

## Studio della protezione catodica di un sistema che simula gli interstizi su condotte sottomarine

### Study of the cathodic protection applied on a system simulating occluded cells on sealines

T. Bellezze, G. Roventi, R. Fratesi - Università Politecnica delle Marche, Ancona  
S. Rosmarini - F.M. Engineering Srl, Ancona

In questo lavoro, è stato effettuato uno studio sull'effetto della protezione catodica in un sistema simulante un interstizio che, nei casi reali, si presenta in alcuni tipi di connessioni utilizzate per le condotte sottomarine. L'interstizio è stato simulato in laboratorio sovrapponendo due piastre rettangolari delle stesse dimensioni: una è stata realizzata con una serie ordinata di elementi metallici di acciaio al carbonio basso-legato, inglobati in una resina epossidica; l'altra era una piastra di PVC. Tutti gli elementi metallici sono stati collegati allo stesso anodo galvanico in lega di alluminio, posto di fronte all'imbocco dell'interstizio. Il sistema è stato immerso in una vasca riempita di acqua di mare artificiale. Sebbene con tempi diversi, variando lo spessore dell'interstizio (2, 4 e 10 mm), è stato osservato che gli elementi metallici hanno raggiunto le condizioni di immunità e che le linee di corrente riescono a penetrare fino in fondo all'interstizio. Alla fine del lavoro sperimentale, è stata eseguita una simulazione agli elementi finiti del sistema studiato.

**Parole chiave:** protezione catodica, corrosione interstiziale, condotte sottomarine, anodo galvanico, analisi agli elementi finiti.

In this work, a study on the effect of the cathodic protection in a system simulating a crevice that, in real cases, is present in some types of connections used for submarine pipelines was carried out. The crevice was simulated in laboratory by overlapping two rectangular plates of the same size: one of them has been obtained with an ordered series of metal elements of low-alloy carbon steel, embedded in an epoxy resin; the other was a plate of PVC. All metal elements were connected to the same galvanic anode of an aluminium alloy, placed in front of the crevice opening. The system was immersed in a tank filled with artificial seawater. Although with different times, by varying the thickness of the crevice (2, 4 and 10 mm), all metal elements have achieved the conditions of immunity and the current lines reached them, even at the crevice bottom. At the end of the experimental work, a finite element simulation of the studied system was developed.

**Keywords:** cathodic protection, crevice corrosion, submarine pipelines, galvanic anode, finite element analysis.

#### INTRODUZIONE

La protezione catodica è una tecnica elettrochimica largamente utilizzata per la prevenzione e la protezione dalla corrosione di strutture metalliche poste in ambienti umidi [1] e in particolare in acqua di mare [2-5].

Per motivi legati alla tecnologia di realizzazione, una tubazione metallica, immersa in acqua di mare e connessa con un terminale meccanico, forma un interstizio dell'ordine di qualche mm fino a 2-3 cm (Fig. 1). In simili circostanze, si pone il problema della penetrazione delle linee di corrente, e pertanto dell'efficacia della protezione catodica offerta da un anodo galvanico in lega di alluminio, all'interno dell'interstizio.

Problematiche di questo tipo sono documentate in generale nella letteratura specialistica [1], mentre studi mirati sono stati dedicati agli interstizi che si formano in corrispondenza del distacco del rivestimento protettivo in tubazioni simili a quella studiata in questo lavoro [6,7].

Allo scopo di esaminare la distribuzione della corrente all'interno dell'interstizio, in funzione del suo spessore, la sperimentazione eseguita ha previsto la realizzazione di un "sistema elettrodico segmentato" [6] che consentisse la discretizzazione in macroaree della superficie metallica da proteggere. Monitorando il potenziale e la corrente corrispondenti alle singole macroaree, è stato possibile esaminare l'efficacia della protezione catodica offerta dall'anodo in lega di alluminio posto all'imbocco dell'interstizio.

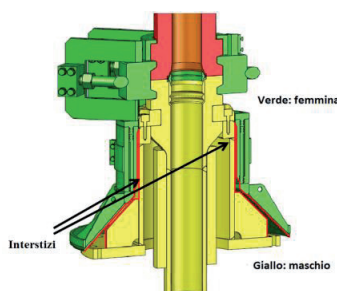


Fig. 1 - Particolare di una connessione ad innesto maschio-femmina tra una tubazione sottomarina e un terminale meccanico - *Detail of a male-female connection between a submarine pipeline and a mechanical terminal.*

## PARTE SPERIMENTALE

Per la simulazione dell'interstizio, è stata inizialmente realizzata una piastra rettangolare 12 x 34.1 cm ("piastra inferiore", Fig. 2) in resina epossidica, in cui sono stati inglobati degli elementi metallici rettangolari di acciaio al carbonio basso-legato, disposti in nove file da tre elementi ciascuna. Ad essa, è stata sovrapposta un'altra piastra in PVC delle stesse dimensioni ("piastra superiore", Fig. 2), in modo da formare un interstizio di spessore variabile (2, 4 e 10 mm). Su quest'ultima sono stati installati degli elettrodi di riferimento Cu/CuSO<sub>4</sub> (+0.318 V vs SHE), in corrispondenza dell'elemento metallico sottostante. Ognuno di questi elementi è stato collegato allo stesso anodo galvanico ( $\phi=29$  mm,  $l=150$  mm) in lega di alluminio (Al-Zn 5,64%-In 0,015%) posto ad una distanza di 65 cm dall'imbocco dell'interstizio. L'assemblaggio delle due piastre è stato eseguito in modo tale da assicurare che le linee di corrente potessero penetrare all'interno dell'interstizio solamente dal lato affacciato all'anodo galvanico. Questa costruzione ha permesso la discretizzazione della superficie inferiore dell'interstizio in macroaree di acciaio, in corrispondenza delle quali è stata eseguita la mappatura dei valori di potenziale e di corrente (misurata mediante dei resistori di shunt da 1 $\Omega$ ) in funzione della loro posizione e del tempo. Tutto il sistema è stato immerso in una vasca riempita di acqua di mare artificiale.

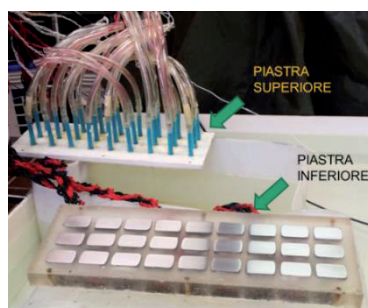


Fig. 2 – Piastre utilizzate per la realizzazione della stazione di misura simulante l'interstizio - *Plates used for the construction of the measuring working station simulating the crevice.*

Per la valutazione dell'efficacia della protezione catodica studiata, sono stati ottenuti dei grafici di potenziale e di densità di corrente in funzione del tempo e in funzione della posizione dei diversi elementi in acciaio, e quindi della profondità dall'imbocco dell'interstizio. In particolare, nei diagrammi di potenziale, tutti i valori sono stati riportati rispetto all'elettrodo SHE e sono state indicate due linee in corrispondenza dell'immunità dell'acciaio (-0.617 V vs SHE) [1] e in corrispondenza del potenziale a cui si verifica la prevalente riduzione dell'acqua a idrogeno gassoso (-0.856 V vs SHE = -1,1 V vs SCE, secondo la norma UNI EN ISO 15589-2). La prima di queste due linee esprime il potenziale di protezione dell'acciaio in condizioni di immunità, mentre la seconda permette di individuare le condizioni in cui si raggiunge una sovraprotezione, che determina l'indesiderato sviluppo di idrogeno.

Al termine del lavoro sperimentale, è stata eseguita un'analisi agli elementi finiti del sistema studiato definendo le condizioni al contorno delle parti metalliche in gioco, come riportato in un precedente lavoro [5].

## RISULTATI E DISCUSSIONE

Sebbene il raggiungimento delle condizioni di immunità sia avvenuto in tempi diversi, quello che è stato osservato dalle prove effettuate, con i tre differenti spessori dell'interstizio, è che tutti gli elementi metallici hanno raggiunto tali condizioni in tutti i casi, indipendentemente dalla loro posizione. Pertanto, le linee di

corrente che si generano tra l'area anodica a quella catodica sono riuscite a penetrare fino in fondo all'interstizio.

Nel corso della protezione catodica dell'acciaio negli interstizi studiati, si verifica il contemporaneo consumo dell'ossigeno disciolto nell'acqua di mare artificiale e la formazione del deposito calcareo sulla superficie degli elementi metallici che formano la piastra inferiore. Entrambi questi fattori conducono ad una progressiva diminuzione del valore assoluto della densità di corrente catodica misurata in corrispondenza di tutti gli elementi metallici di acciaio, come è visibile nel diagramma di sinistra della Fig. 3 e Fig. 4, relative rispettivamente a spessori di interstizio di 2 e 10 mm. Confrontando tra loro questi diagrammi, data la comprensibile maggiore resistenza elettrica offerta al passaggio della corrente dall'interstizio con spessore di 2 mm rispetto a quello da 10 mm, appare chiaro come essa sia, in valore assoluto e per file di elementi metallici corrispondenti, inferiore nel primo caso rispetto al secondo, comportando così una maggiore lentezza nel consumo di ossigeno e nella formazione di calcare. Come conseguenza, il potenziale si porta a valori al di sotto del valore di immunità in tempi più lunghi con interstizi di spessore minore, facendo riferimento in particolare alle zone più lontane dall'imbocco (diagrammi di destra delle Fig. 3 e Fig. 4, Fila 7, 8 e 9).

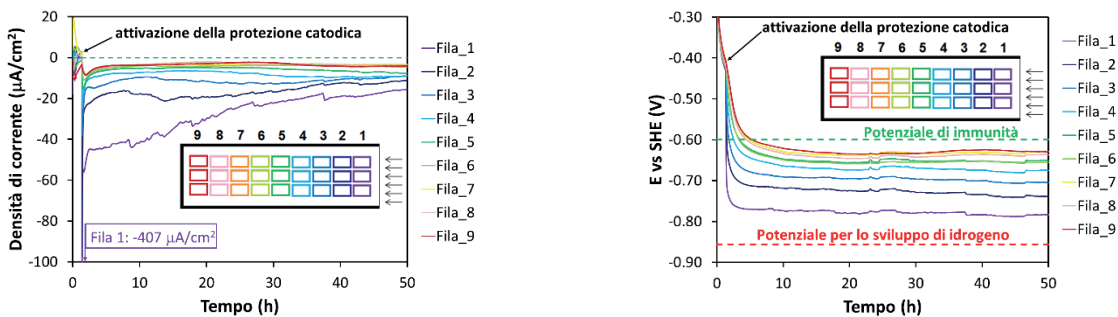


Fig. 3 - Densità di corrente e valori di potenziale degli elementi metallici per l'interstizio di spessore 2 mm - *Current density and potential values of the metal elements for the crevice 2 mm thick.*

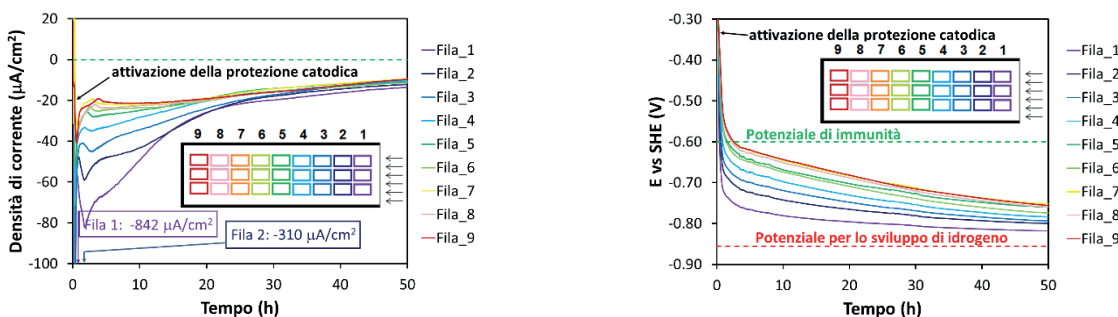


Fig. 4 - Densità di corrente e valori di potenziale degli elementi metallici per l'interstizio di spessore 10 mm - *Current density and potential values of the metal elements for the crevice 10 mm thick.*

Inoltre, nel caso dello spessore da 10 mm, data una più favorevole condizione geometrica, si potrebbe pensare che l'ossigeno consumato dalla protezione catodica possa essere reintegrato dall'esterno per diffusione, contrastando così, almeno in parte, la diminuzione della densità di corrente osservata. Dato che questo non accade, si può ipotizzare che il consumo di ossigeno per riduzione e la conseguente formazione di calcare rappresentano fenomeni che prevalgono sulla dinamica di reintegro dell'ossigeno per diffusione. Se questo si verifica per l'interstizio da 10 mm, a maggior ragione si verifica per quello da 2 mm.

Infine, nel caso della prova eseguita allo spessore dell'interstizio di 4 mm, il raggiungimento delle condizioni di immunità di tutti gli elementi in acciaio si ha per tempi non molto differenti dal caso a spessore pari a 2 mm (per brevità i diagrammi non sono stati riportati).

I valori quasi-stazionari delle densità di corrente e dei potenziali corrispondenti, presi quando essi soddisfano la relazione espressa dalla caratteristica catodica dell'acciaio da proteggere, la quale rappresenta una condizione al contorno essenziale, sono stati riprodotti in modo soddisfacente con un modello agli elementi finiti sviluppato in una fase successiva al lavoro sperimentale. Questo risultato è stato raggiunto nonostante il modello non abbia tenuto conto della formazione del deposito di calcare e della variazione della concentrazione di ossigeno nell'interstizio, perché evidentemente le prime fasi di ciascuna prova non sono interessate in modo marcato da questi processi. Per la messa a punto di tale modellazione, ricreata sulla

# Corrosion

stessa geometria del sistema di prova, all'interfaccia tra la superficie anodica e l'elettrolita e tra la superficie catodica e l'elettrolita sono state imposte come condizioni al contorno [5] i parametri cinetici caratteristici rispettivamente dell'alluminio e dell'acciaio, ottenuti sperimentalmente da curve di polarizzazione eseguite su questi materiali in acqua di mare artificiale. I risultati sono mostrati nelle Fig. 5 e Fig. 6.

Il modello sviluppato può risultare pertanto estremamente utile nella progettazione delle condotte sottomarine, per un primo sostanziale approccio all'analisi degli interstizi simili a quelli studiati in questo lavoro.

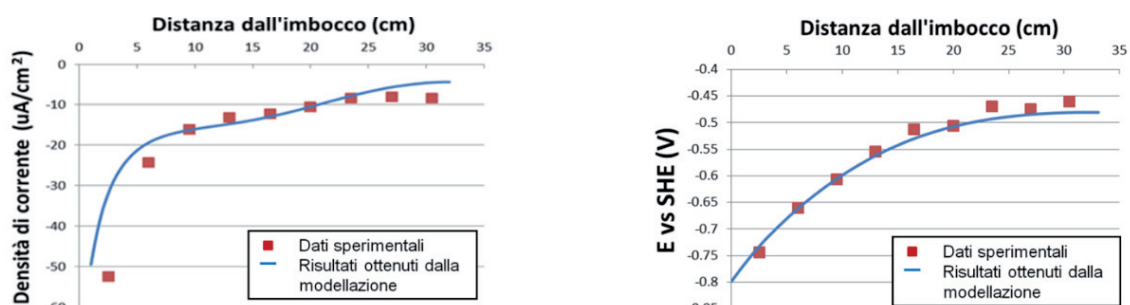


Fig. 5 - Confronto tra i dati sperimentali (dopo 1 ora dall'attivazione della protezione catodica) ed i risultati della modellazione per l'interstizio di spessore di 2 mm - *Comparison between the experimental data (after 1 hour from the activation of cathodic protection) and the results of the modeling for the crevice 2 mm thick.*

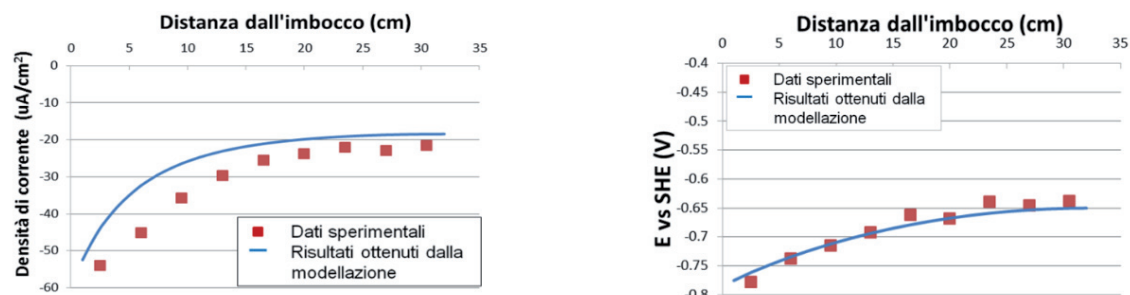


Fig. 6 - Confronto tra i dati sperimentali (dopo 7 ore dall'attivazione della protezione catodica) ed i risultati della modellazione per l'interstizio di spessore di 10 mm - *Comparison between the experimental data (after 7 hours from the activation of cathodic protection) and the results of the modeling for the crevice 10 mm thick.*

## CONCLUSIONI

In questo lavoro, è stato svolto uno studio riguardante l'effetto della protezione catodica all'interno di un sistema simulante un interstizio in una condotta sottomarina, immersa in acqua di mare. Le prove sono state eseguite utilizzando tre spessori di interstizio differenti, ovvero 2 mm, 4 mm e 10 mm. Dai risultati ottenuti, è stato osservato che la protezione catodica è stata efficace in tutti i casi, nonostante le condizioni di protezione per immunità siano state raggiunte in tempi più alti con gli interstizi a spessori più bassi e a distanze più elevate dall'imbocco. In ogni caso, questi tempi sono risultati sotto le 10 ore e pertanto possono considerarsi trascurabili in termini ingegneristici. Nell'ultima fase del lavoro, è stato eseguito un confronto tra i dati sperimentali acquisiti durante le prove con quelli ottenuti da un modello numerico agli elementi finiti, ottenendo un buon accordo. Si ha in definitiva a disposizione un buon approccio iniziale per l'analisi degli interstizi, nel lavoro di progettazione delle condotte sottomarine.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Lazzari, P. Pedferri, "Cathodic Protection" Ed. Polipress, Milano (2006).
- [2] T. Bellezze, G. Roventi, R. Fratesi, Corros. Eng. Sci. Techn., Vol. 48(5) pp. 340-345 (2013).
- [3] T. Bellezze, R. Fratesi, G. Roventi, Metall. Ita., Vol. 105 (6) pp. 31-36 (2013).
- [4] T. Bellezze, R. Fratesi, G. Roventi, Metall. Ita., Vol. 106 (n.7-8) pp. 3-7 (2014).
- [5] S. Lorenzi, T. Pastore, T. Bellezze, R. Fratesi, Corros. Sci., Vol. 108 (7), pag. 36-46 (2016).
- [6] Z. Li, F. Gan, X. Mao, Corr. Sci., Vol. 44, pag. 689-701 (2002).
- [7] J.J. Perdomo, I. Song, Corros. Sci., Vol. 42, pag. 1389-1415 (2000).