

VALUTAZIONE DEL POTERE PENETRANTE DELLA PREVENZIONE CATODICA APPLICATA MEDIANTE ANODI SACRIFIZIALI A COLONNE IN CALCESTRUZZO ARMATO PARZIALMENTE IMMERSO IN ACQUA DI MARE

L. Bertolini, E. Redaelli

Si sono effettuate simulazioni numeriche finalizzate alla determinazione della distribuzione del potenziale e della corrente in elementi in calcestruzzo armato parzialmente immersi in acqua di mare con lo scopo di prevedere il potere penetrante della prevenzione catodica applicata con anodi sacrificali. Si sono considerati modelli bidimensionali di colonne in calcestruzzo armato contenenti armature di acciaio a diverse altezze protette con anodi sacrificali posti nell'acqua in cui erano parzialmente immerse. Le condizioni al contorno per la descrizione del comportamento elettrochimico delle armature e i valori della resistività elettrica del calcestruzzo alle diverse altezze dal livello dell'acqua sono stati ricavati da prove sperimentali di laboratorio effettuate su provini in calcestruzzo armato. Nelle simulazioni si sono considerate diverse condizioni di comportamento elettrochimico delle armature, dimensioni dell'elemento e posizione degli anodi sacrificali. La nota riporta i risultati ottenuti dai modelli e confronta il potere penetrante che può essere raggiunto usando anodi sacrificali immersi in acqua di mare per proteggere le armature nella parte emersa di elementi in calcestruzzo.

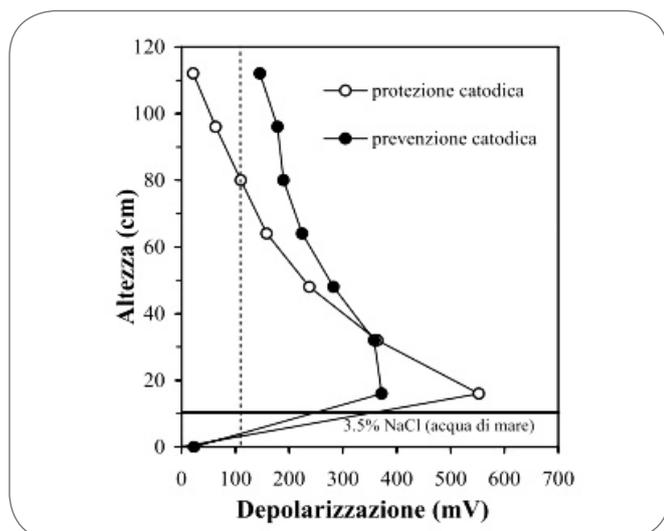
PAROLE CHIAVE: corrosione, simulazione numerica, calcestruzzo, prevenzione e protezione catodica

INTRODUZIONE

La corrosione da cloruri, come è noto, è uno dei principali fenomeni di degrado delle strutture in calcestruzzo armato esposte ad ambienti marini. I cloruri penetrano nel copriferro e, quando la loro concentrazione nel calcestruzzo a contatto con le armature raggiunge un valore critico, causano l'innesco della corrosione per pitting. Questo valore critico dipende da diversi fattori, come il pH del calcestruzzo, il potenziale dell'acciaio e la presenza di microvuoti nella pasta cementizia [1]. La prevenzione catodica è una tecnica elettrochimica che consente di ritardare l'innesco della corrosione in strutture in calcestruzzo ar-

mato soggette a penetrazione di cloruri; è applicata nello stesso modo della protezione catodica, cioè applicando una corrente (catodica) all'armatura attraverso un anodo esterno, ma, diversamente dalla protezione catodica, è applicata quando i cloruri non hanno ancora raggiunto il tenore critico in corrispondenza delle armature, che quindi sono ancora passive [2,3]. La prevenzione catodica si basa sull'aumento del tenore critico per l'innesco della corrosione in seguito alla polarizzazione catodica dell'acciaio. Di conseguenza, il tempo necessario ai cloruri per penetrare il calcestruzzo e raggiungere il tenore critico alla superficie dell'acciaio aumenta e la vita di servizio della struttura è più lunga. La prevenzione catodica lavora a densità di corrente molto più basse (circa 1-2 mA/m² riferiti alla superficie di armatura) rispetto alla protezione catodica (10-20 mA/m²). Grazie al suo elevato potere penetrante [4] e quindi al minore rischio di sovrapprotezione, può essere applicata anche a strutture precomprese senza rischio di infragilimento da

Luca Bertolini, Elena Redaelli
Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica,
Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta"



▲
Fig. 1

Confronto della depolarizzazione a 4 ore in funzione dell'altezza nei provini in calcestruzzo armato soggetti a prevenzione e protezione catodica [7].
Comparison of four-hour-decay along the height of the column subjected to cathodic prevention [black symbols] and cathodic protection [white symbols] [7].

idrogeno.

Le strutture marine parzialmente immerse in acqua di mare mostrano alcune peculiarità. In genere il maggior rischio di corrosione si presenta nella parte emersa (in particolare nella zona delle maree e degli spruzzi), dove sono presenti sia l'ossigeno sia i cloruri. Viceversa, le armature d'acciaio contenute nel calcestruzzo permanentemente immerse generalmente non soffrono corrosione grazie alla mancanza di ossigeno e, quindi, ai bassi valori di potenziale tipici delle condizioni di saturazione. Diversi autori hanno studiato la possibilità di proteggere le armature nella parte emersa attraverso l'uso di anodi sacrificali immersi nell'acqua o inglobati nella struttura [5-7]. In particolare, sarebbe molto vantaggioso poter proteggere l'armatura attraverso anodi sacrificali semplicemente immersi e collegati elettricamente all'armatura. Una possibile limitazione è il potere penetrante della protezione, che raggiunge una altezza di poche decine di centimetri sopra il livello dell'acqua, in relazione alla resistività del calcestruzzo [5,6]. L'uso della prevenzione catodica potrebbe consentire di rimuovere questa limitazione, grazie alla maggiore polarizzabilità dell'acciaio passivo rispetto a quello attivo [4]. Infatti, prove sperimentali effettuate su colonne in calcestruzzo di dimensioni 0.15 m × 0.15 m × 1.2 m [7] hanno mostrato che, se gli anodi sacrificali vengono applicati quando il calcestruzzo è privo di cloruri e le armature passive, anche l'armatura più alta, posta a 1 m dal livello della soluzione, è in condizioni di polarizzazione tali da prevenire l'innescò della corrosione (definite da una depolarizzazione a 4 ore superiore di 100 mV [3]).

Viceversa, se le armature si stanno già corrodendo, le condizioni di polarizzazione sufficienti per garantire la protezione vengono raggiunte solo fino a circa 0.6 m dal livello dell'acqua. Questo risultato è mostrato nella Fig. 1, che mostra la depolarizzazione a 4 ore delle armature alle

diverse altezze nei due casi di protezione catodica e prevenzione catodica.

Per estendere questi risultati a elementi con geometria e dimensioni più realistiche si sono effettuate simulazioni numeriche di distribuzione del potenziale e della corrente in modelli rappresentativi di colonne in calcestruzzo contenenti armature a diverse altezze, protetti con anodi sacrificali posti in acqua e collegati alle armature. Le condizioni al contorno per descrivere il comportamento elettrochimico dell'acciaio e i valori di resistività elettrica del calcestruzzo sono stati ricavati dalle prove sperimentali [7]. Si sono considerate diverse condizioni che differiscono nel comportamento elettrochimico delle armature, nella forma e dimensione degli elementi, nella posizione degli anodi, in modo da evidenziare i possibili benefici che possono essere raggiunti con la prevenzione catodica.

DESCRIZIONE DEI MODELLI NUMERICI

I modelli numerici hanno lo scopo di determinare la distribuzione del potenziale e della corrente in un dominio rappresentativo di un elemento in calcestruzzo armato parzialmente immerso in acqua di mare e protetto con anodi sacrificali. In generale, questo problema richiede la soluzione della equazione di Laplace (1) e della legge di Ohm (2):

$$\nabla \cdot (-\kappa \nabla V) = 0 \quad (1)$$

e

$$i = -\kappa \nabla V \quad (2)$$

dove κ indica la conducibilità ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$), V è il potenziale (V) e i la densità di corrente (A/m^2) [8]. In questo lavoro si è utilizzato un programma agli elementi finiti.

Le armature e gli anodi sono stati assunti come regioni equipotenziali, grazie alla elevata conducibilità dei metalli rispetto a quella del calcestruzzo e della acqua di mare, e non sono stati considerati nel dominio di soluzione della equazione di Laplace; il loro comportamento elettrochimico è stato considerato attraverso opportune condizioni al contorno all'interfaccia con l'elettrolita.

Si sono considerati diversi tipi di condizioni al contorno. All'interfaccia armatura/calcestruzzo si sono inserite curve di polarizzazione che descrivono la cinetica delle reazioni elettrochimiche, o nella forma di equazioni di Butler-Volmer:

$$i = i_0 \cdot \{ \exp(2.303 \cdot (V - V_0)/b_a) - \exp(-2.303 \cdot (V - V_0)/b_c) \} \quad (3)$$

oppure introducendo la corrente limite di diffusione dell'ossigeno:

$$i = \frac{1 - \exp(-2.303 \cdot (V - V_0)/b_c)}{1 - \frac{i_0}{i_{\text{lim}} \exp(-2.303 \cdot (V - V_0)/b_c)}} \quad (4)$$

Nelle equazioni precedenti i_0 è la densità di corrente di corrosione (mA/m^2), V_0 il potenziale di corrosione (V), i_{lim} la densità di corrente limite dell'ossigeno (mA/m^2), b_a e b_c le pendenze anodica e catodica delle curve di polarizzazione (mV/dec). Per le armature nel calcestruzzo immerso si è applicata una semplice condizione di densità di corrente costante, in virtù delle condizioni limite raggiunte in assenza di ossigeno sia in condizioni

Superfici	Condizione	Equazione	Parametri	Cloruri 3%	Cloruri 0%
Armatura immersa	Densità di corrente costante	(5)	i_{cost} (mA/m ²)	4	1
Armature fino ad altezza h dal livello del mare	Corrente limite di ossigeno	(4)	h (m)	0.24	0.16
			V_0 (mV/SCE)	-300	-440
			i_{pas} (mA/m ²)	10	8
			i_{lim} (mA/m ²)	140	40
			b_c (mV/dec)	300	300
Armature superiori	Butler-Volmer	(3)	V_0 (mV/SCE)	-200	-100
			i_0 (mA/m ²)	3	0.1
			b_a (mV/dec)	75	10000
			b_c (mV/dec)	300	300
Anodo	Potenziale costante	(6)	V_{an} (mV/SCE)	-1050	-1050
Altre	Isolamento	(7)	-	-	-

▲
Tab. 1

Condizioni al contorno usate nei modelli per la calibrazione con i dati sperimentali.

Boundary conditions used in the models for the calibration with experimental tests.

di corrosione libera che in presenza di polarizzazione catodica:

$$i = i_{cost} \quad (5)$$

Sulla superficie dell'anodo si è applicata una condizione di potenziale costante (l'anodo è stato assunto come una superficie non polarizzabile):

$$V = V_{an} \quad (6)$$

Tutte le altre superfici al contorno, come le superfici esterne della geometria, sono state poste isolanti:

$$i = 0 \quad (7)$$

La resistività del calcestruzzo è stata scelta considerando le differenze nel contenuto di acqua e di cloruri lungo l'altezza della colonna. La resistività dell'acqua di mare è stata assunta pari a 0.2 $\Omega \cdot m$.

CALIBRAZIONE DEL MODELLO CON I DATI SPERIMENTALI

Inizialmente si è effettuata una serie di simulazioni per calibrare il modello a partire da dati sperimentali di potenziale e corrente su armature poste a diverse altezze in un provino di calcestruzzo. Solo l'armatura più bassa era immersa nella soluzione (3.5% NaCl). Le armature erano collegate elettricamente tra loro e con dei dischi di Al-Zn-In immersi nella soluzione. Si sono considerati due provini: uno in calcestruzzo privo di cloruri (prevenzione catodica) e uno in calcestruzzo contenente 3% di cloruri in massa rispetto al cemento, aggiunti al getto (protezione catodica). I dettagli sperimentali sono in [7]. I valori dei parametri sono riportati in Tab. 1.

Sull'armatura nel calcestruzzo immerso si è applicata una condizione al contorno di densità di corrente costante, in quanto questa armatura riceve una corrente molto bassa dall'anodo, a causa della bassa densità di corrente limite dell'ossigeno in queste condizioni. Il valore di densità di corrente è quello misurato nelle prove sperimentali, che si è mantenuto costante nel tempo. Le prime barre emerse, fino a una altezza h dal livello dell'ac-

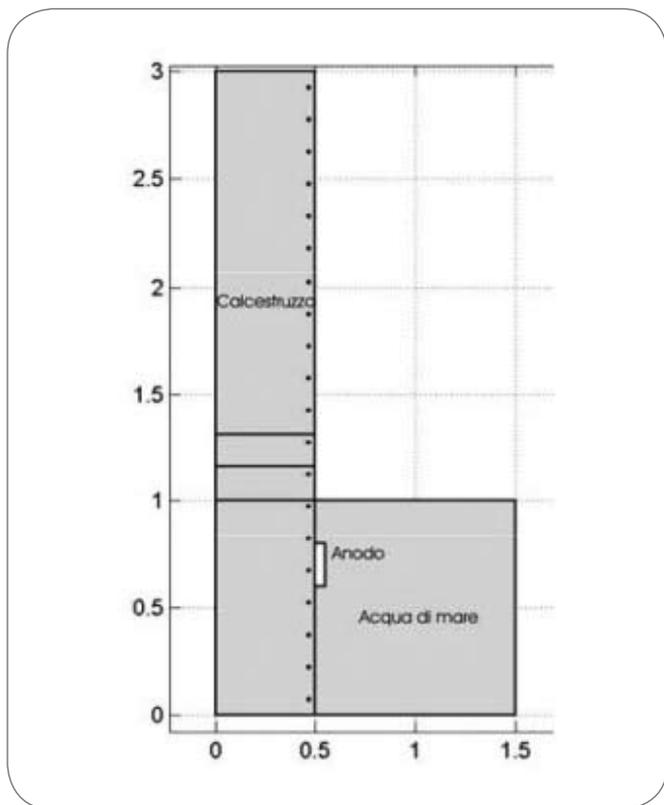
qua (pari a 0.24 m nel calcestruzzo con cloruri e 0.16 m nel calcestruzzo senza cloruri) sono state caratterizzate da una condizione al contorno del tipo con corrente limite di diffusione di ossigeno, mentre le armature superiori con curve di polarizzazione di tipo Butler-Volmer. La pendenza del tratto catodico della curva di polarizzazione è stata scelta pari a 300 mV/dec, mentre la pendenza del tratto anodico è pari a 75 mV/dec per l'acciaio in condizioni di attività e 10 V/dec (cioè praticamente infinita) per l'acciaio in condizioni di passività. I valori del potenziale e della corrente di corrosione sono quelli misurati sulle armature in condizioni di corrosione libera. Il potenziale dell'anodo è pari a -1.05 V/SCE.

Per il calcestruzzo immerso e fino ad altezza h dal livello della soluzione si sono applicati valori di resistività di 30 $\Omega \cdot m$ nel calcestruzzo con cloruri e 100 $\Omega \cdot m$ nel calcestruzzo senza cloruri; per il calcestruzzo ad altezze superiori si sono applicati valori di 200 $\Omega \cdot m$ e 1500 $\Omega \cdot m$ rispettivamente.

Con questo modello numerico si sono ottenute distribuzioni del potenziale e della corrente che hanno mostrato un buon accordo con la distribuzione misurata sperimentalmente, sia nel caso della protezione catodica che nel caso della prevenzione catodica; i dettagli sono riportati in [9]. In particolare, analogamente ai risultati sperimentali, la soluzione dei modelli ha evidenziato che la polarizzazione catodica dell'armatura (cioè la differenza tra il potenziale di corrosione libera e quello raggiunto per effetto del collegamento con gli anodi) è maggiore di 100 mV fino a 0.65 m nel caso della protezione catodica e su tutta l'altezza del provino nel caso di prevenzione catodica.

POTERE PENETRANTE DELLA PREVENZIONE CATODICA SU COLONNE MARINE

Per estendere i risultati delle prove sperimentali a colonne con geometria e dimensioni più realistiche, si è utilizzato il modello per il calcolo della distribuzione del

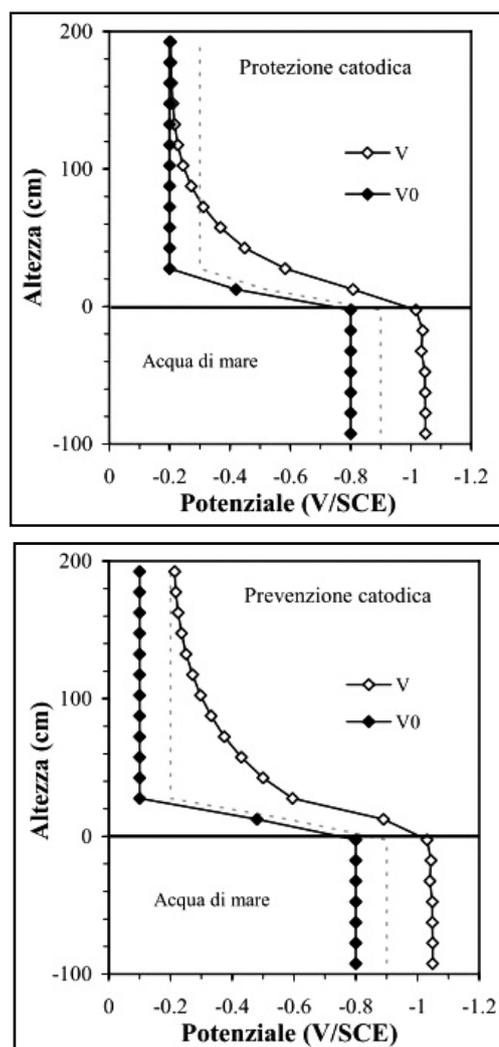


▲
Fig. 2
Geometria del modello bidimensionale, dimensioni in m.
Geometry of bidimensional model, dimensions in m.

potenziale su colonne in calcestruzzo parzialmente immerse in acqua di mare contenenti armature lungo tutta la loro altezza.

Si è considerata inizialmente una geometria di riferimento con diametro di 1 m, altezza sopra il livello del mare di 2 m, altezza della zona immersa di 1 m. Questa colonna contiene 8 barre verticali (diametro 12 mm) e un staffa a spirale (diametro 10 mm) con spaziatura di 0.15 m. Il copriferro è di 30 mm. Tutte le armature sono cortocircuitate e collegate a un anodo sacrificiale posto sulla superficie della colonna. L'anodo è circolare, alto 0.2 m e con spessore di 0.05 m, posto attorno alla colonna 0.2 m al di sotto del livello dell'acqua. Si è costruito un modello bidimensionale dopo aver verificato con modelli tridimensionali che la presenza delle armature longitudinali poteva essere trascurata ai fini della distribuzione del potenziale e quindi sfruttando la geometria assialsimmetrica dell'elemento. Il dominio del modello bidimensionale è mostrato in Fig. 2. La larghezza del dominio che rappresenta l'acqua di mare è pari a 1 m. Le condizioni al contorno rispecchiano quelle utilizzate nella calibrazione del modello: le barre immerse hanno una condizione di densità di corrente costante, quelle nel primo tratto emerso con altezza h (0.16-0.24 m) hanno una curva di polarizzazione con corrente limitata dalla diffusione dell'ossigeno e le restanti armature superiori una curva di polarizzazione tipo Butler-Volmer. Il potenziale imposto all'anodo è di -1.05 V/SCE.

Anche i valori di resistività sono stati scelti in base al mo-



▲
Fig. 3
Potenziale delle armature a diverse altezze calcolati con il modello numerico nel caso di protezione catodica (a) e prevenzione catodica (b). La linea grigia tratteggiata delimita la zona in cui la polarizzazione è superiore a 100 mV.
Potential of steel bars as a function of height calculated with the numerical model in the case of cathodic protection (a) and cathodic prevention (b). The grey dotted line represents potential values at which the polarisation is higher than 100 mV.

dello precedente: 30 $\Omega \cdot m$ fino a 1.16 m per il calcestruzzo con 3% di cloruri e 100 $\Omega \cdot m$ fino a 1.24 m per il calcestruzzo senza cloruri; la resistività nella parte restante della colonna è di 200 $\Omega \cdot m$ e 1500 $\Omega \cdot m$ rispettivamente. Questi valori possono essere ragionevolmente considerati rappresentativi di mari calmi con basse variazioni delle maree. Il modello è stato risolto con una mesh di circa 15500 elementi triangolari.

La Fig. 3 mostra le distribuzioni del potenziale nella colonna con protezione catodica (a) e in quella con prevenzione catodica (b). Si può osservare che se le armature sono attive la polarizzazione catodica diventa trascurabi-

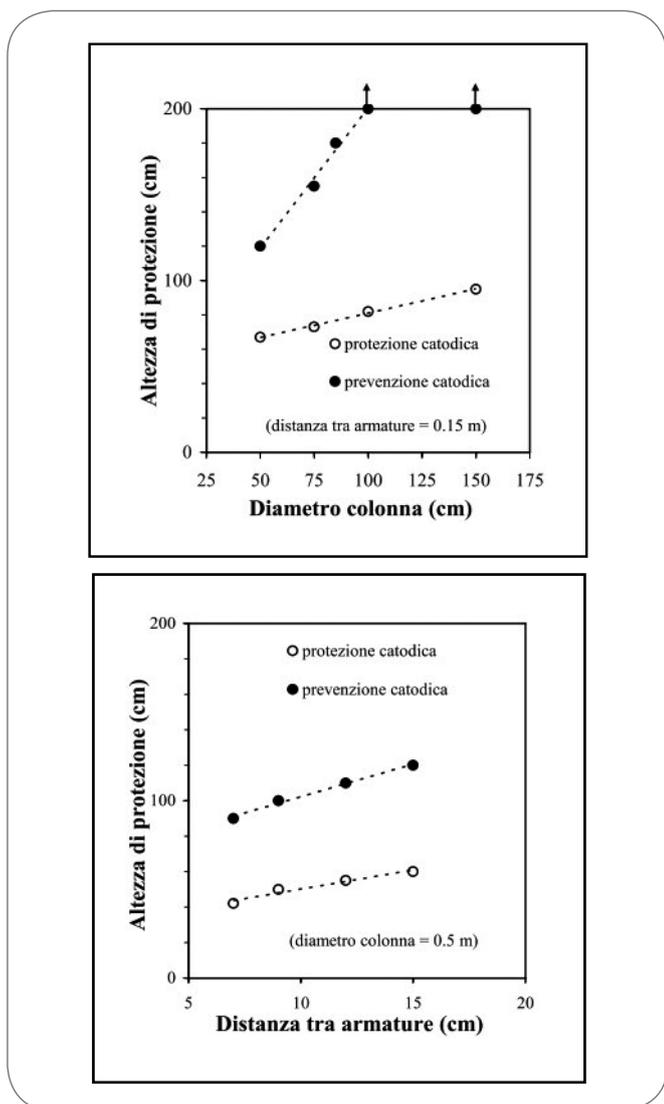


Fig. 4

Altezza al di sopra del livello del mare a cui la polarizzazione dell'armatura è superiore a 100 mV in funzione del diametro della colonna (a) e della distanza tra le armature (b).

Height above water level where the steel polarisation is higher than 100 mV as a function of column diameter (a) and distance between rebars (b).

le ad altezze superiori a 1.20 m, ed è minore di 100 mV al di sopra di 0.8 m; se le armature sono passive, anche la polarizzazione della armatura più in alto è superiore a 100 mV, anche se la densità di corrente che questa armatura riceve (circa 0.1 mA/m²) è inferiore a quella che riceve l'armatura posta alla stessa altezza nella colonna con protezione catodica (circa 0.4 mA/m²).

Nonostante la maggiore resistività del calcestruzzo privo di cloruri, il potere penetrante della prevenzione catodica è più elevato di quello della protezione catodica, grazie alla migliore polarizzabilità dell'acciaio passivo. Mentre la bassa polarizzazione delle armature poste nella parte alta della colonna non è sufficiente a proteggerle se si stanno già corrodendo, può avere effetti benefici se sono passive; i risultati ottenuti dal modello suggeriscono che

questo effetto può essere presente anche ad altezze superiori a 2 m dal livello dell'acqua.

Oltre al caso di riferimento, si sono considerati molti altri casi variando parametri quali lo spessore di copriferro, il diametro della colonna, la distanza tra le armature, la profondità dell'anodo al di sotto del livello del mare. Ad esempio, l'effetto del diametro della colonna e della distanza tra le armature è mostrato in Fig. 4. Si sono considerate protette le armature con valori di polarizzazione superiori a 100 mV. Il potere penetrante aumenta linearmente in funzione di entrambi i parametri sia per la protezione sia per la prevenzione catodica. Un maggiore diametro consente alla corrente di fluire più facilmente nella parte interna della colonna. Un aumento della distanza tra le armature si traduce in una diminuzione della superficie di acciaio da proteggere. Viceversa, non si è evidenziato alcun effetto dello spessore di copriferro nell'intervallo di valori considerato (30-100 mm) e della profondità a cui è posto l'anodo al di sotto della superficie dell'acqua.

Tutti i risultati mostrano chiaramente i vantaggi di applicare gli anodi sacrificali prima dell'innesco della corrosione delle armature (quindi di applicare la prevenzione invece della protezione). Questo è un chiaro esempio dei minori costi e maggiori vantaggi a lungo termine di una tecnica preventiva.

CONCLUSIONI

Si sono riprodotti risultati sperimentali su provini di calcestruzzo armato soggetti alla applicazione della protezione catodica e della prevenzione catodica per calibrare un modello numerico adatto a studiare il potere penetrante della protezione con anodi sacrificali immersi. Le simulazioni numeriche hanno mostrato che l'armatura di acciaio di una colonna circolare alta 3 m e con diametro di 1 m era polarizzata più di 100 mV rispetto al potenziale di corrosione libera anche a 2 m dal livello dell'acqua nel caso in cui l'acciaio fosse passivo, mentre la polarizzazione è diventata praticamente trascurabile al di sopra di 1 m se l'acciaio si corrodeva, nonostante la minore resistività del calcestruzzo. Il potere penetrante dipende dalla geometria della colonna, in particolare il suo diametro, e dalla quantità di superficie di acciaio da proteggere; altri parametri come lo spessore di copriferro e la posizione degli anodi hanno invece un effetto trascurabile.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori sono grati a S. Malgrati e M. Pozzi per il contributo alle simulazioni numeriche.

BIBLIOGRAFIA

- 1] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, R. Polder, "Corrosion of steel in concrete. Prevention, diagnosis, repair", Wiley-VCH, Weinheim, 2004.
- 2] P. Pedferri, Construction and Building Materials, 10 (1996) 391.
- 3] EN 12696-1 Standard, Cathodic protection of Steel in Atmospherically Exposed Concrete, March 2000.
- 4] T. Pastore, P. Pedferri, L. Bertolini, F. Bolzoni, "Current distribution problems in the cathodic protection of reinforced concrete structures", in: D.W.S. Ho, F. Collins (Eds.), Proc. of the International RILEM/CSI-

- RO/ACRA Conference on Rehabilitation of Concrete Structures, Melbourne, 31 August – 2 September, 1992, pp. 189-200.
- 5] O.T. de Rincón, M.F. de Romero, A.R de Carruyo, M. Sanchez, J. Bravo, *Materials and Structures*, 30 (1997) 556.
- 6] A.A. Sagüés, S.C. Kranc, F. Presuel-Moreno, "Advanced computational model for sacrificial cathodic protection of partially submerged reinforced concrete marine footers", in: W.F. Silva-Araya, O.T. de Rincón, L.P. O'Neill (Eds.), *Repair and rehabilitation of reinforced concrete structures: the state-of-the-art*, American Society of Civil Engineering, Reston, 1997, pp. 1-13.
- 7] L. Bertolini, M. Gastaldi, M.P. Pedferri, E. Redaelli, *Corrosion Science*, 44 (2002) 1497.
- 8] J.S. Newman, "Electrochemical systems", Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ, 1973.
- 9] L. Bertolini, E. Redaelli, "Numerical simulation of the throwing power of cathodic prevention applied to marine reinforced concrete piles by means of sacrificial anodes" Eurocorr 2004, Nice (F), 12-16 September 2004.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE THROWING POWER OF CATHODIC PREVENTION WITH SACRIFICIAL ANODES APPLIED TO REINFORCED CONCRETE PILES PARTIALLY SUBMERGED IN SEAWATER

Keywords: corrosion, numerical simulation, concrete, cathodic protection and prevention

The paper deals with the determination of current and potential distribution in reinforced concrete elements partially submerged in seawater aimed at predicting the throwing power of cathodic prevention applied by means of sacrificial anodes.

Previous laboratory studies carried out on reinforced concrete columns $0.15\text{ m} \times 0.15\text{ m} \times 1.20\text{ m}$ showed that the use of sacrificial anodes placed in the solution at the bottom of the column could provide protection of corroding steel bars in the emerged part of the pile up to about 0.6 m from the water level. However, if sacrificial anodes were applied when the concrete was chloride free and steel bars were still passive, even the highest bar, placed at 1 m from the level of water, was protected. These results are shown in Fig. 1 and they are due to the higher polarisability of passive steel, that makes the

throwing power of cathodic prevention higher compared to that of cathodic protection.

In order to extend the results obtained on small-scale specimens to elements of higher dimensions, numerical simulations of current and potential distribution were carried out. Two-dimensional models were set up of reinforced concrete piles containing steel bars at different heights protected with sacrificial anodes placed in the water in which they were partially submerged (the geometry of one of the models is shown in Fig. 2).

Boundary conditions describing the electrochemical behaviour of bars were obtained from polarisation curves measured on the previously mentioned columns. Values of concrete conductivity at different heights from the water level were also obtained from those tests (Tab. 1).

Several cases were considered, representative of conditions differing in electrochemical behaviour of steel bars, dimensions of element, position of sacrificial anodes. The paper discusses the results obtained from the models and compares them in terms of the throwing power that can be reached by using sacrificial anodes immersed in the seawater to protect reinforcing steel bars in the emerged part of a pile, in the case of cathodic protection and cathodic prevention (Fig. 3). In particular, parameters such as the column diameter and the distance between the rebars were considered (Fig. 4).