

# Effetti della pre-ossidazione delle armature sulla corrosione indotta dalla successiva penetrazione nel calcestruzzo della carbonatazione

M. Carsana

Il prolungato stoccaggio delle armature all'aperto in aree non riparate, prima del getto del calcestruzzo, determina sulla superficie dell'acciaio la formazione di ruggine che può essere causa di contenziosi per il presunto rischio di compromettere la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato, in seguito alla successiva carbonatazione del calcestruzzo. La memoria presenta i risultati di una ricerca effettuata su provini in calcestruzzo armati con barre, sia prive di ossidi, sia con ossidi presenti già in seguito al processo di produzione o con quelli ottenuti dopo un anno di esposizione all'atmosfera in fase di stoccaggio. Dopo aver verificato che, anche in presenza di pre-ossidazione, le armature sono in grado di passivarsi in calcestruzzo alcalino e privo di cloruri, i provini armati sono stati sottoposti a carbonatazione accelerata. Le prove hanno evidenziato che il bagnamento diretto del calcestruzzo carbonatato induce in armature attive velocità di corrosione confrontabili, indipendentemente dallo spessore degli ossidi.

**PAROLE CHIAVE:** PRE-OSSIDAZIONE, CALCESTRUZZO, CORROSIONE, CARBONATAZIONE.

## INTRODUZIONE

La carbonatazione abbassa il pH del calcestruzzo e non consente più la stabilità del film di passività delle armature di acciaio, le quali divengono attive e la loro velocità di corrosione dipende dalle condizioni di esposizione ambientale, in particolare dall'umidità del calcestruzzo [1]. Nel caso di corrosione indotta dalla carbonatazione non c'è motivo di ritenere che la pre-ossidazione di armature, rimaste prolungatamente stoccate all'aperto [2] prima di essere inglobate nel calcestruzzo, possa influire sull'inesco della corrosione, in quanto le armature perdono il film di passività anche se non sono pre-ossidate. Non si può, però, escludere a priori che possa esserci un'influenza della pre-ossidazione sulla velocità di propagazione della corrosione. Le norme, in genere, si limitano a richiedere che non ci siano ossidi non aderenti che pos-

**M. Carsana**

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

sano pregiudicare l'aderenza al calcestruzzo, mentre non affrontano i possibili effetti della pre-ossidazione sulla durabilità delle opere in calcestruzzo armato. La presenza di questa pre-ossidazione è, quindi, spesso causa di contenziosi e costringe spesso alla sabbiatura delle barre, indipendentemente dal livello di ossidazione.

Da studi compiuti in un arco di tempo molto ampio [3] è emerso che lo stato di ossidazione delle armature, generatosi prima che siano introdotte nel calcestruzzo, non ha effetti deleteri sull'aderenza al calcestruzzo, almeno se gli ossidi sono aderenti e le armature sono nervate. Scarse sono, invece, le informazioni disponibili sulle effettive condizioni di passivazione delle armature in funzione delle caratteristiche dello stato di pre-ossidazione (spessore e composizione degli ossidi, entità dell'attacco, ecc.) e sul loro ruolo una volta che le armature si depassivano per effetto della carbonatazione. Questa memoria presenta i risultati di uno studio sperimentale volto a valutare il comportamento a corrosione di provini in calcestruzzo armato, con barre aventi condizioni superficiali diverse, in seguito alla penetrazione della carbonatazione.

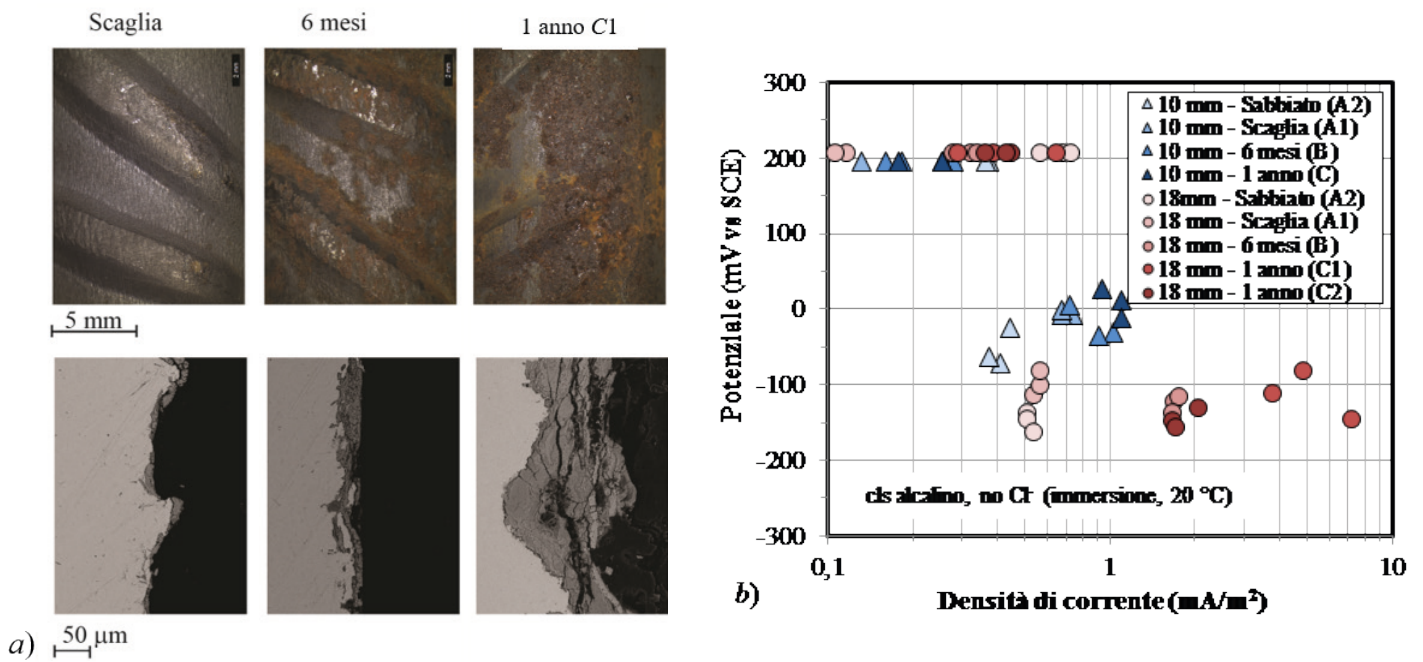
## MATERIALI E METODI

Per la presente sperimentazione sono state utilizzate barre per calcestruzzo armato in acciaio laminato a caldo B450C, aventi diametro 10 e 18 mm ed esposte per 6 mesi (indicate di seguito con B) e 1 anno (C) all'atmosfera e in assenza di contaminazione da cloruri. Per confronto si sono studiate analoghe barre di recente produzione (ricoperte da scaglia di laminazione, (A1) e sabbiate (A2)). Nel caso delle barre di diametro 18 mm esposte per 1 anno in atmosfera si sono distinte due ulteriori sotto-condizioni a seconda del livello di ossidazione (C1 e C2). Le diverse condizioni superficiali sono state documentate con uno stereo-microscopio; mediante sezioni metallografiche osservate al microscopio ottico e a quello elettronico a scansione (alcuni esempi di micrografie in Fig.1a), è stato stimato lo spessore degli ossidi. Sono stati realizzati

provini di calcestruzzo armato (tre per tipologia di barra e di diametro) con un rapporto acqua/cemento pari a 0,5, un CEM II/A-L 42.R, acqua deionizzata, aggregato calcareo frantumato e un additivo superfluidificante. La classe di consistenza è S4 e la resistenza a compressione a 28 giorni è di circa 50 MPa. Si è inizialmente studiato il comportamento a corrosione delle diverse tipologie di armature in calcestruzzo alcalino (non carbonatato) e privo di cloruri, esposto a diverse umidità (80% U.R e totale immersione, 20-23°C), sia in condizioni di corrosione libera (valutate in termini di potenziale di corrosione e velocità di corrosione determinata con il metodo della resistenza di polarizzazione lineare considerando una costante di Stern-Geary pari a 26 mV), sia attraverso prove di polarizzazione potenziostatica (a +200 mV vs SCE) per verificare ulteriormente l'effettivo stato di corrosione monitorando la corrente di polarizzazione nelle successive 24 ore. Per valutare il ruolo della pre-ossidazione sull'innescare e propagazione della corrosione i provini sono stati successivamente sottoposti a carbonatazione accelerata (per 25 settimane a 4% CO<sub>2</sub>, 65% U.R., 20°C), quindi esposti alle medesime condizioni di umidità a cui sono stati testati prima della carbonatazione.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

La caratterizzazione dello stato superficiale delle barre di nuova produzione ha mostrato che la scaglia di laminazione di colore grigio scuro, pur apparendo compatta all'osservazione visiva, in realtà non è sempre aderente e presenta spessori dell'ordine di 5-25 µm (Fig. 1a, sinistra). L'esposizione atmosferica delle barre ha portato alla formazione sulla loro superficie di ossidi rosso-bruno, di estensione superficiale e spessore crescente in funzione del tempo di esposizione (Fig.1a). Dopo un anno di esposizione all'aperto si sono rilevati spessori massimi di ossidi di circa 100 µm sulle barre da 10 mm e di quasi 200 µm su quelle da 18 mm (barre pre-ossidate a destra di Fig.1a).



**Fig.1** - Aspetto della superficie e degli ossidi di alcune barre (18 mm) a). Correlazione tra potenziale e densità di corrente delle armature b) nelle diverse condizioni superficiali durante le prove di polarizzazione potenziostatica e in condizioni di corrosione libera - Visual appearance of the rebar surfaces and of the oxides observed on the bars (18 mm) a). Correlation between potential and current density of the bars b) with different surface conditions during potentiostatic tests and during free corrosion conditions b).

Le prove elettrochimiche hanno consentito di sostenere che, anche in presenza di ossidi con spessori fino a 200  $\mu\text{m}$ , le armature sono in grado di passivarsi in calcestruzzo alcalino e non contaminato da cloruri (Fig. 1b).

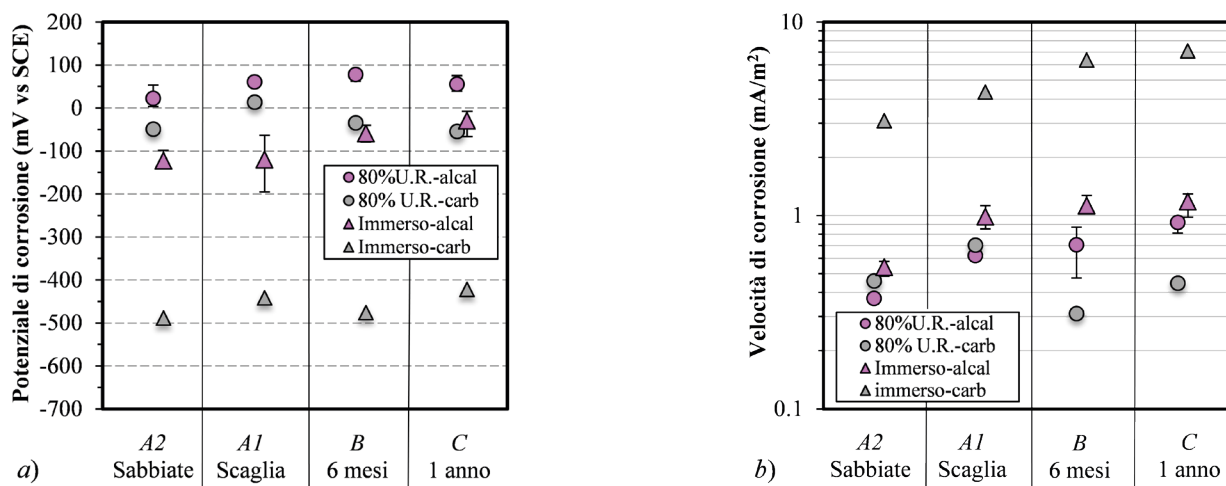
In tutte le condizioni di umidità si è osservato un comportamento analogo per le barre sabbiate (A2), con scaglia (A1) e pre-ossidate (B, C), in termini di potenziali di corrosione tipici delle condizioni di passività (superiori a -200 mV vs SCE, [2]). Le prove di polarizzazione potenziostatica (Fig. 1b) hanno mostrato che anche a un potenziale significativamente più elevato (simboli riportati a +200 mV vs SCE, Fig. 1b) di quello di libera corrosione, la densità di corrente di polarizzazione è trascurabile (inferiore a 1  $\text{mA}/\text{m}^2$ ). Solo le misure di velocità di corrosione (ricavate mediante polarizzazione lineare) hanno fornito valori crescenti in funzione dello spessore delle varie tipologie di ossido presente sulla superficie delle barre. In particolare, nel caso delle barre di diametro 18 mm, pre-ossidate per un anno (C), si sono raggiunti valori di velocità di corrosione non trascurabili (4-8  $\text{mA}/\text{m}^2$ ). Si è, tuttavia, dimostrato come questi valori non siano reali ma solo riconducibili agli effetti sulla misura stessa degli ossidi [4] che portano

a rilevare velocità di corrosione apparenti, non corrispondenti alle effettive condizioni elettrochimiche delle armature. Ne deriva, quindi, che la pre-ossidazione delle barre non pregiudica la loro passivazione nel calcestruzzo.

Nel caso di corrosione indotta dalla successiva carbonatazione del calcestruzzo non c'è motivo di ritenere che la pre-ossidazione possa influire di per sé sull'innesco della corrosione, in quanto le armature, comunque anche se non sono pre-ossidate, perdono il film di passività una volta raggiunte dal fronte di carbonatazione. Non si può, però, escludere a priori che possa esserci un'influenza della pre-ossidazione sulla velocità di corrosione nel successivo periodo di propagazione. Per valutare questo effetto, un provino per ogni tipologia di armatura è stato sottoposto a carbonatazione accelerata. Per indagare le effettive condizioni di corrosione delle armature, in seguito all'esposizione in camera di carbonatazione, e l'eventuale ruolo della pre-ossidazione, si possono confrontare i risultati delle prove elettrochimiche effettuate nelle diverse condizioni di umidità. La Fig. 2 riporta i valori del potenziale e della velocità di corrosione misurati a regime in condizione di immersione e a 80% U.R. per

provini con barre da 10 mm. Dalla Fig. 2 si osserva che, nel caso di armature in condizioni di attività (in calcestruzzo carbonatato), all'aumento dell'umidità del calcestruzzo corrispondono l'aumento della velocità di corrosione dell'acciaio e la diminuzione del suo potenziale di corrosione, mentre nel caso di armature in condizioni passive (in calcestruzzo alcalino), la velocità di corrosione rimane trascurabile indipendentemente dalle condizioni di umidità del calcestruzzo. I potenziali delle armature in calcestruzzo alcalino (Fig. 2a) si mantengono al di sopra di -200 mV vs SCE (condizioni di passività), indipendentemente dal loro diverso stato superficiale. Le variazioni di umidità hanno comportato modifiche analoghe su tutte le tipologie di barre, non correlabili alla pre-ossidazione delle

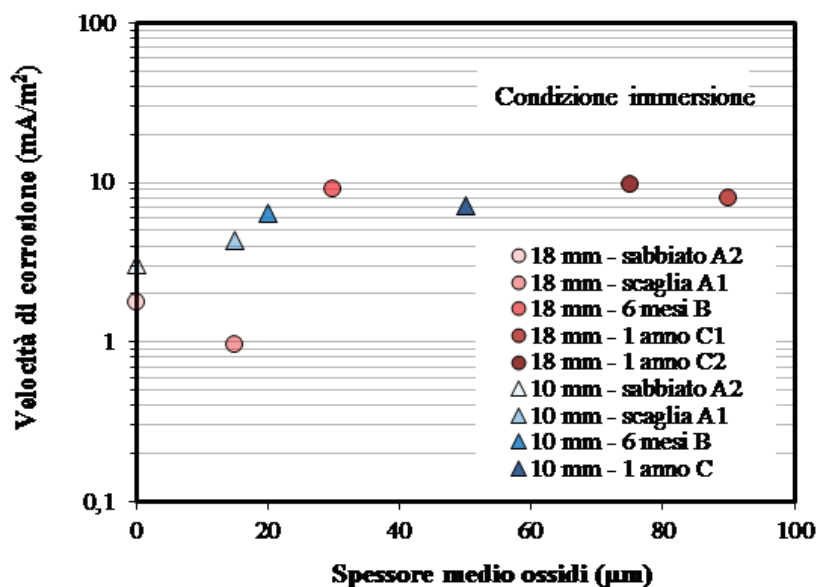
stesse ma, piuttosto, a variazioni del contenuto di ossigeno nel calcestruzzo. Pertanto le misure di potenziale, anche in condizioni di umidità variabile, non evidenziano effetti negativi della pre-ossidazione in calcestruzzo alcalino. Il raggiungimento del fronte di carbonatazione alle varie armature è confermato da un abbassamento confrontabile del potenziale (compreso tra -400 e -500 mV vs SCE). A 80% U.R. il potenziale di tali barre in calcestruzzo carbonatato si riporta a valori confrontabili con quelli delle armature in condizioni di passività. La Fig. 2b confronta la velocità di corrosione rilevata nelle diverse condizioni di pH e di umidità del calcestruzzo a contatto con le armature da 10 mm.



**Fig.2** - Confronto del potenziale a) e della velocità di corrosione b) misurati in diverse condizioni in funzione dello stato superficiale delle armature (10 mm) – Comparison of corrosion potential a) and corrosion rate b) measured in different conditions as a function of surface state of the rebars (10 mm).

Come osservato in Fig. 2b, anche per analoghe armature aventi diametro da 18 mm, già quando si trovano a contatto con calcestruzzo ancora alcalino, le barre con ossidi mostrano velocità di corrosione non più trascurabili, tanto maggiori di 1 mA/m<sup>2</sup> quanto maggiore è il livello di pre-ossidazione. Tuttavia, le condizioni di immersione a cui sono stati esposti tali provini prima ancora di essere carbonatati non hanno alcun effetto significativo sulla velocità di corrosione; infatti, l'aumento della velocità di corrosione che si misura passando dall'ambiente

più asciutto (80% U.R.) all'immersione, non è particolarmente rilevante (Fig. 2b), confermando lo stato passivo in cui si trovano le armature con pre-ossidazione prima dell'esposizione in camera di carbonatazione. Nei provini carbonatati e successivamente posti in condizioni di immersione, le barre si portano a velocità di corrosione fra loro confrontabili (4-7 mA/m<sup>2</sup>) indipendentemente dalle condizioni superficiali (Fig. 2b) e pertanto dallo spessore degli ossidi indotti dall'esposizione all'atmosfera (Fig. 3).



**Fig.3** - Velocità di corrosione misurata in condizioni di immersione in relazione allo spessore medio stimato degli ossidi sulle barre a diverso stato superficiale – Corrosion rate measured during immersion conditions as a function of estimated average of the thickness of oxides on the different superficial bar states.

## CONCLUSIONI

Lo studio sperimentale ha dimostrato che la pre-ossidazione delle barre non pregiudica la passivazione delle barre nel calcestruzzo. Quando il fronte di carbonatazione raggiunge le barre di armatura, queste divengono attive indipendentemente dalle condizioni superficiali, confermando che la pre-ossidazione non influenza l'innescamento della corrosione. Inoltre, le prove di immersione sui provini carbonatati hanno evidenziato come il bagnamento diretto del calcestruzzo induca in armature attive velocità di corrosione elevate e, comunque, confrontabili tra loro, indipendentemente dallo spessore degli ossidi; a conferma delle condizioni attive, il potenziale di corrosione si è

portato a valori più negativi, tra loro confrontabili (-400 e -500 mV vs SCE). Diversamente, si possono garantire condizioni di corrosione trascurabili nell'ambiente a 80% U.R. e 20°C, come evidenziato dal potenziale di corrosione che si è portato per tutte le barre poco sopra i -100 mV vs SCE (a valori confrontabili con quelli misurati sulle medesime barre in calcestruzzo alcalino).

## RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è stata finanziata da Sismic – Associazione tecnica per la promozione degli acciai sismici per cemento armato. Si ringrazia Fan Yang per il contributo alle prove.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] L. BERTOLINI, B. ELSENER, P. PEDEFERRI, E. REDAELLI, R. POLDER, Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair, Wiley (2013).
- [2] P. PEDEFERRI, Corrosione e protezione dei materiali metallici, volume 2, Polipress, Milano (2007).
- [3] L. BERTOLINI, M. CARSANA, Effetti della pre-ossidazione delle armature nel calcestruzzo – Lo stato dell’arte, Structural (2016).
- [4] E. PROVERBIO, R. CIGNA, Influence rebar surface condition on polarization resistance measurement in concrete structures, Materials Science Forum (1995).

# Effects of pre-rusting of bars on the corrosion induced by the subsequent penetration of carbonation into the concrete

When the bars are put into storage outdoors for long time, prior to being embedded in the concrete, on their surface a red-brownish rust layer may formed. The presence of this layer is often the cause of disputes during the acceptance of the bars due to the possible risk of decreasing the durability of reinforced concrete structures once carbonation front will reach the surface of such bars. This work describes the results of experimental tests carried out on concrete specimens reinforced with bars characterized by different degrees of pre-rusting, caused both by outdoors exposure and by production process. After having shown the actual ability of pre-rusted steel reinforcing bars embedded in concrete to reach passive conditions, the study has considered the possible consequences of concrete carbonation. The results have shown that the water saturation of concrete induces on active bars comparable corrosion rates, regardless the thickness of oxides on the steel surface.

**KEYWORDS:** PRE-RUSTING, CONCRETE, CORROSION, CARBONATION.