

Rebars corrosion in concrete coated with polymer-cementitious mortars

Corrosione delle armature in calcestruzzo rivestito con malte cementizie-polimeriche

M. Ormellese¹, S. Beretta¹, A. Brenna¹, MV. Diamanti¹, MP. Pedefferri¹, T. Pastore², M. Berra³, F. Bolzoni¹

¹ Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta", Milano, Italia

² Università di Bergamo, Dipartimento di Progettazione e Tecnologie, Dalmine (BG), Italia

³ R.S.E. S.p.A. Ricerca sul Sistema Energetico, Milano, Italia

ABSTRACT: The paper deals with the study of the effect of polymer modified cementitious mortars on chloride-induced corrosion of steel reinforcement in concrete. Tests were carried out on two commercial coatings, with different polymer/cement ratio. Monitoring of rebars corrosion potential and corrosion rate in concrete subjected to chloride ponding were carried out for more than 15 years; chloride penetration profiles, coating adhesion and corrosion morphology have been also analysed. It was demonstrated that polymer modified cementitious mortars can delay corrosion initiation in concrete caused by chloride penetration. The protective effect increase as the polymer content (polymer/cement ratio) increases. / L'articolo riporta i risultati relativi all'effetto di rivestimenti a base di malte cementizie modificate con polimeri sulla corrosione delle armature nel calcestruzzo; lo studio è stato effettuato su due tipi di rivestimenti commerciali, caratterizzati da diversi valori del rapporto polimero/cemento. Sono stati misurati per oltre 15 anni il potenziale e la velocità di corrosione delle armature in calcestruzzo soggetto a cicli accelerati di esposizione a soluzioni con cloruri. L'analisi dei risultati è stata completata con misure di concentrazione di cloruri, aderenza rivestimento-calcestruzzo, morfologia della corrosione. I risultati della sperimentazione hanno dimostrato che i rivestimenti a base di malte cementizie modificate con polimeri sono in grado di ritardare l'innesco della corrosione causata dall'ingresso dei cloruri, e che l'effetto è maggiore con rivestimenti caratterizzati da un rapporto polimero/cemento superiore.

KEYWORDS: rebars corrosion in concrete; concrete coatings; polymer modified cement mortars / corrosione delle armature; rivestimenti del calcestruzzo; malte cementizie modificate con polimeri

1 INTRODUZIONE

1.1 Corrosione delle armature

Le armature in acciaio al carbonio nel calcestruzzo sono inizialmente in condizioni di passività, promosse dall'elevata alcalinità del calcestruzzo (pH compreso in genere tra 13 e 14); in queste condizioni la velocità di corrosione è trascurabile. La perdita delle condizioni di passività può avvenire a causa della carbonatazione del calcestruzzo, che riduce il pH della soluzione contenuta nei suoi pori, o della presenza di cloruri in concentrazione superiore a un livello critico (Bertolini, Elsener, Pedefferri, Redaelli & Polder 2013).

La prevenzione della corrosione delle armature deve essere effettuata in fase di progettazione ed esecuzione dell'opera, utilizzando un calcestruzzo di elevata qualità (basso rapporto acqua/cemento), con un adeguato spessore di copriferro e procedure adeguate di messa in opera e di stagionatura (EN 206, Eurocodice 2). Il rispetto dei parametri indicati da queste normative può garantire nella maggior parte dei casi il raggiungimento di una vita utile di 50 anni per le strutture operanti in ambienti non troppo ag-

gressivi. In presenza di ambienti particolarmente aggressivi e vite di servizio elevate può essere necessario fare ricorso ai metodi di "protezione aggiuntiva" (Bertolini, Elsener, Pedefferri, Redaelli & Polder 2013); tra questi, l'uso di armature più resistenti alla corrosione (zincate o in acciaio inossidabile), la prevenzione catodica (Pedefferri 1996), l'uso di inibitori di corrosione.

1.2 Malte cementizie modificate con polimeri

I rivestimenti superficiali del calcestruzzo possono rappresentare un'efficace azione di protezione dalla corrosione a un costo relativamente contenuto rispetto a altri metodi di protezione aggiuntiva.

I rivestimenti possono essere classificati in quattro tipologie: film continui a base organica, trattamenti idrofobizzanti, trattamenti che sigillano i pori capillari, malte cementizie modificate con polimeri (Bertolini, Elsener, Pedefferri, Redaelli & Polder 2013, Swamy & Tanikawa 1993, Basheer, Basheer, Cleland & Long 1997, Seneviratne, Sergi & Page 2000, Raupach & Wolff 2004).

Il presente lavoro è centrato sull'efficacia di rivestimenti a base di malte cementizie modificate con polimeri. Questi rivestimenti sono caratterizzati da buona adesione al calcestruzzo, flessibilità e capacità di sigillatura delle fessure; inoltre la bassa permeabilità all'acqua e la discreta permeabilità al vapore conferiscono loro una buona capacità di traspirazione, che evita l'instaurarsi di pressioni all'interfaccia rivestimento-calcestruzzo; la componente inorganica (cementizia) conferisce a questi rivestimenti una buona resistenza all'attacco dovuto ai raggi UV, che invece è molto aggressivo per i rivestimenti di natura solo polimerica (Kristiansen 1997, Coppola, Pistolesi, Zaffaroni & Collepari 1997, Aggarwal, Thaplyial & Karade 2007, Zhang & Buenfeld 2000).

In letteratura sono disponibili molti risultati ottenuti mediante prove standard e/o di breve durata, come ad esempio prove di assorbimento d'acqua, di permeabilità al vapore, di adesione e di corrosione accelerata da cloruri, mentre sono pochi i risultati di sperimentazioni a lungo periodo (Coppola, Pistolesi, Zaffaroni & Collepari 1997, Zhang & Buenfeld 2000, Raupach & Wolff, 2005).

In un precedente lavoro dello stesso gruppo di ricerca i rivestimenti in studio sono stati caratterizzati per quanto riguarda la diffusione stazionaria di cloruri, l'adesione rivestimento-calcestruzzo, il trasporto di acqua e vapore (Diamanti, Brenna, Bolzoni, Berra, Pastore & Ormellese 2013). In un successivo lavoro il comportamento di questo tipo di rivestimenti è stato confrontato in prove di medio periodo con rivestimenti a base polimerica (Brenna, Bolzoni, Beretta & Ormellese 2013).

Il presente lavoro si riferisce a una sperimentazione di lungo periodo (oltre 15 anni) che ha permesso di caratterizzare l'efficacia a lungo termine dei rivestimenti studiati nel contrastare la corrosione da cloruri.

2 MATERIALI E METODI SPERIMENTALI

2.1 Materiali

Lo studio è stato effettuato su rivestimenti commerciali a base di malte cementizie modificate con polimeri acrilici. I due rivestimenti sono caratterizzati da un diverso rapporto polimero/cemento, pari a 0,35 e 0,55.

Il calcestruzzo è stato confezionato con un cemento CEM II A/L 42,5R (EN 197), aggregati calcarei frantumati provenienti dalla cava di Zandobbio (BG) con una dimensione massima di 10 mm. Il rapporto acqua/cemento è pari a 0,5. Le proporzioni della miscela sono riportate in Tabella 1. La stagionatura è stata effettuata a umido (umidità relativa 95% e temperatura 20°C) per 28 giorni. I rivestimenti sono stati applicati in accordo alle indicazioni dei produttori con uno spessore di circa 2 mm.

Table 1. Concrete mix design and compressive strength / Mix design e resistenza a compressione del calcestruzzo

Water/cement ratio/rapporto acqua/cemento	0.5
Cement content /Cemento	300 kg/m ³
Aggregates/ Aggregati	2000 kg/m ³
Plasticizer/ Fluidificante	4.5 kg/m ³
28 days Compressive strength/ Resistenza a compressione a 28 giorni	46 MPa

Sono state utilizzate armature in acciaio al carbonio conformi alla normativa italiana, compatibili con l'attuale designazione FeB450. Solo una parte della lunghezza dell'armatura è stata esposta al calcestruzzo, mentre le parti laterali sono state isolate con una resina termo-restringente. Per le misure di velocità di corrosione sono stati posizionati nelle casseforme anche due armature di acciaio inossidabile e un filo di acciaio inossidabile posizionato vicino all'armatura in acciaio al carbonio. Il copriferro è di 2 cm. Per ogni condizione sono stati confezionati almeno due provini (Figura 1).

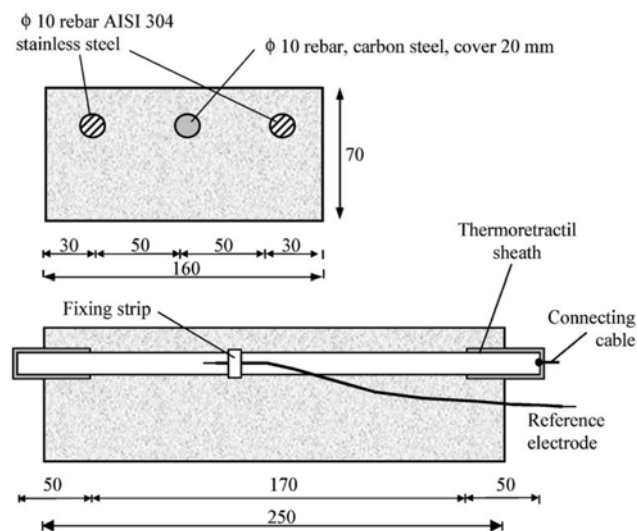


Figure 1. Cross section and lateral view of reinforced concrete specimen / Sezione e vista laterale del provino in calcestruzzo armato.

2.2 Misura del potenziale e della velocità di corrosione

I provini in calcestruzzo armato sono stati sottoposti a cicli di ingresso accelerato dei cloruri ("ponding"), costituiti da una settimana di bagnamento con una soluzione al 5% di NaCl e due settimane di asciugamento; questi cicli simulano una condizione di esposizione severa. La soluzione di cloruri è stata versata all'interno di una vaschetta in PVC posta sulla faccia superiore del provino.

Il comportamento a corrosione è stato verificato mediante misura periodica (alla fine di ogni ciclo di "ponding") del potenziale e della velocità di corro-

sione. Il potenziale di corrosione (E_{corr}) è stato misurato rispetto a un elettrodo di riferimento al calomelano saturo (SCE), caratterizzato da un potenziale costante (+0.244 V rispetto all'elettrodo standard a idrogeno SHE). L'innesco della corrosione è stato verificato in corrispondenza di un brusco abbassamento del potenziale di almeno 200-300 mV.

La velocità di corrosione è stata misurata mediante il metodo della polarizzazione lineare, effettuando una scansione del potenziale tra -10 mV e +10 mV rispetto al potenziale di corrosione libera con una velocità di 0.16 mV/s (Andrade & Gonzalez 1978). Il filo di acciaio inossidabile è stato usato come elettrodo di riferimento e le due armature di acciaio inossidabile come contro-elettrodo.

La densità di corrente di corrosione i_{corr} (mA/m^2) è stata calcolata con la formula $i_{\text{corr}} = B/R_p$ dove B è una costante (pari a 26 mV) e R_p è la resistenza di polarizzazione (dato sperimentale, pendenza del grafico potenziale-densità di corrente). Dalla legge di Faraday è possibile calcolare la velocità di corrosione in $\mu\text{m}/\text{anno}$, moltiplicando per una costante pari a 1,17 il valore ottenuto in mA/m^2 .

2.3 Misura della concentrazione di cloruri

Per misurare la concentrazione totale dei cloruri all'interno del calcestruzzo sono state prelevate carote di diametro 3 cm: le carote sono state tagliate in dischi da circa 1 cm di spessore, macinate e sciolte in acido nitrico; la misura dei cloruri è stata effettuata mediante titolazione potenziometrica con nitrato d'argento.

2.4 Adesione del rivestimento

Le prove di adesione sono state effettuate con metodo "pull-off" in accordo alla normativa ASTM D4541. Un cilindro di acciaio inossidabile è stato fissato al rivestimento tramite una resina epossidica; dopo l'indurimento della resina, è stata applicata al cilindro una forza di trazione in direzione perpendicolare rispetto alla superficie del provino. La forza applicata è stata gradualmente aumentata fino al distacco di un pezzo di rivestimento, di calcestruzzo o di resina dalla superficie del provino stesso: nel momento del distacco il dispositivo registra il massimo carico applicato, dal quale si può ricavare il massimo sforzo di adesione. Sono state effettuate 3 misure per ogni provino.

2.5 Osservazione delle armature e morfologia di corrosione

Alla fine delle misure di potenziale e velocità di corrosione, per i provini rivestiti con uno dei due tipi di rivestimento, il calcestruzzo è stato demolito e le

armature sono state estratte per l'osservazione visiva e la valutazione della velocità di corrosione mediante la misura della perdita di massa. Prima di misurare la perdita di massa i prodotti di corrosione sono stati rimossi dalle armature mediante soluzione acida inibita.

3 RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Potenziale e velocità di corrosione

Le armature in calcestruzzo non rivestito hanno mostrato l'innesco della corrosione dopo pochi cicli di esposizione a soluzioni concentrate di cloruri. L'innesco della corrosione risulta evidente sia dall'abbassamento del potenziale di corrosione (Figura 2) sia dal notevole aumento della velocità di corrosione, che passa da valori inferiori a 1-2 $\mu\text{m}/\text{anno}$ (che possono essere considerati trascurabili) a valori superiori a 10 $\mu\text{m}/\text{anno}$ (Figura 3).

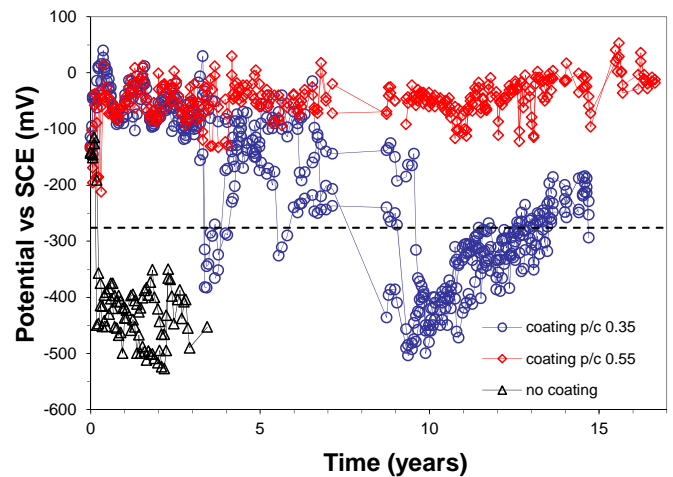


Figure 2. Corrosion potential of rebars in concrete subjected to ponding / Potenziale di corrosione delle armature in calcestruzzo soggetto a ingresso accelerato di cloruri.

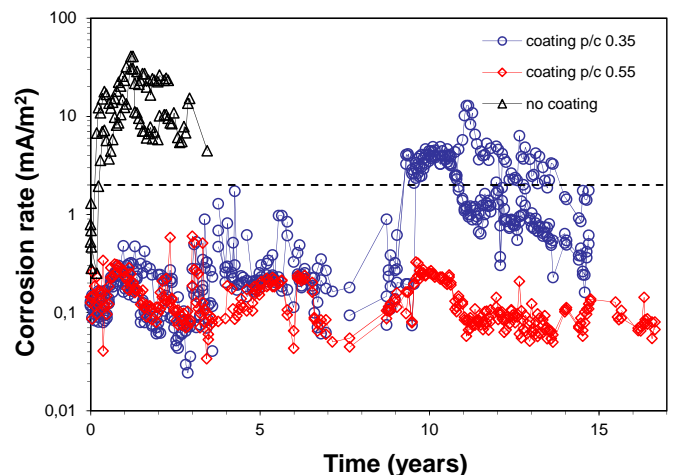


Figure 3. Corrosion rate of rebars in concrete subjected to ponding / Velocità di corrosione delle armature in calcestruzzo soggetto a ingresso accelerato di cloruri.

Le armature in calcestruzzo su cui è stato applicati il rivestimento caratterizzato da un rapporto p/c pari a 0,35 hanno mostrato abbassamento del potenziale in due casi dopo circa 3 anni e mezzo, nel terzo provino dopo circa 9 anni. La velocità di corrosione è aumentata in modo significativo per tutti i provini dopo circa 9 anni. Fino al termine della sperimentazione (quasi 17 anni) non è stato osservato né abbassamento del potenziale né aumento della velocità di corrosione delle armature in calcestruzzo con il rivestimento caratterizzato dal rapporto polimero cemento più elevato (0,55).

3.2 Trasporto dei cloruri

La presenza di rivestimento riduce la concentrazione dei cloruri penetrati nel calcestruzzo, e l'effetto è maggiore in presenza del rivestimento con il rapporto polimero/cemento 0,55. Questi dati sono in accordo con le misure di potenziale e velocità di corrosione e confermano precedenti esperienze dello stesso gruppo di ricerca sulla diffusione stazionaria dei cloruri (Diamanti, Brenna, Bolzoni, Berra, Pastore & Ormellese 2013). In Figura 4 si vede come la concentrazione di cloruri dopo 58 cicli (circa 3 anni e 8 mesi) nei provini rivestiti è inferiore a quella misurata dopo 38 cicli in calcestruzzo non rivestito. In calcestruzzo rivestito con il prodotto con il rapporto polimero/cemento 0,55 la concentrazione di cloruri è rimasta inferiore allo 0,1% rispetto alla massa di calcestruzzo anche dopo 107 cicli (circa 9 anni e 4 mesi). In calcestruzzo rivestito con il rivestimento con p/c 0,35 la concentrazione di cloruri aumenta nel tempo (Figura 5).

L'ingresso dei cloruri nel calcestruzzo è dovuto a differenti meccanismi: diffusione e assorbimento capillare. Le misure di concentrazione di cloruri sono state interpolate con la soluzione analitica della seconda legge di Fick (diffusione non stazionaria), approccio proposto per la prima volta da Collepari, Marcialis & Turriziani nel 1972.

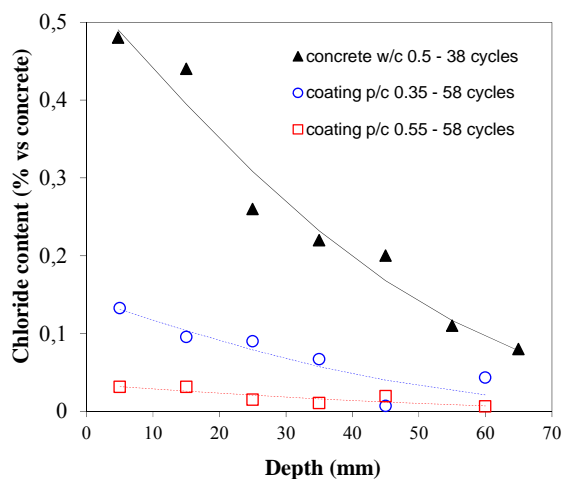


Figure 4. Chloride concentration in coated and not coated concrete subjected to chloride ponding / Concentrazione di cloruri in calcestruzzo rivestito e non rivestito soggetto a ingresso accelerato di cloruri.

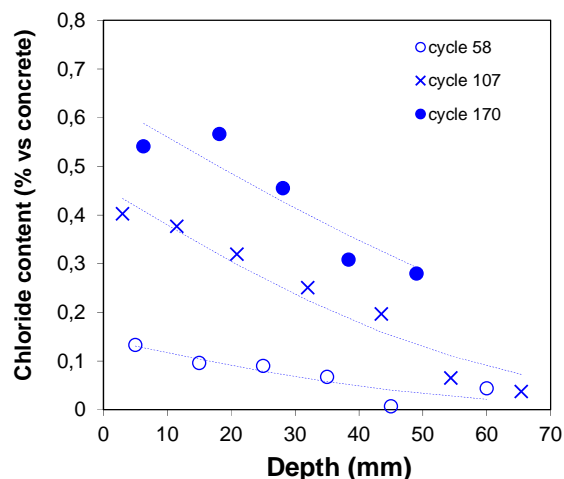


Figure 5. Chloride profile in concrete with p/c 0.35 coating subjected to chloride ponding / Profilo di cloruri in calcestruzzo con rivestimento p/c 0,35 soggetto a ingresso accelerato di cloruri.

La concentrazione di cloruri nel calcestruzzo $C(x,t)$ alla profondità x e al tempo t può essere valutata mediante la soluzione analitica della 2° legge di Fick nel caso di concentrazione superficiale (C_s) e coefficiente "apparente" di diffusione dei cloruri (D_{eff}) costanti, dove erf è la funzione degli errori:

$$\frac{C(x,t)}{C_s} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{eff} \cdot t}}\right) \quad (1)$$

Nel caso di calcestruzzo rivestito, oltre alle limitazioni già discusse bisogna considerare che sono presenti due materiali caratterizzati da diverse proprietà di trasporto (coefficiente di diffusione), e quindi si dovrebbe utilizzare un modello di trasporto più sofisticato. In ogni caso, sebbene il confronto tra i valori del coefficiente di diffusione sia poco significativo, può essere interessante analizzare i valori della concentrazione superficiale. Infatti considerando un semplice modello di diffusione con rivestimento e calcestruzzo in serie (simile a un modello elettrico con due resistenze in serie), il valore di C_s , misurato nel primo strato di calcestruzzo, rende l'idea della capacità del rivestimento di rallentare il trasporto di cloruri.

In tabella 2 è evidente come in presenza di rivestimento, almeno fino al 107° ciclo, il valore di C_s sia significativamente inferiore al valore osservato dopo 58 cicli per il calcestruzzo non rivestito. Per il calcestruzzo rivestito con il prodotto caratterizzato dal rapporto p/c più elevato, la concentrazione C_s è inferiore a 0,1% in massa rispetto al calcestruzzo anche dopo 170 cicli, quindi molto inferiore a quella misurata senza rivestimento dopo soli 4 cicli.

Table 2. Extrapolation of concrete transport properties / Estrapolazione delle proprietà di trasporto del calcestruzzo

Coating /rivestimento	Cycle/ciclo	Chloride transport /trasporto di cloruri	
		D_{eff} ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	C_s (% in mass)
Not coated /non rivestito	4	$14 \cdot 10^{-12}$	0.35
Not coated /non rivestito	58	$15 \cdot 10^{-12}$	0.54
p/c 0.35	58	$8.2 \cdot 10^{-12}$	0.14
p/c 0.35	107	$3.6 \cdot 10^{-12}$	0.46
p/c 0.35	170	$5.1 \cdot 10^{-12}$	0.64

3.3 Concentrazione critica di cloruri

La concentrazione critica di cloruri non è un valore fisso, ma dipende da alcuni fattori, tra cui i principali sono il potenziale delle armature il pH della soluzione nei pori (tipo di cemento), la temperatura. La concentrazione critica di cloruri in questa sperimentazione è stata calcolata come il valore di concentrazione di cloruri misurato (o estrapolato) alla profondità del copriferro, in corrispondenza del tempo di innesco della corrosione. Per fare ciò, sono stati utilizzati i dati delle figure 1 e 2 per valutare l'innesco della corrosione e l'extrapolazione della concentrazione di cloruri mediante l'equazione (1). Si è ottenuto che la concentrazione critica di cloruri nel calcestruzzo senza rivestimento è dell'ordine di 0.06% rispetto alla massa di calcestruzzo, che corrisponde a circa 0,48% rispetto alla massa del cemento; questo valore è in accordo con la letteratura (Bertolini, Elsener, Pedferri, Redaelli & Polder 2013). Per il calcestruzzo con rivestimento p/c 0,35 la concentrazione critica di cloruri, per due dei tre provini, è dello stesso ordine di grandezza.

3.4 Adesione del rivestimento

L'adesione tra calcestruzzo e rivestimento misurata alla fine del periodo di esposizione (15 anni) per il rivestimento con rapporto p/c 0,35 è risultata buona: i valori misurati sono nell'intervallo 0,5-0,6 MPa, paragonabili a quelli misurati dopo 3 anni di esposizione all'atmosfera (Diamanti, Brenna, Bolzoni, Berra, Pastore & Ormellese 2013). La rottura avviene prevalentemente all'interfaccia polimero-calcestruzzo. È stata osservata una delaminazione del rivestimento nella faccia inferiore del provini, mentre l'adesione è stata misurata sulla superficie superiore.

3.5 Osservazione visiva delle armature

Alla fine delle prove, le armature sono state estratte dal calcestruzzo ed è stata effettuata l'osservazione visiva oltre che la misura della perdita di massa.

Sono stati osservati attacchi severi di corrosione localizzata (pitting).

La velocità di corrosione media è risultata inferiore a $10 \mu\text{m}/\text{anno}$, in accordo con le misure di velocità di corrosione (Figura 3) effettuate in modo non distruttivo. Considerando una percentuale di area corrosa del 10% (valore misurato sperimentalmente), la velocità di corrosione aumenta di almeno un ordine di grandezza ($100 \mu\text{m}/\text{anno}$); le massime velocità di corrosione localizzata sono comprese tra 200 e $500 \mu\text{m}/\text{anno}$. I valori di velocità di corrosione in calcestruzzo rivestito sono inferiori a quelli misurati in calcestruzzo non rivestito (analogamente a quanto misurato durante l'esposizione, Figura 3).

3.6 Effetto sulla vita utile

I rivestimenti hanno mostrato di ritardare in modo significativo l'innesco della corrosione delle armature. Il tempo di innesco della corrosione aumenta da pochi mesi per il calcestruzzo a oltre 3 anni e mezzo per il rivestimento con un rapporto polimero/cemento pari a 0,35 ed è superiore a 17 anni (tempo massimo di sperimentazione) per il rivestimento con rapporto 0,55. Si è verificato che l'aumento del tempo di innesco dipende esclusivamente dall'effetto sul trasporto dei cloruri e non da un incremento della concentrazione critica di cloruri. Dopo l'innesco della corrosione, in calcestruzzo rivestito si osserva una riduzione della velocità di corrosione, anche se si deve ricordare che nel caso di corrosione localizzata da cloruri la riduzione della velocità di corrosione è molto meno importante dell'aumento del tempo di innesco della corrosione (Bertolini, Elsener, Pedferri, Redaelli & Polder 2013). La riduzione della velocità di corrosione può essere dovuta alla riduzione delle conducibilità del calcestruzzo provocata dalla riduzione del contenuto di umidità in presenza del rivestimento, già evidenziato in lavori precedenti (Brenna, Bolzoni, Beretta & Ormellese 2013).

I risultati sperimentali di questo lavoro sono stati combinati con l'uso di metodi probabilistici di analisi della vita utile delle strutture in calcestruzzo armato (FIB 2006, Bertolini, Lollini & Redaelli 2011, Lollini, Carsana, Gastaldi, Carsana, Redaelli & Bertolini 2015) per valutare almeno in prima approssimazione l'impatto sulla vita utile di una struttura in calcestruzzo armato interessata dalla corrosione. Si è considerato in prima approssimazione che la presenza di un rivestimento riduca del 20% il coefficiente di diffusione dei cloruri e del 40% la concentrazione superficiale C_s (valori medi): i risultati ottenuti permettono di affermare che l'impatto dell'applicazione di questo tipo di rivestimenti non è paragonabile all'uso di altri metodi di protezione aggiuntiva come l'uso di acciai inossidabili o la protezione catodica, soprattutto in ambienti molto aggressivi (Bolzoni, Beretta, Brenna, Diamanti, Lazzeri, Ormellese & Pedferri 2016). Nonostante ciò, l'uso di questo tipo di rivestimenti può ridurre il

numero di interventi di ripristino e di manutenzione, riducendo il costo del ciclo di vita (Life Cycle Cost). Questo tipo di valutazioni presuppone che il rivestimento sia in grado di mantenere le sue proprietà protettive per una durata pari ad almeno al tempo di innesco della corrosione. Prove accelerate di breve periodo hanno mostrato che questo tipo di rivestimenti è in grado di resistere bene all'attacco dei raggi UV e che l'adesione rimane buona anche dopo tempi relativamente lunghi (3 anni in ambiente naturale e 15 anni di cicli accelerati di cloruri), ma mancano esperienze di campo di lungo termine che possano confermare questo comportamento.

4 CONCLUSIONI

The efficiency of two coatings, based on polymer modified cementitious mortar has been verified by means of 17 years corrosion monitoring:

- these coating can strongly delay chloride corrosion initiation
- owing to higher resistivity (lower water content) of coated concrete, corrosion rate is reduced
- the protective effect is more pronounced as the polymer content (p/c) increases.

L'efficienza di due rivestimenti a base di malte cementizie modificate con polimeri è stata studiata mediante misure di lungo periodo (quasi 17 anni) in calcestruzzo soggetto a ingresso accelerato di cloruri:

- i rivestimenti ritardano notevolmente l'innesco della corrosione da cloruri
- grazie all'elevata resistività del calcestruzzo, conseguenza della riduzione del contenuto di acqua, la velocità di corrosione è ridotta
- l'effetto protettivo dei rivestimenti aumenta all'aumentare del rapporto polimero/cemento.

REFERENCES

Aggarwal L.K., Thapliyal P.C., Karade S.R. 2007. Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions, *Construction and Building Materials* 21: 379–383.

Andrade C., Gonzalez J.A. 1978. Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements, *Werkstoffe und Korrosion* 29 (8): 515–519.

ASTM D4541 2010 - Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers.

Basheer P.A.M., Basheer L., Cleland D.J., Long A.E. 1997. Surface treatments for concrete: assessment methods and reported performance, *Constr. Build. Mater.* 10: 413-429.

Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Redaelli E. & Polder R. 2013. *Corrosion of steel in concrete – Prevention, diagnosis, repair*, 2nd Edition, Weinheim: Wiley VCH.

Bertolini L., Lollini F., Redaelli E. 2011. *Durability design of reinforced concrete structures*. Proc Inst Civil Eng: Construct Mater 164: 273–82.

Bolzoni F., Beretta S., Brenna A., Diamanti M.V., Lazzari L., Ormellesse M. Pedferri MP. 2016. Evaluation of additional protection methods to control reinforcement corrosion, in *Concrete under severe conditions*, Key Engineering materials, ISSN 1013-9826, Trans Tech publications, page 37-46.

Brenna A., Bolzoni F., Beretta S., Ormellesse M. 2013, Long-term chloride-induced corrosion monitoring of reinforced concrete coated with commercial polymer-modified mortar and polymeric coatings, *Construction and Building Materials* 48: 734–744.

CEN EN 206-1, 2000. Concrete — Part 1: Specification, performance, production and conformity.

CEN EN 1992-1-1, 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.

Collepari M., Marcialis A., Turriziani R., 1972. Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes, *Journal of American Ceramic Society*, 55: 534-535.

Coppola L., Pistolesi C., Zaffaroni P., Collepari M., Properties of polymer-cement coatings for concrete protection, *Proc. of Fifth Canmet-ACI Int. Conf. "Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete"*, ACI SP 173, Roma, pp. 267-286

de Vries J., Polder R.B. 1997. Hydrophobic treatment of concrete, *Construction and Building Materials* 11 (4): 259-265.

Diamanti M.V., Brenna A., Bolzoni F., Berra M., Pastore T., Ormellesse M. 2013, Effect of polymer modified cementitious coatings on water and chloride permeability in concrete, *Construction and Building Materials*, 49: 720-728.

Elsener B., Andrade C., Gulikers J., Polder R., Raupach M., Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 36 (261): 461-471.

FIB 2006. 'Model code for service life design', International Federation for Structural Concrete, Bulletin n. 34.

Kristiansen B. 1997, Protective coatings applied in coastal climate. Materials, application, performance, *Proc. of Int. Conf. Repair of concrete structures. From theory to practice in a marine environment*, Svolvaer, Norway, pp.485-499.

Lollini F., Carsana M., Gastaldi M., Redaelli E., Bertolini L. 2015. The challenge of the performance-based approach for the design of reinforced concrete structures in chloride bearing environment, *Construction and Building Materials* 79: 245–254.

Pedferri P. 1996. *Cathodic protection and cathodic prevention*, Construction and building materials, 10 (5): 391-402.

Raupach, M., Wolff, L. 2004. Long-term durability of surface protection systems over concrete, *Journal of Protective Coatings and Linings*, 21 (6): 29-37.

Raupach M., Wolff L. 2005, Investigations on durability of surface protection systems by accelerated laboratory and outdoor exposure tests, *Proceedings of The European corrosion congress, Eurocorr 2005*, Lisbon, Portugal.

Swamy R.N., Tanikawa S. 1993. An external surface coating to protect concrete and steel from aggressive environments, *Materials and Structures* 26: 465-478.

Seneviratne A.M.G., Sergi G., Page C.L. 2000. Performance characteristics of surface coatings applied to concrete for control of reinforcement corrosion, *Constr. Build. Mater.* 14: 55-59.

Tittarelli F., Moriconi G. 2008. The effect of silane-based hydrophobic admixture on corrosion of reinforcing steel in concrete, *Cement and Concrete Research* 38: 1354–1357.

Zhang J.-Z., Buenfeld N.R. 2000. Chloride profiles in surface-treated mortar speci-mens, *Constr. Build. Mater.* 14: 359-364.