

Metodi statistici applicati a ispezioni e analisi di dati di linee interrate in area impianto

V. Colombo, C. Panizza, B. Bazzoni, S. Franci, E. Pitocchelli, E. Alabiso

Le linee interrate in area impianto sono per la maggior parte linee di drenaggio, aperte o chiuse (*open drain e closed drain*) oltre linee di unità di processo e di utility. Le condizioni di corrosione interna, soprattutto per le linee di drenaggio, sono di difficile previsione, in relazione alle condizioni di servizio, spesso discontinue, e alla incertezza su fluidi presenti e condizioni operative (temperatura, pressione, fluidodinamica). Anche le condizioni di esposizione esterna possono essere di difficile previsione, per esempio in relazione al caso frequente di accoppiamento galvanico con la rete di terra. Il materiale da costruzione del *piping* è prevalentemente acciaio al carbonio o basso legato, ma sono spesso presenti anche linee in acciaio inossidabile. Il rischio associato a eventuali eventi di corrosione e perdita di integrità delle linee è comunque sempre elevato in relazione ai requisiti di sicurezza e soprattutto di tutela ambientale. In questo scenario, il ricorso a estese campagne ispettive è d'obbligo e frequente. L'esecuzione di campagne ispettive è comunque resa difficile dalla scarsa accessibilità del *piping* in area impianto; anche il ricorso a scavi spesso è ostacolato dalla presenza di pavimentazione o prossimità ad apparecchiature, o requisiti di sicurezza (per esempio in aree antideflagranti). In questo scenario, ENI, in collaborazione con CESCOR, ha sviluppato una metodologia per l'ottimizzazione delle ispezioni, all'interno di un tipico processo di Risk Based Inspection (RBI), basato su metodi statistici, applicati sia in fase di campionamento, per limitare il numero di scavi e la lunghezza del campione, sia in fase di elaborazione dei dati, per incrementare il livello di confidenza dei risultati. La memoria descrive la metodologia messa a punto, soffermandosi in particolare sull'applicazione di metodi statistici all'analisi di misure spessimetriche con tecnica a ultrasuoni.

PAROLE CHIAVE: ANALISI STATISTICA, ISPEZIONI, VALORI ESTREMI, DISTRIBUZIONE DI GUMBEL – STATISTICAL ANALYSIS, INSPECTIONS, EXTREME VALUES, GUMBEL DISTRIBUTION;

INTRODUZIONE

L'approccio Risk Based Inspection (RBI) viene applicato regolarmente per la corretta gestione delle infrastrutture per la produzione di olio e gas, in particolare di impianti di trattamento, reti di raccolta e condotte, con l'obiettivo di assicurare integrità degli asset in tutte le fasi di progetto. La metodologia RBI è trattata dettagliatamente da più norme internazionali, per esempio API [1,2] e DNV [3], e nel caso di ENI da *Company Standard* dedicate.

Questa memoria discute un caso specifico di RBI, applicato al *piping* interrato di impianti di trattamento olio e gas. Si tratta di linee, per lo più di diametro piccolo o medio-piccolo (compresi tra 2" e 6"), di unità di processo e utility. Tra il *piping* di processo, un peso particolare hanno di norma i drenaggi, aperti o chiusi. Queste sono linee, spesso con funzionamento intermittente, che convogliano fluidi a volte non perfettamente identificabili dal punto di vista della composizione, potenzialmente esposte a corrosione sia interna sia esterna.

La corrosione esterna viene prevenuta con l'applicazione di

**Vittorio Colombo, Cristina Panizza,
Bruno Bazzoni**

Cescor S.r.l., Via Maniago 12, 20134 Milano, Italia

**Stefano Franci, Erik Pitocchelli,
Emanuele Alabiso**

Eni S.p.A., San Donato Milanese (MI), Italia

un rivestimento anticorrosivo di norma in combinazione con la protezione catodica. Quest'ultima, tuttavia, all'interno di aree impianto, non sempre è di facile attuazione sia per la presenza di ostacoli alla corretta distribuzione di corrente, come per esempio le fondazioni in calcestruzzo, sia per la presenza di rete di terra, da cui viene drenata molta della corrente erogata dai sistemi di protezione. In assenza di protezione catodica, la rete di terra se di rame nudo, è responsabile di un effetto aggravante sulla corrosione di *piping* in acciaio per effetto di accoppiamento galvanico. La corrosione interna dipende invece dai fluidi veicolati e dalle condizioni operative, oltre che dal materiale del *piping*. Le due modalità di corrosione, interna ed esterna, avvengono in modo indipendente, senza alcuna relazione tra le due. In entrambi i casi, l'effetto della corrosione si manifesta tipicamente come perforazione della parete del tubo e conseguente perdita di impervietà della linea.

Lo sversamento di fluidi, in particolare idrocarburi, non è ritenuto accettabile e richiede di essere evitato. Le ispezioni sono parte integrante del processo di RBI e se correttamente effettuate consentono di conoscere con un ragionevole grado di confidenza lo stato di integrità delle linee. I metodi ispettivi sono svariati ^[4], ma le tecniche più comuni sono l'ispezione visiva (o Close Visual Inspection – CVI); la spessimetria a ultrasuoni (UT); le onde guidate (GW). In tutti i casi, è comunque richiesta l'accessibilità alle linee. Per le linee interrate si tratta quindi di effettuare scavi per accedere alle linee, e questo oltre che costoso risulta spesso ostacolato dalla presenza di pavimentazione e dalla limitata accessibilità delle aree.

In questo contesto, per massimizzare il rapporto costi benefici dell'analisi di Risk Based Inspection, si è ritenuto intervenire nelle seguenti aree:

- approfondire l'analisi di corrosione, sia esterna sia interna, così da ordinare le linee rispetto alla loro probabilità di perforazione;
- applicare criteri statistici per ottimizzare la dimensione del campione di linee da ispezionare;
- applicare la statistica all'analisi dei risultati ispettivi.

Viceversa, non è stata approfondita l'analisi delle conseguenze, ritenendo in ogni caso non accettabile a priori lo sversamento di fluidi.

La procedura messa a punto è stata applicata a un centro olio produttivo in esercizio e in questa sede viene riportata una sintesi dei risultati.

L'INSIEME DELLE LINEE E L'ANALISI DI CORROSIONE

Le caratteristiche dell'insieme delle linee oggetto dell'analisi RBI, aggregate per *corrosion loop* omogenei, sono riassunte nella tabella 1. Si è trattato complessivamente di oltre 500 linee interrate, per lo più drenaggi idrocarburici e amminici, per complessivi 7500 m circa di lunghezza, lunghezza e diametro medio rispettivamente di 14 m circa e 2,7 pollici, di cui circa il 60% in acciaio al carbonio e la quota restante in acciaio inossidabile AISI 316L. L'età media dell'insieme delle linee era pari a 24,2 anni.

Tab.1 - Fluidi, materiali, numero di linee e lunghezza / *Fluids, materials, numbers of lines and length.*

Corrosion Loop	Materiale	Linee	
		Numero	Lunghezza (m)
Glicole - esausto e rigenerato	acciaio al carbonio	61	758,5
Multifase	acciaio al carbonio	10	904,8
Olio trattato	acciaio al carbonio	1	30
Drenaggi - idrocarburi leggeri acidi e oleosi	acciaio al carbonio	48	702,5
Drenaggi amminici	acciaio al carbonio	107	709,9
	AISI 316 L	12	582
Acqua di reiniezione trattata	acciaio al carbonio	167	1620,1
Drenaggi freddi - idrocarburi leggeri e oleosi	AISI 316 L	83	1497,3
Drenaggi propano	AISI 316 L	2	3,1
	acciaio al carbonio	28	659,2
Hot oil	acciaio al carbonio	4	53
Totali		523	7520

L'analisi di rischio delle linee è effettuata avendo identificato nella corrosione il principale processo di degrado nel tempo delle linee stesse. I possibili danneggiamenti delle linee oggetto di studio sono stati analizzati:

- per la corrosione interna, in relazione al fluido trasportato, alle condizioni operative e al materiale;
- per la corrosione esterna, in relazione alla corrosività del terreno, al tipo di rivestimento e alla stima di degrado nel periodo di esposizione, al potenziale misurato nell'area della linea per valutare l'entità di possibili fenomeni di accoppiamento galvanico (le linee in esame non sono protette catodicamente).

A tutte le linee è stato assegnato lo stesso livello di criticità delle conseguenze, identificate nello sversamento del fluido convogliato a seguito di perforazione e perdita di impervietà di parete. Pertanto, l'analisi di rischio nel caso in esame viene di fatto determinata dalla probabilità di *failure* (*probability of failure*, POF) per corrosione.

Per la corrosione interna sono stati identificati i seguenti meccanismi:

- corrosione da CO₂;
- corrosione localizzata da CO₂/H₂S;
- corrosione microbiologicamente indotta (MIC);
- corrosione da ammine.

Per tutte le linee è stato effettuato un calcolo della velocità di corrosione attuale, CR, sia interna sia esterna. Le velocità di corrosione interna variano da 0,005 mm/anno per servizi non corrosivi a 1,5 mm/anno per servizi corrosivi. Per la corrosione esterna è stato considerato un valore massimo pari a 0,3 mm/anno per tutte le linee in acciaio al carbonio corrispondente allo scenario peggiore di accoppiamento galvanico con la rete di terra. In assenza di dati ispettivi pregressi, per la stima della velocità di corrosione è stato adottato un approccio conservativo, volto a distinguere le linee tra loro e quindi ordinarle dal punto di vista della probabilità di corrosione, piuttosto che a prevedere esattamente l'effettiva velocità dei processi corrosivi. Si è quindi calcolato il parametro RT, come rapporto tra spessore consumato e spessore totale di parete:

$$R_T = \frac{t_{CONS}}{t} = \frac{CR \times OL}{t} \quad [1]$$

dove:

- CR è la velocità di corrosione, in mm/anno
t è lo spessore di parete della linea, in mm
t_{CONS} è lo spessore di parete consumato, in mm
OL è la operating life (anni) di ciascuna linea (calcolata come differenza tra l'anno di esecuzione dell'analisi e l'anno di posa e avviamento della linea).

Per $R_T < 1$ la linea non si prevede sia perforata; viceversa, per $R_T \geq 1$. Per ciascuna linea è stata stimata una criticità dal punto di vista della corrosione interna e una dal punto di vista della corrosione esterna secondo le regole riportate in tabella 2.

Tab.2 - Criteri di assegnazione di criticità delle linee sulla base del valore del parametro R_T / *Criteria for the assignment of lines criticality based on parameter R_T .*

	Criticità	Intervallo R_T
A	Molto Alta	$1,2 < R_T < 1,5$:
B	Alta	$0,9 < R_T < 1,2$:
C	Media	$0,6 < R_T < 0,9$:
D	Bassa	$0,3 < R_T < 0,6$:
E	Molto Bassa	$0 < R_T < 0,3$:

I risultati dell'analisi di corrosione, interna ed esterna, effettuata su 523 linee, sono riassunti nella tabella 3. Poco meno del 50% delle linee sono risultate al livello di criti-

cià trascurabile, popolato soprattutto dalle linee in AISI 316L la cui probabilità di corrosione risultava molto bassa.

Tab.3 - Sintesi dei risultati dell'analisi di criticità dell'insieme delle linee / *Summary of the results of the criticality analysis of the lines.*

Criticità		N. Linee				
		Corr. Interna		Corr. Esterna		Totali
		Acciaio al carbonio	AISI 316L	Acciaio al carbonio	AISI 316L	
A	Molto Alta	72	0	103	0	175
B	Alta	0	0	20	0	20
C	Media	1	0	10	0	11
D	Bassa	16	36	27	0	79
E	Molto Bassa	19	216	3	0	238
Totali		108	252	163		523

LA DEFINIZIONE DEL CAMPIONE SIGNIFICATIVO

Come detto sopra, l'esecuzione di ispezioni delle linee oggetto dell'analisi richiede che siano effettuati scavi all'interno dell'area impianto, molto impegnativi sia economicamente sia logisticamente. Per ottimizzare il numero di scavi, il numero di ispezioni e i tempi esecutivi, il piano ispettivo è stato limitato alle linee con livello di criticità A-Molto Alta, B-Alta e C-Media, escludendo le linee con criticità D-Bassa e E-Molto Bassa. Per ottimizzare ulteriormente la dimensione del campione di linee da ispezionare si è fatto ricorso metodi statistici, e in particolare alla metodologia proposta dalla norma ASTM E 122-07 [5] per la determinazione di un campione significativo e rappresentativo.¹

Per applicare il modello ASTM è necessario definire le dimensioni del *difetto critico significativo*, cioè un difetto rilevabile e con dimensioni tali da poter ipotizzare un innesco di attacco corrosivo. Relativamente ai difetti attesi, sulla base dell'analisi condotta per le linee in esame, si sono formulate le seguenti assunzioni:

- la morfologia più probabile è di tipo localizzato;
- il fattore di localizzazione probabile, espresso come rapporto tra lunghezza e profondità dell'attacco localizzato, si stima essere intorno a 10. Le dimensioni probabili degli attacchi corrosivi sono: $P_{DIFETTO} \approx 2 \div 5$

mm; $L_{DIFETTO} \approx 20 \div 50$ mm;

- la posizione più probabile attesa per gli attacchi corrosivi interni si situa sul fondo della linea (ore 6).

Si assumono quindi i seguenti parametri per definire il difetto critico *significativo*:

- morfologia difetto: difetto in cui $L/p \approx 10$ indice di innesco di un fenomeno di corrosione;
- $L_{DIFETTO}$: 25 mm;
- $P_{DIFETTO}$: 2,5 mm.

Nel contesto in esame, la tecnica più idonea per l'esecuzione di ispezioni interne è la misura di spessore mediante ultrasuoni (UT), le posizioni significative da indagare sono quelle sulla generatrice inferiore del tubo (ore 6). Per quanto riguarda la corrosione esterna invece la prima indagine da effettuare è l'ispezione visiva seguita da quella UT in caso di evidenza di difetti. Ipotizzando una lunghezza media di 25 mm per ogni difetto significativo in un metro di tubazione si possono avere teoricamente 40 posizioni lineari (campioni) da indagare.

Per i meccanismi attesi di corrosione interna ed esterna, sulla base del numero di difetti attesi, sono stati definiti gli intervalli numerici riportati in tabella 4.

¹ Accanto alla metodologia ASTM è stato applicato anche il modello Cannon-Roe [6] per la determinazione di un campione, che se analizzato e privo di difetti permetta di estendere il risultato all'intera popolazione. La trattazione con il modello Cannon-Roe viene qui omessa per ragioni di spazio.

Tab.4 - Distanza attesa difetti di corrosione interna ed esterna / *Expected distance for internal and external corrosion defects.*

	Criticità	N. attacchi al metro	N. attacchi al metro
		Interno	Esterno
A	Molto Alta	1	0,2
B	Alta	0,2	0,1
C	Media	0,1	0,02

In accordo a ASTM E 122-07, il numero minimo di misurazioni da acquisire, nell'ipotesi che la distribuzione dei difetti significativi segua un andamento associabile a quello del-

la normale standard, può essere calcolato con la formula seguente:

$$n = \frac{Z^2 \sigma_0^2}{E^2} \quad [2]$$

dove:

- n dimensione del campione
- E errore standard, massima differenza accettabile tra la media reale e quella calcolata sul campione
- Z fattore dipendente dall'intervallo di confidenza desiderato o atteso:
 - Confidenza 90%: z = 1,64
 - Confidenza 95%: z = 1,96
 - Confidenza 99%: z = 2,576

σ : deviazione standard stimata, fornisce una previsione della variabilità.

Tra i termini dell'equazione precedente il valore di deviazione standard (σ) è molto difficile da ipotizzare a priori, mentre, sulla base dell'esperienza, è più facile fare una stima della percentuale attesa (P_0) di misure anomale o difetti significativi. Se l'indagine vuole essere volta alla ricerca del numero di difetti anomali il valore di deviazione standard (σ) può essere sostituito come segue:

$$\sigma^2 = P_0(1 - P_0) \quad [3]$$

dove:

P Prevalenza attesa, percentuale di difetti anomali

Pertanto, la precedente equazione può essere scritta come segue:

$$n = \frac{Z^2 P_0(1 - P_0)}{E^2} \quad [4]$$

I risultati ottenuti in termini di numerosità dei campioni statisticamente significativi devono essere quindi convertiti in lunghezze di linea da ispezionare, L, in base alle

spaziature di esecuzione delle misure, S. I risultati sono riportati nella tabella 5.

Tab.5 - Lunghezze da ispezionare. Livello di confidenza preferibile. Corrosione interna / *Length to be inspected. Preferred confidence level. Internal corrosion.*

	Criticità	L _{tot} (m)	Conf.	n misure	S (mm)	L (m)	%
Corrosione interna							
A	Molto Alta	756	99%	632	100	63,2	8,4
B	Alta	13,3	99,9%	532	25	13,3	100,0
C	Media	21,7	99,9%	868	25	21,7	100,0
Corrosione esterna							
A	Molto Alta	1385,7	99%	2856	25	71,4	5,1
B	Alta	843,2	99%	5726	25	143,1	17,0
C	Media	966,8	99,9%	114748	25	966,8	100,0

ISPEZIONI EFFETTUATE E RISULTATICampione ispezionato

Il campione di linee ispezionate è stato in realtà più nu-

meroso di quello minimo calcolato. L'estensione delle ispezioni effettivamente condotte nel periodo 2021-2024 è riassunta nella tabella 6.

Tab.6 - Lunghezze da ispezionare / *Length to be inspected.*

Parametro	Ispezioni interne	Ispezioni esterne
Corrosion loop totali	N. 15	
Corrosion loop con linee ispezionate	N. 10	
Numero totale linee	N. 523	
Numero linee ispezionate (percentuale sul totale)	N. 42 (8%)	
Lunghezza totale linee	7520 m	
Lunghezza totale linee ispezionate (percentuale sul totale)	3105 m (41,3%)	3105 m (41,3%)
Lunghezza totale tratti ispezionati (percentuale sul totale)	688 m (9,1%)	835 m (11,1%).

Tecniche

Sono state adottate le seguenti metodologie ispettive:

- misure di spessore con tecnica a ultrasuoni (UT);
- ispezione del rivestimento anticorrosivo esterno. Essa comprende:
 - valutazione visiva;
 - valutazione adesione del rivestimento in prossimità dei lembi;
 - valutazione adesione del rivestimento mediante martellatura;

- controllo spessimetrico a campione;

- HV Spark test.

- Ispezione visiva esterna della superficie metallica dopo rimozione del rivestimento;
- test idraulico.

Misure UT. Elaborazioni statistiche

Le misure spessimetriche UT, che hanno costituito l'attività ispettiva più cospicua, sono state effettuate per rilevare attacchi di corrosione presenti all'interno

della linea, non accessibile visivamente. La presenza invece di corrosione esterna e la misura della profondità dell'attacco corrosivo sono stati invece rilevati mediante ispezione visiva e calibro. Per ciascuna linea ispezionata è stato prodotto un report di ispezione interna, basato su misure UT, e un report di ispezione esterna.

In fase di elaborazione dei dati UT, per ciascun report di ispezione è stato effettuato il riesame di tutte le misure anche allo scopo di individuare eventuali set di misure anomale. Si è deciso di escludere dalle elaborazioni statistiche tutte le misure effettuate su componenti diverse dai tubi, in particolare: curve, tee e riduzioni. Le misure in corrispondenza di questi componenti presentano infatti spessori spesso diversi rispetto a quelle dei tubi e, per una stessa sezione, diverse nelle varie posizioni di misura. Le elaborazioni sono state quindi condotte unicamente per le misure su tubi.

Le elaborazioni statistiche sono state effettuate con l'obiettivo di determinare l'entità della perdita di spessore della parete dei tubi della linea, da cui poi calcolare la velocità media di corrosione nel periodo di operatività della linea, stimato come differenza tra la data di esecuzione dell'ispezione e quella di posa della linea. Il calcolo dello spessore corrosivo è reso difficile da una serie di fattori che compongono il valore misurato. Questi comprendono:

- le tolleranze dimensionali;
- l'ovalizzazione dei tubi;
- lo scarto tra spessore nominale e spessore effettivo;
- l'errore nell'esecuzione della misura.

Un secondo aspetto riguarda la possibilità di avere effettuato le misure spessimetriche non nelle posizioni dove la corrosione era più severa. Questo rischio è significativo perché le forme di corrosione attese sono prevalentemente di tipo localizzato: interessano cioè una regione piccola di superficie, nell'ordine di pochi

centimetri quadrati, e la probabilità di mancare tali posizioni è tanto più elevata quanto più è grande la spaziatura tra le misure. In questo scenario viene in aiuto la statistica e in particolare la statistica dei valori estremi. Questa consente di stimare probabilisticamente, nota la distribuzione dei valori estremi, l'entità del valore massimo dello spessore corrosivo.

I test idraulici, effettuati su tutte le 42 linee ispezionate, hanno confermato l'assenza di perdite.

Procedura di elaborazione dei dati

Per ciascun set di dati sono stati calcolati:

- il valore medio;
- la deviazione standard;
- il valore massimo.

Dai dati spessimetrici è stato quindi generato un insieme di valori designato spessori corrosi, calcolato come differenza tra valore misurato e spessore medio calcolato. Di norma, come spessore medio si è considerata la media di tutte le misure. Da questo insieme è stato generato il sottoinsieme di valori, cambiati di segno, per i quali la differenza tra valore misurato e spessore medio risultava minore di zero. È stato quindi generato un ulteriore sottoinsieme, designato valori estremi, costituito dal valore massimo di spessore corrosivo ogni sotto-lotto di 120 misure di spessore corrosivo. In questo modo si è ottenuto un insieme di dati adeguatamente popolato e rappresentativo dei difetti massimi e più critici con il quale poter fare considerazioni statistiche. Per i due insiemi, spessori corrosi e valori estremi, sono stati calcolati i seguenti parametri:

- media spessori corrosi e media valori estremi, μ ;
- deviazione standard (Dev. Std), σ ;
- valore massimo (Max);
- coefficiente di Variazione, CV;

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad [5]$$

- coefficiente distribuzione di Gumbel, α , dove

$$\alpha = \frac{\sigma}{1,28} \quad [6]$$

Coefficiente distribuzione di Gumbel, λ

$$\lambda = \mu - 0,58 \cdot \sigma \quad [7]$$

- spessore massimo corrosivo corrispondente alla probabilità del 99 % x_{MAX} ($p=0,990$);
- spessore massimo corrosivo corrispondente alla probabilità del 99,9 % x_{MAX} ($p=0,999$);
- anni di esercizio (differenza tra anno di esecuzione ispezione e anno di posa);
- velocità di corrosione massima, $V_{CORR-MAX}$ calcolata

(rapporto tra x_{MAX} ($p=0,999$) e anni di esercizio).

I parametri α , λ , x_{MAX} sono relativi alla distribuzione dei valori estremi di Gumbel, qui adottata per calcolare, come coda della distribuzione, il valore massimo dello spessore corrosivo nella linea, con probabilità del 99% e del 99,9%, in accordo alle seguenti espressioni:

$$x_{MAX}(p = 0,990) = \lambda + 4,6 \cdot \alpha \quad [8]$$

$$x_{MAX}(p = 0,999) = \lambda + 6,6 \cdot \alpha \quad [9]$$

Le funzioni densità di probabilità, $f_G(x)$, e probabilità cumulata, $F_G(x)$, per la distribuzione di Gumbel sono date

dalle seguenti espressioni:

$$f_G(x) = \frac{1}{\alpha} e^{\left[-\left(\frac{x-\lambda}{\alpha} \right) - e^{-\left(\frac{x-\lambda}{\alpha} \right)} \right]} \quad [10]$$

$$F_G(x) = e^{-\left(\frac{x-\lambda}{\alpha} \right)} \quad [11]$$

Nella figura 1 sono riportati esempi di distribuzioni di Gumbel, relative a una linea (drenaggio amminico V380-051-DG-6"-11G-B), elaborate a partire da tutte le misure spessimetriche disponibili (8216 valori) e per i valori estremi di ciascun lotto di 120 misure (69 valori). L'effetto della dimensione dei sotto-lotti di misure da cui sono stati estratti i valori estremi, che nel caso in esame è stato di 120 misure, è complesso, e dipende dalle caratteristiche statistiche degli insiemi di partenza. La funzione densità di probabilità dei valori estremi di norma presenta un massimo sposta-

to a destra rispetto a quello ottenuto dall'insieme di tutti i valori, come si vede nel caso illustrato in figura 1. Tuttavia, i parametri di interesse, cioè i valori di spessore massimo corrosivo, x_{MAX} ($p=0,990$) e x_{MAX} ($p=0,999$), sono determinati dalle code della distribuzione, che dipendono dalla dispersione dei dati. Un esempio di più distribuzioni calcolate per diversi valori C adottati per la definizione della dimensione del sotto-insieme di misure (valori estremi per lotti di 40, 80, 120, 160 misure) è illustrato nella figura 2.

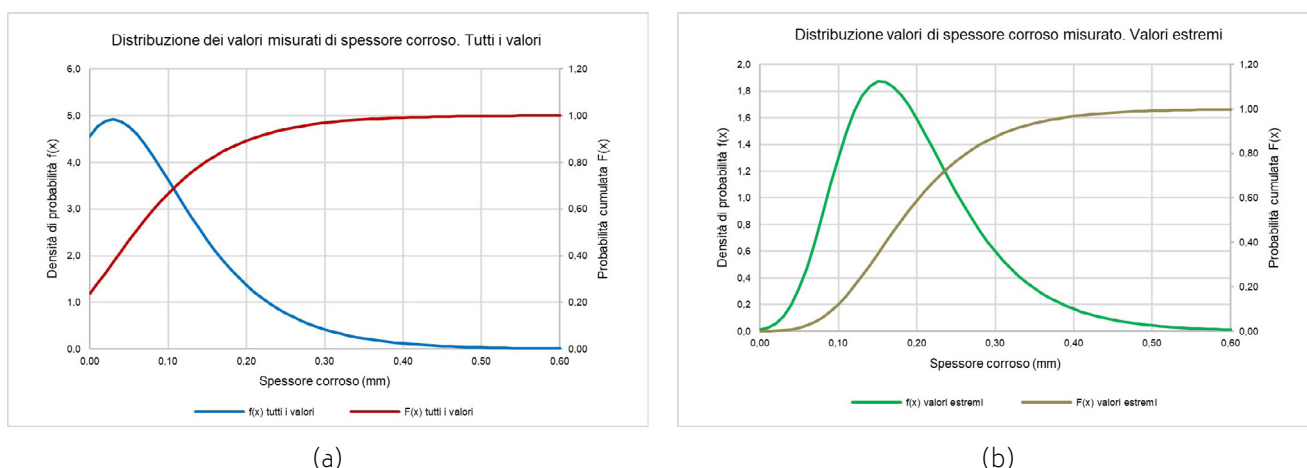


Fig.1 - Distribuzioni di Gumbel: (a) tutti i valori misurati; (b) valori estremi di lotti di 120 misure / *Gumbel distribution: (a) all measured values; (b) extreme values on 120 measures.*

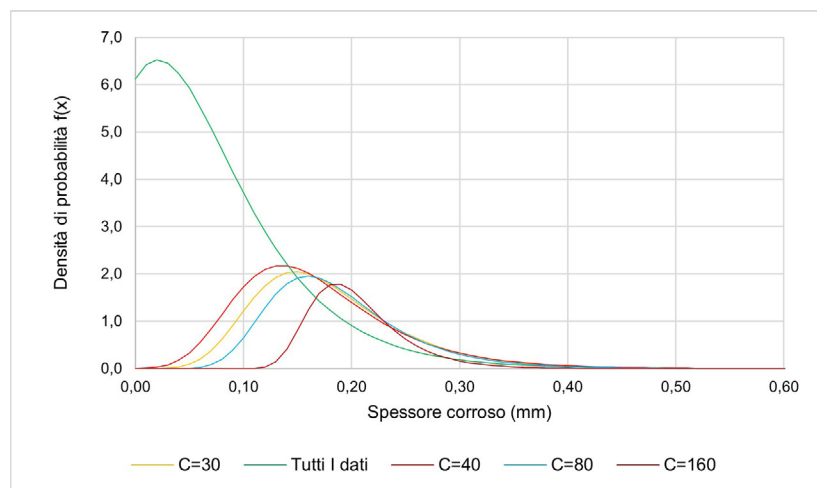


Fig.2 - Distribuzioni di Gumbel per diversi valori della dimensione del campione C /
Gumbel distribution for different values of dimension of sample C.

Riclassificazione del rischio di corrosione

Per tutte le linee ispezionate, è stata calcolata la velocità di corrosione massima, $V_{\text{CORR-MAX}}$ come rapporto tra penetrazione massima x_{MAX} ($p=0.999$) e il numero di anni di

esercizio. Sulla base dei valori di velocità di corrosione massimi dedotti dai risultati ispettivi, e assegnati a ciascun corrosion loop, l'insieme delle linee è stato riclassificato in accordo ai criteri illustrati nella tabella 7.

Tab. 7 - Criteri di riclassificazione sulla base delle velocità di corrosione /
Reclassification criteria on the basis of the corrosion rate.

$V_{\text{CORR-MAX}}$	Classe di corrosione
$V_{\text{CORR-MAX}} < 50 \mu\text{m/anno}$	Trascurabile
$50 < V_{\text{CORR-MAX}} < 100 \mu\text{m/anno}$	Bassa
$100 < V_{\text{CORR-MAX}} < 200 \mu\text{m/anno}$	Media
$200 < V_{\text{CORR-MAX}} < 500 \mu\text{m/anno}$	Alta
$V_{\text{CORR-MAX}} > 500 \mu\text{m/anno}$	Molto alta

Si è quindi calcolato lo spessore consumato, come prodotto della velocità di corrosione per il tempo di esposizione, per tre diversi scenari: al 2024, al 2029 (a 5 anni) e al 2034 (a 10 anni), e per ciascuna linea si è calcolato il valore del parametro R_T nei tre scenari sopra definiti.

Per ciascuno degli scenari considerati, sulla base del valore assunto dal parametro R_T , si è assegnata a ciascuna

linea la classe di criticità in accordo agli stessi criteri adottati nel 2022. I risultati sono riassunti nella tabella 8. Si fa notare che le velocità di corrosione disponibili per attribuire le criticità a partire dal 2024 si basano sui dati ispettivi e non su quelli dei modelli teorici come fatto nel 2022. Questo comporta una differenza e una maggiore precisione nell'assegnazione delle criticità alle singole linee.

Tab. 8 - Distribuzione delle linee nelle Classi di Rischio di corrosione interna. Analisi 2022 e ricalcolo casi 2024, 2029 e 2034 / *Distribution of the lines in the risk classes for internal corrosion. 2022 assessment and recalculation for 2024, 2029 and 2034.*

Criticità		Criticità			
		2022	2024	2029	2034
A	Molto Alta	72	0	0	6
B	Alta	3	3	6	0
C	Media	8	3	5	40
D	Bassa	86	105	130	123
E	Trascurabile	354	412	382	354
Totali		523	523	523	523

Ulteriori attività ispettive, già pianificate per i prossimi anni, potranno modificare i risultati degli scenari previsionali a 5 e a 10 anni, così come è avvenuto tra il 2022 e il 2024 a seguito delle ispezioni effettuate.

CONCLUSIONI

La procedura RBI messa a punto e applicata per la valutazione dello stato di integrità delle linee interrate all'interno di un'area impianto ha consentito di massimizzare i risultati delle attività ispettive in termini di conoscenza dello stato delle strutture.

L'applicazione di metodi statistici si è confermata fruttuosa. Nella fase di dimensionamento del campione utile sui cui effettuare le ispezioni fornisce un supporto alle

considerazioni basate sulla sola esperienza o sul buon senso. Anche se l'applicazione di algoritmi richiede la definizione di parametri complessi, come la dimensione prevista dei difetti o il numero di difetti attesi, i metodi di campionamento statistico forniscono una base razionale per decidere l'estensione delle campagne ispettive; allo stesso tempo, nulla impedisce di adottare criteri conservativi, come fatto nel caso riportato, estendendo le dimensioni del campione per le ispezioni.

Ancora più importante è l'impiego della statistica nell'analisi dei risultati ispettivi, dove l'utilizzo di distribuzioni di valori estremi consente di ovviare alle incertezze dei metodi ispettivi nell'individuare correttamente la presenza di difetti e la loro dimensione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] API RP 581 – Risk Based Inspection Technology
- [2] API RP 571 – Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry
- [3] DNV-RP-G101 – Risk Based Inspection of Offshore Topsides Static Mechanical Equipment
- [4] DNV-RP-G103 – Non-Intrusive Inspection.
- [5] ASTM E 122-07 – Standard Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With Specified Precision, the Average for a Characteristic of a Lot or Process
- [6] Luciano Lazzari – Engineering Tools for Corrosion. Design and Diagnosis – EFC Publication n. 68 – 2017.
- [7] Kowaka M, Tsuge H, Akashi M, Matsumura K, Ishimoto H. An introduction to life prediction of industrial plant materials—application of extreme value statistical method for corrosion analysis. New York: Allerton Press; 1994.
- [8] Gumbel EJ. Statistics of extremes. New York: Columbia University Press; 1958.
- [9] Kottogoda NT, Rosso R. Statistics, probability and reliability for civil and environmental engineers. New York: McGraw-Hill International Editions; 1998.

Statistical methods applied to inspections and data analysis of buried pipes in plant areas

The underground lines within the plant area are mostly drainage lines, either open or closed (open drain and closed drain), as well as process and utility lines. Internal corrosion conditions, especially for drainage lines, are difficult to predict due to service conditions that are often discontinuous and uncertainties regarding the fluids present and operating parameters (temperature, pressure, fluid dynamics). External exposure conditions can also be hard to foresee, for example due to the frequent occurrence of galvanic coupling with the grounding network. The piping construction material is predominantly carbon steel or low-alloy steel, although stainless steel lines are also commonly present. The risk associated with potential corrosion events and loss of line integrity is always high, given the safety requirements and especially environmental protection concerns. In this context, extensive inspection campaigns are both necessary and frequent. However, conducting inspection campaigns is challenging due to the limited accessibility of piping within the plant area; excavation is often hindered by pavement, proximity to equipment, or safety requirements (e.g., in explosion-proof areas). In this scenario, ENI, in collaboration with CESCOR, has developed a methodology for optimizing inspections within a typical Risk-Based Inspection (RBI) process. This methodology is based on statistical methods applied both during the sampling phase—to limit the number of excavations and sample length—and during data processing—to increase the confidence level of the results. This paper describes the developed methodology, focusing in particular on the application of statistical methods to the analysis of thickness measurements using ultrasonic testing techniques.

KEYWORDS: STATISTICAL ANALYSIS; INSPECTIONS; EXTREME VALUES; GUMBEL DISTRIBUTION;

[TORNA ALL'INDICE >](#)