

Comportamento alla corrosione di armature in calcestruzzo con materie prime contaminate da cloruri - Parte II: risultati preliminari di prove in campo

Corrosion behaviour of reinforcement in concrete with chloride-contaminated raw materials - Part II: on site preliminary results

E. Redaelli, M. Carsana, M. Gastaldi, F. Lollini, F. Torabian Isfahani, L. Bertolini - Politecnico di Milano

L'utilizzo di acqua di mare nella preparazione del calcestruzzo è oggi vietato a causa del rischio di corrosione delle armature. Tuttavia, il consumo di acqua contribuisce largamente all'impatto ambientale del calcestruzzo. Sarebbe dunque auspicabile, in particolare in quelle parti del mondo dove l'acqua potabile è un bene prezioso, considerare la possibilità di utilizzo dell'acqua di mare. Il progetto SEACON-INFRAVATION, svolto in collaborazione tra University of Miami e Politecnico di Milano, con vari partner industriali, ha fra gli obiettivi quello di investigare l'utilizzo di acqua di mare per la costruzione di strutture e infrastrutture in calcestruzzo armato sostenibili e durevoli. Nell'ambito di questo progetto è stato costruito un fosso di guardia in calcestruzzo armato adiacente all'autostrada A1 (nei pressi di Piacenza Sud). Questa memoria presenta i risultati preliminari del comportamento alla corrosione delle diverse armature inglobate nel calcestruzzo con acqua di mare.

Parole chiave: Calcestruzzo, acqua di mare, sali disgelanti, armature di acciaio inossidabile, armature *GFRP*.

The use of seawater for mixing concrete is currently forbidden due to the associated risk of reinforcement corrosion. Yet, water consumption largely contributes to the environmental impact of concrete. Hence, the use of seawater would be highly advantageous, in particular in those regions where potable water is a precious resource. The project SEACON-INFRAVATION between University of Miami and Politecnico di Milano, with various industrial partners, aims at investigating the use of seawater for the construction of sustainable and durable reinforced concrete structures and infrastructures. Within the project, a reinforced concrete culvert was built next to A1 motorway, close to Piacenza Sud. This note presents the preliminary results of the corrosion behaviour of various types of reinforcement embedded in seawater concrete.

Keywords: Concrete, seawater, de-icing salts, stainless steel rebar, *GFRP* rebar.

INTRODUZIONE

Questa memoria segue la prima parte nella quale sono state descritte le prove di laboratorio e presenta il *demo project* relativo all'applicazione in campo. L'obiettivo è quello di valutare la possibilità di utilizzare acqua di mare in una struttura reale, in relazione sia all'esecuzione e alla messa in opera del calcestruzzo, sia al comportamento alla corrosione delle armature per lunghi periodi. A tale scopo, il *demo project* ha previsto la costruzione di un fosso di guardia in calcestruzzo armato adiacente all'autostrada A1 (nei pressi di Piacenza Sud), avvenuta nel novembre 2016. Il fosso raccoglie le acque di scarico provenienti dall'autostrada dove nei periodi invernali vengono sparsi sali antigelo. È diviso in sei segmenti con diverse combinazioni di calcestruzzo e armature, la cui corrosione viene monitorata nel tempo.

Al *demo project*, oltre al Politecnico di Milano che ha supervisionato l'applicazione, hanno partecipato: Buzzi che ha fornito e caratterizzato il calcestruzzo, Pavimental che ha curato gli aspetti progettuali e messo a disposizione il sito e l'impresa, Acciaierie Valbruna e ATP che hanno fornito le armature di acciaio inossidabile e di *GFRP*, rispettivamente. Questa memoria descrive gli scenari considerati nel *demo project* e presenta i risultati preliminari relativi al comportamento alla corrosione delle armature.

METODOLOGIA SPERIMENTALE

Il fosso di guardia ha una lunghezza di 30 m ed è diviso in sei segmenti lunghi 5 m ciascuno, indicati con le lettere A-F. La base del fosso è larga 0.8 m, spessa 0.15 m ed è delimitata lateralmente da due superfici inclinate, non armate. La Tab. 1 mostra le combinazioni di calcestruzzo e armatura di ogni segmento: per il segmento A si è utilizzato calcestruzzo di riferimento (privo di cloruri aggiunti) e armatura di acciaio al carbonio; per i segmenti B, C, D e E si è utilizzato calcestruzzo preparato con acqua di mare (indicato con *SeaCon*) e, nell'ordine, armature di acciaio al carbonio, acciaio inossidabile austenitico 304, acciaio inossidabile duplex 23-04 e *GFRP* (*glass fibre reinforced polymer*); infine per il segmento F si è utilizzato calcestruzzo preparato con una frazione di aggregato costituito da manto stradale fresato (*recycled asphalt pavement, RAP*) e armatura di acciaio al carbonio. Le armature sono disposte secondo una maglia di lato 200 mm e hanno copriferro di 30 mm. La Tab. 2 riporta la composizione dei tre calcestruzzi considerati.

Tab. 1 - Combinazioni di armatura e calcestruzzo nei sei segmenti del fosso di guardia - *Combinations of reinforcement and concrete in the six segments of the culvert*

Segmento	A	B	C	D	E	F
Armatura	Acciaio al carbonio	Acciaio al carbonio	SS 304 (1.4311)	SS 23-04 (1.4362)	GFRP	Acciaio al carbonio
Calcestruzzo	Riferimento	SeaCon	SeaCon	SeaCon	SeaCon	RAP

Tab. 2 - Composizione dei calcestruzzi, in kg/m³ (da Buzzi) - *Composition of concrete mixes (from Buzzi)*

Calcestruzzo	Riferimento	SeaCon	RAP
CEM II/A-LL 42.5R	335	335	335
Cenere volante	30	30	30
Sabbia 0-5 mm	800	800	766
Ghiaia 5-7 mm	365	365	246
Ghiaia 8-15 mm	630	630	526
RAP	-	-	226
Additivo superfluid. (Addiment T75)	2.19	2.19	2.19
Additivo ritardante (VZ53)	-	0.76	-
Acqua	175	-	175
Acqua di mare	-	175	-

Durante il getto sono stati confezionati quattro cubi di lato 150 mm per ognuno dei tre calcestruzzi. Per ogni tipo di calcestruzzo, due cubi sono stati portati in laboratorio e utilizzati per le misure di resistività elettrica e di resistenza a compressione dopo 28 giorni di stagionatura umida; gli altri due cubi sono stati esposti nel fosso di guardia nei corrispondenti segmenti (A, B e F).

Le condizioni di corrosione delle armature nel fosso vengono monitorate attraverso diverse misure. Il potenziale delle armature metalliche viene misurato rispetto a elettrodi di riferimento inglobati nel calcestruzzo alla profondità del copriferro: in particolare, vengono utilizzati un elettrodo di argento/cloruro d'argento (*SSC*) e uno di titanio attivato (*Ti-act*). In tutti i segmenti è inserita una sonda per la misura della conducibilità elettrica del calcestruzzo (*Res-probe*), posta anch'essa alla profondità del copriferro. Inoltre, nei segmenti A, B e F sono state installate sonde multi-armatura (*Multi-probe*) che contengono ognuna i tre tipi di armatura e consentiranno di investigare il comportamento alla corrosione anche negli scenari che, per motivi pratici, non si sono potuti realizzare (un esempio è mostrato in Fig. 1; i risultati delle misure su queste sonde non sono riportati in questa memoria). Infine, il segmento B contiene anche una rete di titanio attivato (*Ti-mesh*) che potrà essere utilizzata per misure elettrochimiche o per l'applicazione della protezione catodica [1]. La Fig. 2 mostra una vista del fosso. Tutti i collegamenti elettrici con i vari elementi presenti nel fosso (armature, elettrodi di riferimento, sonde multi-armatura, rete di titanio attivato) sono stati raccolti in un quadro elettrico adiacente al fosso.

In questa nota saranno presentati i risultati preliminari delle misure di potenziale di corrosione dell'armatura e resistività elettrica del calcestruzzo e i risultati delle prove di caratterizzazione dei diversi calcestruzzi.

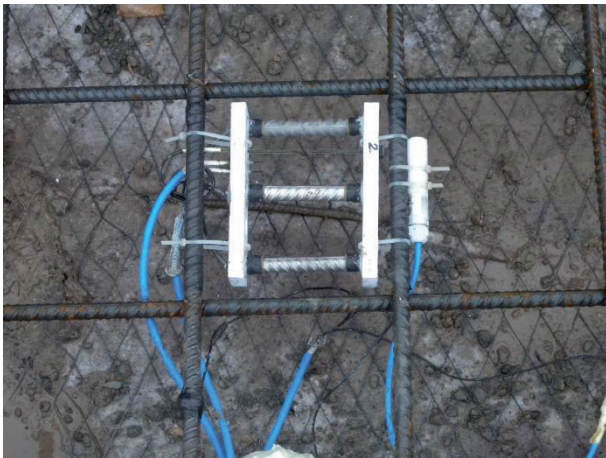


Fig. 1 - Sonde e elettrodi sul segmento B - Probes and electrodes on segment B



Fig. 2 - Vista del fosso di guardia - View of the culvert

RISULTATI E DISCUSSIONE

La Tab. 3 mostra i risultati delle prove di caratterizzazione effettuate sui cubi dopo 28 giorni di stagionatura umida. I calcestruzzi di riferimento e *RAP* hanno mostrato resistenze a compressione simili, di circa 33 MPa, mentre il calcestruzzo con acqua di mare ha mostrato una resistenza di circa 42 MPa. La resistività elettrica è pari a 52 ohm m per i calcestruzzi di riferimento e con acqua di mare, e leggermente superiore (69 ohm m) per quello con *RAP*.

Tab. 3 - Densità (D), resistenza a compressione (R_c) e resistività elettrica (ρ) misurate sui cubi dopo 28 giorni di stagionatura umida (valori medi dei due cubi) - Density (D), compressive strength (R_c) and electrical resistivity (ρ) of cubes after 28 days of moist curing (average values)

Calcestruzzo	D (kg/m ³)	R_c (MPa)	ρ (ohm m)
Riferimento (A)	2281	32.8	52
Acqua di mare (BCDE)	2307	42.3	52
<i>RAP</i> (F)	2301	32.5	69

La Fig. 3 mostra l'andamento del potenziale delle armature nei diversi scenari. Inizialmente il potenziale delle armature di acciaio al carbonio (A, B e F) era piuttosto basso in tutte le condizioni (circa -600 mV vs SSC); in seguito è aumentato portandosi, dopo circa 4 mesi, a valori di -80 mV vs SSC nel calcestruzzo di riferimento e -200 mV vs SSC nei calcestruzzi con acqua di mare e *RAP*. Sebbene non siano disponibili misure di velocità di corrosione, questi ultimi valori sembrano rappresentativi di condizioni di passività [1-3]. La corrosione non sembra quindi essersi innescata sull'armatura in acciaio al carbonio nel calcestruzzo con acqua di mare.

Le armature di acciaio inossidabile austenitico e duplex nel calcestruzzo con acqua di mare (C e D) hanno mostrato fin dall'inizio valori di potenziale più alti rispetto a quelle di acciaio al carbonio, mentre dopo circa 4 mesi i potenziali erano confrontabili con quelli dell'acciaio al carbonio nel calcestruzzo di riferimento (-100 mV vs SSC). I valori di potenziale misurati nei primi 4 mesi di esposizione sono risultati in buon accordo con quelli ottenuti dalle prove di laboratorio riportati nella prima parte di questa memoria. Il comportamento delle armature in *GFRP* sarà valutato mediante prelievo di campioni e osservazione diretta dell'armatura [4].

La Fig. 4 mostra l'andamento della resistività elettrica del calcestruzzo misurata con la sonda di resistività alla profondità dell'armatura. Tutte le sonde hanno evidenziato un andamento crescente nel primo mese, mentre l'ultima misura ha mostrato una diminuzione. Si osserva, inoltre, che i valori sono sensibilmente diversi da quelli misurati sui cubi in laboratorio (Tab. 3): in particolare il calcestruzzo contenente acqua di mare ha mostrato valori compresi tra 9 e 12 ohm m nei quattro diversi segmenti (B-E), e inoltre questi valori sono risultati leggermente superiori a quelli ottenuti sui calcestruzzi di riferimento e con *RAP* (8-9 ohm m). La

Corrosion

resistività del calcestruzzo è una grandezza che dipende non solo dalla sua composizione, ma anche da fattori ambientali (contenuto di umidità e temperatura) e dalla composizione della soluzione dei pori, oltre che da eventuali disomogeneità locali. I valori di resistività elettrica del calcestruzzo saranno quindi valutati all'interno di ogni segmento, in quanto ci si attende che la penetrazione di cloruri o di umidità (che può avvenire con diverse modalità all'interno dei diversi segmenti) fino alla profondità dell'armatura possa essere evidenziata da una variazione di questa grandezza.

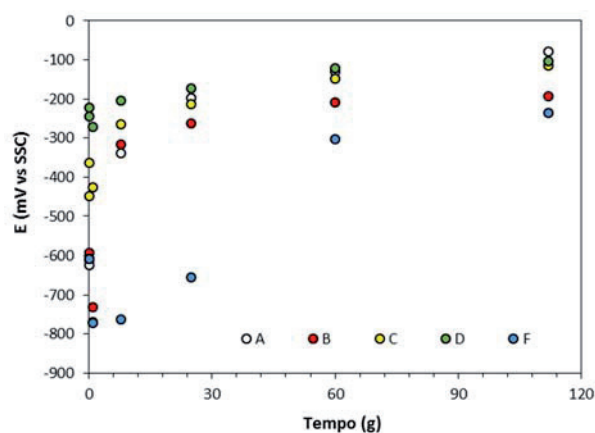


Fig. 3 - Andamento nel tempo del potenziale dell'armatura nei diversi segmenti del fosso - *Evolution of rebar potential in the various segments of the culvert*

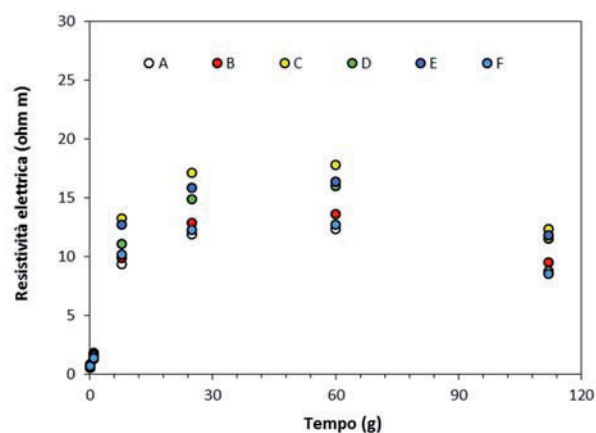


Fig. 4 - Andamento nel tempo della resistività elettrica del calcestruzzo nei diversi segmenti del fosso - *Evolution of concrete resistivity in the various segments of the culvert*

CONCLUSIONI

Il comportamento alla corrosione di diversi tipi di armature in calcestruzzo preparato con acqua di mare è stato studiato nell'ambito di un *demo project* che ha previsto la costruzione di un fosso di guardia adiacente all'autostrada A1. Dopo circa 4 mesi dalla costruzione, l'armatura di acciaio al carbonio nel calcestruzzo con acqua di mare ha mostrato valori di potenziale di -200 mV vs SSC, che sembrano indicare condizioni di passività. Le armature di acciaio inossidabile, come atteso, hanno mostrato potenziali ancora più elevati, intorno a -100 mV vs SSC. La resistività elettrica del calcestruzzo misurata alla profondità dell'armatura è risultata molto simile per tutti i calcestruzzi, e leggermente più elevata per il calcestruzzo contenente acqua di mare. Il monitoraggio di questa grandezza nel tempo consentirà di meglio comprendere il comportamento alla corrosione dell'armatura in seguito alla penetrazione di cloruri e alle variazioni di umidità e temperatura.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro presentato è finanziato da INFRAVATION (Grant Agreement No. 31109806.005-SEACON). Gli autori desiderano ringraziare: F. Canonico, F. Bertola e L. Capelli (Buzzi Unicem); A. Pela (Pavimental); R. Bertelli (Acciaierie Valbruna); F. Nardone (ATP); A. Nanni (University of Miami).

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. BERTOLINI, B. ELSENER, P. PEDEFERRI, E. REDAELLI, R. POLDER, Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair, 2nd edition, Wiley-VCH, Weinheim (2013).
- [2] F. LOLLINI, M. CARSANA, M. GASTALDI, E. REDAELLI, L. BERTOLINI, A. NANNI, Preliminary assessment of durability of sustainable RC structures with mixed-in seawater and stainless steel reinforcement, Key Engineering Materials, Vol. 711, 2016, p. 52-59.
- [3] F. LOLLINI, M. CARSANA, M. GASTALDI, E. REDAELLI, L. BERTOLINI, The challenge of the performance-based approach for the design of reinforced concrete structures in chloride bearing environment, Construction and Building Materials, Vol. 79, 2015, p. 245-254.
- [4] M. KHATIBMASJEDI, A. NANNI, Durability of GFRP reinforcement in Seacon, CDCC 2017 - The Fifth International Conference on Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction and Rehabilitation of Structures, 2017.