coefficiente di sicurezza globale ed originario della membratura modificata e del resto della attrezzatura"); pertanto non comporta alcuna variazione significativa del progetto originario e/o delle

caratteristiche originali, della destinazione e/o del tipo, configurandosi così come riparazione di attrezzatura a pressione, ai sensi dell'art.14 del d.m. 329/2004, e può essere assoggettato alla procedura prevista dal comma 2 dello stesso art.14.

L'intervento avviene nel modo seguente:

1. Prefabbricazione in officina dei dischi di lamiera ϕ120 saldati con il perno ϕ50
2. Esecuzione di controlli PT sulle saldature tra perni e dischi
3. Foratura (dal piano superiore) di entrambe le lamiere con punta ϕ20 per il centraggio delle successive lavorazioni
4. Taglio mediante plasma (con apposita dima dal piano superiore) per asportare il disco di lamiera ϕ120 superiore
5. Taglio mediante plasma (con apposita dima dal piano inferiore) per asportare il disco di lamiera ϕ120 inferiore
6. Preparazione dei cianfrini di saldatura nelle lamiere forate mediante molatura
7. Esecuzione di controlli PT sui cianfrini eseguiti per molatura
8. Posizionamento e puntatura dei gruppi dischi-perno
9. Saldatura testa a testa dei dischi spessore 15 con la lamiera residua (disco superiore agendo dalla parte superiore e disco inferiore agendo dalla parte inferiore); nella parte superiore del disco superiore occorre garantire la complanarità in fase di posizionamento, in quanto le lamiere potrebbero avere spessori diversi (15 mm il disco, un valore inferiore, dovuto all'usura, per la lamiera esistente)
10. Esecuzione dei controlli non distruttivi (VT, PT o MT e UT sul 100% dei giunti BW)

Prova idraulica:

11. Sezionamento del circuito vapore mediante flangiatura
12. Esecuzione prova idraulica finale della sezione

Durante gli interventi viene prestata massima attenzione agli aspetti di sicurezza degli operatori. Infatti, tutte le attività da eseguire sui piani incamiciati (fasi di lavoro da 3 a 10 nell'elenco riportato sopra) dovranno essere effettuate all'interno del debenzinatore. Anche se le aperture di accesso sono di dimensioni generose, si tratta pur sempre di spazi confinati: camere di diametro 4,5 m e altezza che va da 1 m (sopra al piano II) a 1,9 m (sopra al piano I) a 2,2 m (sotto il piano II).

3. Conclusioni

L'esperienza qui raccontata ha mostrato come la collaborazione fattiva tra utenti e UOT INAIL, andando oltre al mero approccio autorizzativo, possa portare a soluzioni semplici e creative che consentono, nel pieno mantenimento delle condizioni di sicurezza, di aiutare gli utilizzatori stessi a gestire i propri impianti in condizioni economicamente accettabili.

Bibliografia

[1] ISPESL Raccolta VSG Revisione 1995, Edizione 1999 – Specificazioni tecniche applicative del d.m. 21 novembre 1972 per la verifica della stabilità dei generatori di vapore d'acqua.

[2] ASME PCC-2-2022 - Repair of Pressure Equipment and Piping.

Progettazione preliminare e analisi dei rischi associati alla diffusione delle tecnologie a celle a combustibile nel settore dei trasporti, finalizzati allo sviluppo di una Hydrogen Valley

F. Ciancetta[1], S. Mari[1], G. D'Ovidio[2], R. Iovene[3], R. Vasile[3]

[1]Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia, Università degli Studi dell'Aquila
[2] Centro Interdipartimentale Trasporti e Mobilità Sostenibile, Università degli Studi dell'Aquila
[3] Inail - Uot di Pescara

Abstract

Il settore dei trasporti rappresenta un terzo di tutto il consumo finale di energia nell'UE ed è responsabile di oltre un quarto delle emissioni totali di gas effetto serra, il che lo rende uno dei principali responsabili del cambiamento climatico. Ridurre gli effetti negativi dei trasporti è un obiettivo strategico dell'UE, che ha messo in atto una serie di azioni per promuovere modalità di trasporto più pulite ed efficienti. Lo sviluppo di soluzioni di trasporto collettivo a zero emissioni implica l'uso di nuovi sistemi di propulsione in grado di utilizzare vettori energetici prodotti da fonti energetiche rinnovabili.
Il lavoro si occupa della progettazione preliminare, dell'analisi delle prestazioni e dell'analisi dei rischi connessi all'utilizzo dell'idrogeno, di un autobus passeggeri ibrido a idrogeno da utilizzare in un'area montuosa per lo sviluppo di una Hydrogen Valley.
In particolare, è stata simulata una configurazione di minibus che effettua un percorso di andata e ritorno in base alle reali condizioni del traffico, sono stati dimensionati i principali componenti del sistema di trazione, sono stati analizzati i rischi legati al sistema di accumulo a bordo del veicolo e le relative misure da adottare al fine del contenimento degli stessi. Lo studio, parte di un progetto più ampio cofinanziato dall'Unione Europea, intende porre le basi per lo sviluppo di una Hydrogen Valley, sito integrato di produzione, stoccaggio e utilizzo dell'idrogeno, per il trasporto pubblico ad idrogeno nell'area montana dell'Altopiano delle Rocche nella regione Abruzzo.

Keywords: Trasporto pubblico, Hydrogen Valley, Fonti rinnovabili

1. Introduzione

Le politiche dell'UE sulla transizione energetica e lo sviluppo sostenibile, volte a mitigare il riscaldamento globale, prevedono una drastica riduzione del 90% delle

emissioni dirette di gas serra (GHG) nel settore dei trasporti entro il 2050, rispetto ai livelli del 1990, come indicato nel Green Deal europeo [1]. Per raggiungere tali obiettivi, è fondamentale limitare l'impatto ambientale per unità di servizio di trasporto soddisfatta, il che può essere ottenuto attraverso il passaggio a modalità di trasporto più sostenibili e l'impiego di soluzioni tecnologiche che aumentino l'efficienza dei veicoli, riducendo le emissioni di GHG per unità di energia [2]. Le tecnologie a celle a combustibile ad idrogeno (HFC) sono state identificate come una soluzione interessante in quanto consentono non solo di ridurre il consumo energetico, ma anche di ridurre l'utilizzo di combustibili fossili a favore di fonti rinnovabili nazionali [3],[4]. Tuttavia, l'adozione diffusa delle tecnologie a celle a combustibile presenta ancora diverse sfide economiche e ambientali. Tra queste vi sono l'assenza di una rete di distribuzione e rifornimento di idrogeno, i costi elevati di acquisto, il livello di maturità tecnologica ancora limitato e l'elevato costo del vettore idrogeno, dovuto alla sua domanda limitata [5]. Questi ostacoli rappresentano dei rischi significativi per la diffusione su larga scala delle tecnologie a celle a combustibile nel settore dei trasporti. Ad esempio, il costo e la complessità dell'installazione di una rete di distribuzione di idrogeno rappresentano una sfida economica significativa. Inoltre, l'alto costo di acquisto dei veicoli a celle a combustibile può limitarne l'adozione da parte degli operatori di trasporto. Il livello di maturità tecnologica delle celle a combustibile e la loro affidabilità operativa potrebbero rappresentare un ulteriore rischio per l'efficienza e la sicurezza dei veicoli. Infine, l'accessibilità a fonti di energia rinnovabile per la produzione di idrogeno può rappresentare una limitazione per la sostenibilità complessiva del sistema. In questo contesto, il presente lavoro si propone di affrontare i rischi associati alla diffusione delle tecnologie a celle a combustibile nel settore dei trasporti, attraverso l'implementazione di un modello di simulazione adeguatamente sviluppato e testato in condizioni di guida reale. Questo permetterà di valutare la fattibilità delle soluzioni tecnologiche proposte, considerando le specifiche condizioni operative e i profili di missione richiesti per i veicoli. L'analisi dei rischi consentirà di identificare le principali criticità e di adottare misure adeguate per mitigare gli effetti negativi potenziali.

2. Approccio metodologico

L'approccio metodologico comprende i seguenti passaggi: i) costruzione del modello del veicolo; ii) identificazione del percorso e della tipologia dell'autobus di trasporto pubblico; iii) acquisizione delle caratteristiche topografiche del percorso e del profilo cinematico in condizioni di traffico reale; iv) simulazione dell'operazione dell'autobus sul percorso scelto; v) definizione delle caratteristiche del gruppo motopropulsore e vi) analisi del consumo.

2.1 Architettura del veicolo

L'architettura del veicolo è stata sviluppata con l'obiettivo di progettare un gruppo motopropulsore in grado di operare in un ambiente montano caratterizzato da pendenze ripide e lunga autonomia giornaliera. Per queste ragioni è stato preso in considerazione un veicolo ibrido a celle a combustibile a idrogeno - batteria. Gli obiettivi principali mirano a: i) aumentare l'efficienza del veicolo mediante un nuovo sistema di propulsione ibrido; ii) evitare la dissipazione di energia; iii) limitare l'installazione di batterie chimiche per la trazione; iv) utilizzare un carburante verde che può essere generato da energie rinnovabili. Uno schema dell'architettura del veicolo è mostrato nella Figura 1. L'impianto motore proposto utilizza un motore di trazione elettrico (EM) alimentato da un gruppo motore ibrido composto da una pila a combustibile a idrogeno (FC) e un sistema di batterie. Il motore di trazione, la pila a combustibile e il sistema di batterie sono collegati al bus di alimentazione CC (linea rossa continua) mediante convertitori: Convertitore del sistema di trasmissione elettrica (CED) e Sistema di gestione della batteria (BMS). Per gestire i flussi di potenza richiesti, un sistema di controllo principale (CS) comunica con il sistema di controllo della pila a combustibile (CFC) e il controllo di guida (DC) tramite un bus di comunicazione (linea verde).



Figura 1. Schema del bus a zero emissioni

2.2 Modello dinamico del veicolo

Il modello dinamico dell'autobus a celle a combustibile è stato sviluppato per valutare le prestazioni del veicolo e dei suoi componenti durante il movimento sul percorso esaminato. Di seguito, il modello matematico è descritto solo brevemente e ulteriori dettagli possono essere reperiti nei documenti [7] e [8] citati in bibliografia. Sulla base del profilo cinematico della missione e dei parametri del veicolo, è stato calcolato il requisito di potenza di trazione a partire dall'equazione differenziale del moto, suddividendo le forze esterne in trazione, $T(v(t))$, e somma delle resistenze al movimento del veicolo, $\Sigma R(v(t))$. Quest'ultima può essere espressa come somma delle resistenze al rotolamento, R_w, della pendenza, R_s, e dell'aria, R_A. Da cui la trazione è:

$$T(v(t)) = m\alpha \frac{dv}{dt} - [R_w(v(t)) + R_s(\beta) + R_A(v(t))] \quad (1)$$

dove m è la massa lorda del veicolo, α è il coefficiente di massa inerziale rotazionale, v è la velocità del veicolo e β è l'angolo della pendenza della strada.

La potenza di trazione elettrica, P_{el}, è stata calcolata considerando anche il recupero di energia in frenata elettrica, come segue:

$$P_{el} = T(v(t))v(t)/(\eta_t \eta_D) \; for \; T(v(t))v(t) > 0 \quad (2)$$

$$P_{el} = T\big(v(t)\big)v(t)(\eta_t \eta_D) for \; T\big(v(t)\big)v(t) < 0 \quad (3)$$

con η_t e η_D l'efficienza della trasmissione e del sistema di trazione elettrica (convertitore più motore elettrico). Per simulare correttamente la fase di frenata è stata assunta una distribuzione del peso sugli assi del veicolo. Infine, il modello considera che non viene recuperata energia se lo stato di carica (SOC) della batteria è pieno.

Lo schema dell'implementazione del modello nel software di simulazione mostrato nella Figura 2 (a) è stato realizzato con MATLAB. Il modello calcola i flussi di potenza e il consumo di energia (sistemi di trazione e ausiliari) a partire dalla definizione degli input relativi ai seguenti tre blocchi:

- "Vehicle features" che riguarda le caratteristiche del veicolo;
- "Road characteristics" che riguarda la topografia del percorso e le caratteristiche della superficie stradale;
- "Drive cycle" che descrive il profilo di guida specificando la velocità in funzione del tempo.

Il blocco "Traction power" calcola la potenza meccanica necessaria per percorrere il percorso di input con il veicolo selezionato al profilo di velocità specificato.

Il blocco "Electric Drivetrain" calcola la potenza elettrica necessaria per la trazione, tenendo conto delle perdite energetiche del cambio, del motore elettrico e del convertitore di potenza. Il calcolo delle perdite di trasmissione è basato su tabelle di ricerca validate mediante dati sperimentali e letteratura. Il modello consente di calcolare l'energia totale richiesta e il consumo di idrogeno nel percorso dato con il ciclo di guida previsto.

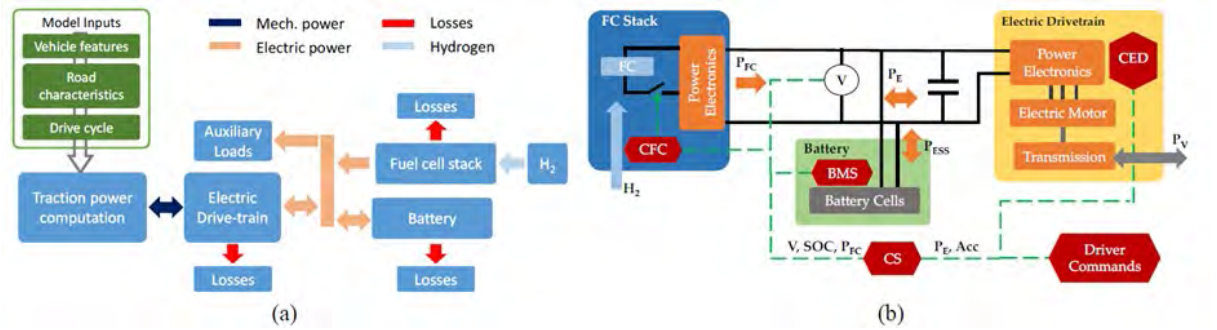


Figura 2. (a) Schema del simulatore del veicolo (a sinistra); (b) schema a blocchi del sistema di alimentazione elettrica (a destra)

2.3 Sistema di alimentazione elettrica e strategia di controllo

Il diagramma a blocchi del sistema di alimentazione elettrica previsto è mostrato nella Figura 2 (b), dove sono dettagliate le linee di alimentazione e di controllo. Si basa su uno stack di celle a combustibile controllato dal suo controller (CFC) e dotato di un convertitore DC/DC per garantire il corretto trasferimento di energia dalla pila

a combustibile al bus DC. Il sistema di accumulo di energia (ESS), configurato come una batteria al litio-ion, è direttamente collegato al bus DC e gestito dal sistema di gestione della batteria (BMS). Il motore elettrico di trazione, la trasmissione a singola marcia del veicolo e l'elettronica di potenza correlata sono indicati come sistema di trasmissione elettrica e sono gestiti dal controller del sistema di trasmissione elettrica (CED). Il sistema di trasmissione elettrica è direttamente collegato al bus DC tramite un condensatore di massa. In termini di potenza, la configurazione proposta richiede che la batteria sia dimensionata per fornire la potenza di picco del sistema di trasmissione elettrica, mentre la pila a combustibile è concepita come un estensore di autonomia e viene gestita per lavorare a un livello di potenza fisso in cui si raggiunge l'efficienza massima. A tal fine, il BMS monitora la tensione del bus DC e scambia il suo livello con gli altri controller tramite il bus di comunicazione insieme allo stato di carica della batteria (State of Charge - SOC). Quando il SOC scende al di sotto di una soglia adeguata, il sistema di controllo principale (CS) richiede che la pila a combustibile venga attivata e inietti potenza nel bus DC per evitare che la batteria si scarichi completamente. A seconda della pendenza della strada e della dinamica del veicolo, l'energia fornita dalla pila a combustibile viene utilizzata direttamente dal sistema di trasmissione elettrica o per ricaricare la batteria.

3. Caso studio

Come caso studio è stata selezionata un'area italiana di elevato valore ambientale situata nel Parco Nazionale d'Abruzzo, Lazio e Molise. Durante l'analisi dei rischi, è fondamentale identificare e mitigare le potenziali problematiche legate alla progettazione e all'utilizzo di un veicolo ibrido a zero emissioni in quest'area.

3.1 Descrizione del veicolo

Il veicolo ibrido a zero emissioni selezionato per il caso di studio è differenziato da una massa aumentata di circa 1000 kg rispetto a un equivalente veicolo diesel. Le caratteristiche del veicolo sono riportate in Tabella 1.

Parametri	*Simboli*	*Unità di misura*	*Valori*
Lunghezza		m	7.76
Larghezza		m	2.4
Altezza		m	3.05
Passeggeri (posti)			25
Massa del veicolo a pieno carico	m	kg	8700
Sezione frontale		m^2	7.32
Coefficiente aereodinamico	Cx		0.380
Tipo di pneumatici			225/75 R-16

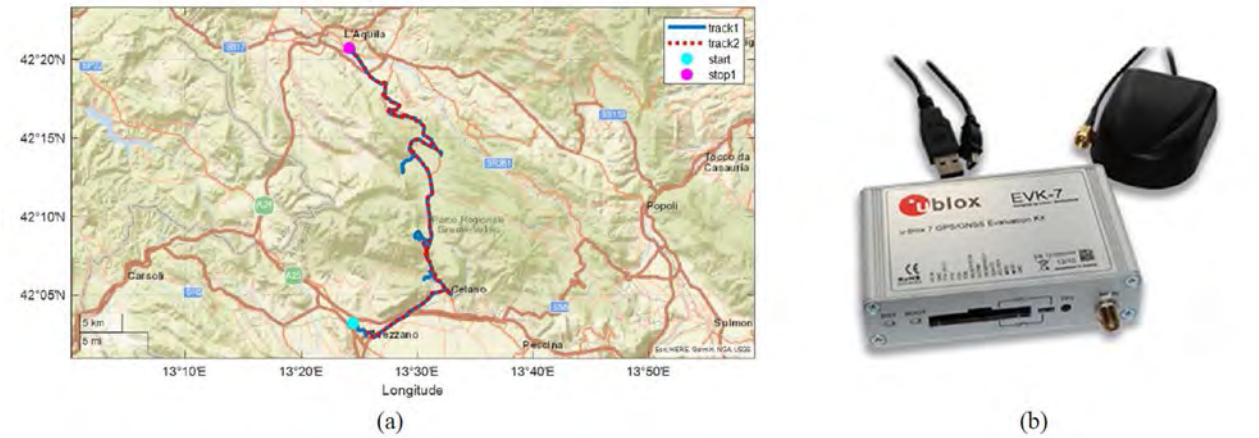
Tabella 1. Principali dati del veicolo utilizzati nelle simulazioni

Per ridurre i rischi associati a una maggiore massa, possono essere adottate diverse tecniche di contenimento dei rischi, tra cui:

- Progettazione del sistema di sospensione e dei freni: Una progettazione attenta e robusta di questi sistemi può contribuire a garantire una buona stabilità del veicolo, consentendo una guida sicura anche su terreni accidentati o con pendenze ripide;
- Utilizzo di tecnologie avanzate per il controllo della trazione e l'assistenza alla frenata: L'implementazione di sistemi come il controllo elettronico della trazione e l'assistenza alla frenata può migliorare ulteriormente la sicurezza di guida, consentendo una migliore gestione della potenza e un controllo più preciso del veicolo in situazioni critiche;
- Gestione sicura delle celle a combustibile e delle batterie: Le celle a combustibile e le batterie sono componenti fondamentali di un veicolo ibrido. Per garantire la sicurezza, è necessario implementare misure come sistemi di monitoraggio avanzati per rilevare tempestivamente anomalie o malfunzionamenti. Inoltre, è importante seguire procedure di manutenzione regolari e formare adeguatamente il personale sulla gestione sicura di queste tecnologie.

3.2 Descrizione del percorso

È stato selezionato un percorso di andata e ritorno (161 km) nell'area extraurbana dell'Aquila Figura 3 (a). Il percorso fa parte dell'attuale linea di autobus regionale che collega le città di Avezzano e L'Aquila.



(a) (b)

Figura 3. (a) Vista del percorso selezionato per il caso di studio (a sinistra); (b) il kit di valutazione del sistema globale di navigazione satellitare (GNSS) ad alta precisione adottato per il tracciamento del veicolo (a destra)

Per acquisire le caratteristiche topografiche del percorso e il ciclo di guida della missione del veicolo, è stato installato un sistema di misura basato su un sistema di acquisizione con dispositivo GPS su un autobus diesel con caratteristiche prestazionali simili a quelle del progetto. La stazione di misura adotta un u-blox 7 Evaluation Kit con sistema Precise Point Positioning che supporta il modulo NEO-7P.

Il modulo, riportato nella figura 3 (b), è un sistema globale di navigazione satellitare (GNSS) ad alta precisione.
I risultati dell'acquisizione mostrano che: i) l'altitudine massima è compresa tra 600 m e 1500 m s.l.m.; ii) la pendenza massima e media sono rispettivamente del 15% e del 4,5%; iii) la velocità massima e media sono rispettivamente di 20,98 m/s e 9,63 m/s.

4. Risultati sperimentali

La simulazione del veicolo descritto in precedenza è stata eseguita in base ai dati acquisiti relativi al ciclo di guida e al percorso, al fine di dimensionare i componenti della catena cinematica.

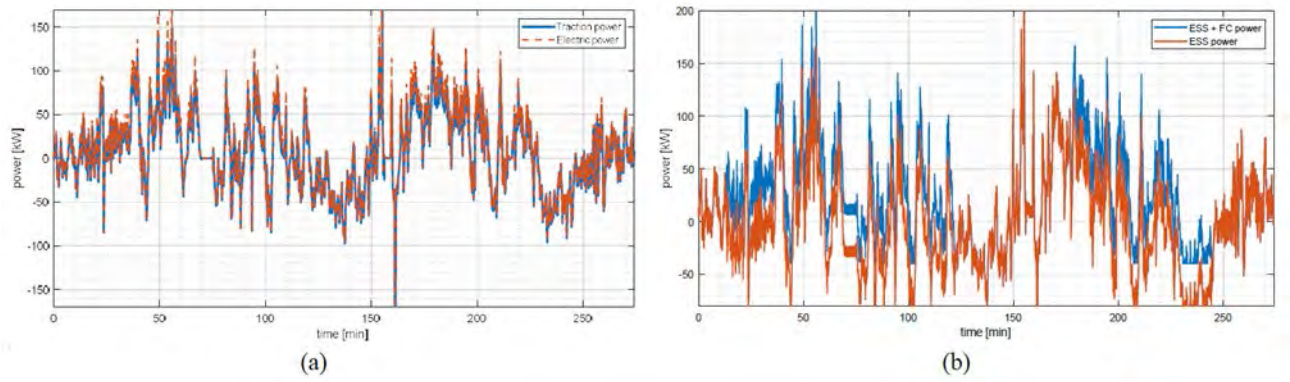


Figura 5. Descrizione del profilo della missione: (a) profili di trazione e potenza elettrica; (b) profili di potenza di ESS e cella a combustibile

Nella Figura 5 (a) sono riportati i profili di trazione e potenza elettrica. La Figura 5 (b) illustra rispettivamente la potenza dell'ESS e l'unità di potenza (potenza dell'ESS e della cella a combustibile). I risultati mostrano che la potenza di picco elettrica è di 160 kW e la potenza di picco dell'ESS è di 200 kW in scarica e 80 kW in carica. Di conseguenza, è stato scelto un motore di trazione con potenza di picco di 150 kW.
La Figura 6 (a) mostra come la cella a combustibile e l'ESS gestiscano la richiesta di potenza del veicolo. Si può notare che una potenza della cella a combustibile di 40 kW e un'energia della batteria di 50 kWh sono in grado di fornire la potenza elettrica richiesta evitando condizioni di sovraccarico o sotto-carica della batteria.

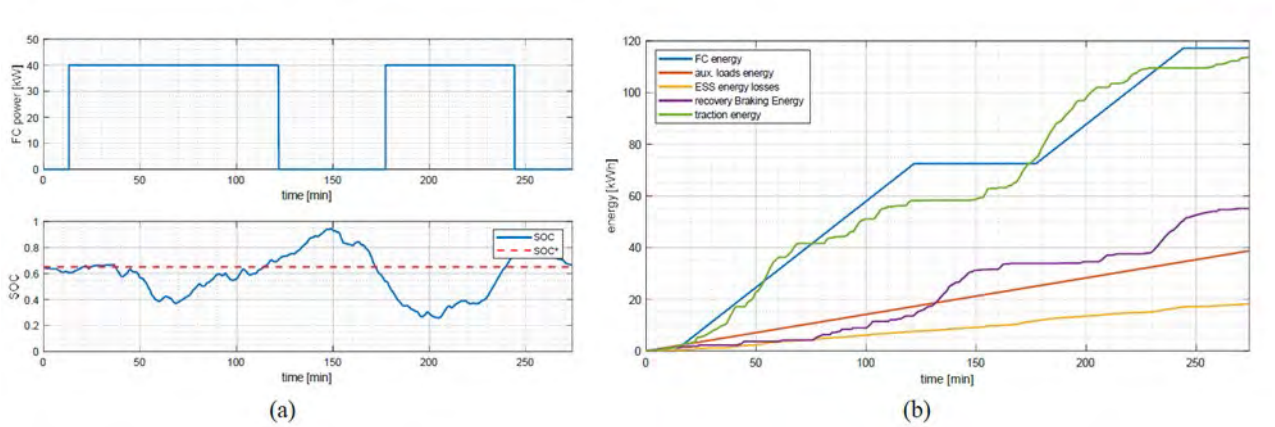


Figura 6. Descrizione del profilo della missione: (a) Potenza richiesta dalla cella a combustibile (in alto) e dall'ESS (in basso). (b) Profilo energetico del componente principale del sistema

I profili energetici dei principali componenti del sistema sono riportati nella Figura 6 (b). Il consumo stimato di H_2 è di 6,4 kg (circa 0,039 kg/km) per il tragitto considerato. Tuttavia, è importante notare che alcuni parametri di incertezza possono influenzare i risultati della simulazione. Tra gli altri, quelli che possono avere la maggiore influenza sono gli errori associati all'accuratezza dei sensori, la possibile perdita del segnale GPS, anche a causa della presenza di lunghi tunnel, e l'effettiva energia elettrica che può essere recuperata sia in discesa che durante il freno rigenerativo nelle fasi di decelerazione. Pertanto, anziché considerare un singolo consumo medio per chilometro, è più appropriato assumere un intervallo di valori che, per lo studio in questione, si situa tra 20/25 km/kg_{H2}, con il primo valore il più realistico.

5. Rischi connessi all'utilizzo dell'idrogeno nei sistemi di trazione

L'adozione dell'idrogeno come fonte di energia per autotrazione rappresenta una delle frontiere più promettenti nella ricerca di combustibili puliti ed efficienti. Tuttavia, come per qualsiasi nuova tecnologia, è importante valutare attentamente i rischi associati all'utilizzo dell'idrogeno come fonte energetica. L'idrogeno è l'elemento chimico più leggero. Allo stato legato è presente nell'acqua e in tutti i composti organici e organismi viventi. Allo stato libero è scarsamente presente sulla Terra e deve quindi essere prodotto da altre fonti; rappresenta quindi un vettore di energia, come l'energia elettrica, e non una fonte. Essendo l'elemento più leggero presenta una grossa criticità dovuta al basso contenuto energetico per unità di volume, cosa che ne rende difficile il trasporto e lo stoccaggio. I principali aspetti da considerare sono la sicurezza durante lo stoccaggio, il trasporto e la distribuzione dell'idrogeno. Pertanto è fondamentale garantire l'adeguata progettazione e l'implementazione di sistemi di stoccaggio e di distribuzione sicuri.

5.1 Infiammabilità

L'idrogeno è altamente infiammabile, con un intervallo di infiammabilità molto ampio (limiti di infiammabilità nell'aria dal 4% al 75% in volume). Questo significa che può prendere fuoco a una concentrazione di solo il 4% nell'aria e bruciare con una fiamma molto calda e quasi invisibile, che emette pochissimo calore radiante e, quindi, dà un avvertimento limitato della sua presenza. L'accensione di miscele infiammabili idrogeno-aria avviene con un apporto energetico molto basso, circa un decimo di quello di una miscela benzina-aria, tanto che una scintilla invisibile e/o una carica elettrostatica possono causare un'accensione. Pertanto un'accidentale fuoriuscita di idrogeno durante il rifornimento, la produzione o l'utilizzo dei veicoli può comportare gravi rischi e pertanto sono richieste misure di sicurezza specifiche per prevenire incidenti o esplosioni quali:

- Le stazioni di rifornimento di idrogeno devono essere progettate per prevenire fughe e disperdere rapidamente l'idrogeno in caso di incidente;
- Deve essere prevista l'installazione di sensori di rilevamento dell'idrogeno per monitorare costantemente le concentrazioni nell'aria e attivare gli allarmi in caso di superamento delle soglie di sicurezza;
- Deve essere predisposta una formazione adeguata per gli operatori e gli utenti finali sull'uso sicuro dell'idrogeno, inclusi protocolli di emergenza.

5.2 Stoccaggio

L'idrogeno presenta una scarsa densità energetica volumetrica, 1 kg di H_2 occupa in condizioni normali (1,013 bar e 0°C) un volume di 11212 litri, richiedendo quindi serbatoi di grandi dimensioni per il suo deposito. Aumentare la pressione del gas migliora la densità di energia per unità di volume, ottenendo contenitori meno ingombranti. Le perdite di idrogeno da tubi, recipienti e apparecchiature possono provocare una fiamma a getto se l'idrogeno si accende (ad esempio per attrito o elettricità statica). La lunghezza della fiamma del getto dipende dalla pressione dell'idrogeno e dalle dimensioni della perdita. L'idrogeno richiede quindi condizioni specifiche per essere stoccato in modo sicuro, poiché può esistere come gas compresso o liquido criogenico. La pressurizzazione e il raffreddamento richiedono attrezzature specializzate, che possono essere soggette a guasti o malfunzionamenti, pertanto è necessario:

- L'utilizzo di serbatoi di stoccaggio conformi a standard di sicurezza rigorosi. La soluzione oggi più utilizzata per lo stoccaggio dell'idrogeno a bordo dei veicoli o anche per le stazioni di servizio è costituita da bombole di gas compresso alla pressione di 350 oppure 700 bar, costituite in genere da 3 strati, uno interno polimerico, uno intermedio in fibra di carbonio capace di sopportare elevate trazioni e uno più esterno in acciaio in grado di proteggere il sistema da danni meccanici e corrosivi;
- L'ispezione e la manutenzione regolari con controllo periodico dei serbatoi per rilevare eventuali danni o segni di degrado;

- L'adozione di tecnologie di raffreddamento all'avanguardia per garantire il mantenimento di temperature sicure;
- Il monitoraggio in modo permanente o periodico dei serbatoi a pressione utilizzando rilevatori di atmosfera esplosiva al fine di identificare le perdite prima possibile e intraprendere le azioni correttive necessarie;
- La progettazione delle linee di sfiato dell'idrogeno deve ridurre al minimo il rischio associato alla potenziale accensione (detonazione vs deflagrazione) considerando il rapporto lunghezza/ diametro. Il design meccanico deve essere in grado di resistere all'accensione all'interno della linea di sfiato a meno che l'accensione all'interno dello sfiato non sia impedita, ad esempio, mediante uno spurgo di azoto o un dispositivo antifiamma.
- I flussi dagli sfiati e dalle apparecchiature di sicurezza devono essere convogliati in un luogo sicuro dove non generano un pericolo per le persone o le strutture vicine, lontano da aree del personale, linee elettriche e altre fonti di accensione, prese d'aria, aperture di edifici e sporgenze. Le leghe di rame o l'acciaio inossidabile sono materiali preferiti per ridurre al minimo la possibilità di accensione dovuta alle particelle di corrosione atmosferica.

5.3 Produzione e Distribuzione

La produzione di idrogeno richiede attenzione ai dettagli per evitare impatti ambientali negativi, mentre la distribuzione richiede una rete di infrastrutture ben pianificata. È quindi necessario:

- L'utilizzo di metodi sostenibili, come l'elettrolisi dell'acqua tramite energia rinnovabile, per la produzione di idrogeno;
- L'adozione di standard rigorosi per la progettazione e la gestione delle stazioni di rifornimento di idrogeno;
- Laddove sia necessario far passare le condutture dell'idrogeno nello stesso condotto o cavidotto utilizzati per i cavi elettrici, tutti i giunti nelle tubazioni dell'idrogeno nel condotto/ cavidotto devono essere saldati o brasati. Una distanza minima di separazione dai cavi elettrici e da qualsiasi altra tubazione deve essere determinata dalla valutazione dei rischi o da norme/regolamenti locali. La tubazione dell'idrogeno dovrebbe essere collocata a un'altezza maggiore rispetto ad altre condutture;
- La continuità elettrica deve essere mantenuta in tutto il sistema;
- Laddove sono montati manicotti esterni, questi devono essere opportunamente forati per evitare il gonfiaggio;
- Gli strumenti e gli indicatori devono essere progettati e posizionati in modo tale che, in caso di perdita o rottura e possibile incendio successivo, il rischio per il personale sia ridotto al minimo. Si raccomanda l'uso di vetri di sicurezza e sfiato posteriore sui manometri (la cosiddetta costruzione «solid front»).

5.4 Compatibilità dei Materiali

L'idrogeno può causare problemi di compatibilità con alcuni materiali, portando alla fragilità e alla rottura di componenti critici. Si rende quindi indispensabile:

- L'Utilizzo di materiali che resistono alla corrosione e alla diffusione dell'idrogeno. Non devono essere utilizzati tubi e raccordi in ghisa. Si sconsiglia l'uso di qualsiasi ghisa a causa della permeabilità all'idrogeno e della possibilità di porosità nella ghisa;
- Laddove è probabile che l'ammoniaca sia presente come impurità o come contaminante atmosferico, le leghe a base di rame/stagno/zinco non devono essere utilizzate per tubi o raccordi poiché questi materiali sono suscettibili all'attacco dell'ammoniaca. Si dovrebbe anche prendere in considerazione la possibilità che siano presenti altri contaminanti e prendere adeguate precauzioni;
- L'uso di giunti saldati o brasati (la saldatura dolce non è consigliata) è raccomandato ove possibile. Laddove si ritengano necessari giunti fragili (filettati, flangiati, ecc.), questi dovrebbero essere ridotti al minimo poiché sono una potenziale fonte di perdite. Devono essere prese in considerazione le potenziali perdite dalle connessioni dovute alla permeabilità dell'idrogeno a tutte le pressioni;
- Il monitoraggio costante delle prestazioni dei materiali in ambienti ad idrogeno.

5.5 Rischi di utilizzo sui veicoli ad uso civile

L'idrogeno può esser utilizzato sui veicoli essenzialmente in due modi:

- Direttamente come carburante in un motore a combustione interna (HICEV Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicle);
- Nelle celle a combustibile (Fuel Cells) per produrre energia elettrica che poi alimenta il motore elettrico del veicolo (FCEV Fuel cells Electric Vehicle).

La tecnologia Fuel Cells va raccomandata rispetto al motore a combustione interna in quanto più efficiente; tuttavia, l'uso diretto dell'energia elettrica stoccata nelle batterie costituisce un sistema ancora più efficiente in quanto evita le trasformazioni tra i diversi vettori energetici; pertanto, dove possibile, sarebbe raccomandabile usare direttamente l'energia prodotta da fonti rinnovabili nell'auto elettrica, evitando le perdite di energia dovute alle trasformazioni. Sembrerebbe più logico ed efficiente destinare l'uso dell'idrogeno principalmente nel settore heavy duty (Camion, TIR, Autobus, Treni, Navi) dove l'uso delle batterie non sembra proponibile per questioni di dimensioni, autonomia, tempi di ricarica. Pertanto, la scelta ricade sulla tecnologia delle celle a combustibile a idrogeno in quanto il rendimento è circa il doppio di quello di un motore termico. L'utilizzo di tale tecnologia richiede comunque una particolare attenzione alla gestione del gas e ai potenziali rischi ad esso associati. Ciò include la prevenzione delle fughe di idrogeno, la gestione delle pressioni e

l'adozione di misure di sicurezza per garantire il corretto funzionamento del sistema di alimentazione.
Un altro aspetto fondamentale riguarda la formazione e la sensibilizzazione dei conducenti dei veicoli a idrogeno, che devono essere adeguatamente informati sui rischi associati all'utilizzo dell'idrogeno come combustibile e devono seguire le pratiche di sicurezza raccomandate. Ciò include l'addestramento sul corretto utilizzo del sistema di alimentazione, la gestione dei serbatoi di idrogeno e le procedure da seguire in caso di emergenza.
Per quanto concerne il sistema di alimentazione dei veicoli ad uso civile ad idrogeno al fine di garantire la sicurezza nell'utilizzo possono essere adottate diverse misure, tra le quali l'impiego dei seguenti sistemi di controllo:

- Sensori di rilevamento delle fughe di idrogeno: I veicoli a idrogeno possono essere dotati di sensori che rilevano la presenza di fughe di idrogeno nel sistema di alimentazione. Questi sensori avvisano il conducente o attivano misure di sicurezza come l'interruzione dell'alimentazione o la chiusura delle valvole di sicurezza. Al giorno d'oggi sensori per applicazioni automotive capaci di rilevare fughe sono difficilmente reperibili in commercio, in quanto tale tecnologia e tale cultura della sicurezza non è ancora consolidata fra i produttori di veicoli ibridi o full electric.
- Sistema di gestione termica: Un sistema di gestione termica può essere implementato per controllare e mantenere la temperatura dell'idrogeno nel sistema di alimentazione entro limiti sicuri. Ciò può prevenire situazioni di surriscaldamento o formazione di pressioni elevate che potrebbero causare problemi di sicurezza;
- Valvole di sicurezza: Le valvole di sicurezza sono dispositivi di sicurezza che si attivano in caso di pressioni eccessive nel sistema di alimentazione. Queste valvole si aprono automaticamente per rilasciare l'eccesso di idrogeno in caso di situazioni di emergenza o sovrappressione, contribuendo a prevenire incidenti;
- Sistemi di spegnimento automatico: In situazioni di emergenza, i veicoli possono essere dotati di sistemi di spegnimento automatico che interrompono l'alimentazione di idrogeno al motore e chiudono le valvole di sicurezza per ridurre il rischio di esplosioni o incendi;
- Protezione termica: La protezione termica può essere applicata alle parti sensibili del sistema di alimentazione dell'idrogeno per prevenire danni da temperature elevate o incendi accidentali. Questa protezione deve essere realizzata utilizzando materiali resistenti al calore o sistemi di isolamento termico.

È importante specificare che queste sono solo alcune delle possibili misure di controllo che possono essere adottate per garantire la sicurezza nell'utilizzo dell'idrogeno come combustibile per i veicoli ad uso civile. La scelta dei sistemi di

controllo dipenderà dalle specifiche tecniche del veicolo, dalle normative di sicurezza vigenti e dalle best practice raccomandate.

6. Conclusioni

L'utilizzo dell'idrogeno per autotrazione offre enormi vantaggi in termini di riduzione delle emissioni e sostenibilità, tuttavia, è essenziale comprendere e mitigare i rischi ad esso associati. L'adozione di misure di sicurezza rigorose in ogni fase del ciclo dell'idrogeno insieme a una formazione completa del personale e all'implementazione di tecnologie avanzate, garantirà un utilizzo sicuro e responsabile dell'idrogeno nell'industria automobilistica. In tal modo si potranno affrontare con successo le sfide future e sfruttare appieno il potenziale dell'idrogeno come carburante pulito.

Bibliografia

[1] EC. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal COM/2019/640 final. 2019.
[2] MIM. Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità. 2022.
[3] Bucci G., Ciancetta F., Fiorucci E. An automatic test system for the dynamic characterization of PEM fuel cells. Proceedings from the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2004. pp. 675–680. https://doi.org/10.1109/imtc.2004.1351137
[4] EC. Sustainable and smart mobility strategy. 2020.
[5] Ajanovic A., Glatt A., Haas R. Prospects and impediments for hydrogen fuel cell buses. Energy, 235, 121340. 2021. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121340
[6] Bucci G., Ciancetta F., Fiorucci E., Veglio F. An Experimental Approach to the Modeling of PEM Fuel Cells in Dynamic Conditions. Proceedings from the IEEE Lausanne Power Tech. 2007. pp. 1094–1099.https://doi.org/10.1109/PCT.2007.4538468
[7] Di Battista D., Villante C., Cipollone R. Optimal Components Design of a Fuel Cell Electric Vehicle. SAE Technical Paper. 2015. https://doi.org/10.4271/2015-24-2546
[8] Villante C. A tool for Well-to-Wheels evaluation of alternative public transport means. Proceedings from EVS28. 2015.

Revamping di un impianto di compostaggio con produzione di biogas ed adozione di un sistema di Upgrading per minimizzare gli autoconsumi elettrici e massimizzare il tasso di recupero del metano

V. Prete[1], A. Urso[1], A. De Palma[2], S. Manna[3], A. Colautto[4], L. Viarengo[5], M. Fischetti[5], G. Odino[6]

[1]Inail – Uot di Alessandria
[2]Inail – Uot di Venezia
[3]Inail – Uot di Roma
[4]Inail – Uot di Milano
[5]G.A.I.A. SpA
[6]Studio Ing. G. Odino

Abstract

L'azienda oggetto della presente memoria opera nel campo del trattamento, recupero e smaltimento dei rifiuti urbani; nell'impianto vengono recuperati i rifiuti organici e trasformati in compost e in biogas per la produzione di energia elettrica al fine di soddisfare le necessità dell'impianto.
Nel 2022 è stato effettuato un revamping dell'impianto di compostaggio consistente nell'installazione di un secondo digestore e di un impianto di Upgrading del biogas.
Il biometano così prodotto, previa purificazione, viene immesso nella rete di distribuzione locale ed è prevista a pieno regime una produzione fino a 6 milioni di metri cubi all'anno.
Oggetto del presente studio è la tecnologia adottata per la purificazione del biogas, derivante dal processo di lavorazione dei rifiuti organici trattati, che prevede l'impiego di membrane di altissima qualità.
Il processo avviene tramite un sistema di compressione che aumenta la pressione del biogas pretrattato al valore necessario all'unità a membrana, posta a valle, per separare il biogas in un flusso di CO_2 e CH_4.
Il sistema di controllo dell'impianto è programmato per rilevare la pressione operativa del gas in vari punti, il contenuto di metano, la quantità di flusso e per regolare automaticamente i parametri chiave del processo di separazione.
Il complesso installato minimizza gli autoconsumi elettrici e massimizza il tasso di recupero del metano fino ad almeno il 99,5%.
L'impianto di compostaggio a digestione anaerobica oggetto della memoria si colloca all'interno di un piano industriale di produttività e transizione energetica e vuole essere da esempio per altre realtà operanti in questo settore.

Keywords: biogas, compostaggio, ottimizzazione consumi

1. Introduzione

Le opportunità aperte dal d.m. 2 marzo 2018 per la produzione di biometano ed il trend di crescita nella raccolta differenziata dell'organico hanno spinto l'azienda, che si colloca all'interno di un sistema di gestione ambientale integrata, ad investire nel settore. Si è partiti dalla consapevolezza che il know-how acquisito e la presenza di un sito già correttamente infrastrutturato e dotato di servizi avrebbero consentito all'impianto oggetto della presente memoria di trattare i rifiuti organici in modo ambientalmente più sostenibile ed economicamente più efficiente rispetto alla media degli impianti già presenti.

Il nuovo impianto ha potuto inoltre rispondere alla crescente domanda di trattamento per l'umido prodotto in ambito regionale.



Figura 1. Vista generale impianto



Figura 2. Vista generale upgrading



Figura 3. Particolare upgrading

2. Descrizione e finalità dell'impianto

All'interno dell'impianto di compostaggio vengono recuperati i rifiuti organici (scarti di cucina, sfalci e potature) che sono trasformati in compost di qualità per l'agricoltura; l'impianto copre una superficie totale di circa 31.800 m^2.
Negli ultimi anni, seguendo le indicazioni del piano industriale, è iniziato il revamping dell'impianto esistente con la costruzione di biocelle, di un nuovo impianto di trattamento dell'aria e l'installazione di un impianto di digestione anaerobica.

L'intervento ha permesso di avviare l'intero quantitativo di FORSU (Frazione Organica del Rifiuto Solido Urbano) in ingresso al trattamento di digestione anaerobica e di trasformare il biogas in biometano da immettere nella rete di distribuzione del gas.
La produzione di biometano a partire dalla FORSU o altri scarti organici oltre a ridurre l'impiego di combustibili di origine fossile contrasta l'emissione di gas serra naturalmente generata da fenomeni di fermentazione aerobica.

La scelta di giungere alla produzione di biometano consente all'azienda di generare notevoli benefici ambientali e di incrementare i propri ricavi grazie alla vendita del biometano prodotto e all'ottenimento degli incentivi previsti per la produzione di biocarburanti avanzati. Per quanto riguarda i benefici ambientali l'utilizzo di biometano comporta una riduzione di almeno il 75% di emissioni di gas serra rispetto al gas naturale di origine fossile.
Il calore necessario per il funzionamento dell'impianto di digestione anaerobica è generato con cogenerazione ad alto rendimento.
In sintesi, il sistema impiantistico di recupero dei rifiuti organici consente di:

- Ridurre le emissioni odorigene per effetto della totale digestione anaerobica della matrice
- Recuperare in modo efficiente e sostenibile i rifiuti organici, sfruttando in modo efficiente l'energia contenuta nel biogas
- Ridurre le emissioni in atmosfera da combustione del biogas (sostituito da gas naturale)
- Migliorare la logistica generale del sito
- Migliorare le economie di scala rendendo economicamente più sostenibile il processo

3. Funzionamento del processo

Nei processi di digestione anaerobica si origina una miscela gassosa denominata biogas principalmente composta da Metano (CH_4) ed anidride carbonica (CO_2) e da piccole quantità di solfuro di idrogeno (H_2S) ed ammoniaca (NH_3). Sono occasionalmente presenti tracce di idrogeno (H_2), azoto (N_2), carboidrati saturi o alogenati ed ossigeno (O_2) nonché particelle di polveri. Il biogas può contenere altre sostanze in funzione del tipo di sostanza organica digerita e delle condizioni di processo.

Rispetto alla media del biogas prodotto da varie matrici (fanghi, prodotti agricoli, ecc) quello da FORSU presenta caratteristiche di buona qualità in fatto di tenore di metano (>58%) e tenore in ammoniaca. Il biogas ottenibile dalla FORSU presenta caratteristiche ottimali per una utilizzazione energetica o per la successiva purificazione a biometano.
Partendo da tale composizione è possibile impostare la tecnologia di trattamento per giungere al biometano che dovrà puntare essenzialmente alla rimozione dello Zolfo, della CO_2 e di altre impurità.

Il processo di depurazione del biogas, finalizzato a renderlo idoneo per la qualifica normativa di biometano, è suddiviso in due fasi distinte:

- Purificazione del biogas
- Upgrading

4. Purificazione del biogas

La fase di purificazione è essenziale per il seguito del processo dovendo provvedere all'eliminazione sia di molecole indesiderate sia per la composizione finale del biometano sia per l'operatività degli impianti di upgrading che potrebbero essere danneggiati dalla presenza di inquinanti specifici (es. zolfo per le membrane).

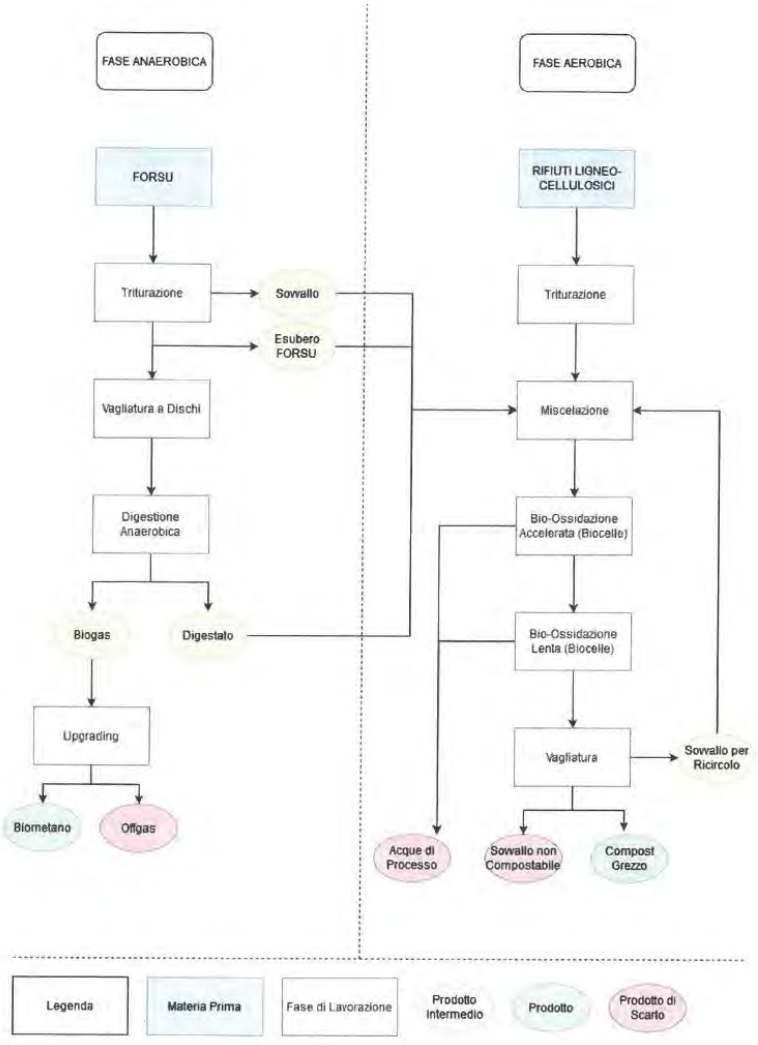


Figura 4. Schema a blocchi processo impianto

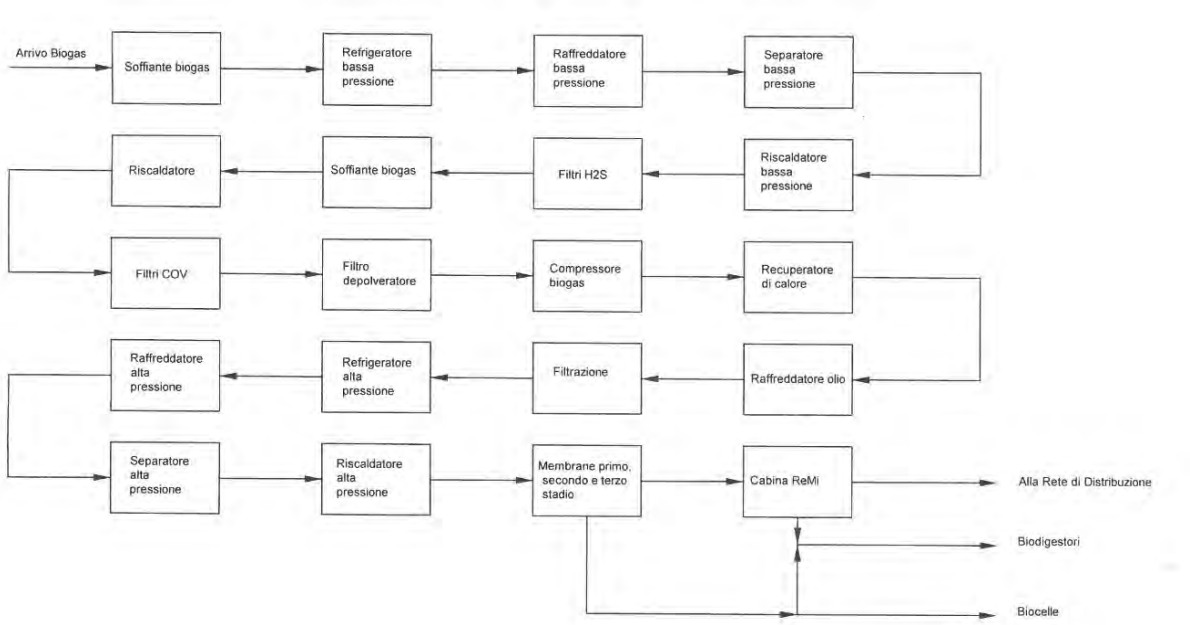


Figura 5. Schema a blocchi upgrading

Il processo di purificazione del biogas è costituito da un'unità di deumidificazione e da filtri a carboni attivi.
L'unità di deumidificazione del biogas è costituita da un gruppo frigorifero (chiller) che raffredda il biogas all'interno di un fascio tubiero rimuovendone l'acqua di condensa che verrà inviata ad una apposita vasca di accumulo per poi essere smaltita.
I filtri a carboni attivi, costituiti da 4 sili di diametro 1,9 m ed altezza massima di 4 m, sono impiegati per eliminare gli inquinanti: H_2S, COV (Composti Organici Volatili) e silossani.
Il biogas viene fatto transitare al loro interno e le impurità vengono trattenute dai carboni ivi presenti. I sili vengono montati in serie e possono essere by-passati dal biogas in modo da consentire la sostituzione dei carboni senza fermare l'impianto.



Figura 6. Filtri H_2S e COV

Il biogas in uscita dai digestori viene inviato alla sezione di purificazione con l'obiettivo di liberarlo dalle seguenti impurità:

- Acque
- Composti dello zolfo
- Altri composti organici volatili
- Eventuale ammoniaca

4.1 Deumidificazione del biogas

Prima di poter rimuovere la CO_2 è necessario procedere alla rimozione dell'umidità presente a tal fine il biogas in ingresso alla sezione di upgrading viene raffreddato in un fascio tubiero collegato con un gruppo frigorifero (chiller) che consente di eliminare la frazione liquida dalla corrente gassosa. Questa fase ha il duplice vantaggio di portare alla rimozione dell'umidità e dei COV (circa il 20%) solubilizzati all'interno dell'acqua rimossa.

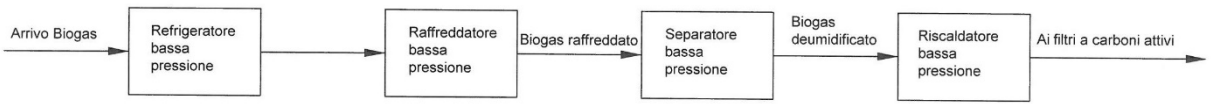


Figura 7. Schema a blocchi unità di deumidificazione

Per ottenere la massima sicurezza di funzionamento del sistema di essiccazione sono stati installati due gruppi frigoriferi ridondanti da 40 kW ognuno con potenza pari al 60% di quella richiesta. Il primo gruppo è al servizio della fase di deumidificazione iniziale mentre il secondo raffredda il gas in uscita al termine della fase di compressione. I due gruppi frigoriferi sono installati sullo stesso circuito. Le temperature raggiunte dal sistema di raffreddamento sono inferiori ai 5°C permettendo l'ottimizzazione per quanto riguarda la rimozione dei composti solubili quali l'ammoniaca, COV e H_2S.
Il biogas deumidificato viene quindi messo in sovrapressione tramite una soffiante.



Figura 8. Impianto di raffrescamento e refrigerazione

4.2 Trattamento ai carboni attivi

Una volta eliminata la quota di acqua il gas passa attraverso un sistema di abbattimento composto da filtri multipli a carbone attivo che hanno lo scopo di eliminare l'H_2S, i COV residui, i silossani e altri gas in tracce.
I filtri sono stati installati con sistemi di controllo lead-lag che comprendono una serie di valvole consentendo l'inversione dei flussi, il bypass e il sezionamento del singolo filtro garantendo quindi flessibilità, affidabilità e continuità di servizio permettendo di eseguire le operazioni di manutenzione senza fermare l'impianto.

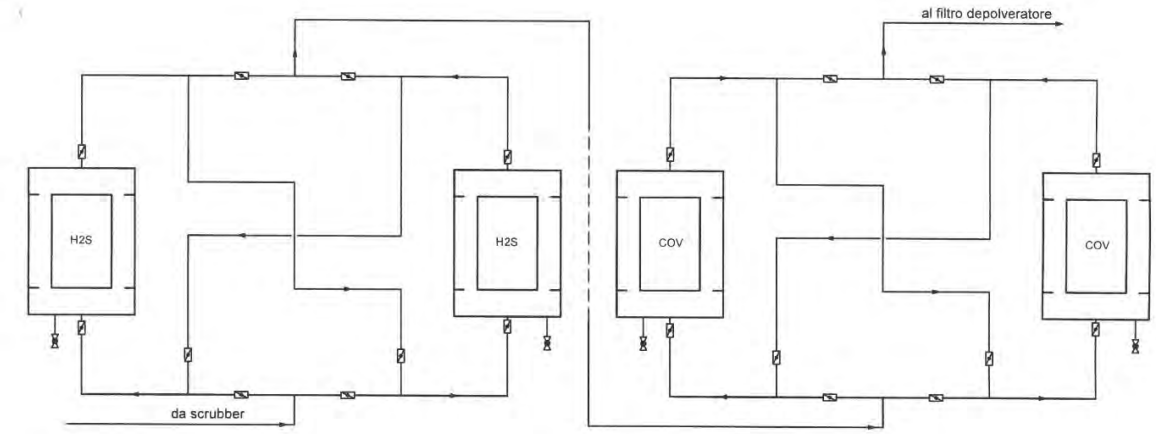


Figura 9. Schema di principio filtrazione H_2S e COV

5. Fase di upgrading

5.1 Compressione del gas

Il gas in uscita dalla sezione di pretrattamento vista in precedenza viene compresso alla pressione di funzionamento delle membrane compresa tra 12 e 14 bar e i compressori previsti saranno due dimensionati sul 50% della portata massima. L'installazione delle membrane avverrà all'interno di apposito container. La potenza installata di ciascun compressore sarà di 260 kWe.



Figura 10. Impianto di compressione

5.2 Il processo a membrane

Confrontando le varie tecnologie ad oggi presenti sul mercato, e che possono considerarsi mature, la scelta è ricaduta sulle membrane in considerazione dell'elevata affidabilità e diffusione della tecnologia in rapporto alle buone prestazioni tecniche raggiungibili.

Le membrane basano il loro funzionamento sulla capacità di separare il metano contenuto nel biogas prodotto attraverso la diversa permeabilità delle sostanze che compongono la corrente gassosa da trattare utilizzando un gradiente di pressione come forza motrice per il processo.

La superficie di contatto viene realizzata attraverso fibre cave e la separazione viene ottenuta considerando che le molecole di anidride carbonica e degli inquinanti presentano dimensioni inferiori rispetto a quelle del metano e dunque permeano più efficacemente fra i micropori del substrato polimerico. Date le minori dimensioni delle molecole di anidride carbonica, del vapore d'acqua, dell'H_2S e dell'ammoniaca, queste riescono a transitare più velocemente attraverso il reticolo composto dalla membrana dove vengono raccolte sul lato a più bassa pressione della stessa contrariamente il metano rimane intrappolato sul lato ad elevata pressione. A questo punto la corrente gassosa è separata e il metano ottenuto si trova ad una pressione e purezza adeguate all'immissione in rete.

Uno dei punti di forza delle membrane consiste nella assenza di composti secondari di scarto o emissioni e non necessitano di sostanze secondarie per la fase di separazione, come ad esempio le soluzioni di lavaggio utilizzate all'interno delle colonne di scrubbing, con conseguenti minori OPEX (OPerational EXpenditure).



Figura 11. Particolare membrane



Figura 12. Particolare membrane

6. Conclusioni e valutazioni energetiche finali

Le due sezioni impiantistiche maggiormente energivore sono l'upgrading e il compostaggio con oltre 3 milioni di kWh annui ciascuno. L'elevata richiesta di energia elettrica necessaria alle due sezioni appena citate è determinata in prima analisi dall'elevato numero di ore di funzionamento annuali (regime di funzionamento approssimativamente continuo) e in secondo luogo dagli elevati volumi trattati. La

sezione di upgrading gestisce oltre 10 milioni di Sm^3/anno di biogas prodotto nella sezione di digestione mentre il sistema di aspirazione e movimentazione dell'aria smaltisce portate dell'ordine di 160.000 m^3/h.
Nel bilancio energetico complessivo sono stati presi in considerazione tutti i flussi energetici in entrata ed in uscita dall'impianto. Il dato di partenza è rappresentato dal contenuto energetico dei quasi 6.300.000 Sm^3 di metano prodotti annualmente che, considerando il potere calorifico inferiore del biometano pari a 9,444 kWh/Sm^3, corrispondono a poco meno di 60.000 MWh annui.
Al termine di tutto il processo di produzione descritto e delle conseguenti perdite circa 5.939.000 Sm^3 annui di metano, rappresentante il 94,5% del totale pari a 56.086 MWh, sono realmente immettibili in rete. I miglioramenti tecnologici e la gestione ottimale dei sensori di controllo possono, ovviamente, ridurre in modo significativo la quota del 5,5% di perdite cautelativamente stimate aumentando il metano immettibile.
L'acquisto di gas naturale di rete per l'alimentazione del cogeneratore e la conseguente copertura di tutti gli ausiliari elettrici e di quelli termici è stimato in circa 1.934.000 Sm^3/anno pari a circa 19.700 MWh annui. L'incidenza del gas acquistato in termini energetici è pari a circa il 30% del biometano prodotto. L'apparentemente elevato consumo energetico per i servizi di impianto deve essere considerato riferito non solo alla sezione di produzione energetica (biometano) ma a tutto il ciclo di trattamento dei rifiuti organici che andrebbero, altrimenti, ad essere energicamente persi. Il processo proposto, al contrario, consente di recuperare un'importante quota di energia sotto forma di biometano e di realizzare un recupero di materia in forma di compost di qualità il tutto secondo gli indirizzi della normativa europea sui rifiuti. Trattamenti alternativi, come i processi semplicemente aerobici, porterebbero ad ottenere un recupero esclusivamente di materia con costi energetici importantissimi del tutto a carico delle fonti fossili tradizionali.
Il processo rappresenta, quindi, un esempio di approccio decisamente virtuoso da un punto di vista energetico e ambientale.

7. Bibliografia

[1] Manuali uso e manutenzione delle attrezzature installate

[2] D. Andriani, A. Wresta, T. D. Atmaja, A. Saepudin. A Review on Optimization Production and Upgrading Biogas through CO_2 Removal Using Various Techniques. *Appl Biochem Biotechnol.* 2014*;* 172(4):1909–28

[3] S. Basu, A. L. Khan, A. Cano-Odena, C. Liu, I. F. J. Vankelecom. Membrane-Based Technologies for Biogas Separations. *Chem. Soc. Rev.* 2010; 39(2): 750–68.

[4] M. Scholz, T. Melin, M. Wessling 2010;. Transforming Biogas into Biomethane Using Membrane Technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2010; 17:199–212.

Interventi di riparazione in generatori di vapore con fumi particolarmente aggressivi (termovalorizzatori, biocombustibili)

A. Carro[1], M. Quadalti[2]

[1] Inail - Uot di Forlì
[2] qb STUDIO s.r.l. – Soc. di ingegneria

Abstract

L'utilizzo di particolari combustibili, quali l'incenerimento dei rifiuti, le farine di derivazione zootecnica, il biogas, può comportare la presenza di fumi particolarmente aggressivi, sia per la composizione degli stessi sia soprattutto per l'attitudine a generare condense acide estremamente corrosive nelle zone "più fredde" (economizzatori, evaporatori).
Il presente articolo racconta alcuni interventi di riparazione in generatori di vapore a tubi d'acqua in cui si sono introdotti rivestimenti protettivi a protezione dei tubi che tendevano maggiormente a corrodersi. In particolare:

- tubi protetti mediante un cladding anticorrosione con apporto in lega "Inconel 625", riportata mediante saldatura
- applicazione di rivestimenti protettivi (High Velocity Thermal Spray - HVTS), con leghe di Nickel e di Cromo
- applicazione di rivestimenti protettivi in fluoropolimeri.

Tali tecniche sono state valutate dal punto di vista tecnico ed economico in maniera diversa nei vari casi analizzati, portando a scelte differenti in relazione alle singole situazioni specifiche.
Gli interventi proposti derivano da tecnologie adottate già da diversi anni nelle nuove realizzazioni; hanno la particolarità di poter essere realizzati su attrezzature in esercizio e di ottenere benefici tangibili in termini di durata delle membrature interessate.

Keywords: Corrosione delle attrezzature, Riparazioni, Studio dei materiali.

Introduzione

Negli ultimi 20 anni il mercato dell'energia è profondamente mutato, sia per quanto riguarda il tipo di domanda (più flessibile ed intermittente, con picchi di richiesta in svariati periodi dell'anno), sia per quanto riguarda i combustibili (da fonti rinnovabili o derivanti dal trattamento dei rifiuti).
Ai grandi produttori di energia, si sono aggiunte aziende che hanno affiancato all'originario scopo di impresa la produzione di energia mediante fonti in qualche

modo incentivate, quali lo smaltimento dei rifiuti, i biogas e/o syngas, i combustibili di origine vegetale e/o zootecnica. I generatori di vapore presenti in questi impianti si sono trovati ad utilizzare combustibili diversi da quelli per cui erano stati progettati, dalle caratteristiche non perfettamente costanti ed in condizioni di carico spesso variabili (ovvero con un numero di accensioni/spegnimenti superiore a quello preventivato), trovandosi così a dover gestire fumi più aggressivi del previsto.
Senza addentrarci nell'analisi delle cause che esula dallo scopo del presente lavoro, gli utilizzatori dei generatori considerati in questo studio hanno riscontrato, a seconda della conformazione dei generatori stessi, corrosione generalizzata nelle membrature soggette a temperature più alte e/o corrosione localizzata nelle membrature soggette a temperature più basse. Corrosioni che hanno portato a riduzioni veloci nello spessore delle membrature, ma soprattutto corrosioni puntiformi per vaiolature o pitting che hanno generato forature con conseguenti perdite d'acqua.
Limitandosi a considerare il contenuto di acido cloridrico e anidride solforosa nei fumi (praticamente nulli quando si utilizza metano), che sono indubbiamente i dati più significativi relativamente al pericolo di corrosione da condense acide, le analisi dei fumi mostrano che nell'arco di un mese di esercizio la concentrazione di HCl può variare significativamente:

COMBUSTIBILE	CONCENTR. MEDIA MENSILE	CONCENTR. MEDIA MENSILE	CONCENTR. MEDIA GIORNO MAX	CONCENTR. MEDIA GIORNO MAX
	HCl (mg/Nm^3)	SO_2 (mg/Nm^3)	HCl (mg/Nm^3)	SO_2 (mg/Nm^3)
biomassa + ev. rifiuto (n.2 impianti)	da 0,3 a 3,2	da 2,5 a 5,47	da 1,2 a 4,5	da 4,0 a 11,0
rifiuto di vario genere (n.4 impianti) [1]	da 0,6 a 2,75	da 0,26 a 2,7	da 1,05 a 5,19	da 0,49 a 4,19

Tabella 1. HCl ed SO2 nei fumi al camino dei GdV considerati (giu-lug 2023)

Occorre però sottolineare che i dati soprariportati, pubblicati in continuo sul web da alcuni utilizzatori, si riferiscono:

i. ai valori riscontrati al camino, non a quelli effettivamente in caldaia;

[1] La concentrazione di HCl nei fumi dipende più dal tipo di impianto e dai suoi processi di rimozione dei gas acidi che non dal tipo di rifiuto utilizzato.

ii. alla media mensile delle medie giornaliere; nell'arco della giornata si possono osservare oscillazioni di breve durata che possono anche raggiungere picchi di valore anche 2÷3 volte la media del giorno.

Questo lavoro racconta alcune esperienze maturate su generatori di vapore, in seguito a richieste degli utenti di autorizzazione ad interventi di riparazione sui generatori stessi o di messa in servizio di scambiatori di recupero sul percorso fumi sostituiti o modificati.

Non vengono trattate situazioni in cui le anomalie riscontrate erano riconducibili alla qualità dell'acqua di alimento, ma sono illustrati casi in cui sono stati proposti rivestimenti protettivi per migliorare la resistenza all'usura delle membrature soggette a fumi/condense corrosive (banchi, schermi, serpentini...), cercando di ricavarne considerazioni più generali, al di là delle proposte commerciali più o meno "esclusive", in certi casi protette anche da marchi e/o brevetti depositati.

1. Cladding

Il cladding è una tecnica nota ed utilizzata da molto tempo. Consiste nel rivestire una membratura mediante una lega più resistente a corrosione (usualmente a base di nickel).

Tale rivestimento può essere aggiunto:

- mediante riporto di saldatura automatizzato, con saldatura ad arco al plasma MIG/MAG (GMAW-131) o più modernamente con il laser cladding; gli interventi analizzati hanno riguardato la sostituzione, parziale o totale, dei tubi di caldaia usurati, con tubi "claddati", dove lo spessore, che si è aggiunto a quello del progetto originario, è normalmente compreso tra 1,5 e 2,5 mm (ma sono tecnicamente raggiungibili anche spessori maggiori, fino a 5÷6 mm); per rimanere nei limiti della "riparazione", tale spessore è sempre stato aggiunto allo spessore iniziale previsto dal progetto originario;
- mediante interventi localizzati eseguiti direttamente in campo, per mezzo di un procedimento manuale TIG (GTAW-141), mediante il quale vengono rivestite determinate aree di membrature.

I procedimenti di saldatura utilizzati per il riporto possono essere qualificati secondo la norma UNI EN ISO 15614-7:2020, con una modalità che deve comprendere anche il metallo base, su cui viene eseguita quella che viene chiamata "placcatura". La norma offre comunque una notevole possibilità di estensione; ad esempio, un procedimento qualificato per un metallo base del gruppo 5 (secondo UNI CEN ISO/TR 15608:2012), copre automaticamente anche tutti i metalli base dei gruppi 1, 2, 3 e 4 (Prospetto 5 UNI EN ISO 15614-7).

In diversi casi sono state utilizzate combinazioni di entrambe le tecniche elencate in precedenza: ad esempio prefabbricazione a terra di un banco economizzatore già rivestito e aggiunta in campo dello stesso tipo di rivestimento su un collettore e sui tubi limitrofi (le giunzioni tubi/collettori più bassi, si sono spesso rivelate le zone più vulnerabili a questo tipo di corrosione).

Nella maggior parte dei casi, gli interventi di riparazione esaminati hanno riguardato i banchi lambiti dai fumi "più freddi", quali gli economizzatori o particolari zone di evaporatori, dove erano presenti fenomeni di corrosione puntuale e diffusa, dovuti a fumi e condense acide. Problemi di corrosione che sono stati amplificati dai transitori di avviamento/spegnimento, soprattutto in presenza di banchi bypassabili, in quanto il progressivo riscaldamento di tutte le membrature potrebbe non essere stato sempre ottimale. Invece, in altri casi gli interventi hanno riguardato anche membrature lambite dai fumi più caldi, quali i banchi surriscaldatori, ricostruendo alcuni tratti aggiungendo le placcature ed estendendo eventualmente quanto previsto già nel progetto originario, sia in termini di superficie, sia di spessore.
Per quanto riguarda il materiale utilizzato, in tutti i casi esaminati gli utilizzatori sono sempre ricorsi a rivestimenti in Inconel 625[2], riscontrando vantaggi tangibili in termini di durata delle membrature interessate.

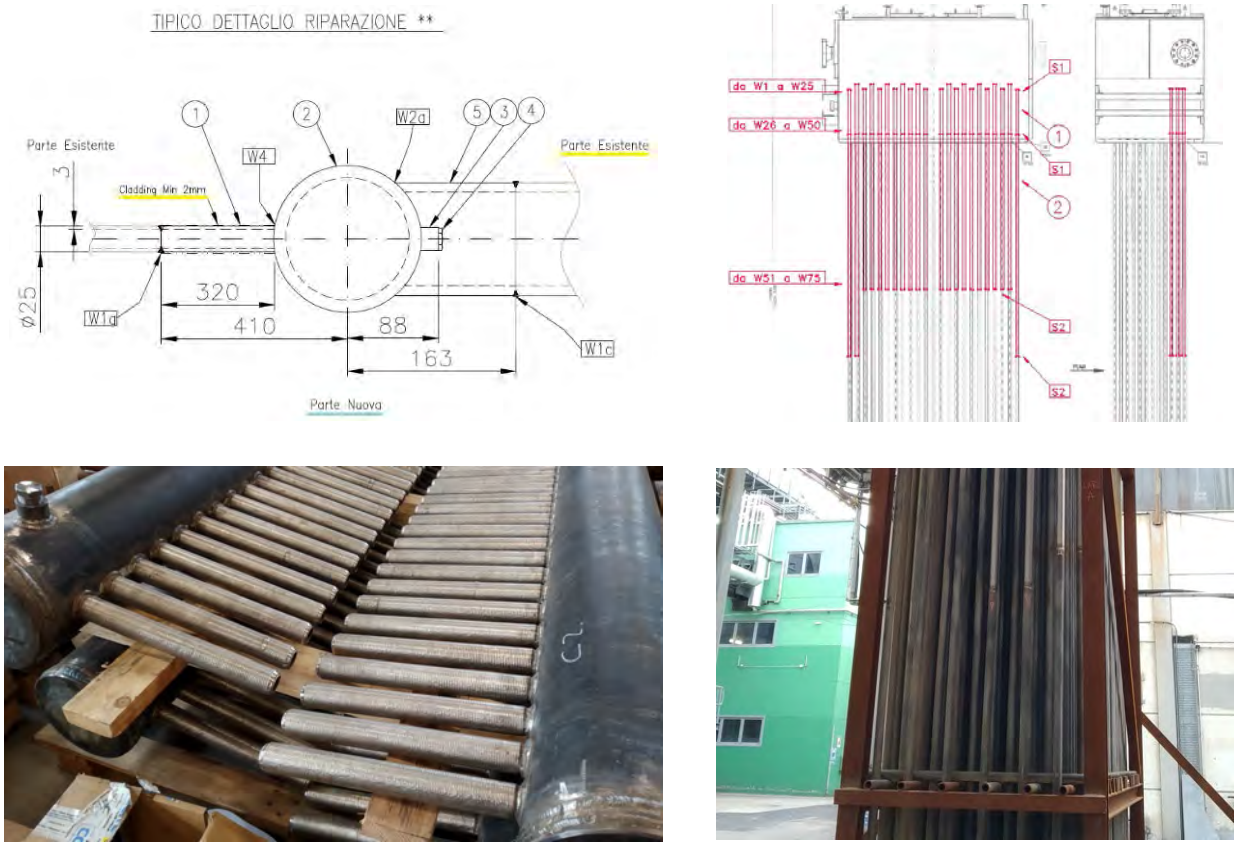


Figura 1. Tubi rivestiti in Inconel 625

2. High velocity thermal spray – HVTS

In casi in cui la corrosione si era rivelata diffusa in ampie zone di superficie di scambio in caldaia (ad esempio nelle parti finali di pareti membranate radianti e/o

[2] Ricordiamo che l'Inconel 625 è il nome commerciale di una lega di Nichel-Cromo-Molibdeno, la cui designazione standard è 2.4856 (o UNS N06625 oltre oceano).

nelle parti iniziali di pareti convettive), causata quindi più dall'aggressività dei fumi che dalle condense acide, alcuni utilizzatori hanno fatto ricorso ad una tecnica protettiva denominata High Velocity Thermal Spray (HVTS).
Anche questo metodo è inquadrato da standard internazionali[3], tra i quali si segnalano in particolare:

- UNI EN ISO 17834:2004 Spruzzatura termica - Rivestimenti per la protezione contro la corrosione e l'ossidazione ad elevata temperatura
- UNI EN ISO 14918:2017 Spruzzatura termica - Prove di qualificazione degli addetti alla spruzzatura termica
- UNI EN 13507:2018 Spruzzatura termica - Pretrattamento di superfici di parti metalliche e componenti da sottoporre a spruzzatura termica

Nel caso analizzato più di recente, è stato proposto ad esempio un rivestimento, da applicare manualmente, in un'area di 11m^2 della parete membranata in camera di combustione e di un'area di 25m^2 della parete membranata ai lati dell'ingresso in sezione convettiva.
Il rivestimento adottato, in accordo alle indicazioni della UNI EN ISO 17834, era in NiCrMoW (materiale tipo 5 secondo la Tab. B.1 della UNI EN ISO 17834), di tipo adatto alle classi C, D ed E (Tab.1), dichiarato dal produttore idoneo a temperature di esercizio fino a 650 °C e applicato in loco con spessore minimo di 0,5 mm. Lo spessore viene misurato mediante un apposito spessimetro magnetico dagli stessi operatori che curano l'applicazione del rivestimento.
Su proposta del fornitore, l'utilizzatore ha fatto proteggere anche il primo fascio dei tubi banchi surriscaldatori MT e BT con un rivestimento leggermente diverso, avente un tenore di Cr e di Mo più elevati per garantire maggior stabilità alle alte temperature.



Figura 2. Preparazione e trattamento HVTS in parete membranata

[3] Da notare che alcuni produttori usano impropriamente il termine "cladding" (traducibile con "placcatura"), mentre le norme parlano di "coating" (traducibile con "rivestimento")

3. Rivestimenti in fluoropolimeri

Nel caso di scambiatori ausiliari o di economizzatori, dove le temperature di esercizio sono più basse (230-250°C), sono stati tentati interventi con aggiunta di rivestimenti in PTFE o in PFA.
In particolare, in un caso esaminato, un banco economizzatore, costruito inizialmente in acciaio al carbonio, è stato sostituito con un banco progettato diversamente nelle tre zone di lavoro:

- tubi acciaio inox austenitico rivestito di PFA nella parte calda dello scambiatore di calore (sopra al punto di rugiada dei fumi, nel lato ingresso gas/uscita acqua),
- tubi non rivestiti di una lega a base nickel con ferro (2.4605 / UNS N06059) nella parte fredda dello scambiatore (sotto il punto di rugiada del vapore acqueo dei fumi, nel lato ingresso acqua/uscita gas),
- corpo dello scambiatore in acciaio al carbonio rivestito di PFA.

L'esito di tale sostituzione è stato notevolmente positivo: in presenza di fumi che mediamente contengono 3 mg/Nm^3 di HCl, la durata è passata da pochi mesi, sia per il banco originario, sia per il secondo sostituito (sempre in CS), agli attuali 5 anni, con il nuovo banco che è ancora regolarmente in esercizio.

4. Confronto conclusivo

Nel tirare le fila sull'esito delle esperienze effettuate in questi anni, viene stilata una tabella comparativa che mette in luce gli aspetti di forza e di debolezza individuati negli approcci presentati:

ASPETTO CONSIDERATO		*CLADDING*	*THERMAL SPRAY*	*PFA*
Efficacia (in termini di durata)	+	Utilizzabile fino a 1000°C. Maggiore durata.	Utilizzabile fino a 650°C. Non essendo una saldatura, non incide sulle giunzioni del metallo base e non necessita di PWHT.	Buona durata (in combinazione con scelta di materiali di costruzione delle membrature diversi).
	-	Necessita di procedimento qualificato placcatura/metallo base.	Garantite durate inferiori (3 anni circa)	Solo per basse temperature (<250°C). Basse durate con fumi molto aggressivi.

ASPETTO CONSIDERATO		*CLADDING*	*THERMAL SPRAY*	*PFA*
Tipo di intervento	+	Possibilità di migliori realizzazioni (soprattutto prefabbricando a terra).	Intervento veloce e poco invasivo (anche se occorre preparare adeguatamente le superfici).	Possibilità di migliori realizzazioni (soprattutto prefabbricando a terra).
	-	Invasivo (sostituzione di membrature e/o interventi di saldatura in campo).	Applicazione dall'esito non del tutto controllabile. Fumi pericolosi (occorrono DPI adeguati).	
Economicità dell'intervento	+	Possibilità di prefabbricare a terra (con procedimenti automatizzati) i banchi completamente lambiti dai fumi (es. surriscaldatori).	Nessuno "spreco" di rivestimento nelle pareti membranate (la protezione è eseguita soltanto nel lato lambito dai fumi). Tempi di fermata più brevi.	Costo minore dei manufatti.
	-	Costo maggiore dei manufatti (e non tutti i fornitori sono in grado di piegare il tubo rivestito). Tempi di fermata più lunghi (in caso di intervento in caldaia).	Tecnologia meno diffusa (elevati tempi di attesa).	

Tabella 2. Confronto tra le tecniche di rivestimento protettivo.

Bibliografia

[1] R. Iovene, S. Malvezzi, D. Moretti: Analisi dei meccanismi di danno nei surriscaldatori di vapore all'interno di un termovalorizzatore. Atti del Convegno SAFAP 2014, Roma 14-15 ottobre.

[2] E. Opromolla, C. Liccardo, L. Tassan Pagnochit, A. Cocchiaro: Protezione con INCONEL 625 di surriscaldatori di vapore all'interno di un termovalorizzatore. Atti del Convegno SAFAP 2021, 16-18 novembre.

[3] W.M.M. Huijbregts, R. Leferink: Latest advances in the understanding of acid dewpoint corrosion: corrosion and stress corrosion cracking in combustion gas condensates. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 51, 3 (2004), pp. 173-188.

[4] A. Delimi, E. Galopin e altri: Investigation of the corrosion behavior of carbon steel coated with fluoropolymer thin films. *Surface and Coatings Technology,* Volume 205, Issue 16 (15/05/2011), pp. 4011-4017.

[5] Wanyuan Gui, Cheng Zhong e altri: Laser-clad Inconel 625 coatings on Q245R structure steel: microstructure, wear and corrosion resistance. *NPJ materials degradation*, 6, Article number: 37 (2022).

[6] A. Illana, M.T. de Miguel e altri: Experimental study on steam oxidation resistance at 600°C of Inconel 625 coatings deposited by HVOF and laser cladding. *Surface and Coatings Technology,* Volume 451 (15/12/2022).

I sistemi di protezione dalle scariche atmosferiche negli edifici e costruzioni contenenti depositi di sostanze esplosive o nei quali si lavorano o si manipolano sostanze esplosive

P. Amodeo, G. Argento, F.P. Sofia, G. Sunseri

Inail - Uot di Palermo

Abstract

Con la presente memoria si vuole fornire un quadro sistematico ed esaustivo delle principali peculiarità impiantistiche obbligatorie e delle caratteristiche tecniche che i componenti degli impianti di protezione dalle scariche atmosferiche, installati negli edifici e costruzioni contenenti sostanze esplosive devono possedere, in modo da fornire un supporto pratico per progettisti e/o verificatori.
Di conseguenza nel seguito si descriveranno le principali caratteristiche possedute dagli stessi edifici, si esporranno sommariamente alcune problematiche legate alla valutazione del rischio di fulminazione e si individueranno le norme giuridiche e tecniche inerenti alla realizzazione degli impianti in oggetto.
Successivamente si indicheranno i criteri generali per la progettazione degli impianti, unitamente alle caratteristiche dei relativi componenti e verranno anche date indicazioni sulla documentazione tecnica di supporto agli stessi impianti.

Keywords: depositi sostanze esplosive, scariche atmosferiche, LPS (Lightning Protection System)

1. Introduzione

Durante la partecipazione alle Commissioni ispettive ex art. 27, comma 6 del d.lgs. 26 giugno 2015 n. 105, nonché durante le attività di verifica a campione Inail di cui al DPR 462/01 o nel corso di esecuzione delle verifica periodiche di impianti in base alla convenzione INAIL – Ministero della Difesa, ci si trova spesso a dover valutare la regolarità di impianti per la protezione dalle scariche atmosferiche (LPS – Lightning Protection System) installati a protezione di strutture nelle quali vengono tenute in deposito o si lavorano e/o si manipolano sostanze esplosive (in particolare esplosivi da cava, articoli pirotecnici, munizioni, ecc.) e sorgono sovente difformità interpretative sulla adeguata realizzazione di tali impianti.
Quest'ultimi, infatti, devono rispettare quanto prescritto dal cogente regio decreto 6 maggio 1940, n. 635, tutt'oggi in vigore, ma nel contempo devono rispondere alle norme tecniche vigenti al momento della loro realizzazione (norme CEI 81-1 o norme della serie CEI EN 62305) che, ai sensi dell'art. 81 del d.lgs. 81/2008, costituiscono la "regola d'arte" di riferimento per il settore specifico.

Scopo di questa memoria è quello di affrontare tale problematica facendo un'analisi delle caratteristiche degli LPS prescritte dalla norma giuridica e dalle norme tecniche, al fine di poter fornire una guida che possa essere di aiuto per potere conciliare le stesse nella realizzazione degli impianti.

2. Principali caratteristiche degli edifici in oggetto

Per una maggiore chiarezza espositiva della presente memoria è necessario fare una preventiva descrizione delle tipologie di edifici che solitamente si riscontrano nell'ambito delle attività di deposito, di lavorazione e/o di manipolazione di sostanze esplosive, per lo più solide, precisando che si tratta solitamente di piccoli edifici, generalmente isolati ed adeguatamente distanziati da altre strutture, realizzati in cemento o muratura o comunque in materiali ininfiammabili, ad un solo piano fuori terra, che presentano le ulteriori seguenti caratteristiche:

- presentano generalmente una copertura in materiale incombustibile che offre il minimo ostacolo all'azione dell'esplosione, il più possibile leggera e con forma per lo più piana con ridottissima pendenza, al fine di offrire la minima resistenza alle eventuali onde esplosive provenienti da altre eventuali costruzioni limitrofe (generalmente del tipo "a sandwich" con lastre di lamiera grecata leggera dello spessore > 2 mm, e schiuma di poliuretano espanso al centro con funzione di isolante);
- sono dotati di infissi (porta di accesso e finestra/e) generalmente costituiti con telai metallici;
- presentano finestre che sono dotate di vetri, protetti all'interno e all'esterno da rete metallica con maglia da 1 cm^2 o, in alternativa, con lastre trasparenti di materiale sintetico, incombustibili ed infrangibili;
- all'interno delle costruzioni possono essere presenti solo impianti elettrici e/o di segnale non rientranti tra gli impianti "sensibili", realizzati comunque in genere al di fuori delle zone di pericolo e con componenti posti a distanza dall'LPS esterno tale da garantire isolamento elettrico tra le parti;
- eventuali impianti esterni alla struttura elettrici e/o di segnale non rientranti tra gli impianti "sensibili", risultano realizzati con componenti posti a distanza dall'LPS esterno tale da garantire isolamento elettrico tra le parti;
- all'interno delle costruzioni possono essere presenti "corpi metallici interni" (in particolare scaffalature);
- potrebbero essere presenti "corpi metallici esterni" (in particolare tubazioni o vari elementi strutturali) che entrano dall'esterno verso l'interno delle strutture.

3. La valutazione del rischio di fulminazione e di sovratensioni

L'art. 80 del d.lgs. 81/2008 prescrive che "*Il datore di lavoro prende le misure necessarie affinché i lavoratori siano salvaguardati dai tutti i rischi di natura elettrica connessi all'impiego dei materiali, delle apparecchiature e degli impianti elettrici messi a*

loro disposizione ed, in particolare, da quelli derivanti da fulminazione diretta ed indiretta e da sovratensioni" (comma 1). A tal fine, lo stesso datore di lavoro deve effettuare una specifica valutazione dei rischi (comma 2) in modo da potere adottare le misure tecniche ed organizzative necessarie ad eliminare o ridurre al minimo i rischi presenti e a determinare i dispositivi di protezione collettivi e individuali che sono necessari alla conduzione in sicurezza del lavoro (comma 3).
Tale valutazione dei rischi deve essere effettuata tenendo esclusivamente in considerazione oggi quanto prescritto dalla norma CEI EN 62305-2 "Protezione contro i fulmini – Parte 2: Valutazione del rischio" che, nel caso in esame di edifici/costruzioni che contengono esplosivi solidi o zone pericolose, darebbe molto probabilmente se non sicuramente luogo (in quanto il rischio di perdita di vite umane per fulminazione – R_1, risulterebbe sicuramente superiore al rischio "tollerabile" – R_T, previsto dalla stessa norma tecnica, proprio a causa della presenza delle sostanze esplosive) alla necessità di dovere proteggere le stesse strutture con uno specifico impianto di protezione dalle scariche atmosferiche, peraltro particolarmente performante, a vantaggio della sicurezza con "Livello di protezione contro il fulmine" (LPL) pari a LPL (condizione più restrittiva).
Nel seguito quindi si partirà dal presupposto che il datore di lavoro abbia effettuato tale valutazione del rischio di fulminazione e che debba di conseguenza procedere alla realizzazione di un impianto di protezione dalle scariche atmosferiche (LPS) con LPL a protezione della costruzione.

4. Il regio decreto 6 maggio 1940, n. 635 – allegato D

Si tratta di una norma giuridica notevolmente vincolante, che risulta ancora oggi in vigore e che costituisce il "*Regolamento per l'esecuzione del Testo Unico 18 giugno 1931, n. 773 delle Leggi di Pubblica Sicurezza*", alla quale si devono comunque necessariamente uniformare tutti gli impianti che vengono anche oggi realizzati principalmente sulla base delle norme tecniche CEI EN.
Nella parte II del relativo allegato D viene trattato l'argomento inerente alla classificazione degli edifici contenenti sostanze esplosive, che vengono distinti in:

- "Edifici e costruzioni nei quali si lavorano o si manipolano sostanze esplosive" (par. 7);
- "Edifici e costruzioni contenenti depositi di sostanze esplosive" (par. 8).

Le modalità di realizzazione dell'impianto di protezione dalle scariche atmosferiche sono invece riportate nella "appendice tecnica" allo stesso allegato D, che costituisce "*un riassunto, con i completamenti e gli adattamenti del caso di ciò che vi è di sostanziale nelle Norme per l'impianto parafulmini negli edifici militari pubblicate dalle Autorità militari competenti*".
Si tratta di "norme" molto differenti dalle norme tecniche CEI o CEI EN di più recente emanazione ma che comunque, come già precedentemente accennato, si devono applicare assieme a queste ultime, tenendo in considerazione quanto di più restrittivo, ai fini della sicurezza, è prescritto in entrambe.

4.1 L'appendice tecnica al regio decreto

Nell'appendice tecnica al regio decreto è previsto che l'LPS venga esclusivamente realizzato secondo il sistema "a schermo reticolare" ("Gabbia di Faraday" o "rete di protezione"), costituita da una rete di conduttori a sua volta composta da "organi di raccolta" R ("captatori") e da "organi di scarico" S ("calate") collegati ad un certo numero di "prese di terra" T o "organi di disperdimento" ("dispersori"); sono anche prescritti collegamenti della rete di protezione con le masse metalliche vicine.

4.2 La distanza "d" prevista dal regio decreto

In base all'appendice tecnica sopra menzionata un oggetto situato nell'interno dell'edificio può ritenersi tanto più sicuro quanto maggiore risulta il rapporto tra la sua distanza dal punto più vicino dello "schermo reticolare" (d) ed il lato del quadrato (L) di area equivalente a quella delle maglie vicine all'oggetto considerato; in particolare, nel caso di presenza di sostanze esplosive (par. 1 dell'appendice tecnica), deve verificarsi che:

$$d/L \geq 1 \qquad (1)$$

Tale condizione risulta facilmente raggiungibile con:

- l'infittimento (generale o locale, specie nella parte superiore) della rete di conduttori costituenti la gabbia, oppure
- l'allontanamento delle sostanze esplosive rispetto alla stessa rete.

Negli "edifici speciali" (par. 5 dell'appendice tecnica) che sono proprio quelli oggetto della presente memoria, è prescritto che le maglie dello schermo reticolare dovranno risultare abbastanza piccole, in modo da proteggere efficacemente tutti gli oggetti contenuti all'interno.

5. Le norme tecniche CEI 81-1 e CEI EN 62305 – LPS isolato

5.1. Generalità

In relazione agli LPS da realizzare nelle strutture con rischio di esplosione contenenti materiali esplosivi solidi o aree pericolose, poiché è necessario evitare che una parte della corrente di fulmine, anche minima, penetri nella struttura da proteggere, le norme tecniche in oggetto prevedono esclusivamente (CEI 81-1 □□□ Ediz.) o comunque "raccomandano" (CEI EN 62305-3, Allegato D) l'installazione di un LPS esterno di tipo "isolato", intendendo come tale un impianto di protezione dalle scariche atmosferiche in cui i captatori e le calate sono posizionati ed installati in modo tale che il percorso della corrente di fulmine non interessi la struttura e l'interno della stessa;

In quest'ottica un LPS esterno "isolato" risulta di conseguenza essere:

- un LPS i cui captatori e calate sono posti ad una distanza dai corpi metallici e dai circuiti interni della struttura da proteggere, uguale o superiore a quella di

una “distanza di sicurezza (s)” prescritta dalle stesse norme CEI o CEI EN, oppure

- un LPS isolato dalla struttura a mezzo di un “isolamento equivalente”, utilizzando ad esempio supporti isolanti per sostenere i componenti dello stesso LPS (i materiali isolanti utilizzati per isolare l’LPS esterno devono avere una tensione di tenuta ad impulso Ui, con forma d’onda 1,2/50 ms non inferiore a Ui ≥ 500 × s (kV) (art. 3.3.1, CEI 81-1 III Ediz.).

La realizzazione di impianti “non isolati” implicherebbe il manifestarsi di tutta una serie di problemi (verifica delle sovratemperature raggiunte dalle connessioni e dai corpi metallici a seguito del passaggio della corrente di fulmine, verifica della bontà di tutte le connessioni equipotenziali) che rendono preferibile, comunque, il ricorso ad un impianto “isolato”.
Appare evidente che, in base a quanto rappresentato occorre quindi conoscere la posizione dei corpi metallici e dei circuiti presenti all’interno della struttura, nonché valutarne le eventuali modifiche apportate nel tempo alla loro posizione. Di conseguenza risulta più comodo ed anche a vantaggio della sicurezza, porre a “distanza di sicurezza” l’LPS esterno dai soli muri esterni della struttura, ottenendo così la libertà di posizionare, modificare o estendere a piacimento i circuiti ed i corpi metallici interni (in tal caso la distanza di sicurezza da mantenere tra LPS e struttura va valutata assumendo per “L” l’altezza della struttura).
I corpi metallici esterni vanno comunque collegati all’LPS esterno alla base della struttura, sia perché essi costituiscono nella maggior parte dei casi “masse metalliche estranee”, sia perché non sarebbe in pratica possibile realizzarne l’isolamento; tale collegamento non pregiudica comunque l’isolamento fra struttura ed LPS perché, essendo realizzato alla base della stessa struttura, la corrente di fulmine non va comunque ad interessare la stessa struttura.

5.2 La distanza di sicurezza “s” prevista dalle norme tecniche

La distanza di sicurezza prevista dalle norme tecniche CEI 81-1 e CEI EN 62305-3 è la minima distanza fra le parti che realizza la condizione per la quale la tensione di tenuta dell’isolamento fra esse sia almeno uguale alla sovratensione che determinerebbe la scarica pericolosa; di conseguenza non possono verificarsi scariche pericolose fra due parti metalliche se queste sono poste ad una distanza uguale o superiore a quella di sicurezza.
Esclusivamente nelle costruzioni dotate di struttura portante metallica o realizzata in calcestruzzo armato con i ferri d’armatura elettricamente continui, non è richiesto, dalle norme tecniche CEI 81-1 e CEI EN 62305, il rispetto della distanza di sicurezza.
La distanza di sicurezza è espressa dalla seguente formula:

$$s = k_i \cdot k_c \cdot L/k_m \text{ (m)} \qquad (2)$$

dove:

k_i = coefficiente che tiene conto della corrente di fulmine in relazione al livello di protezione dell'LPS considerato (vedasi di seguito);
k_c = % della corrente di fulmine circolante nella singola calata;
k_m = coefficiente che tiene conto della rigidità del materiale isolante interposto fra le parti metalliche, riferita a quella dell'aria;
L = lunghezza della spira, misurata parallelamente alla calata (lunghezza verticale lungo la calata fra il punto in cui si intende verificare la distanza di sicurezza e la più vicina connessione equipotenziale) in metri.

I valori di k_i e k_m si possono desumere da apposite tabelle riportate nelle norme tecniche CEI 81-1 e CEI EN 62305-3, rispettivamente in funzione della classe stabilita dell'LPS che è stata ipotizzata pari a LPL □□(k_i = 1), e del materiale di cui è costituito il distanziamento (k_m).

In relazione al valore di k_c si precisa che:

- Per LPS realizzati secondo la norma CEI 81-1 III Ediz.:
  - tale valore è posto pari ad 1 (nel caso di calate non collegate al livello del suolo – tab. E1);
  - tale valore, nel caso di calate collegate al livello del suolo, deve invece essere calcolato secondo una particolare formula riportata nella legenda alla Fig. E2 della norma.
- Per LPS realizzati secondo la più recente norma CEI EN 62305 il valore di k_c è determinato attraverso una specifica tabella riportata nella stessa norma tecnica.

6. Criteri per la progettazione di un LPS

Alla luce di quanto rappresentato, per la progettazione di un LPS a protezione di strutture del tipo di quelle in oggetto, occorre quindi preventivamente valutare i valori delle distanze:

- d – "distanza" prevista dal regio decreto
- s – "distanza di sicurezza" prevista dalle norme tecniche

tenendo poi in considerazione il valore maggiore tra i due, per stabilire la distanza oltre la quale l'LPS da realizzare deve comunque necessariamente potersi ritenere "isolato".

Successivamente occorrerà individuare e descrivere le caratteristiche dell'intero LPS esterno e quindi degli "organi di raccolta" R ("captatori"), degli "organi di scarico" S ("calate"), delle "prese di terra" T o "organi di disperdimento" ("dispersori") e dei "collegamenti della rete di protezione con le masse metalliche vicine" (collegamenti equipotenziali).

Da una dettagliata analisi di quanto prescritto nell'appendice tecnica dell'allegato D del regio decreto, nella norma tecnica CEI 81-1 III Ediz. e nelle norme tecniche della serie CEI EN 62305, sono state individuate le caratteristiche più restrittive ai fini della sicurezza, in modo da potere realizzare un LPS che possa conciliare la norma giuridica del regio decreto con le norme tecniche da seguire per la realizzazione

degli impianti; tali caratteristiche verranno riassunte ed individuate nei paragrafi successivi.
Si tiene presente che, come precedentemente accennato, nel caso specifico deve essere esclusivamente realizzato un LPS "isolato", costituito da "Schermo reticolare" o "Gabbia di Faraday"; negli edifici in cemento armato, le armature metalliche possono essere usate per la costituzione dello schermo, soltanto se durante la costruzione siano state prese le precauzioni necessarie per assicurare il contatto elettrico permanente fra i vari elementi metallici (per gli LPS realizzati secondo la norma CEI 81-1 III Ediz. si devono verificare le condizioni per la continuità dei ferri prescritte all'art. 1.3.1 ed alla relativa nota, per gli LPS realizzati secondo la serie di norme CEI EN 62305 le connessioni dei ferri di armatura devono invece essere conformi al punto 4.3 della norma CEI EN 62305-3 e soddisfare i requisiti della norma EN 5064-1.).
Nel dettaglio gli LPS nei casi in oggetto dovranno essere realizzati prevedendo l'installazione dei seguenti componenti:

6.1. Le caratteristiche dei captatori

Possono essere indifferentemente adoperati:

1. Piattina Fe-Zn, spessore ≥ 2 mm – sezione ≥ 75 mm^2
2. Rete di tondino o conduttore massiccio in Fe-Zn, sezione ≥ 50 mm^2 (diametro 8 mm) (rete con maglie di lato "*non maggiore di qualche decimetro*", posta solo se possibile a d = 2 m dalla costruzione)
3. Rivestimento completo della copertura esterna con schermo di acciaio di 5 mm di spessore o equivalente (7 mm per l'alluminio) – captatore naturale

6.2. Le caratteristiche delle calate

Possono essere indifferentemente adoperati:

1. Piattina Fe-Zn, spessore ≥ 2 mm – sezione ≥ 50 mm^2
2. Rete di tondino o conduttore massiccio in Fe-Zn Sezione ≥ 50 mm^2 (diametro 8 mm) (rete con maglie di lato "*non maggiore di qualche decimetro*", posta solo se possibile a d = 2 m dalla costruzione)
3. Rivestimento completo delle pareti esterne con schermo di acciaio di 5 mm di spessore o equivalente (7 mm per l'alluminio) – calate naturali

È considerata una buona pratica collegare tra loro le calate con conduttori ad anello; a tal proposito si fa presente che i conduttori verticali dello schermo reticolare che scendono lungo le pareti dell'edificio dovranno essere collegati, nella loro parte inferiore, da un conduttore ad andamento orizzontale, che giri intorno all'edificio e che termini inferiormente la gabbia e che potrà trovarsi poco sopra il livello del suolo oppure essere addirittura immerso nel terreno (vedasi dispersore di tipo B).
Occorrerà realizzare almeno n. 1 calata per ogni sostegno perimetrale della maglia.

Non è necessario proteggere le calate per evitare pericolose tensioni di contatto in quanto, nel caso in oggetto, in generale non è prevista la presenza di persone in numero elevato o per un elevato periodo di tempo in prossimità delle stesse calate.

6.3. I collegamenti tra calate e dispersori

È previsto il solo collegamento diretto tra calate e dispersore.
I collegamenti calate – dispersori dovranno risultare in numero N:

- N ≥ 2 (nelle parti opposte dell'edificio)
- N ≥ 1 ogni 25 m di perimetro dell'area da proteggere

In particolare, si ha che:
N = 2 – fino a 50/60 m^2
N = 4 – fino a 300 m^2
N = 6 – fino a 500 m^2 + n. 1 presa di terra per ogni ulteriori 150/200 m^2 di area coperta
Per tali collegamenti si dovranno utilizzare:

1. conduttori di ferro di spessore (e quindi di sezione) notevolmente maggiore di quella delle piattine per lo schermo reticolare (piattine in Fe-Zn, spessore >> 2 mm e sezione >> 75 mm^2);
2. conduttori in rame stagnato o acciaio inossidabile;
3. conduttori di altro materiale protetti in modo efficace (guaine di piombo saldate).

Nei casi 2 e 3, per ridurre gli eventuali effetti di coppia elettrica all'attacco con lo spandente, le parti ristrette dello spandente e del conduttore devono essere rivestite con bitume.
Su ciascuna calata, in prossimità del collegamento al dispersore, deve essere previsto un punto di misura, ad eccezione del caso di calate naturali connesse ad un dispersore di fondazione.
Il punto di misura deve potere essere apribile con attrezzo e, in condizioni normali, deve rimanere chiuso. o manicotti di cemento

6.4. Ancoraggi, collegamenti e giunzioni

I captatori e le calate devono essere saldamente fissati di modo che gli sforzi meccanici, elettrodinamici o accidentali (ad esempio: vibrazioni, slittamento di placche di neve, dilatazione termica, ecc.) non possano provocare la rottura o l'allentamento dei conduttori.
I collegamenti tra captatori e calate possono essere realizzati esclusivamente in uno dei modi seguenti:

- saldatura + chiodatura o bullonatura, oppure solo
- chiodatura o bullonatura, con almeno 1 chiodo o bullone negli incroci e 2 chiodi o bulloni nelle giunzioni.

Nelle giunzioni effettuate mediante bullonatura, chiodatura o con morsetti di altro tipo, devono essere garantiti 20 mm di sovrapposizione e almeno 200 mm^2 di superficie di contatto.
Le giunzioni calate-dispersori devono invece essere realizzate esclusivamente mediante saldatura + chiodatura.
In relazione agli LPS realizzati secondo la serie di norme CEI EN 623305 il progettista e l'installatore dello stesso LPS dovrebbero specificare nelle documentazioni tecniche di supporto all'impianto, i morsetti e gli ancoraggi atti a resistere agli sforzi elettrodinamici determinati dalle correnti di fulmine nei conduttori per poter consentire le dilatazioni e contrazioni termiche previste (devono essere utilizzati componenti provati secondo la serie di norme EN 50164).

6.5. Le caratteristiche dei dispersori

Il sistema disperdente deve preferibilmente essere costituito da dispersori di Tipo B (dispersore ad anello esterno alla struttura in contatto con il suolo per almeno l'80% della sua lunghezza totale o dispersore di fondazione che formi un anello chiuso, interrato ad una profondità di almeno 0,5 m e posto possibilmente a circa 1 m dai muri perimetrali).
Possono essere aggiunti anche dispersori di Tipo A, costituiti da elementi verticali posti all'esterno della struttura (il cui numero non sia inferiore al numero delle calate con un minimo di 2), del tipo:

- Tubo in Fe-Zn, diametro esterno ≥ 40 mm, spessore ≥ 2mm, lunghezza ≥ 4 m, peso ≥ 3 kg/m
- Profilato in Fe-Zn, spessore ≥ 5 mm, dimensione trasversale ≥ 50 mm, lunghezza ≥ 4 m, peso => 3 kg/m
- Conduttore cordato in rame, sezione ≥ 35 mm^2, filo elementare con diametro da 1,8 mm (LPS realizzati secondo CEI 81-1 III Ediz.) o da 1,7 mm (LPS realizzati secondo la serie di norme CEI EN 62305).

L'intero sistema disperdente deve comunque garantire che la resistenza di terra risulti essere $R_E \leq 10$ Ohm.

6.6. I collegamenti equipotenziali

L'equalizzazione del potenziale dovrà essere effettuata solamente quando la distanza corpi metallici – schermo risulta minore o uguale alla "distanza di sicurezza" considerata.
I collegamenti equipotenziali dovranno essere effettuati, all'interno o all'esterno dell'edificio, quanto più vicino possibile al punto di ingresso dei corpi metallici nella struttura da proteggere, con conduttori "*simili a quelli adoperati per lo schermo reticolare (essendo largamente sufficienti sezioni dell'ordine di mmq 50)*", in almeno due punti (scelti tra quelli più vicini ai punti dello schermo) da realizzare mediante:

- chiodature;
- bullonature;

- collari di pressione.

Tali collegamenti dovranno essere realizzati esclusivamente a livello del suolo e faranno capo ad un collettore equipotenziale, a sua volta collegato al sistema disperdente, mediante conduttori di sezione pari a 16 mm^2 in rame, 25 mm^2 in Al, 50 mm^2 in Fe-Zn, ubicato in posizione accessibile ed ispezionabile.
In particolare:

- I collegamenti tra corpi metallici interni e collettore equipotenziale potranno essere effettuati mediante conduttori di sezione pari a 6 mm^2 in rame, 10 mm^2 in Al, 16 mm^2 in Fe-Zn.
- I collegamenti tra corpi metallici esterni e collettore equipotenziale:
  - per LPS realizzati secondo la norma CEI 81-1 III Ediz., devono essere in grado di sopportare la parte della corrente di fulmine che li attraversa, calcolata secondo l'Appendice C della stessa norma, oppure in alternativa possono anche essere utilizzati conduttori di sezione pari a 16 mm^2 in rame, 25 mm^2 in Al, 50 mm^2 in Fe-Zn).
  - per LPS realizzati con la serie di norme CEI EN 62305, devono essere realizzati con conduttori che devono potere sopportare la frazione della corrente di fulmine che li attraversa, calcolata in accordo con l'Allegato E della CEI EN 62305-1:2011.

Negli edifici in cemento armato, durante la costruzione dei quali non siano state prese le precauzioni necessarie per assicurare il contatto elettrico permanente fra i vari elementi metallici delle armature, se possibile dovranno essere collegate in più punti le stesse armature della costruzione allo schermo reticolare, considerando le armature come masse metalliche vicine allo schermo.

7. Documentazione tecnica di supporto all'LPS

In ultimo si ritiene essenziale, per poter esprimere un giudizio sulla regolarità dell'impianto di protezione dalle scariche atmosferiche installato nelle strutture in oggetto, che lo stesso risulti corredato almeno dalle seguenti documentazioni tecniche:

- Valutazione del rischio di fulminazione, ai sensi delle norme CEI 81-1 e/o CEI 81-4 e/o della norma CEI EN 62305-2
- Progetto dell'impianto di protezione dalle scariche atmosferiche (Appendice I CEI 81-1, Allegato E CEI EN 62305-3)
- Dichiarazione di conformità dell'impianto
  - alla legge 186/1968 (solo per impianti realizzati dal 13.03.1990 e fino al 26.03.2008);
  - al DM 37/2008 (solo per impianti realizzati successivamente al 27.03.2008).
- Mod. A di "denuncia" dell'impianto ai sensi del DM 12.09.1959 (all'Ispettorato del Lavoro, o all'ENPI, o alla USL, o all'ISPESL), oppure documentazione comprovante la "denuncia" dell'impianto secondo quanto prescritto dall'art. 2 del DPR 462/01, all'ISPESL/INAIL ed alla ASP/ARPA competenti per territorio

- Ultimo verbale di verifica periodica (in atto ai sensi dell'art. 4 del DPR 462/01) effettuata sull'impianto dalla ASP/ARPA competente per territorio o da organismo abilitato dal MISE

8. Conclusioni

Da quanto ampiamente esposto si comprende come affrontare e risolvere il compito di dare semplici e univoche soluzioni da rispettare nella realizzazione degli LPS al fine di far conciliare il regio decreto con le norme tecniche vigenti al momento della realizzazione degli stessi LPS non sia un compito facile, né tantomeno si ha la presunzione di poter risolvere completamente la problematica attraverso la presente memoria.
Ci si è prefissi, attraverso l'esplicitazione degli elementi fondamentali delle norme giuridiche e tecniche del settore, di stimolare i tecnici e tutti coloro che devono valutare l'idoneità dell'impianto, verso un approccio diverso alla problematica; un approccio più completo che li possa spingere ad abbandonare una visione preconcetta, nello stimolare il confronto al fine di valutare l'opportunità di eventuali perfezionamenti dei loro fondamenti progettuali per trovare idonee e opportune soluzioni alternative.

Bibliografia

[1] V. Carrescia, G. Lo Piparo. Elettroquesiti 3 – Fulmini e parafulmini. Edizioni TNE. Torino, Anno 1996

[2] Vari Autori. Indicazioni operative per le aziende del settore pirotecnico - Fabbriche, depositi di fabbriche e di vendita. *INAIL Collana salute e sicurezza.* Anno 2018

[3] INAIL Settore Ricerca, Certificazione e Verifica – Dipartimento Certificazione e Conformità dei Prodotti e Impianti "*DPR 462/01 - Guida tecnica alla prima verifica degli impianti di protezione dalle scariche atmosferiche e impianti di messa a terra*". Aprile 2012

[4] Regio decreto 6 maggio 1940, n. 635 "*Regolamento per l'esecuzione del Testo Unico 18 giugno 1931, n. 773 delle Leggi di Pubblica Sicurezza*" – Allegato "D"

[5] D.Lgs. 9 aprile 2008, n. 81 "*Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro*" e s.m.i.

[6] D.Lgs. 12 giugno 2003, n. 233 "*Attuazione della direttiva 1999/92/CE relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori esposti al rischio di atmosfere esplosive*"

[7] D.M. 22 gennaio 2008, n. 37 "*Regolamento concernente l'attuazione dell'articolo 11-quaterdecies, comma 13, lettera a) della legge n. 248 del 2 dicembre 2005, recante*

riordino delle disposizioni in materia di attività di installazione degli impianti all'interno degli edifici" e s.m.i.

[8] D.M. 19 maggio 2010 "*Modifica degli allegati al D.M. 22.01.2008, n.37, concernente il regolamento di attività di installazione degli impianti all'interno degli edifici*"

[9] D.P.R. 22 ottobre 2001, n.462 "*Regolamento di semplificazione del procedimento per la denuncia di installazioni e dispositivi di protezione contro le scariche atmosferiche, di dispositivi di messa a terra di impianti elettrici e di impianti elettrici pericolosi*"

[10] Norma CEI 81-1 "*Protezione delle strutture contro i fulmini*" III Edizione. Anno 1998

[11] Norma CEI 81-4 "*Protezione delle strutture contro i fulmini – Valutazione del rischio dovuto al fulmine"* I Edizione. Anno 1996

[12] Norma CEI EN 62305-1 "*Protezione contro i fulmini – Parte 1: Principi generali*". Anno 2013

[13] Norma CEI EN 62305-2 "*Protezione contro i fulmini – Parte 2: Valutazione del rischio*". Anno 2013

[14] Norma CEI EN 62305-3 "*Protezione contro i fulmini – Parte 3: Danno materiale alle strutture e pericolo per l persone*". Anno 2013