

# Elettrodo di riferimento CSE innovativo con doppio coupon per una misura più accurata del potenziale

a cura di: P. Marcassoli, D. Pesenti Bucella, M. Tironi, G. Martinelli

Le tubazioni e le altre strutture metalliche interrate sono tipicamente protette dalla corrosione mediante sistemi di protezione catodica. La condizione di protezione è verificata mediante misurazione del potenziale della struttura rispetto a elettrodi di riferimento, generalmente elettrodi rame/solfato di rame. Tuttavia, il potenziale misurato include, insieme al potenziale reale, un contributo di caduta ohmica nel terreno, dovuto alla corrente di protezione circolante. Inoltre, in presenza di correnti disperse o interferenze in corrente alternata (CA), il valore del potenziale apparente è influenzato anche da ulteriori cadute ohmiche.

Al fine di ottenere una significativa riduzione della caduta ohmica, è stato sviluppato un innovativo elettrodo di riferimento che riduce al minimo la distanza tra coupon e setto poroso, resistente alle basse temperature e all'essiccazione. Il presente lavoro mostra come questi miglioramenti siano stati ottenuti da risultati di test di laboratorio e di campo, e mediante modellazione con Metodo agli Elementi Finiti (FEM).

**PAROLE CHIAVE:** ELETTRODO RAME/SOLFATO DI RAME; COUPON; CADUTA OHMICA; POTENZIALE; PROTEZIONE CATODICA; FEM

## INTRODUZIONE

La protezione catodica (PC) è una tecnica elettrochimica che ha lo scopo di eliminare o ridurre la velocità di corrosione delle strutture metalliche interrate, come per esempio le tubazioni, abbassandone il potenziale con l'applicazione di una corrente catodica continua. Le norme UNI EN 12954:2019 [1] e UNI EN ISO 15589-1:2017 [2] indicano i valori del potenziale di protezione ( $E_p$ ), al netto delle cadute ohmiche, da garantire per proteggere la struttura metallica da diversi tipi di corrosione, per esempio dovuta ad accoppiamento galvanico, aerazione differenziale, corrosione microbiologica e interferenze elettriche derivanti da sistemi operanti in corrente continua (CC) e in corrente alternata (CA).

Il criterio universalmente accettato e utilizzato per la verifica dell'efficacia della PC su una struttura metallica è basato sulla misura del potenziale, che solitamente è eseguita mediante un elettrodo di riferimento (ER) posto a contatto con lo stesso elettrolita in cui si trova la struttura protetta interrata [3] [4]. Pertanto, è fondamentale l'utilizzo di un ER durevole e affidabile.

Il potenziale misurato mentre circola la corrente di protezione, il potenziale "On" ( $E_{ON}$ ), è funzione della posizione

**P. Marcassoli, D. Pesenti Bucella,  
M. Tironi**

Cescor Srl, Via Maniago 12, 20134 Milano, Italia

**G. Martinelli**

I.C.P. | Industrial Cathodic Protection Srl, Via Risorgimento 11,  
20017 Rho (Milano), Italia

dell'ER rispetto alla struttura, ed è la somma di due contributi: il potenziale "IR-free" ( $E_{IR-free}$ ), che rappresenta il livello di protezione reale, e la caduta ohmica (IR) nel terreno, che dipende da corrente circolante, resistività del suolo e distanza tra struttura ed ER. Questo ovviamente implica che, a causa del contributo IR, il potenziale misurato sarà più negativo rispetto al livello di protezione reale.

La resistività del suolo è il parametro che influenza in maniera più significativa il contributo IR; infatti, anche se valori di corrente di piccola entità circolano verso la struttura, il suo contributo può raggiungere decine di millivolt in terreni a bassa resistività e fino a qualche volt in terreni ad alta resistività.

La misura di  $E_{IR-free}$ , cioè il potenziale al netto delle cadute ohmiche, può essere eseguita utilizzando diverse tecniche [3] [4], con lo scopo di eliminare, o quanto meno di minimizzare, il contributo IR nell'elettrolita, come la tecnica "On-Off" o le sonde di potenziale [5], le quali rappresentano un'alternativa all'"On-Off", specialmente in quei contesti dove questo metodo non è applicabile, come le aree complesse.

Le sonde di potenziale disponibili sul mercato, che utilizzano il rame/solfato di rame (CSE) come ER, presentano tuttavia una durata intrinseca limitata, solitamente non superiore a pochi anni, perché la soluzione interna può essiccarsi, oppure essere contaminata a causa dell'ingresso di cloruri (o altri alogenuri o solfuri), oppure può fuoriuscire e causare la dispersione di ioni metallici e sali in soluzione nell'ambiente circostante. Inoltre, è talvolta segnalata una risalita capillare del solfato di rame lungo il cavo elettrico.

Durante l'esecuzione di una misura di potenziale, il contributo IR può essere stimato dal valore dei parametri che influenzano questo contributo (resistività del terreno, densità di corrente, distanza struttura-ER), i quali a loro volta consentono di ottenere una stima del potenziale reale della struttura. La distribuzione di potenziale sulla superficie di una struttura metallica interrata può essere valutata eseguendo una modellazione con il Metodo agli Elementi Finiti (FEM) su una rappresentazione 3D (modello) del sistema analizzato. Questa simulazione consente, una volta impostate le opportune condizioni al contorno, di conoscere il potenziale sulla superficie al catodo senza includere alcun contributo IR.

Mediante misure sperimentali derivanti da test di laboratorio e di campo preliminari, e successivo confronto con

simulazioni FEM, il presente lavoro mostra i miglioramenti nella riduzione del contributo IR nel potenziale misurato con un dispositivo di nuova generazione costituito da elettrodo CSE in gel con doppio coupon.

## MATERIALI E METODOLOGIA SPERIMENTALE

I test di laboratorio sono stati effettuati su elettrodi CSE in gel con doppio coupon costituiti da un corpo ceramico cilindrico avente diametro 84 mm e lunghezza 153 mm. La superficie sensibile dell'elemento di contatto, cioè il setto poroso, è di circa 100 cm<sup>2</sup> nel caso in cui la superficie di base è rivestita e solo una striscia della superficie laterale è lasciata non rivestita, mentre è di circa 150 cm<sup>2</sup> nel caso in cui solamente la superficie di base è lasciata non rivestita.

I due coupon circolari in acciaio al carbonio hanno dimensioni differenti: il coupon da 10 cm<sup>2</sup> ha lo scopo di rilevare le interferenze in continua (CC), mentre il coupon da 2 cm<sup>2</sup> ha lo scopo di verificare le interferenze in alternata (CA). La distanza tra i due coupon e il setto poroso è  $\leq 1$  cm. L'elettrodo metallico interno è costituito da rame puro e l'elettrolita da gel di solfato di rame, di composizione brevettata. Tutte le prove sperimentali sono state eseguite in un contenitore di plastica riempito con soluzione acquosa caratterizzata da una resistività di 100  $\Omega$ m, con un anodo a rete in titanio attivato con ossidi di metalli misti (MMO) avente superficie pari a circa 100 cm<sup>2</sup> usato come contro-elettrodo, e con i due coupon mantenuti sempre collegati elettricamente tra loro.

Sono state eseguite due serie di test, e il fattore discriminante è stata la superficie totale non rivestita del setto poroso; la Serie 1 indica i test condotti sugli elettrodi con superficie di base rivestita e solo una fascia laterale con setto "attivo", mentre la Serie 2 indica i test sugli elettrodi in cui anche la superficie di base non è rivestita, e quindi sia fondo che una fascia di superficie laterale risultano attivi.

Ciascuna delle due serie di prove prevede, su di uno stesso elettrodo CSE, le seguenti misure sperimentali:

- Confronto tra elettrodo esterno ed elettrodo interno
- Misura del potenziale di libera corrosione dei due coupon
- Test "a, b, c, d, e": Misura per 8 ore della differenza di potenziale (ddp) tra i due coupon e l'elettrodo CSE interno, con una polarizzazione catodica applicata ai due coupon pari a -700, -800, -900, -1100, -1300 mV vs. Ag/AgCl /KCl saturo, rispettivamente.

La polarizzazione catodica è sempre stata applicata e controllata mediante potenziostato/galvanostato AMEL (Modello 2559; AMEL, Milano, Italia). Tutte le misure sperimentali sono state registrate mediante dispositivo di acquisizione digitale portatile CESCOR (Datalogger a doppio canale; Modello DL852C; CESCOR, Milano, Italia), con frequenza di acquisizione di 1 Hz e impedenza in ingresso di 1 GΩ.

I test di campo preliminari sono stati effettuati con l'obiettivo di confermare i risultati ottenuti dai test di laboratorio e dalle simulazioni FEM, nonché di confrontare i valori di potenziale misurato e potenziale atteso e di valutare il contributo IR nel potenziale misurato.

**Modellazione FEM**

Il software utilizzato per l'analisi tramite modellazione FEM è Comsol® Multiphysics versione 5.6.

Il modello 3D è stato utilizzato per riprodurre i test di laboratorio, ed è stato costruito considerando i tre componenti più importanti del sistema: l'elettrodo CSE, l'elettrolita e l'anodo in titanio attivato.

L'elettrodo CSE è stato modellato in tutta la sua geometria,

dalla superficie del setto poroso fino alla superficie superiore dell'elettrodo, escluso il pressacavo. I coupon da 10 cm² e 2 cm² sono stati modellati insieme ai distanziatori polimerici che li separano dalla superficie del setto poroso. Per la modellazione dell'elettrolita (acqua dolce), è stato modellato un cubo da 8 m³, all'interno del quale è stato posizionato l'elettrodo CSE. Un valore isotropico di resistività dell'elettrolita di 100 Ωm è stato imposto all'intero volume del cubo. L'anodo in titanio attivato da 100 cm² è stato ricavato da uno dei lati del cubo dell'elettrolita.

Dal momento che la riduzione dell'ossigeno è il processo catodico dominante, la densità di corrente (ddc) di corrosione equivale alla ddc limite di ossigeno; questa è stata approssimata alla ddc misurata nel test "a", i.e. polarizzazione imposta ai coupon di -700 mV vs. AAC/Sat. KCL, pari a 190 mA/m².

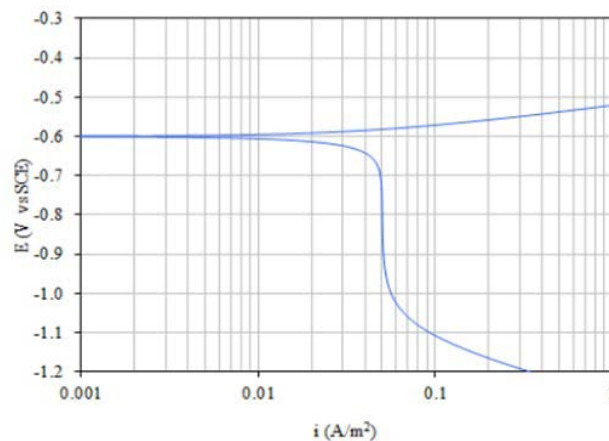
Per il potenziale di libera corrosione dei coupon è stato utilizzato il valore misurato pari a -612 mV vs. CSE.

L'equazione elettrochimica al catodo, riportata di seguito, si basa sulle equazioni di Tafel, e la densità di corrente limite di ossigeno è stata applicata [3]:

$$i = i_{corr} \cdot e^{\frac{-2.303 \cdot (E - E_{corr})}{b_a}} - i_L - i_{H_2} \cdot e^{\frac{-2.303 \cdot (E - E_{H_2})}{b_{H_2}}} \tag{eq.1}$$

Dove:

- $i_{corr}$  densità di corrente di corrosione
- $b_a$  pendenza della curva anodica di Tafel
- $i_L$  densità di corrente limite di ossigeno
- $i_{H_2}$  densità di corrente di scambio dell'idrogeno
- $E_{H_2}$  potenziale di equilibrio dell'idrogeno
- $b_{H_2}$  pendenza della curva dell'idrogeno di Tafel.



**Fig.1** - Condizioni al contorno sulle superfici catodiche (coupon), basate sull'equazione di Tafel e la densità di corrente limite di ossigeno / Boundary conditions at cathodic surfaces (coupons), based on Tafel equations and oxygen limiting current density

La ddc di protezione erogata dall'anodo di titanio attivato è stata imposta prima di ogni simulazione in modo da raggiungere lo stesso valore di potenziale reale misurato sui coupon durante i test di laboratorio.

Le condizioni al contorno identificate e imposte al sistema sono riportate di seguito e rappresentate in Fig. 1:

- Superfici isolate
- Densità di corrente limite di ossigeno (coincidente con la ddc di corrosione e di protezione)

- Potenziale di libera corrosione dei coupon
- Equazione elettrochimica al catodo
- Corrente di protezione erogata dall'anodo di titanio attivato.

Tutte le superfici nel modello che non assorbono o erogano corrente sono state definite come isolate.

In Tab. 1 sono sintetizzati i parametri utilizzati per la modellazione FEM.

**Tab.1** - Sommario dei parametri utilizzati per la modellazione FEM / Summary of parameters used in FEM modelling.

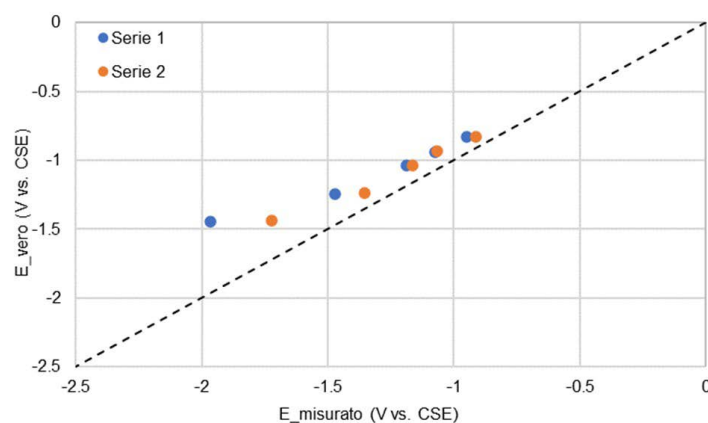
Parametro	Unità	Valore
$i_{corr}=i_L$	mA/m <sup>2</sup>	190
$E_{corr}$	V vs. SCE	-0.612
$b_a$	mV/dec	60
$i_{H_2}$	A/m <sup>2</sup>	0.00002
$E_{H_2}$	V vs. SCE	-0.850
$b_{H_2}$	mV/dec	120
Resistività ( $\rho$ )	$\Omega$ m	100

## RISULTATI E DISCUSSIONE

In Fig. 2 è riportato il confronto grafico tra i valori di potenziale ottenuti dalle due serie di test di laboratorio (Serie 1 e Serie 2). Per ciascuna delle due serie, i valori di potenziale misurato sono rapportati ai valori di potenziale vero ottenuti per approssimazione attraverso elettrodi esterni posizionati con il setto poroso a ridosso della superficie dei coupon.

Sia gli elettrodi CSE di Serie 1 sia di Serie 2, nell'intervallo

di corretta protezione (-0.85 ÷ -1.15 vs. CSE), mostrano valori di potenziale molto prossimi al valore atteso, confermando un benefico abbattimento delle cadute ohmiche dei nuovi dispositivi. Entrambe le serie, per elevate polarizzazioni corrispondenti a condizioni di sovra-protezione delle tubazioni, mostrano ancora cadute ohmiche residue, e un conseguente scostamento del potenziale misurato rispetto al potenziale vero.



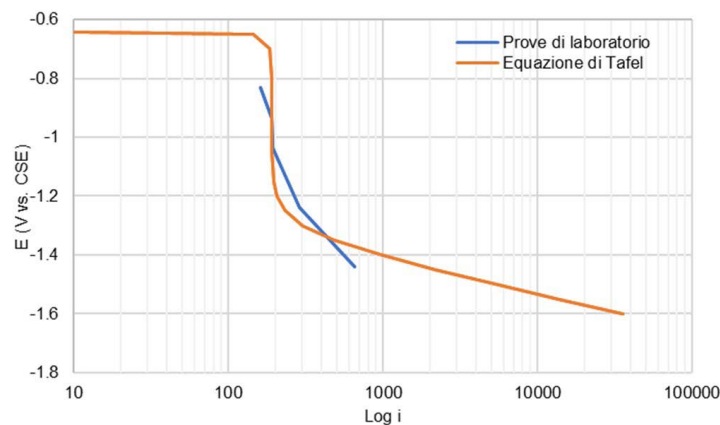
**Fig.2** - Confronto tra valori di potenziale misurato e potenziale atteso / Comparison between measured potential and true potential values.

Gli elettrodi della Serie 2, in cui la superficie di base non è rivestita, mostrano delle migliori prestazioni di abbattimento della caduta ohmica rispetto alla precedente versione della Serie 1. Questo effetto è da attribuire alla geometria dell'elettrodo CSE e alla ridotta distanza tra coupon e gel elettrolitico. Infatti, nonostante la distanza fisica tra la superficie dei coupon e il gel interno, la base del corpo ceramico contribuisce a creare un ponte elettrolitico che riduce la distanza efficace tra coupon ed elettrodo di riferimento interno, e quindi le cadute ohmiche.

Alla luce del precedente confronto, la Serie 1 è stata scartata dai successivi test e approfondimenti, e non è stata quindi considerata nelle simulazioni FEM.

Al fine di verificare la consistenza delle simulazioni FEM, la curva caratteristica (Log  $i$  vs.  $E$ ) ottenuta dai risultati dei test di laboratorio è stata confrontata con la curva teorica ottenuta dall'equazione di Tafel; il confronto è rappresentato graficamente in Fig. 3.

L'analisi FEM è stata svolta considerando N. 5 test di laboratorio (Test "a, b, c, d, e"). Come si può vedere, per bassi valori di densità di corrente di protezione (Test "a, b, c, d"), lo scostamento tra le due curve risulta di modesta entità, i.e. meno dell'8%, mentre, per il Test "e", la differenza tra il valore misurato e quello calcolato diventa considerevole, con uno scostamento del 58%.



**Fig.3** - Confronto grafico tra le curve caratteristiche ottenute dai risultati dei test di laboratorio (blu) e l'equazione di Tafel (arancione) / Graphical comparison between the characteristic curve obtained from the laboratory tests (blue) results and the Tafel equation (orange)

In Tab. 2 e Tab. 3 sono riportati i risultati numerici delle simulazioni FEM sulla densità di corrente di protezione assorbita dai coupon e il corrispettivo valore di potenziale misurato durante i test di laboratorio.

Le simulazioni FEM sono state ripetute ricorsivamente incrementando la corrente erogata dalla superficie anodica, sino a riprodurre le condizioni di polarizzazione dei coupon dei test sperimentali.

Il valore di potenziale utilizzato è costituito dal valore medio della superficie di base, dopo aver verificato che

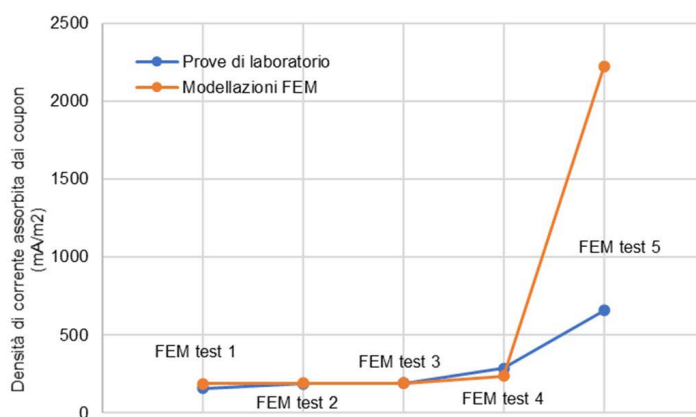
i valori riferiti alla circonferenza dei coupon o alla media dell'intera superficie attiva del setto poroso non restituivano valori altrettanto coerenti con i test.

**Tab.2** - Confronto tra le densità di corrente calcolate tramite modellazione FEM e ottenute dai test di laboratorio / Comparison between the current densities evaluated with FEM modelling and obtained by laboratory tests

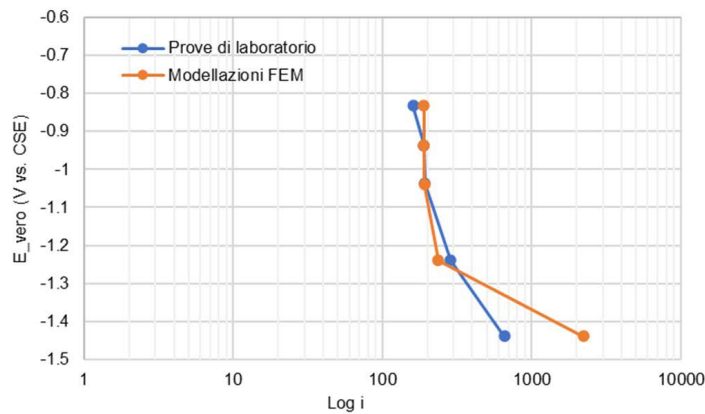
Modello FEM	Test di laboratorio corrispondente	$i_{CP}$ [mA/m <sup>2</sup> ]	$i_{coupon\_lab}$ [mA/m <sup>2</sup> ]	$i_{coupon\_FEM}$ [mA/m <sup>2</sup> ]
1	a	31.7	159.9	189.2
2	b	31.9	189.1	190.1
3	c	32.0	193.0	191.1
4	d	39.7	286.4	236.7
5	e	372.5	658.5	2221.8

**Tab.3** - Confronto tra i valori di potenziale calcolati tramite modellazione FEM e ottenuti dai test di laboratorio / Comparison between potential values evaluated with FEM modelling and obtained by laboratory tests

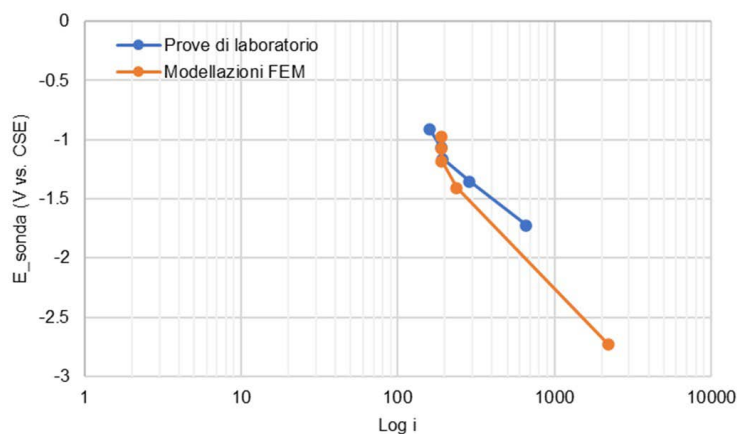
Modello FEM	$E_{true\_Lab}$ [V vs. CSE]	$E_{probe\_Lab}$ [V vs. CSE]	$E_{true\_FEM}$ [V vs. CSE]	$E_{probe\_FEM}$ [V vs. CSE]
1	-0.832	-0.912	-0.832	-0.973
2	-0.936	-1.065	-0.936	-1.078
3	-1.038	-1.164	-1.038	-1.180
4	-1.239	-1.354	-1.239	-1.405
5	-1.439	-1.724	-1.439	-2.732



**Fig.4** - Confronto tra le densità di corrente assorbite dai coupon e le modellazioni FEM / Comparison between the current densities absorbed by the coupons and those evaluated with the FEM modelling.



**Fig.5** - Confronto tra i valori di potenziale vero dei coupon dai test di laboratorio e i valori calcolati con le modellazioni FEM / Comparison between the coupons true potential measured during the laboratory tests and those evaluated with the FEM modelling.



**Fig.6** - Confronto tra i valori di potenziale dei coupon misurati con elettrodo interno e i valori calcolati con le modellazioni FEM / Comparison between the coupons potential values measured with the internal electrode and those evaluated with the FEM modelling.

Per facilitare il confronto dei risultati, la Fig. 4 espone il confronto tra la densità di corrente di protezione assorbita dai coupon, mentre Fig. 5 e Fig. 6 mostrano il confronto tra potenziali omologhi, cioè tra i valori di potenziale vero e i potenziali misurati mediante elettrodo interno.

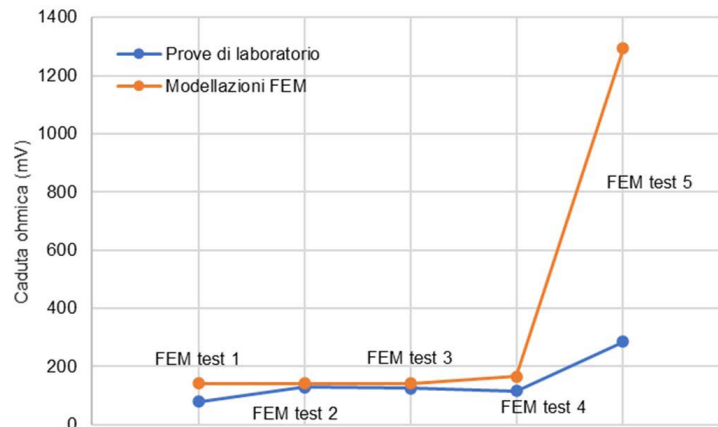
Al fine di verificare l'accuratezza dei risultati ottenuti dalla modellazione FEM, è stata calcolata e comparata la caduta ohmica sia dei test di laboratorio che delle modellazioni.

Il calcolo è stato svolto sottraendo i valori riportati in Tab. 3 per i valori di potenziale misurati mediante elettrodo CSE interno della sonda ai valori di potenziale vero.

I risultati del calcolo sono riportati in Tab. 4, mentre la Fig. 7 mostra i risultati in formato grafico.

**Tab.4** - Confronto tra cadute ohmiche calcolate dai risultati delle modellazioni FEM e dei test di laboratorio / Comparison between the ohmic drops evaluated from FEM modelling and laboratory tests results.

Modello FEM	IR drop (lab) [mV]	IR drop (FEM) [mV]	Differenza [%]
1	80	141	-43
2	129	142	-9
3	126	142	-11
4	115	166	-31
5	285	1293	-78

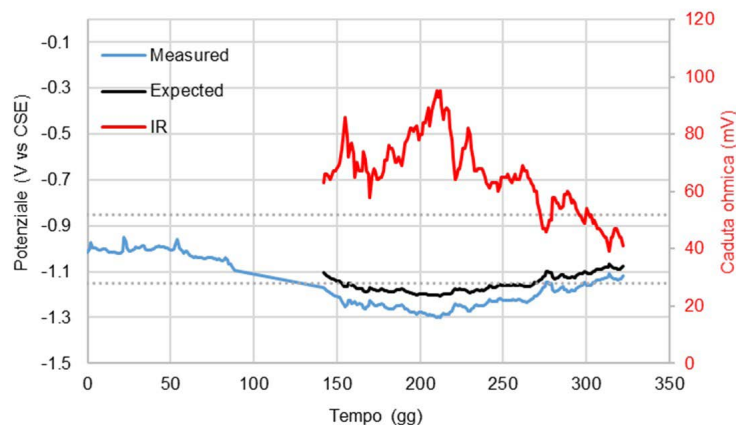


**Fig.7** - Confronto tra i valori di caduta ohmica dei test di laboratorio e della modellazione FEM / Comparison between the measured ohmic drop values of the laboratory tests and FEM modelling.

Anche il confronto tra i risultati dei test di laboratorio e la modellazione FEM conferma la capacità degli elettrodi CSE in gel con doppio coupon nel contenere la caduta ohmica a valori modesti e accettabili.

Come già evidenziato in precedenza, condizioni di elevata polarizzazione, con conseguenti densità di corrente di protezione elevate, restituiscono invece valori di caduta

ohmica ancora molto significativa, dell'ordine anche del volt. Questa capacità di ridurre in modo significativo la caduta ohmica è ulteriormente confermato da dati ottenuti da test di campo preliminari, riportati in Fig. 8, in cui sono confrontati i valori di potenziale misurato e potenziale atteso, con l'obiettivo di valutare il contributo IR nel potenziale misurato.



**Fig.8** - Confronto tra i valori di potenziale misurato e potenziale atteso, e valutazione della caduta ohmica di test di campo preliminari / Comparison between measured potential and true potential values, and evaluation of ohmic drop of preliminary field tests



Dal grafico precedente si può vedere che, nel caso in cui i potenziali sono nel corretto intervallo di protezione, la caduta ohmica è di poche decine di mV, e anche in condizioni di sovra-protezione il contributo IR è comunque inferiore a 100 mV.

In condizioni di elevata polarizzazione, ovvero in condizioni non più di limite di ossigeno ma di sviluppo di idrogeno, le densità di correnti circolanti sono di entità tale da portare comunque a contributi IR non trascurabili. Questo limite degli elettrodi CSE si verifica tuttavia solo in condizioni estreme di polarizzazione, oltre i livelli previsti dalle vigenti normative.

## CONCLUSIONI

Le normative internazionali e nazionali hanno ben evidenziato la necessità di installazione di sonde incorporanti elettrodo di riferimento e coupon in acciaio per una più accurata valutazione dello stato di protezione catodica delle strutture interrato, andando significativamente a ridurre il contributo di caduta ohmica nella misura di potenziale. Questo è di particolare importanza nei contesti interferiti, ove il potenziale misurato può differire significativamente dal potenziale vero durante la registrazione, oppure nelle aree complesse, laddove la tecnica "On-Off" non è applicabile.

La memoria ha illustrato mediante risultati ottenuti da test di laboratorio e di campo preliminari, e successive simulazioni FEM, l'effetto di riduzione del contributo IR. La caduta ohmica residua dipende in modo proporzionale dal livello di polarizzazione e quindi dalla corrente assorbita

dai coupon, risultando tanto più elevata quanto più elevata è la corrente circolante, come atteso. Inoltre, per strutture operanti in condizioni di sovra-protezione, il contributo di caduta ohmica risulta ancora significativo, mentre nell'intervallo corretto di protezione stabilito dalle vigenti normative, questo contributo è modesto e accettabile, portando comunque un importante progresso rispetto a elettrodi tradizionali e coupon separati.

Le simulazioni FEM hanno permesso una migliore interpretazione delle misure ottenute, evidenziando il ruolo della geometria dell'elettrodo e del corpo in materiale ceramico in cui i coupon sono direttamente fissati e opportunamente isolati. Infine, anche il confronto dei valori di potenziale misurato e potenziale atteso da test di campo preliminari ha evidenziato che, nel corretto intervallo di protezione, il contributo IR risulta trascurabile, ed è di bassa entità anche in condizioni di modesta sovra-protezione.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'Ing. Sara Tagini per l'importante contributo dato allo sviluppo e alle prove dei dispositivi.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] UNI EN 12954. Principi generali di protezione catodica di strutture metalliche interrate o immerse; 2019.
- [2] UNI EN ISO 15589-1. Industrie del petrolio, petrolchimiche e del gas naturale - Protezione catodica dei sistemi di condotte - Parte 1: Condotte sulla terraferma; 2017.
- [3] Lazzari L, Pedefferri P, Ormellese M. Protezione catodica. Milano, Italia: Polipress; 2006.
- [4] Brenna A, Beretta S, Uglietti R, Lazzari L, Pedefferri M, Ormellese M. Cathodic protection monitoring of buried carbon steel pipeline: measurement and interpretation of instant-off potential. Corrosion Engineering, Science and Technology; 2017.
- [5] Khan N. Using coupons and ER soil corrosion probes in applying pipeline CP criteria. Materials Performance; 2007, vol. 46, no. 4, pp. 26-30.
- [6] Domanda di brevetto europeo n. 21154224.6 del 29/01/2021

# New CSE reference electrode with two coupons for improved measurement of true potential

Pipelines and other buried metallic structures are typically protected against corrosion by means of cathodic protection systems. The protection status is verified by measuring the potential of the structure in respect to reference electrodes, generally copper/copper sulphate electrodes. Nevertheless, the measured potential includes, together with the true potential, ohmic drop contributions in the soil, due to the circulating protection current. Furthermore, in the presence of stray currents or alternate current (AC) interferences, the apparent potential value is also affected by additional ohmic drops.

In order to achieve a significant reduction of the ohmic drop, a new reference electrode has been developed, in which the distance between coupon and porous plug is minimized, resistant against cold temperatures and drying. This paper shows how these improvements have been achieved by laboratory and field tests results, and also by means of Finite Element Method (FEM) modelling.

**KEYWORDS:** COPPER/COPPER SULPHATE ELECTRODE; COUPON; OHMIC DROP; POTENTIAL; CATHODIC PROTECTION; FEM.