

Valutazione dello stato di corrosione di tubazioni interrate in acciaio in presenza di correnti vaganti

F. Duranti, L. Lazzari, F. Marelli, S. Tani

La memoria illustra le indagini e le metodologie impiegate per la stima delle condizioni di corrosione di tubazioni interrate in presenza di correnti vaganti disperse da impianti di trazione elettrica. Il campionamento è stato effettuato con criterio di "cluster", cioè relativo a famiglie omogenee delle zone della rete idrica con diversa potenzialità di interferenza. In ciascun sito sono state eseguite registrazioni del potenziale, misure di caduta ohmica laterale per l'estrapolazione del potenziale vero, la misura della resistività del terreno secondo il metodo Wenner, analisi chimica del terreno (pH, cloruri e solfati sull'estratto acquoso). I risultati sono stati elaborati al fine di definire il rischio di corrosione nelle zone in prossimità delle fonti di interferenza. La valutazione del rischio di corrosione è stata basata su indici definiti sulla base di: potenziale medio e notturno; potenziale in corrispondenza alla deviazione standard $+2\sigma$; permanenza temporale delle condizioni anodiche e la stima della velocità di corrosione calcolata con il metodo della polarizzazione lineare. Il modello proposto e discusso si è dimostrato di agevole applicazione e ha permesso di classificare in ordine di rischio di corrosione le zone investigate.

PAROLE CHIAVE:

acciaio, corrosione, prove non distruttive

INTRODUZIONE

Le reti metalliche interrate, per esempio reti cittadine di distribuzione del gas e dell'acqua, sono esposte al rischio di corrosione se non adeguatamente protette con sistemi di prevenzione e controllo della corrosione. Le ragioni per cui si possono instaurare condizioni di corrosione non trascurabili sono riassumibili nelle seguenti [1]:

- corrosività dei terreni attraversati per presenza di umidità associata alla disponibilità di ossigeno. Tale corrosività dipende da numerosi fattori che possono essere riassunti in:
 - presenza di sali, in particolare cloruri e solfati
 - resistività (definita dalla presenza di acqua e di sali)
 - disomogeneità del terreno, con zone a elevato apporto di ossigeno (ghiaiose e sabbiose) e zone anaerobiche, come le argille
- condizioni di interferenza elettrica provocate da impianti di protezione catodica o dalle correnti disperse dagli impianti di trazione elettrica.

Sono stati proposti diversi modelli di previsione della condizione di corrosione nei terreni, basati sui fattori sopra elencati; per esempio, si veda in [2] per una breve rassegna di alcuni di essi.

Una valutazione di massima è stata anche proposta in una normativa europea [3-5].

I modelli fino ad ora proposti hanno considerato la presenza di correnti vaganti come un fattore aggravante, senza tuttavia definirne la reale entità. Gli standard internazionali, per esempio [6], fornisce un criterio di accettabilità della interferenza senza quantificare l'entità del rischio di corrosione nei termini di velocità di corrosione attesa.

Questa memoria presenta una metodologia per la stima della velocità di corrosione attraverso la misura dei parametri del terreno e il campo elettrico causato dalle correnti vaganti.

MODELLO PER LA STIMA DELLA CORROSIVITÀ

La stima del rischio di corrosione è stata basata su un modello che prevede le seguenti misurazioni:

- Registrazione 24 ore del potenziale delle tubazioni (frequenza di campionamento di 1 Hz) compreso il periodo notturno in cui le correnti vaganti disperse dagli impianti di trazione elettrica sono assenti
- Registrazioni a due canali per l'acquisizione contemporanea del potenziale e della caduta ohmica laterale
- Valutazione del potenziale vero delle tubazioni con il metodo della estrapolazione [7-8] o in assenza della misura come potenziale notturno
- Stima della velocità di corrosione delle tubazioni mediante la tecnica elettrochimica della polarizzazione lineare
- Misura della resistività elettrica del terreno, ove logisticamente possibile, mediante il metodo Wenner a 4 picchetti con spaziature variabili da 1,5 a 5 m, corrispondenti all'incirca alla profondità di investigazione
- Valutazione della corrosività dei terreni sulla base della normativa [3-5] a partire dalla composizione del terreno e dalla resistività.

Fabio Duranti

Cescor - Via Maniago 12 - Milano

Luciano Lazzari

Politecnico di Milano, Dipartimento CMIC "G. Natta"
Via Mancinelli 7 - Milano

Fabio Marelli, Stefano Tani

Metropolitana Milanese S.p.A. - Servizio Idrico Integrato ATO -
Via Meda, 44 - Milano

Stima della velocità di corrosione

È stato sperimentato il metodo della "polarizzazione lineare" per la stima della velocità di corrosione mediante una misura in campo. Come si evince dalla letteratura, questo metodo è impiegato con successo sia in laboratorio sia nel monitoraggio della corrosione negli impianti industriali, per esempio, nei circuiti delle acque di raffreddamento [1]. È usato anche nella valutazione della velocità di corrosione delle armature di rinforzo nel calcestruzzo armato [9].

Il principio del metodo è il seguente: si misura il potenziale di corrosione della struttura (o di un provino nel caso di misure di laboratorio) e mediante un elettrodo ausiliario esterno si invia una corrente in modo da determinare una piccola polarizzazione (inferiore a 50 mV). Il rapporto tra la polarizzazione e la densità di corrente che l'ha determinata è detta "resistenza di polarizzazione" ed è inversamente proporzionale alla velocità di corrosione.

Nel caso in esame, cioè l'applicazione del metodo a strutture interrate, insorgono alcune difficoltà pratiche, precisamente:

- la difficoltà di delimitare la superficie della struttura che è interessata alla polarizzazione indotta dalla corrente scambiata mediante l'elettrodo ausiliario, da cui segue che la densità di corrente può essere solo stimata
- poiché trattasi di tubazioni di grande diametro con rivestimento bituminoso con bassa efficienza, sono necessarie elevate correnti per produrre la polarizzazione richiesta. Ciò comporta la necessità di poter disporre di dispersori temporanei di consistenti dimensioni da collocare nelle immediate vicinanze con qualche difficoltà logistica di reperimento dello spazio
- la presenza di correnti vaganti rende pressoché non eseguibile la misura, secondo la tecnica tradizionale.

Tuttavia, mutuando esperienze maturate sulle strutture in calcestruzzo armato [2], sia aeree sia interrate, la tecnica è applicabile proprio sfruttando la presenza delle correnti vaganti nel modo seguente:

- la presenza delle correnti vaganti permette di calcolare il potenziale di corrosione della struttura con buona approssimazione, mediante il metodo di estrapolazione lineare [10]
- la registrazione contemporanea del potenziale e della caduta ohmica laterale, oltre che permettere la valutazione del potenziale di corrosione, consente di estrarre almeno tre campioni (ossia il valore istantaneo del potenziale e del contemporaneo valore della caduta ohmica laterale) che possono essere usati per il calcolo della resistenza di polarizzazione
- il valore istantaneo del potenziale da campionare deve rappresentare una condizione di deviazione dal potenziale di corrosione estrapolato di qualche decina di mV, per esempio < 50 mV, in modo che siano valide le condizioni richieste dal metodo
- in corrispondenza al potenziale istantaneo estratto, si misura il valore della caduta ohmica laterale
- la densità di corrente scambiata dalla struttura è proporzionale alla caduta ohmica laterale, secondo la relazione seguente:

$$i = 1000 \frac{IR_{\text{laterale}}}{\rho d}$$

con IR_{laterale} il valore misurato in campo in corrispondenza al potenziale campionato, ρ resistività del terreno, d è la spaziatura dell'elettrodo laterale e 1000 è una costante che tiene conto dell'ordine di grandezza del rapporto tra la densità di corrente sulla superficie della struttura e la densità di corrente che circola nel terreno e che determina la caduta ohmica laterale

- la resistenza di polarizzazione è data da:

$$R_p = \frac{\Delta E}{i} = 0,001 \frac{\rho d \Delta E}{IR_{\text{laterale}}}$$

- la velocità di corrosione ($\mu\text{m}/\text{y}$) in condizioni di corrente limite di ossigeno è data dalla formula di Stern&Geary [11]:

$$I_{\text{corr}} = \frac{b_a}{2,3R_p} = \frac{1000b_a IR_{\text{laterale}}}{2,3\rho d \Delta E} = 25000 \frac{IR_{\text{laterale}}}{\rho d \Delta E} = 25 \frac{IR_{\text{laterale}}}{\Delta E}$$

con IR_{laterale} e ΔE in mV, d in m e ρ in Ωm . Poiché il prodotto (ρd) è risultato circa uguale a 1000, la formula è stata di conseguenza semplificata.

Il parametro calcolato I_{corr} ha il significato generale di corrente scambiata tra tubazione e terreno che ha provocato la polarizzazione. I_{corr} assume propriamente il significato di velocità di corrosione ($\mu\text{m}/\text{y}$) se la tubazione si trova nelle condizioni di libera corrosione o di polarizzazione anodica, mentre rappresenta la densità di corrente di protezione catodica se la tubazione nella zona di misura è in tali condizioni per effetto delle correnti vaganti.

Rischio di corrosione da correnti vaganti

La valutazione del rischio di corrosione da correnti vaganti è qui basata su un criterio più articolato rispetto al semplice criterio riportato nello standard NACE [6] e nella norma EN [4, 5]. Queste, infatti, definiscono condizioni rischiose quelle in cui la polarizzazione anodica è superiore a 20 mV, dove si intende che la polarizzazione sia misurata al netto delle cadute ohmiche, condizione questa non realizzabile nelle misure in campo con elettrodo portatile. Pertanto, tenendo conto della inevitabile presenza di forti contributi di caduta ohmica nella misura del potenziale delle tubazioni, è stato deciso di valutare i seguenti criteri:

1. potenziale medio e notturno ricavati dalla registrazione di 24 ore. Rischio di corrosione alto se E_{medio} e $E_{\text{nott}} > -0,3$ V CSE; trascurabile se $< -0,6$ V e basso se compreso nel rispettivo intervallo
2. valore del potenziale in corrispondenza alla deviazione standard $+2\sigma$. Rischio di corrosione alto se $E_{+2\sigma} > -0,3$ V CSE; trascurabile se $< -0,6$ V e basso se compreso nel rispettivo intervallo
3. permanenza in condizione anodica (potenziale medio o notturno o estrapolato $> -0,35$ V CSE) calcolata come % del tempo. Rischio di corrosione alto se periodo di condizione anodica $> 50\%$
4. indice del valore della velocità di corrosione calcolato con il metodo della polarizzazione lineare $v_{\text{corr}} > 20$ mA/m² (corrispondente a circa 20 $\mu\text{m}/\text{anno}$ di velocità di corrosione).

Ognuno di questi criteri richiede qualche commento. L'interferenza da correnti vaganti è variabile nel senso che, nell'arco delle 24 ore, si alternano polarizzazioni catodiche e anodiche, in cui durante una fase catodica si ha una modifica chimica dell'interfaccia metallo-terreno con alcalinizzazione dello strato limite e temporanea passivazione dell'acciaio, che la successiva fase anodica tende a distruggere per ripristinare le condizioni iniziali e produrre, quando l'acciaio è ridiventato attivo, la dissoluzione del ferro. Pertanto, durante la fase anodica occorre tenere in conto il tempo necessario per azzerare le condizioni instaurate dalla precedente fase catodica, per cui solo se queste prevalgono sia in senso temporale (criterio 3) sia in valore medio (criterio 1 e 2) diventa possibile la reazione anodica di dissoluzione del ferro. Vale la pena di ricordare che durante la fase ano-

Resistività		E_{redox}		pH Indice		Umidità		Cloruri		Solfati		Solfuri	
($\Omega \cdot m$)	Indice	(mV vs SHE)	Indice			(% in peso)	Indice	(ppm)	Indice	(ppm)	Indice	(ppm)	Indice
> 120	0	> 400	+2	> 5	0	< 20	0	< 100	0	< 200	0	assente	0
50-120	-1	400-200	0	< 5	-1	> 20	-1	100-1000	-1	200-300	-1	< 0,5	-2
20-50	-2	200-0	-2					> 1000	-4	> 300	-2	> 0,5	-4
< 20	-4	< 0	-4										
Somma indici				Corrosività				Velocità di corrosione (mm/y)					
0				nulla				< 0,1					
-1 / -8				bassa				0,1-0,2					
-8 / -10				moderata				0,2-0,5					
< -10				severa				> 0,5					

TAB. 1 Valutazione della corrosività di un terreno con il metodo a indici.

Soil corrosivity evaluation by an index method base.

dica "transitoria" la reazione anodica è lo sviluppo di ossigeno. Per quanto riguarda il criterio 4, il valore della velocità di corrosione di 20 $\mu m/anno$ non è intendersi in valore assoluto, ma solo come parametro di comparazione.

Valutazione della corrosività del terreno

Sulla base di dati statistici sono stati proposti degli indici di corrosività calcolati sulla base dei valori dei parametri più significativi che determinano la velocità di corrosione dell'acciaio al carbonio. Nel caso in esame sono stati usati quelli proposti da TrabANELLI e riportati in tabella 1 [2].

RILIEVI EFFETTUATI

Le misure sono state eseguite in N. 31 punti significativi nell'area di Milano, con campionamento a "cluster", cioè relativo a famiglie omogenee delle zone della rete idrica con diversa potenzialità di interferenza, quali:

- sottostazioni elettriche (SSE) dei sistemi di trazione. In queste zone le strutture metalliche, se interferite, mostrano un comportamento prevalentemente anodico e perciò di corrosione.
- dispersori di protezione catodica della rete di distribuzione del gas. In queste zone le strutture metalliche, se interferite, mostrano un comportamento prevalentemente catodico.

Sono state effettuate le seguenti misure:

- Registrazione del potenziale delle tubazioni mediante impiego di acquisitori digitali e elettrodi di riferimento portatili. Le registrazioni hanno avuto di norma una durata di 24 ore e una frequenza di campionamento di 1 Hz. Ove logisticamente possibile sono state eseguite registrazioni a due canali per l'acquisizione contemporanea di potenziale e caduta ohmica laterale
- Valutazione del potenziale vero delle tubazioni con Metodo Straylog [2] sui punti dove è stato possibile eseguire registrazioni a due canali. Il principio su cui si basa il metodo è il seguente: la caduta ohmica laterale è nulla quando non circola corrente nel terreno. In queste condizioni il potenziale, indicato con E_p nei grafici, è privo del contenuto spurio di caduta ohmica e coincide quindi con il potenziale vero della tubazione. Tale condizione è realizzata per via grafica mediante estrapolazione lineare della retta E / V_L (potenziale misurato/caduta ohmica laterale). Sui grafici è indicato anche il parametro R (coefficiente di regressione lineare) che può assumere valori da 0 a 1 e fornisce una valutazione della bontà dell'interpolazione
- Misura del potenziale istantaneo mediante voltmetri digitali
- Verifica dello stato di corrosione delle tubazioni mediante la tecnica elettrochimica della polarizzazione lineare, compati-

bilmente con le condizioni al contorno in corrispondenza di ciascun posto di misura

- Misura della resistività elettrica del terreno, ove logisticamente possibile, mediante il metodo Wenner a 4 picchetti con spaziatore variabili da 1,5 a 5 m, corrispondenti all'incirca alla profondità di investigazione.

RISULTATI

I valori di resistività e del contenuto di sali (cloruri e solfati) su tre campioni (#1 pH 8.2; Cl 84 ppm; $CaSO_4$ 480 ppm) (#2 pH 7.8; Cl 120 ppm; $CaSO_4$ 240 ppm) (#3 pH 7,7; Cl 70 ppm; $CaSO_4$ 120 ppm; resistività media 130 Ωm) hanno permesso di calcolare gli indici, che sono compresi tra -2 e -3, associati a bassa corrosività del terreno.

Per ciascun punto investigato, è stato possibile valutare il rischio di corrosione che è risultato il seguente:

- N.8 punti di misura con elevato rischio di corrosione (25% del campione)
- N.2 punti di misura con medio rischio di corrosione (circa 6% del campione)
- N.9 punti di misura con basso rischio di corrosione (circa 28% del campione)
- N.13 punti con trascurabile rischio di corrosione (circa 41% del campione).

In Tabella 2 sono riportati i valori misurati e il risultato delle elaborazioni di alcuni punti investigati. Nelle figure 1 e 2 sono riportati due esempi di registrazioni del potenziale con i valori statistici. È stato possibile concludere che le fonti di interferenza più pericolose sono quelle di superficie (SS linea urbana e Drenaggio unidirezionale), mentre quelle poste in profondità rispetto alla rete idrica, quali SS linea Metropolitana, sono risultate molto meno influenti. Le zone anodiche a elevato rischio di corrosione (25% del campione) sono in prossimità delle fonti di interferenza di superficie e richiedono un pronto intervento di prevenzione della corrosione mediante applicazione di drenaggi polarizzati, ove fattibile, o di impianti di protezione catodica a corrente impressa

CONCLUSIONI

La valutazione dello stato di corrosione di tubazioni interrate non provviste di protezione catodica e interessate da correnti vaganti, disperse da impianti di trazione elettrica a corrente continua, è stata effettuata sulla base della normativa vigente, integrata da un modello basato sull'analisi statistica dei potenziali misurati nelle 24 ore e da misure dirette di velocità di corrosione mediante una variante del metodo della polarizzazione lineare.

Diam. Tubaz. (mm)	Forze di Inert.	Resistenza termica (struttura)			Registrazione di 24h del potenziale (V CSE)						Potenziale Vero con Metodo Straylog (V)	Polarizzazione lineare			Rischio di Corrosione per Inadeguatezza	
		a=1.5	a=3	a=5	-2σ	+2σ	E _{med}	E _{tot}	σ (mV)	% anod.		% catod.	ΔV _{1/2} (mV)	ΔE (mV)		c _{max} /c _{min} ² anod/c _{cat}
800	CA+SSM	115	70	70								-0,32	7	20	10-a	medio
500	binario FN	145	200	215	-3,11	0,19	-1,46	-1,35	825	9	91	-0,78	190	50	80-c	basso
700	SSM	190	150	150	-0,47	-0,11	-0,29	-0,38	92	84	16					alto
500	SSM				0,51	0,45	0,48	0,48	17			0,45 (nott)	7	11	16-c	trascurabile
400	ARev+SSU	100	95	120	-0,48	-0,38	-0,42	-0,43	28	60	40					medio
800	SSU+SSU+DU				-0,30	-0,28	-0,28	-0,28	8							alto
400	SSM				0,39	0,37	0,38	0,39	7							basso
700	nn	125	100	100	-0,05	-0,59	-0,72	-0,68	65	32	68	-0,7	48	43	27-c	inaccettabile
700	ARev	130	125	145	-1,00	0,38	0,69	0,6	155	32	68	0,6 (nott)	13	25	13-c	basso
400	SSU+DU				-0,47	-0,45	-0,46	-0,47	5							inaccettabile
1200	nn + CA	165	215	280	-0,59	-0,47	-0,53	-0,51	26	29	71	-0,5 (nott)	100	100	25-c	trascurabile
600	SSU	145	140	155	-0,78	0,18	-0,3	-0,5	240	79	21	0,44	80	70	30-a	alto
800	SSU				-0,05	0,34	-0,27	0,42	306	67	33					alto
800	SSM				-0,58	-0,32	-0,45	-0,47	66	60	40					medio
200(100)	nn				-0,45	-0,41	-0,43	-0,44	12			-0,42	83	35	80	inaccettabile
700	SSU+No.3 DU	220	120	75	0,45	-0,31	-0,38	0,43	37	92	8	-0,15	33	10	86-a	alto
400	SSM				-0,80	-0,54	-0,67	-0,61	67	21	79	-0,61	110	50	55-c	trascurabile
1200	SSM	120	120	105	0,69	0,63	0,66	0,66	13			0,76	50	30	42-c	trascurabile
700	SSU+DU				-1,04	-0,68	-0,86	-0,75	88	10	90	-0,8	22	160	3-c	trascurabile

TAB. 2 Alcuni risultati ottenuti con il modello di valutazione proposto.

Some results obtained with the model proposed.

FIG. 1

Esempio di registrazione del potenziale con prevalenza di interferenza catodica.

Example of a potential recording when the prevailing interference is cathodic.

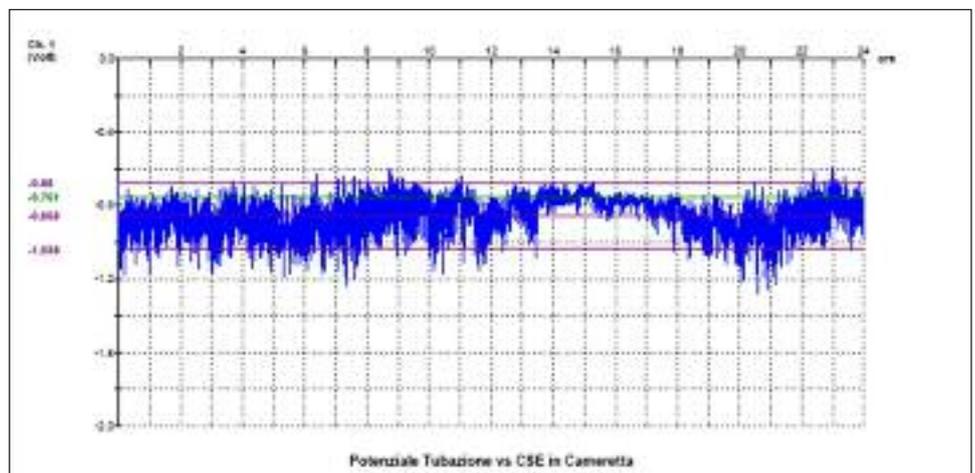
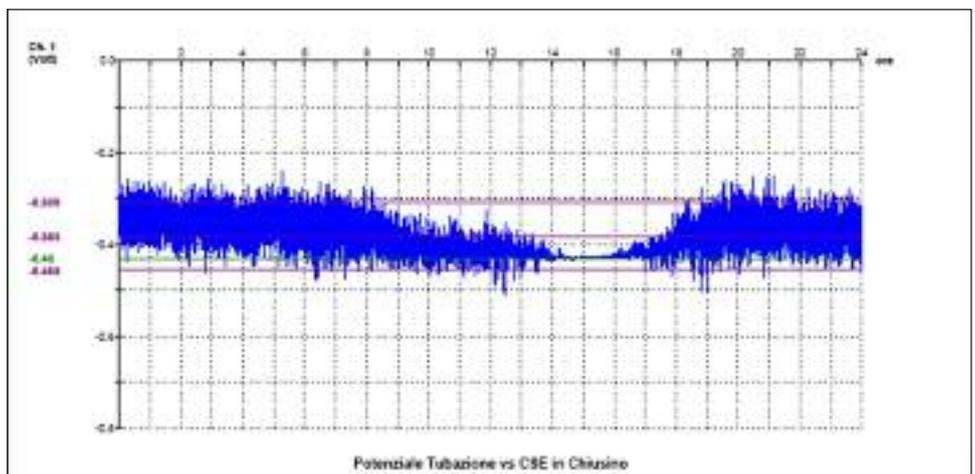


FIG. 2

Esempio di registrazione del potenziale con prevalenza di interferenza anodica.

Example of a potential recording when the prevailing interference is anodic.



Il modello proposto e discusso si è dimostrato di agevole applicazione e ha permesso di classificare in ordine di rischio di corrosione le zone investigate.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare MM Area Progettazione Infrastrutture e Servizio Idrico Integrato Area Acquedotto per l'opportunità e per il supporto fornito ai fini della buona riuscita dello studio qui presentato, il cui obiettivo funzionale è stato quello di fornire elementi conoscitivi per la corretta implementazione di una successiva fase di progettazione di impianti di protezione catodica a protezione delle principali tubazioni della rete di distribuzione AP in Milano.

RIFERIMENTI

- [1] P.Pedefferri, (2008) Corrosione e protezione dei materiali metallici, Vol.1 e 2, Polipress, Milano
- [2] L.Lazzari, P.Pedefferri, M.Ormellesse, (2006) Protezione catodica, Polipress, Milano
- [3] U68.00.003, (1994), Corrosione di strutture metalliche interrate. Valutazione della corrosività dei terreni per materiali ferrosi non legati e basso legati
- [4] EN12501-1 (2004), Protezione dei materiali metallici contro la corrosione - rischio di corrosione nel terreno - Parte 1: generalità
- [5] EN12501-2 (2004), Protezione dei materiali metallici contro la corrosione - probabilità di corrosione nel terreno - Parte 2: materiali ferrosi non legati e basso legati
- [6] NACE RP0169-96, Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems, NACE International, Houston, TX
- [7] B.Bazzoni, L.Lazzari, (1994), Metodi per l'eliminazione dei contributi di caduta ohmica in presenza di campi elettrici variabili, Giornate Nazionali sulla Corrosione e Protezione, Milano, 24-25 maggio 1994
- [8] B.Bazzoni, L.Lazzari, (1996), The Lateral Gradient Technique for Potential Measurements in Presence of Stray Current, Proc. Int. Conference Nace Corrosion 96, paper 96202, NACE International, Houston, TX
- [9] P.Pedefferri, L.Bertolini, (2005), La corrosione delle strutture in calcestruzzo armato, McGraw-Hill, Milano
- [10] L.Bertolini, P.Pedefferri, B.Bazzoni, L.Lazzari, (1998), Measurements of Ohmic Drop Free Potential in the Presence of Stray Current, Proc. Int. Conference Nace Corrosion 98, paper 98560, NACE International, Houston, TX
- [11] M.Stern, A.L.Geary, Electrochemical Polarization I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves, J. of Electrochem. Soc., 104, 56 (1957).

Abstract

Corrosion assessment of buried steel pipelines in the presence of stray currents

Key words: steel, corrosion, non destructive tests

The paper deals with the survey activities and methodologies used for the corrosion assessment of buried steel pipelines in the presence of stray currents, dispersed by DC traction transit systems. The sampling of locations to investigate was of a "cluster" type, where each cluster was an homogeneous set of pipelines from the type of interference point of view. In each location, potential recording, lateral ohmic drop measurements to extrapolate the true potential, soil resistivity measurements with Wenner method and soil chemical analysis (pH, chlorides and sulphates on aqueous extract) were determined. Results were analysed to calculate the risk of corrosion in zone directly exposed to stray current source. Corrosion risk evaluation was based on indexes derived from: median and nightly potential; potential corresponding to the value of +2 times the standard deviation; the fraction of time of anodic condition and the corrosion rate calculated by the linear polarization method. The approach proposed is easy to apply and gives a useful rank of the locations investigated on the basis of the corrosion risk.