

Innesco e propagazione della corrosione dell'armatura in calcestruzzi fibrorinforzati ad altissime prestazioni (UHPFRC)

E. Redaelli, B.P. Maffezzoli, D. Redaelli

La memoria presenta i risultati preliminari di un'indagine sperimentale volta alla caratterizzazione del comportamento alla corrosione dell'armatura in calcestruzzi fibrorinforzati ad altissime prestazioni. Per la caratterizzazione di parametri correlati con il tempo di innesco si sono svolte prove di risalita capillare, contenuto d'acqua e assorbimento, resistività elettrica, carbonatazione accelerata e migrazione di cloruri. Queste prove hanno mostrato che il calcestruzzo è un materiale molto impervio. Le prove di corrosione dell'armatura - sia di acciaio al carbonio che di acciaio inossidabile - hanno indicato condizioni di passività anche in seguito all'esposizione a cicli di asciutto-bagnato con cloruri. Solo in presenza di fessure l'armatura di acciaio al carbonio ha mostrato un possibile innesco della corrosione.

PAROLE CHIAVE: CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO UHPFRC, CORROSIONE, CARBONATAZIONE, CLORURI.

INTRODUZIONE

Il calcestruzzo fibrorinforzato ad altissime prestazioni (Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete, UHPFRC) è un materiale ad alta resistenza (resistenza a compressione superiore a 120 MPa) la cui composizione viene progettata per soddisfare determinate prestazioni allo stato fresco e indurito. Grazie al basso rapporto acqua/legante (circa 0.2) e alla presenza di aggiunte minerali, è caratterizzato da una bassa porosità, che, in combinazione con la presenza di fibre che limitano l'apertura delle fessure, viene spesso considerata garanzia di una intrinseca durabilità. Tuttavia, sono relativamente limitati gli studi sul comportamento a lungo termine di questo materiale, in particolare in relazione ai fenomeni di corrosione dell'armatura.

La memoria presenta i risultati preliminari di un'indagine sperimentale volta alla caratterizzazione del comportamento alla corrosione dell'armatura a contatto con calcestruzzo UHPFRC. Si è considerato un calcestruzzo UHPFRC commerciale autocompattante (Ductal), con fibre in acciaio in due diversi tenori (2.5% e 3.5% in volume). Oltre alle prove di caratterizzazione allo stato fresco e indurito, sono state condotte prove per la valutazione di parametri correlati con la durabilità del materiale, come

E. Redaelli, B.P. Maffezzoli

Politecnico di Milano

D. Redaelli

HES-SO, University of Applied Sciences Western Switzerland, Fribourg

l'assorbimento d'acqua, la risalita capillare, la resistività elettrica, la resistenza alla penetrazione di carbonatazione e cloruri. Inoltre, sono state avviate prove di corrosione su provini armati, anche in seguito alla pre-fessurazione del calcestruzzo, durante le quali sono stati misurati il potenziale e la velocità di corrosione di armature di acciaio al carbonio e inossidabile.

METODOLOGIA

Si sono considerate due miscele di calcestruzzo, indicate con le lettere E e F, che differiscono per quantitativo di fibre (pari rispettivamente a 3.5% e 2.5% in volume), preparate a partire da una miscela secca alla quale sono stati aggiunti acqua (per ottenere rapporto a/l di circa 0.2), additivo superfluidificante e fibre. La miscela secca è costituita da cemento CEM I 52.5, fumo di silice, sabbia calcarea fine e sabbia silicea, in proporzioni non specificate (valori indicativi della frazione in massa sono rispettivamente 1, 0.325, 0.3, 1.43). Le fibre sono d'acciaio ad alta resistenza ($R = 1104$ MPa), ottonate, dritte, lunghe 14 mm e con rapporto d'aspetto pari a 70.

Oltre ai provini destinati alle prove di caratterizzazione meccanica, sono stati confezionati provini prismatici 40x40x160 mm e provini cilindrici con diametro di 100 mm e altezza di 50 mm. Per le prove di corrosione si sono utilizzati provini prismatici 45x45x500 mm armati con una barra di diametro 8 mm disposta lungo l'asse longitudinale. Si sono considerate barre di acciaio al carbonio e barre di acciaio inossidabile duplex 1.4362 (queste ultime utilizzate soltanto con il calcestruzzo F).

Tutti i provini sono stati scasserati dopo 24 h dal getto e quindi esposti in camera di stagionatura con U.R. = 95% e $T = 20^\circ\text{C}$. I provini non armati sono stati stagionati per 28 giorni, mentre quelli armati per 21 giorni. Alcuni provini armati sono stati sottoposti a prove di trazione diretta con formazione di fessure di apertura generalmente compresa tra 0.1 e 0.5 mm (con picchi di 1.5-3.5 mm per provini in cui l'armatura è stata portata a snervamento).

Sui provini non armati sono state eseguite prove di risalita capillare, assorbimento d'acqua, resistività elettrica, carbonatazione accelerata e migrazione di cloruri. La risalita capillare è stata condotta su provini prismatici: la massa d'acqua assorbita dal provino inizialmente essiccato è stata misurata dopo 12 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 24 h e poi fino a circa 150 h. Il tratto iniziale lineare della correlazione tra la quantità d'acqua assorbita per unità di superficie e la radice quadrata del tempo è stato interpolato con il

metodo dei minimi quadrati per ottenere il coefficiente di risalita S . Le prove di assorbimento d'acqua sono state condotte su provini prismatici che sono stati inizialmente essiccati in stufa a 100°C fino a massa costante e successivamente immersi in acqua a $T = 20^\circ\text{C}$ fino a massa costante e infine esposti a U.R. = 90% e $T = 20^\circ\text{C}$. La resistività elettrica è stata misurata sugli stessi provini con un conduttimetro collegato con due piastre appoggiate sulle superfici quadrate con interposta una spugna umida. La resistenza alla carbonatazione è stata valutata mediante il saggio con fenoltaleina su provini prismatici esposti in un ambiente con 100% CO_2 e U.R. = 65%. La resistenza alla penetrazione dei cloruri è stata valutata mediante la prova di migrazione in cella inclinata su provini cilindrici [1].

Per quanto riguarda le prove di corrosione, i provini armati sono stati esposti a un ambiente con U.R. = 90% e $T = 20^\circ\text{C}$ per circa 100 giorni, e successivamente a cicli settimanali di asciutto-bagnato con una soluzione di NaCl 3.5% (2 giorni di bagnatura e 5 giorni di asciugamento). Il potenziale dell'armatura è stato misurato con un elettrodo di riferimento esterno di tipo argento/cloruro d'argento (SSC); la velocità di corrosione è stata misurata con la tecnica della polarizzazione lineare applicando una differenza di ± 10 mV rispetto al potenziale di corrosione libera mediante un contro-elettrodo esterno e misurando la corrente circolante dopo 30 s.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Le principali proprietà dei calcestruzzi allo stato fresco e indurito sono riassunte in Tab. 1. Entrambi i calcestruzzi hanno mostrato diametri di spandimento di 800-900 mm, densità su cubo di circa 2500 kg/m^3 e resistenza a compressione media su cubo dopo 28 giorni di stagionatura di circa 160 MPa. Il coefficiente di risalita capillare S è risultato per entrambi i calcestruzzi mediamente pari a 0.03 $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{0.5}$, valore indicativamente un ordine di grandezza inferiore rispetto ai calcestruzzi ordinari [2].

La Fig. 1 mostra i risultati delle prove di assorbimento d'acqua e resistività elettrica, prima in condizioni di immersione e poi durante l'esposizione a U.R. = 90%. Inizialmente, sia il contenuto d'acqua che la resistività elettrica hanno mostrato un andamento crescente, che dopo circa 100 giorni si è stabilizzato a valori costanti: questa condizione può essere considerata rappresentativa della saturazione del provino, con valori medi di assorbimento d'acqua intorno a 1.6% per il calcestruzzo E e 1.4% per il calcestruzzo F, e valori di resistività elettrica intorno a

1100 $\Omega \cdot m$ per il calcestruzzo E e 2270 $\Omega \cdot m$ per il calcestruzzo F. L'andamento crescente della resistività con il contenuto d'acqua indica che in questa fase domina l'effetto di affinamento dei pori della microstruttura del calcestruzzo (dovuto all'idratazione dell'eccesso di cemento rimasto non idratato dopo la stagionatura) rispetto all'effetto di bagnamento. In seguito all'esposizione a U.R. = 90%, il contenuto d'acqua è diminuito a valori di 1.5% e 1.3% per i calcestruzzi E e F, rispettivamente; la resistività, invece, ha continuato ad aumentare, mostrando in questa fase domina l'effetto dell'asciugamento che rende il calcestruzzo meno conduttivo. Si osserva inoltre come,

a pari condizioni ambientali, il calcestruzzo E, con maggiore quantità di fibre, è sempre caratterizzato da un contenuto d'acqua maggiore e una resistività elettrica minore rispetto al calcestruzzo F, che ha una minore quantità di fibre. Peraltro, i valori di resistività elettrica ottenuti su entrambi i calcestruzzi sono tipici dei materiali porosi isolanti, evidenziando quindi che la presenza di fibre metalliche non conferisce caratteristiche conduttive al materiale, anche se il fatto che all'aumentare della loro quantità la resistività diminuisce sembra suggerire che le fibre danno un contributo alla conduzione di corrente, in accordo con alcuni dati di letteratura [3,4].

Tab.1 - Principali proprietà dei calcestruzzi UHPFRC: rapporto acqua/legante nominale (a/l), percentuale di fibre in volume (v_f), tempo totale di miscelazione (T_{mix}), diametro medio di spandimento dopo 1 e 5 minuti (D_1 e D_5), densità media su cubo, resistenza media a compressione su cubo e modulo elastico dopo 28 giorni di stagionatura (d_{28} , $R_{c,28}$ e E_{28}) - Main properties of UHPFRC: nominal water/binder ratio (a/l), volume percentage of fibers (v_f), total mixing time (T_{mix}), average slump flow after 1 and 5 minutes (D_1 and D_5), average density on cube, average compressive strength on cube and elastic modulus after 28 days of curing (d_{28} , $R_{c,28}$ and E_{28})

UHPFRC	a/l	v_f (%)	T_{mix} (min)	D_1 (mm)	D_5 (mm)	d_{28} (kg/m ³)	$R_{c,28}$ (MPa)	E_{28} (GPa)
E	0.2	3.5	20	810	905	2563	165	54.5
F	0.2	2.5	18	825	932	2527	161	54.4

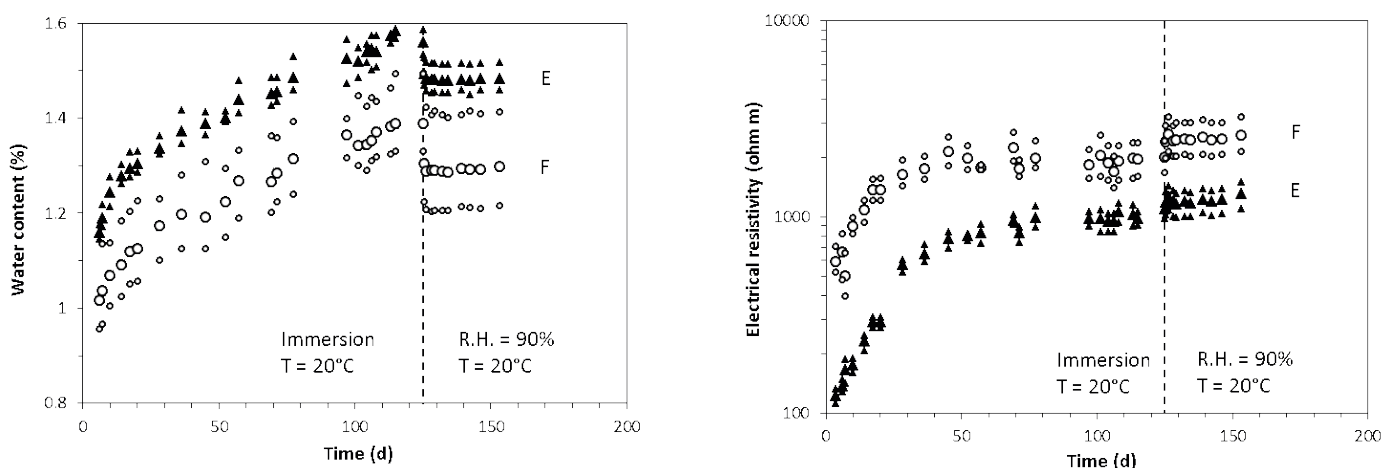


Fig.1 - Andamento nel tempo del contenuto d'acqua (a sinistra) e della resistività elettrica (a destra) in condizioni di immersione e di U.R. = 90% (simbolo grande: valore medio di tre provini; simboli piccoli: valori massimo e minimo) - Time evolution of water content (left) and electrical resistivity (right) in conditions of immersion and R.H. = 90% (large symbol: average value of triplicate specimens; small symbols: maximum and minimum values).

Per quanto riguarda le prove di carbonatazione accelerata, entrambi i calcestruzzi hanno mostrato profondità di carbonatazione nulla dopo 4 mesi di esposizione a 100% CO₂. Questo risultato non ha consentito di quantificare il coefficiente di carbonatazione, però ha evidenziato come entrambi i calcestruzzi siano caratterizzati da un'elevata resistenza alla carbonatazione, probabilmente anche grazie alla riserva di alcalinità dovuta all'elevato dosaggio di cemento. La profondità di penetrazione dei cloruri in seguito alla prova di migrazione in cella inclinata è risultata intorno a 1-4 mm (con differenze di potenziale applicate di 50-60 V per 24-48 h), che corrisponde a coefficienti di diffusione di 0.1-0.2·10⁻¹² m²/s. Questi valori potrebbero essere stati influenzati dalla superficie di taglio del provino cilindrico su cui è stata condotta la prova, che ha esposto le fibre metalliche in superficie, creando dei percorsi preferenziali per la corrente all'interno delle fibre stesse, più che nella matrice cementizia. Si tratta comunque di valori molto piccoli e inferiori a quelli che caratterizzano i calcestruzzi comuni.

La Fig. 2 riassume i risultati di potenziale e velocità di corrosione dell'armatura. Durante il periodo a U.R. = 90%, l'armatura di acciaio al carbonio ha mostrato valori di potenziale di 50 mV vs SSC in entrambi i calcestruzzi, mentre l'armatura di acciaio inossidabile ha mostrato valori

di -50 mV vs SSC. Durante i cicli di asciutto-bagnato con cloruri, il potenziale dell'armatura ha mostrato valori inferiori di circa 50-100 mV, sia per l'acciaio al carbonio che per l'acciaio inossidabile, ma la velocità di corrosione è risultata trascurabile (circa 0.4 mA/m² per l'acciaio al carbonio e inferiori a 0.1 mA/m² per l'acciaio inossidabile).

Nei provini fessurati, il potenziale durante l'esposizione a U.R. = 90% è risultato simile a quello dei rispettivi provini non fessurati, mentre in seguito all'avvio dei cicli di asciutto-bagnato la diminuzione di potenziale è stata più marcata, in particolare per l'armatura di acciaio al carbonio che ha raggiunto valori di -250 mV vs SSC con velocità di corrosione di circa 2 mA/m². L'armatura di acciaio inossidabile è rimasta invece caratterizzata da valori di velocità di corrosione trascurabili.

Questi dati indicano che, in entrambi i calcestruzzi, le armature dei provini non fessurati si trovano in condizioni di passività, anche in seguito all'esposizione ai cloruri, in accordo con l'alta resistenza alla penetrazione dei cloruri, mentre le armature di acciaio al carbonio dei provini fessurati sono probabilmente in fase di incipiente innesco della corrosione. Per caratterizzare la propagazione della corrosione ed evidenziare un possibile effetto del contenuto di fibre e della presenza di fessure sarà necessario proseguire le prove per tempi più lunghi.

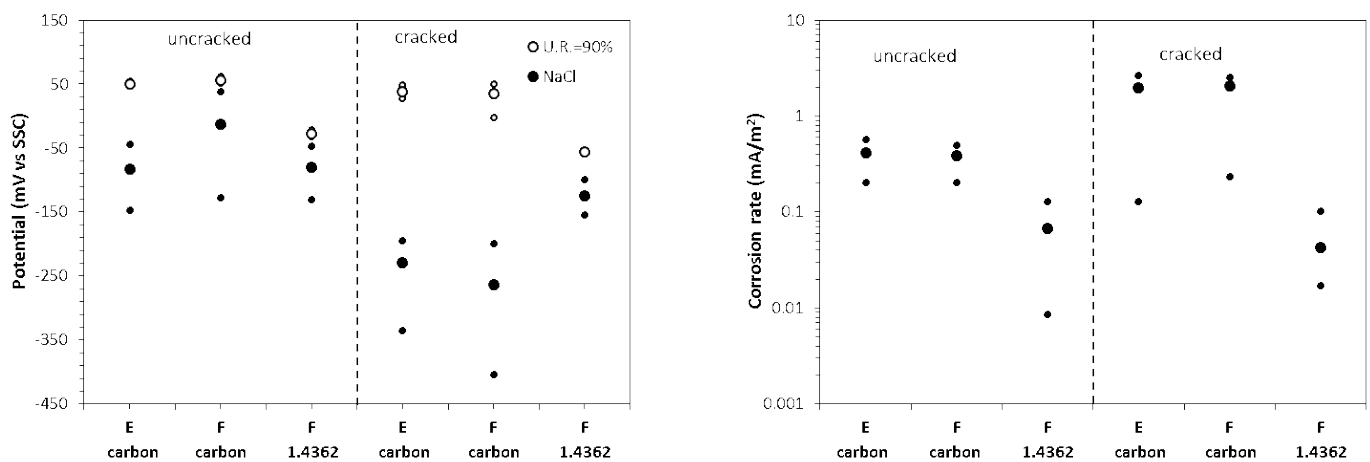


Fig.4 - Potenziale di corrosione (a sinistra) e velocità di corrosione (a destra) durante l'esposizione a diverse condizioni per armature di acciaio al carbonio (carbon) e acciaio inossidabile (1.4362) (simbolo grande: valore medio di tre provini durante il periodo di esposizione; simboli piccoli: valori massimo e minimo) - Average values of corrosion potential (left) and corrosion rate (right) for carbon steel (carbon) and stainless steel (1.4362) rebars (large symbol: average value of triplicate specimens during exposure condition; small symbols: maximum and minimum values).

CONCLUSIONI

Le prove di caratterizzazione di due calcestruzzi UHPFRC con contenuto di fibre di 2.5% e 3.5% hanno mostrato che i parametri correlati con la durabilità sono rappresentativi di una microstruttura molto compatta: l'assorbimento d'acqua e il coefficiente di risalita capillare sono risultati rispettivamente dell'ordine di 1.4-1.6% e 0.03 kg/m²·h^{0.5} per entrambi i calcestruzzi, mentre la resistività elettrica in condizioni di saturazione è risultata dell'ordine di 1200-2500 Ω·m, mostrando valori maggiori nel calcestruzzo con meno fibre. La resistenza alla carbonatazione e alla penetrazione dei cloruri sono risultate molto elevate.

Nelle prove di corrosione, l'armatura di acciaio al carbonio

in entrambi i calcestruzzi ha mostrato potenziali e velocità di corrosione che indicano condizioni di passività, anche in seguito all'esposizione ai cicli di asciutto-bagnato con cloruri. In presenza di fessure la velocità di corrosione è aumentata indicando un possibile insorgere della corrosione. Il comportamento alla corrosione dell'armatura di acciaio inossidabile non sembra invece influenzato dalla presenza di fessure.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano Lafarge-Holcim per la fornitura di materiale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] NT Build 492, Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, 1999.
- [2] Torabian Isfahani F, Redaelli E, Lollini F, Li W, Bertolini L. Effects of nanosilica on compressive strength and durability properties of concrete with different water to binder ratios. *Adv Mater Sci Eng*. 2016;1-16.
- [3] Roux N, Andrade C, Sanjuan MA. Experimental study of durability of reactive powder concretes. *J Mater Civ Eng*. 1996;8(1):1-6.
- [4] Berrocal CG, Lundgren K, Löfgren I. Corrosion of steel bars embedded in fibre reinforced concrete under chloride attack: State of the art. *Cem Concrete Res*. 2016;80:69-85.

Initiation and propagation of reinforcement corrosion in ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)

This note presents the preliminary results of an experimental investigation aimed at studying the corrosion behaviour of reinforcement in ultra-high performance fibre reinforced concretes. Regarding parameters related with corrosion initiation, tests of capillary absorption, water content and water absorption, electrical resistivity, accelerated carbonation and chloride migration were carried out. Results highlighted that concrete is a very impervious material. Results of corrosion tests - both on carbon steel and stainless steel reinforcements - showed conditions of passivity even after exposure to wetting and drying cycles with chlorides. Only in the presence of cracks, carbon steel reinforcement showed a possible onset of corrosion.

KEYWORDS: UHPFRC, CORROSION, CARBONATION, CHLORIDES.