

Corrosione a lungo termine di armature di acciaio in calcestruzzi carbonatati con diverse composizioni

N. Russo, E. Redaelli, F. Lollini

Per una corretta previsione della vita di servizio di una struttura in calcestruzzo armato soggetta a corrosione da carbonatazione è necessaria una accurata stima del tempo di propagazione, funzione della velocità con cui l'attacco propaga, che dipende dalle condizioni di esposizione e dalla qualità del calcestruzzo. Questa nota riporta i risultati sperimentali di un programma di ricerca volto alla caratterizzazione delle condizioni di corrosione delle armature in calcestruzzi carbonatati, aventi diverse composizioni, ed esposti per più di 15 anni in ambiente esterno non riparato dalla pioggia. I risultati sperimentali hanno permesso di evidenziare il ruolo fondamentale della composizione del calcestruzzo nel determinare il comportamento a corrosione delle barre, portando a condizioni di degrado significativamente differenti, che vanno dall'assenza di fessurazione al completo distacco del copriferro. Si sono, inoltre, investigate le correlazioni tra la velocità di corrosione e parametri quali la resistività elettrica del calcestruzzo e il potenziale di corrosione dell'armatura.

PAROLE CHIAVE: CEMENTI DI MISCELA, CARBONATAZIONE, CONDIZIONI NON RIPARATE, VELOCITÀ DI CORROSIONE

INTRODUZIONE

Nelle strutture in calcestruzzo armato soggette a corrosione da carbonatazione, la fase di propagazione può rappresentare una significativa parte della vita di servizio e, per questo motivo, deve essere correttamente quantificata. Essendo questo periodo strettamente correlato alla velocità con cui propaga l'attacco corrosivo, funzione delle condizioni di esposizione e della qualità del calcestruzzo, la sua stima è di fondamentale importanza.

A partire dagli anni 80 del secolo scorso sono stati condotti numerosi studi per valutare la velocità di corrosione di armature in acciaio al carbonio inglobate in calcestruzzi confezionati con diversi tipi di cemento ed esposti principalmente in condizioni di laboratorio a cicli di temperatura e umidità relativa. Gli studi, invece, condotti in condizioni di esposizione naturale, in ambiente esterno, sia inerenti provini sia strutture reali sono scarsi, di durata limitata nel tempo e spesso non riportano informazioni legate alla velocità di corrosione, ma solamente al potenziale di corrosione o ai risultati dell'osservazione visiva. Da questi lavori si evince che la velocità di corrosione, solitamente espressa come densità di corrente, è estremamente variabile, da 1 a 30 mA/m², tuttavia non è possibile definire con certezza le reali condizioni di esposizione, non essendo riportate informazioni riguardanti la temperatura, l'umidità relativa e la frequenza di precipitazioni durante il periodo di espo-

N. Russo, E. Redaelli, F. Lollini

Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica,
Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta"

sizione [1-3]. Inoltre, la maggior parte dei dati, anche considerando quelli ottenuti su provini esposti a condizioni di laboratorio, si riferisce principalmente a calcestruzzi confezionati con cemento Portland, mentre pochi dati sono disponibili sui cementi di miscela.

Questa nota riporta i risultati preliminari ottenuti su campioni in calcestruzzo armato carbonatati, confezionati con calcestruzzi aventi diverse composizioni, ed esposti per più di 15 anni in ambiente esterno non riparato dalla pioggia.

PROCEDURA SPERIMENTALE

Per indagare le condizioni di corrosione delle armature in calcestruzzo carbonatato sono stati confezionati calcestruzzi con rapporti acqua/legante pari a 0.61 e 0.46, dosaggio di legante variabile da 250 kg/m³ a 350 kg/m³ e diversi tipi di legante, ottenuti con una parziale sostituzione del clinker di cemento portland (OPC), con il 15 e 30% di calcare (15LI e 30LI) e con il 30% di cenere volante (FA). Sono stati utilizzati aggregati calcarei, con una dimensione massima di 16 mm, e un superfluidificante per ottenere una classe di lavorabilità S4 (ovvero uno slump di 160-200 mm in accordo alla norma EN 206). La Tabella 1 riporta la composizione dei calcestruzzi confezionati, la sigla, le proprietà allo stato fresco, in termini di abbassamento al cono di Abrams (slump) e la resistenza a compressione valutata dopo 28 giorni di stagionatura come media di due provini. Come armature sono state utilizzate armature in acciaio al carbonio, aventi diametro di 10 mm, lunghezza di 200 mm ed esposte per 150 mm. Le barre sono ottenute attraverso un processo di laminazione a caldo con trattamento termico in linea (TempCore). Per il calcestruzzo 30LI/0.61/300 si è considerato anche un altro tipo di armatura, ottenuto

attraverso trafilatura a freddo (indicate con la lettera T). La Tabella 2 riporta le caratteristiche meccaniche dell'acciaio e la composizione chimica. Prima del confezionamento dei calcestruzzi, le barre sono state sabbiare (in condizione di metallo bianco).

Sono stati confezionati, coi diversi calcestruzzi, provini armati prismatici, 60 mm x 250 mm x 150 mm, contenenti tre armature ciascuno, poste a diverse profondità, cosicché risultassero caratterizzate da diversi spessori di copriferro (pari a 10, 25 e 40 mm rispettivamente per l'armatura superiore, sup, intermedia, int, e inferiore, inf) (Figura 1). Due fili di acciaio inossidabile, utilizzati come riferimento e contro-elettrodo durante le misure elettrochimiche, sono stati posizionati in corrispondenza delle armature. Il comportamento alla corrosione è stato valutato mediante misura del potenziale di corrosione delle armature (E_{corr}) e di polarizzazione lineare (R_p). La densità di corrente di corrosione è stata quindi stimata attraverso la relazione: $i_{corr} = B/R_p$ dove la costante B è stata assunta pari a 26 mV. Inoltre, sono state effettuate misure di conducibilità elettrica tra i due elettrodi di acciaio inossidabile, il cui valore è stato convertito in resistività attraverso la costante di cella calcolata con un metodo agli elementi finiti.

I provini, stagionati 7 giorni, dopo essere stati carbonatati in modo accelerato ($CO_2 = 100\%$, $T = 20^\circ C$ e U.R. = 65%), sono stati esposti in ambiente naturale, in condizioni non riparate dalla pioggia, sul tetto del Dipartimento, con la superficie di getto posizionata in orizzontale e rivolta verso l'alto e quella inferiore appoggiata su una grata rialzata dalla pavimentazione per favorire la circolazione di aria (prima dell'esposizione, le superfici laterali dei provini e le parti terminali delle armature, sporgenti dal provino, sono stati rivestiti con stucco o resina epossidica).

Tab.1 - Composizione dei calcestruzzi e principali risultati allo stato fresco (slump) e indurito (resistenza media a compressione, $R_{c,28}$) – Composition of concrete mixes and main results at the fresh (slump) and hardened state (compressive strength, $R_{c,28}$).

Serie	Sigla	a/l	acqua (kg/m ³)	legante (kg/m ³)	Aggregati (kg/m ³)	slump (mm)	$R_{c,28}$ (MPa)
OPC	OPC-0.61-300	0.61	183	300	1857	200	59.3
15LI	15LI-0.61-250	0.61	152	250	1983	190	54.6
	15LI-0.61-300	0.61	183	300	1857	180	45.3
30LI	30LI-0.61-300	0.61	183	300	1857	210*	36.8*
	30LI-0.46-300	0.46	138	300	1979	170	61
	30LI-0.46-350	0.46	161	350	1868	165	57.4
FA	FA-0.61-300	0.61	183	300	1857	170	44

* i risultati si riferiscono al getto realizzato per confezionare il provino con armature TempCore

Tab.2 - Caratteristiche meccaniche e composizione chimica dell'acciaio ($R_{s,0.2\%}$ = carico di snervamento, R_m = carico di rottura, A_{gt} = allungamento a carico massimo) – Mechanical properties and chemical composition of carbon steel bars ($R_{s,0.2\%}$ = yield strength, R_m = tensile strength, A_{gt} = elongation at maximum strength).

Barra	$R_{s,0.2\%}$ (MPa)	R_m (MPa)	A_{gt} (%)	C	Mn	Si	P	Cu	Ni	Altri
TempCore	544	640	11.6	0.211	1.04	0.2	0.022	0.49	0.12	<0.1
Trafilato	469	616	11.3	0.196	0.93	0.27	0.023	0.57	0.16	<0.1

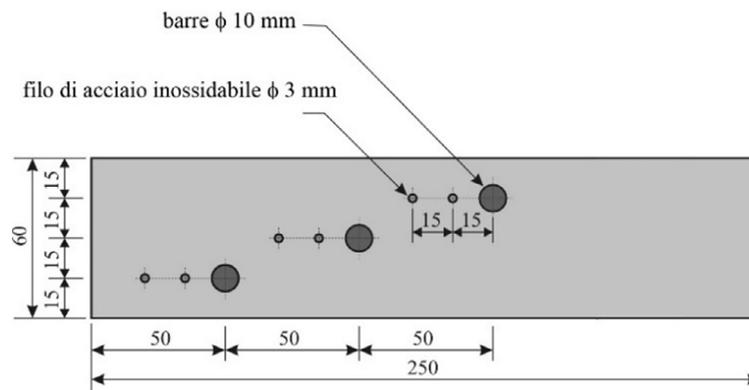


Fig.1 - Rappresentazione schematica dei provini armati (dimensioni in mm, profondità = 150 mm) – Outline of reinforced specimens (dimensions in mm, depth = 150 mm,).

Durante i primi due anni di esposizione i provini sono stati costantemente monitorati e i risultati del monitoraggio sono riportati in [4] (fa eccezione il provino contenente le armature trafilate che è stato monitorato per un periodo molto limitato). Dopo questo iniziale periodo di monitoraggio, i provini sono stati lasciati in ambiente esterno non riparato. Dopo circa 15 anni dal confezionamento è stata condotta una osservazione visiva dei campioni, per mettere in luce il loro stato di conservazione (presenza di fessure, la loro apertura e presenza di distacchi) e si è ripreso, per circa quattro mesi, il monitoraggio delle sole armature inglobate in calcestruzzo integro o fessurato, con metodologia analoga a quella utilizzata durante i primi anni.

RISULTATI E DISCUSSIONE

La Tabella 3 riporta i risultati dell'osservazione visiva e i valori medi di velocità di corrosione, i_{corr} e potenziale di corrosione, E_{corr} , calcolati considerando i valori ottenuti durante i primi due anni di monitoraggio su tutte le tre armature, dal momento che, almeno per spessori di copriferro relativamente modesti (inferiori a 25 mm), i_{corr} e E_{corr} erano risultati confrontabili [4]. L'osservazione visiva è stata condotta

sia sulla faccia di getto, direttamente esposta alla pioggia, sia su quella controcassero (l'armatura inferiore sebbene abbia uno spessore di copriferro di 40 mm rispetto alla superficie di getto, ha uno spessore di 10 mm dalla superficie controcassero). Si osserva nei diversi provini, dopo 15 anni di esposizione in ambiente esterno non riparato, la presenza di una fessura, con apertura variabile funzione della composizione del calcestruzzo, in corrispondenza delle armature più superficiali. In alcuni casi, come per il provino 15LI-0.61-300 si è verificato il completo distacco del calcestruzzo. L'apertura delle fessure è maggiore per le armature superficiali rispetto a quelle inferiori che, anche se hanno rispetto alla superficie controcassero lo stesso spessore di copriferro, non erano esposte direttamente alla pioggia. Per quanto riguarda le armature posizionate ad una profondità intermedia, si può osservare, per alcuni provini, l'assenza su entrambe le superfici di esposizione di segni di fessurazione incipiente (come ad esempio per il provino OPC-0.61-300) o la presenza di una fessura solo sulla faccia controcassero. In altri provini, come il 15LI-0.61-300, invece, anche l'armatura a profondità intermedia è in calcestruzzo completamente distaccato.

Essendo le i_{corr} misurate sulle tre armature confrontabili, si può ritenere che lo spessore di copriferro giochi un ruolo fondamentale nel determinare la durata della fase di propagazione e che, all'aumentare dello stesso, questa aumenti. Il ruolo del copriferro è, indubbiamente, correlato alla resistenza meccanica offerta dal calcestruzzo nel contrastare gli sforzi di trazione generati dalla formazione dei prodotti di corrosione. All'aumentare della resistenza a compressione aumenta anche la resistenza a trazione e quindi alla

fessurazione; tuttavia un calcestruzzo più poroso potrebbe permettere l'allocazione dei prodotti di corrosione nei suoi pori, diminuendo la pressione esercitata. Il distacco del calcestruzzo, sia in corrispondenza dell'armatura intermedia, sia di quella superficiale è stato, infatti, osservato nei calcestruzzi aventi una minore resistenza a compressione a 28 giorni di stagionatura (Tabelle 1 e 3).

Tab.3 - Osservazione visiva dei campioni armati (w = apertura fessura in mm, - = assenza di fessura) e valori medi di densità di corrente e potenziale di corrosione misurati nei primi anni di esposizione – Visual observation of reinforced specimens (w = crack width in mm; - = absence of crack) and average value of corrosion current density and corrosion potential measured during the first years of exposure.

Etichetta	i_{corr} (mA/m ²)	E_{corr} (mV/SCE)	faccia getto			faccia controcasero		
			sup	int	inf	sup	int	inf
OPC-0.61-300	0.8	-309	w = 0.4	-	-	-	-	w < 0.1
15LI-0.61-250	2.73	-393	w = 0.5	w < 0.1	-	-	-	w < 0.1
15LI-0.61-300	1.9	-351	distacco	distacco	-	distacco	distacco	w = 0.5 ÷ 0.6
30LI-0.61-300	2.48	-328	distacco	distacco	w < 0.1	distacco	distacco	w = 2.5
30LI-0.61-300-T	4.9	-479	distacco	distacco	w < 0.1	distacco	distacco	w = 2.5
30LI-0.46-300	1.67	-463	w = 0.25	-	-	-	w = 0.2	w = 0.25
30LI-0.46-350	1.81	-393	w = 0.5	-	-	-	< 0.1	w = 0.3
30FA-0.61-300	2.08	-355	distacco	-	-	distacco	w = 0.35	w = 0.6

A pari stagionatura, la composizione del calcestruzzo, in termini non solo di rapporto acqua/cemento, ma anche di tipo di cemento, è quindi di fondamentale importanza in quanto determina la resistenza a compressione. Il tipo di cemento, inoltre, influenza la resistività elettrica del calcestruzzo e, di conseguenza, la velocità di corrosione, e, riguardo a quest'ultima, i valori inferiori sono stati osservati sul provino confezionato con cemento Portland (Tabella 3). Il provino confezionato con cemento Portland, grazie alla combinazione tra bassa velocità di corrosione e elevata resistenza meccanica, ha portato al migliore stato di conservazione. D'altro canto, sebbene i dati a disposizione siano limitati, il processo di produzione delle armature non sembra avere influenzato in maniera significativa lo stato di conservazione.

Al termine dell'osservazione visiva, si è iniziato nuovamente il monitoraggio delle grandezze elettrochimiche delle armature inglobate in calcestruzzo sano o fessurato. La Figura 2 riporta i valori medi e l'intervallo di variabilità del potenziale di corrosione e della densità di corrente di corrosione. Per confronto si riportano anche i valori misurati durante i primi due anni di esposizione. Indipendentemente dal tipo di calcestruzzo si osserva un significativo aumento di E_{corr} e una diminuzione di i_{corr} che potrebbero essere dovuti a diverse cause. Innanzitutto, la presenza di prodotti di corrosione all'interfaccia calcestruzzo/armatura e di fessure di apertura significativa potrebbe rendere meno affidabile il contatto elettrolitico e, quindi, le misure stesse.

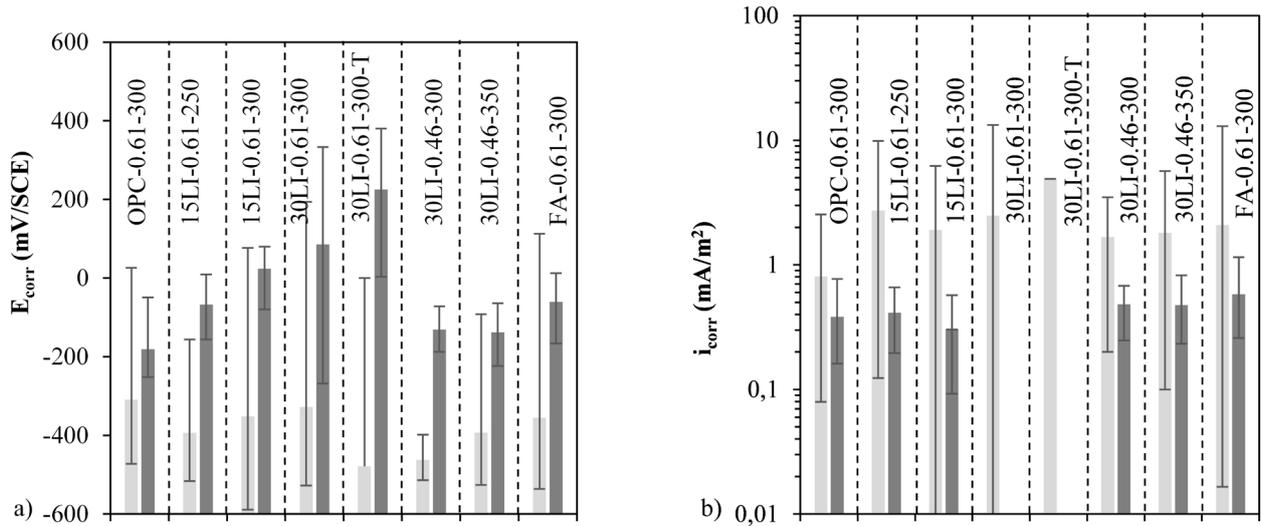


Fig.2 - Potenziale di corrosione, E_{corr} (a) e densità di corrente, i_{corr} (b) misurati sui diversi provini dopo 15 anni di esposizione (barre grigio scuro) e nei primi anni di esposizione (barre grigio chiaro) – Corrosion potential, E_{corr} (a) and corrosion current density, i_{corr} (b) measured on the different samples after 15 years of exposure (dark grey bars) and during the first two years of exposure (light grey bars).

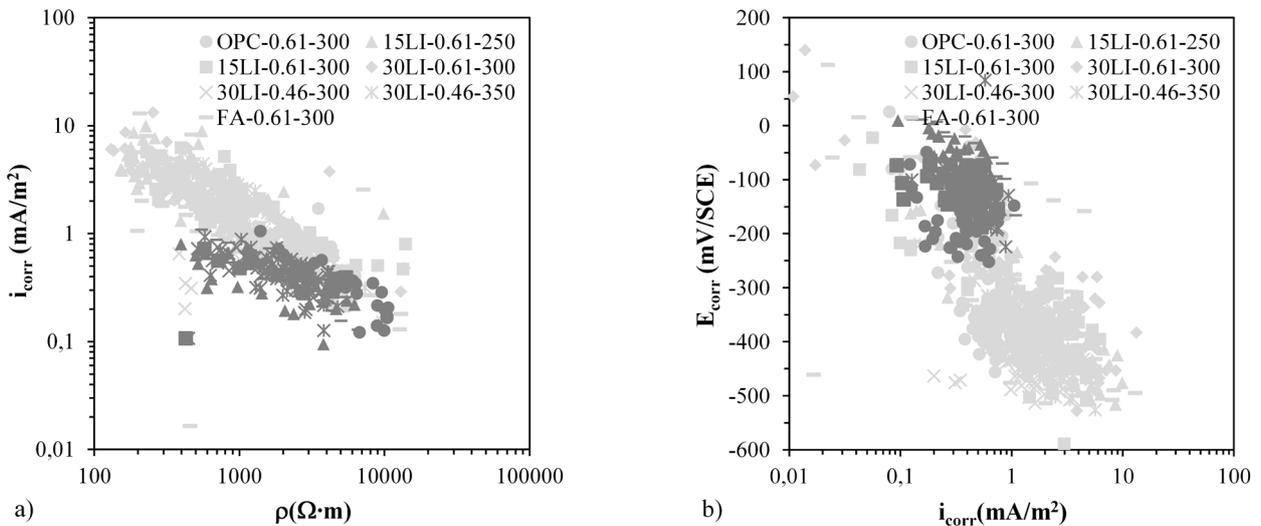


Fig.3 - Relazione tra densità di corrente e resistività elettrica (a) e tra densità di corrente e potenziale di corrosione (b) per i diversi provini dopo 15 anni di esposizione (simboli grigio scuro) e nei primi anni di esposizione (simboli grigio chiaro) – Relationship between corrosion current density and electrical resistivity (a) and between corrosion current density and corrosion potential (b) on the different samples after 15 years of exposure (dark grey symbols) and during the first two years of exposure (light grey symbols).

Questo potrebbe anche non rendere più trascurabile le differenze tra armature poste a diversa profondità. Inoltre, il periodo di monitoraggio è di durata significativamente diversa (circa 4 mesi rispetto ai due anni) pertanto le con-

dizioni climatiche medie potrebbero essere relativamente differenti nei due periodi di riferimento (nell'ultimo periodo di monitoraggio, il clima è stato piuttosto secco, mite e con scarse precipitazioni). Inoltre, l'intervallo di variazio-

ne di E_{corr} e i_{corr} , significativamente inferiore per le misure dopo 15 anni di esposizione, potrebbe essere anch'esso dovuto alla diversa durata di monitoraggio. Risulta quindi difficile valutare se si ha una variazione nel tempo dei parametri elettrochimici, ovvero se la densità di corrente e, quindi, la velocità di corrosione, diminuisce nel tempo oppure se le basse i_{corr} rilevate dipendono dalle condizioni climatiche presenti al momento delle misure. Solo al termine di un periodo di monitoraggio più lungo e dal confronto puntuale di ogni singola armatura sarà possibile trarre delle indicazioni su questo. Non è, inoltre, possibile confermare l'effetto del tipo di cemento sulla i_{corr} .

La Figura 3 mostra la relazione tra la densità di corrente e la resistività elettrica del calcestruzzo e tra la densità di corrente e il potenziale di corrosione ottenuta sia dopo 15 anni di esposizione (simboli grigio scuri) sia nei primi anni di esposizione (simboli grigio chiaro), considerando le misure puntuali su ogni armatura. Si osserva, nei primi anni di esposizione, una buona correlazione tra i_{corr} e p che dipende leggermente dal tipo di calcestruzzo. Tale correlazione sembra variare nel tempo, portando a valori di densità di corrente più bassi, a pari resistività elettrica. Gli elevati valori di resistività elettrica sono compatibili con quelli misurati in ambienti asciutti (U.R. < 80%). Al fine quindi di confermare questa correlazione è necessario un periodo di monitoraggio più lungo e una valutazione più approfondita dei fattori che potrebbero influire sui parametri elettrochimici, come, ad esempio, la presenza di fessurazione. Sembra esistere anche una buona correlazione tra potenziale di corrosione e densità di corrente.

I risultati hanno mostrato che la durata della fase di propagazione è fortemente influenzata dalla composizione del calcestruzzo e dallo spessore di copriferro. A seguito di un periodo di esposizione di durata confrontabile, i provini confezionati con calcestruzzi caratterizzati da una maggiore resistenza meccanica e maggiore resistività elettrica mostrano l'assenza di fessurazione per le armature aventi maggiore spessore di copriferro e fessure di limitata apertura per le armature aventi minore spessore di copriferro. Viceversa, i provini con minore resistenza meccanica e minore resistività elettrica presentano distacchi che interessano sia le armature più superficiali sia, in alcuni casi, quelle intermedie. Dal monitoraggio delle condizioni di corrosione dopo 15 anni di esposizione si è osservata una diminuzione della velocità di corrosione rispetto a quanto osservato nei primi anni di esposizione e una leggera variazione nelle correlazioni tra la velocità di corrosione e la resistività elettrica e il potenziale di corrosione sempre rispetto a quelle determinate nei primi anni di esposizione. Tuttavia, è necessario un periodo di monitoraggio più lungo per confermare questo andamento.

CONCLUSIONI

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] AM. DUNSTER, DJ. BIGLAND, IR. HOLTON, Rates of carbonation and reinforcement corrosion in high alumina cement concrete. *Mag Concr Res.*, Vol 52, pp.433-441 (2000).
- [2] G. SERGI, AMG. SENEVIRATNE, T MALEKI, et al., Control of reinforcement corrosion by surface treatment of concrete, *Proc Inst Civ Eng Struct Build.*, Vol 140(1), pp. 85-100 (2000)
- [3] JS. MATTILA, MJ PENTTI, Residual service life of concrete façade structures with reinforcement in carbonated concrete in Nordic climate. In: Walraven S, editor. *Taylor made concrete structures*. London: Taylor and Francis Group, p. 75-79 (2008).
- [5] F. LOLLINI, E. REDAELLI, Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete made with different supplementary cementitious materials, *Corros. Eng. Sci. Technol.*, Vol. 56 (2), pp. 473-482 (2022).

Long-term corrosion behavior of carbon steel in carbonated concrete made with different binders

To properly predict the service life of a reinforced concrete structure subjected to carbonation-induced corrosion, a correct estimation of the propagation period is needed. The propagation period is related to the rate at which the corrosive attack propagates, and mainly depends on the exposure conditions and the concrete quality. This paper reports the preliminary results of a research aimed at investigating the corrosion conditions of steel in carbonated concrete, made with different compositions and exposed for more than 15 years to an unsheltered outdoor environment. Preliminary results showed the fundamental role of concrete composition in determining the corrosion behavior of steel bars, leading to significant different damage conditions, from the absence of cracking to the complete concrete cover detachment. Moreover, the correlations between the corrosion rate and concrete resistivity as well as corrosion potential were investigated.

KEYWORDS: BLENDED CEMENT, CARBONATION, UNSHELTERED EXPOSURE, CORROSION RATE

[TORNA ALL'INDICE >](#)



LECCE • ITALY • 17-19 APRIL 2024

4th Mediterranean Conference on Heat Treatment and Surface Engineering

AIM is pleased to announce the 4th Mediterranean Conference on Heat Treatment and Surface Engineering (MCHTSE 2024) and the 5th International Conference on Thermal Process Modeling and Simulation (TPMS-5).

The two IFHTSE Conferences will be held together in Lecce - Italy, on 17-19 April 2024.

The two conferences aim at providing a forum within which engineers, scientists, researchers and production managers can review and discuss fundamentals, new challenges, recent progress and emerging topics in the fields of advanced heat treatment and surface engineering technology.

IMPORTANT DATES

Abstracts Submission Deadline: October 31, 2023

Notification of acceptance:.....December 15, 2023

Preliminary program: January 31, 2024

Full Papers Submission Deadline: February 28, 2024

www.aimnet.it/mc-tmp.htm