

Durability of the hot galvanized steel bars: Italian concrete days

Durabilità delle barre in acciaio zincate a caldo: Giornate aicap 2016 Congresso CTE

M. Santamaria¹, N. Scibilia¹, F. Di Franco¹, M. Ferrante²

¹ *Department of Civil, Environmental, Aerospace, of Materials Engineering, University of Palermo, Italy*

² *Master's degree in Building Engineering*

ABSTRACT: The following paper presents the results of a survey of hot dip galvanized steel bars in terms of corrosion resistance. The corrosive environment was simulated through an electrolytic solution in which the galvanized bars were immersed; measurements were done to determine parameters characterizing specimens state and their variation with increasing exposure to corrosive environment. The study is extended to a set of samples characterized by a variable zinc coating thickness. To assess the influence of the zinc coating on the steel bars durability, the same characterization was made of a non-galvanized steel sample, in order to compare the results obtained. Also, a morphological analysis of the zinc coating was carried out using a scanning electron microscope. Finally, we show the results of some pull-out tests conducted on galvanized bars to evaluate the bond./ Il lavoro presenta i risultati di un'indagine su barre in acciaio zincato a caldo dal punto di vista della resistenza alla corrosione. L'ambiente corrosivo è stato simulato attraverso una soluzione elettrolitica nella quale sono stati immersi i campioni di barre zincate e si sono determinati i parametri caratterizzanti lo stato degli stessi e la loro variazione all'aumentare dell'esposizione nell'ambiente corrosivo. Lo studio è esteso ad un set di campioni caratterizzati da uno spessore di zincatura variabile. Per valutare l'influenza della zincatura sulla durabilità delle barre in acciaio, si è operata la stessa caratterizzazione su un campione di acciaio non zincato, mettendo a confronto i risultati ottenuti. Si è inoltre effettuata un'analisi morfologica del rivestimento di zinco mediante microscopio elettronico a scansione. Infine, sono riportati i risultati di alcune prove di pull-out condotte su barre zincate per valutarne l'aderenza al calcestruzzo.

KEYWORDS: zinc coating; corrosion; bond / zincatura a caldo; corrosione; aderenza acciaio-calcestruzzo

1 INTRODUZIONE

La durabilità degli elementi costruttivi in calcestruzzo armato è di notevole attualità, in relazione al degrado che presenta il nostro patrimonio edilizio e infrastrutturale. Proteggere l'acciaio risulta fondamentale per aumentare la vita utile di un manufatto in calcestruzzo armato. La forma di degrado che interessa i materiali metallici è la corrosione.

I metodi di protezione possono essere ricondotti a due grandi categorie: quelli che agiscono con una protezione attiva e quelli che agiscono con protezione passiva. La prima ricorre all'elettricità e/o all'uso di un anodo sacrificale per portare il materiale da proteggere in condizioni di immunità termodinamica; mentre quella passiva è realizzata impiegando strati protettivi ad effetto barriera.

La zincatura esplica entrambe le suddette forme di protezione. La deposizione dello zinco sul substrato di acciaio può avvenire in diversi metodi (zincatura a caldo, spray di zinco, deposizione elettrolitica). Nel presente studio si concentra l'attenzione sulla zinca-

tura a caldo. Inoltre si evidenzia come l'utilizzo delle barre zincate non comporti cambiamenti negativi in termini di aderenza acciaio-calcestruzzo.

2 LA CORROSIONE

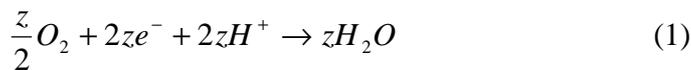
2.1 *Classificazione del processo corrosivo*

Dal punto di vista morfologico la corrosione si può suddividere in: generalizzata, localizzata e selettiva. La prima può essere uniforme, quando la perdita di materia è omogenea, e non uniforme in caso contrario; la seconda è quella per cui solo in certi punti del pezzo si verifica un attacco incisivo; mentre la corrosione selettiva interessa una parte del metallo che per la sua natura chimica risulta più suscettibile all'attacco corrosivo in un particolare ambiente. In funzione dell'ambiente che provoca la corrosione si distingue la corrosione a secco e a umido. La prima è provocata da atmosfere gassose in assenza di umidità e la seconda si manifesta in ambienti caratterizzati

dalla presenza di acqua e/o vapore d'acqua; è il tipo di corrosione più frequente nelle opere civili.

La corrosione ad umido ha un meccanismo di tipo elettrochimico ed è regolata da leggi di tipo termodinamico e cinetico.

L'ambiente corrosivo è costituito da soluzioni acquose, con funzionamento di sistemi galvanici in cui il processo corrosivo è la risultante di un processo anodico di dissoluzione (ossidazione) del materiale metallico in congiunzione a un parallelo processo catodico di riduzione di una specie presente nell'ambiente acquoso (ossigeno, ioni H^+ , acqua). L'agente ossidante più presente è l'ossigeno; se si considera un ambiente acido, la semireazione catodica di consumo di elettroni è la riduzione dell'ossigeno che si trova a diretto contatto con la superficie metallica:



dove z indica il numero di elettroni coinvolti nel processo corrosivo.

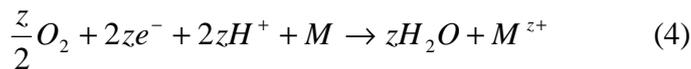
Esiste un'altra possibile semireazione catodica di consumo di elettroni in ambiente acquoso:



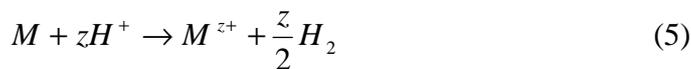
Mentre la semireazione anodica è quella di dissoluzione del metallo, che si può genericamente indicare attraverso la seguente relazione:



Il processo di corrosione sarà quindi caratterizzato dalla reazione globale di catena (somma delle due semireazioni):



oppure:



Della corrosione è importante valutarne due aspetti quello termodinamico e quello cinetico.

Il primo consente di fare considerazioni sulla spontaneità del processo corrosivo valutando la variazione di energia libera ΔG della reazione globale di catena. In termodinamica un processo sarà spontaneo per $\Delta G < 0$, non lo sarà per $\Delta G > 0$. La cinetica consente di risalire alla velocità con la quale il processo si evolve.

Il processo di corrosione è costituito da due processi accoppiati: un processo anodico di ossidazione del metallo e un processo catodico di riduzione dell'idrogeno (o dell'ossigeno).

Questi due processi possono essere rappresentati in un grafico potenziale-densità di corrente in cui sono presenti due curve che rappresenteranno rispettiva-

mente le caratteristiche anodiche e catodiche dei processi presi in considerazione. Tale diagramma è noto come Diagramma di Evans; si tratta della rappresentazione, nel piano E-Log i , delle curve di polarizzazione anodica (ossidazione del metallo) e catodica (riduzione di O_2 , H^+ , H_2O). Il punto di intersezione delle due curve è il punto di funzionamento e dà il valore del potenziale (E_{corr}) e del valore di densità di corrente di corrosione (i_{corr}). Nell'intorno del potenziale di corrosione si può definire una Resistenza di polarizzazione indicata con R_p che è correlata alla densità di corrente di corrosione secondo l'espressione:

$$R_p = \frac{b_a b_c}{2.3 i_{corr} (b_a + b_c)} \quad (6)$$

Dove i parametri b_a e b_c sono coefficienti che caratterizzano la pendenza delle curve anodiche e catodiche. Dalla precedente relazione si ricava:

$$i_{corr} = \left(\frac{1}{2.3 R_p} \right) \left(\frac{b_a b_c}{b_a + b_c} \right) \quad (7)$$

2.2 Corrosione nelle barre per c.a.

Come è noto, la protezione delle barre di armatura deriva dalla presenza del copriferro, ma la matrice cementizia non è impenetrabile e ha un certo livello di porosità, permettendo l'ingresso di sostanze aggressive che diminuiscono l'alcalinità dell'ambiente in cui si trovano le armature. Una di queste è l'anidride carbonica, responsabile della carbonatazione, che fa perdere al calcestruzzo la condizioni di passività alla superficie delle armature. La carbonatazione consiste in una reazione tra l'anidride carbonica e l'idrossido di calcio presente nell'impasto. Questo fenomeno produce una diminuzione del pH del calcestruzzo: il calcestruzzo è caratterizzato da un pH compreso tra 12,6 e 13,8 che esplica protezione nei confronti del ferro, il quale si ricopre di un film di ossido di pochi nanometri di spessore.

L'alcalinità del calcestruzzo si riduce progressivamente fino a valori del pH inferiori a 9 e in queste condizioni il film di ossido viene distrutto e si innescava una condizione favorevole alla corrosione.

Inoltre, quando l'acciaio si ossida aumenta di 5 volte il proprio volume; creando fortissime pressioni laterali che tendono a lesionare il calcestruzzo e, con un processo degenerativo, ad espellere il copriferro esponendo sempre di più le armature agli attacchi ambientali.

3 LA ZINCATURA A CALDO

Il metallo scelto per ottenere la protezione attiva deve avere un potenziale elettrochimico più basso

dell'acciaio e deve formare composti intermetallici con il ferro dell'acciaio di base, garantendo uniformità e adesione al rivestimento. Lo zinco ha un potenziale di riduzione standard minore rispetto al ferro ed è più vulnerabile all'azione corrosiva.

Avendo lo zinco un potenziale di equilibrio -0.44 V/SHE, mentre l'acciaio -0.76 V/SHE, lo zinco funzionerà spontaneamente da anodo sacrificale.

Un altro parametro fondamentale che caratterizza la durata del rivestimento, una volta fissato lo spessore, è la velocità con cui si corrode.

Lo zinco è un materiale poco nobile che tenderebbe a passare facilmente in soluzione, come dimostra l'elevata densità di corrente di scambio per questo processo $i_0 = 10^6$ mA/cm²; tuttavia, lo zinco ha pesime proprietà elettro-catalitiche nei confronti della reazione di sviluppo di idrogeno, infatti, la i_0 per la riduzione dell'idrogeno su zinco è 10^{-4} mA/m² e questo fa sì che la velocità di corrosione sia bassissima.

Le norme che riguardano la zincatura sono le seguenti:

- UNI EN ISO 1461:2009
- UNI EN ISO 14713-1:2010
- UNI EN 1090-1,2:2012

Nella prima vengono definiti gli spessori di rivestimento minimi, in funzione dei differenti spessori del manufatto di acciaio zincato, per diversi tipi di elementi strutturali. Sono inoltre indicati i metodi di prova per le verifiche di tali spessori, dal momento che il rivestimento ottenuto per zincatura a caldo non può essere uniforme.

La seconda norma viene presa come riferimento per prevedere la velocità di corrosione dello strato di zinco e quindi la durata dello stesso.

La UNI EN 1090 descrive i requisiti e le modalità per l'apposizione della Marcatura CE, secondo la Direttiva 89/106/CEE ed il Regolamento Europeo n. 305/2011.

Prima di effettuare l'immersione dell'acciaio nel bagno di zinco occorre trattare le superfici dei pezzi utilizzando le seguenti vasche: vasca di sgrassaggio per eliminare olii e lubrificanti derivanti da lavorazioni dell'acciaio; vasca di decapaggio per eliminare ossidi e ruggine presenti sulla superficie del pezzo; vasca di flussaggio per rivestire la superficie di una pellicola protettiva che impedisca l'ossidazione del pezzo fino all'immersione nello zinco fuso. terminate le suddette procedure, il manufatto è sottoposto a una fase di essiccamento e preriscaldamento, in cui la pellicola protettiva fornita dal flussaggio viene essiccata. In tal modo, oltre a eliminare l'umidità superficiale si riduce il salto termico, favorendo la reazione zinco-ferro e abbreviando i tempi di immersione nello zinco fuso.

Nel corso della zincatura si crea, sulla superficie dell'acciaio, uno strato di lega intermetallica ferro-zinco, sovrastata da uno strato di zinco. I tempi di immersione variano da 2 minuti fino ad un massimo

di 15 minuti; a seconda del tempo di permanenza nello zinco fuso si otterranno spessori diversi, crescenti col tempo di immersione.

4 PROCEDURA SPERIMENTALE

Per valutare la durabilità delle barre zincate a caldo si sono analizzati provini di barre rivestite di zinco e di barre prive di protezione.

Si sono testate barre di acciaio B450C aventi diametro di 20 mm suddivise in cinque classi, caratterizzate da uno spessore di zinco diverso. Le caratteristiche chimiche di questi provini, sono le seguenti:

Table 1. Chemical characteristics of the specimens / Composizione chimica dei provini

| Chemical Analysis | Composition |
|-------------------|-------------|
| | % |
| C | 0.22 |
| P | 0.01 |
| S | 0.036 |
| Cu | 0.34 |
| N | 0.011 |
| C _{eq} | 0.37 |

La variazione dello spessore di rivestimento di zincatura è stata valutata con l'ausilio di un microscopio elettronico a scansione, il quale ha consentito di individuare anche la morfologia del rivestimento; inoltre, effettuando un'analisi elementare si è verificato che la zona indagata fosse proprio quella di rivestimento di zinco. Per l'identificazione dei vari provini si utilizza la dicitura seguente: B450C_n° indicante la classe che ne identifica lo spessore di zincatura. Sintetizzando si riportano di seguito le immagini, con due diversi livelli di ingrandimento, del campione con il più piccolo spessore di rivestimento e di quello con lo spessore più grande. Il provino B450C_1 ha uno strato di zinco ottenuto immergendo le barre nel bagno di zinco fuso per 2.5 minuti. Si è misurato uno spessore di 50 µ, rilevando che la morfologia dello strato è caratterizzata da una serie di cilindri microscopici che, se pur vicini tra loro, rendono il rivestimento non perfettamente compatto e omogeneo (Figure 2).

Il provino B450C_5 ha uno strato di zinco ottenuto immergendolo nel bagno di zinco fuso per 11 minuti; si è misurato uno spessore di 470 µ con una morfologia di tipo lamellare compatta (Figure 4).

L'analisi ha messo in evidenza che aumentando il tempo di immersione dei provini nel bagno di zinco non si ottiene soltanto un aumento dello spessore ma anche una variazione della morfologia dello stesso, ottenendo strati più compatti e resistenti.

Al fine di indagare sul comportamento delle barre di acciaio in condizioni di corrosione, si è presa come riferimento una soluzione elettrolitica che simuli

l'ambiente aggressivo in cui sono stati immersi i provini per un periodo prefissato.

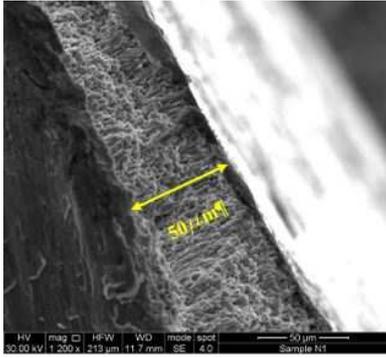


Figure 1. Electron microscopic analysis of the B450C_1 bar / Analisi al microscopio elettronico della barra B450C_1

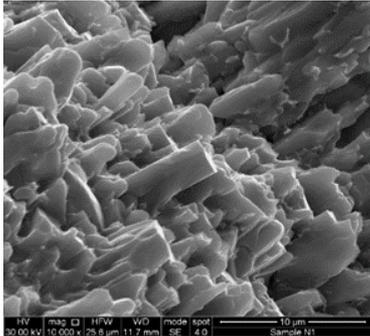


Figure 2. Electron microscopic analysis of the B450C_1/ Analisi al microscopio elettronico della barra B450C_1

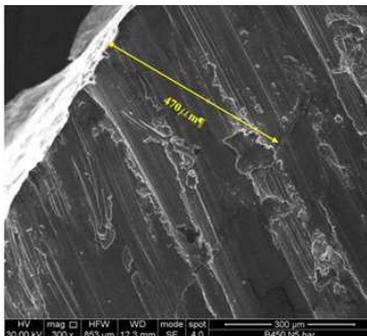


Figure 3. Electron microscopic analysis of the B450C_5 bar/ Analisi al microscopio elettronico della barra B450C_5

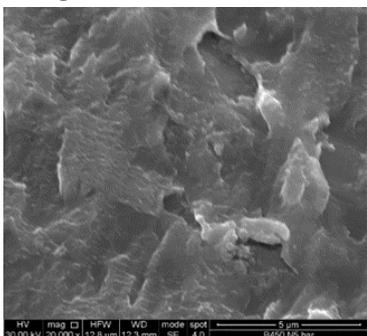


Figure 4. Electron microscopic analysis of the B450C_5 bar/ Analisi al microscopio elettronico della barra B450C_5

La soluzione elettrolitica simula un ambiente altamente aggressivo, associabile ad un ambiente marino per la presenza dei cloruri e industriale per la presenza dei solfati e carbonati. Facendo riferimento alle classi di esposizione, la soluzione simula la classe di esposizione XS2 e presenta un pH = 8.

Di seguito si riporta la composizione della soluzione elettrolitica:

Table 2. Composition of the corrosion electrolytes/ Composizione della soluzione elettrolitica

| Composition | Concentration |
|---------------------------------|----------------------|
| | mol L ⁻¹ |
| Na ₂ SO ₄ | 2 × 10 ⁻¹ |
| NaCl | 5 × 10 ⁻² |
| NaHCO ₃ | 5 × 10 ⁻³ |
| H ₂ O ₂ | 1 × 10 ⁻³ |

Per la caratterizzazione dei provini si è utilizzato il software Power Suite, abbinato ad un potenziostato, che prevede l'utilizzo della cella a tre elettrodi:

- Elettrodo di lavoro: working electrode;
- Controelettrodo: counter electrode;
- Elettrodo di riferimento: reference electrode.

Il working è l'elettrodo sul quale avviene la reazione, quindi in questo caso è il provino di acciaio zincato a caldo; il counter ha lo scopo di chiudere il circuito facendo fluire corrente attraverso la cella elettrochimica. Si possono utilizzare diversi tipi di contro elettrodo, in questo caso si è utilizzata una retina di platino; il reference ha il compito di creare nella cella, un riferimento fisso per il potenziale, quindi un'interfaccia idealmente non polarizzabile, che non modifica il suo potenziale anche se attraversata da un flusso di corrente, in questo caso si è utilizzato un reference di tipo Ag/AgCl.

La soluzione elettrolitica utilizzata nella cella è la stessa che è stata utilizzata per corrodere i provini. I parametri individuati per caratterizzare i provini sono: potenziale di corrosione (E_{corr}); resistenza di polarizzazione (R_p) e densità di corrente di corrosione (i_{corr}).

Il potenziale di corrosione consente di valutare in che stato si trova il campione grazie ai diagrammi di Pourbaix e nel caso specifico quello del ferro.

Questo diagramma mette in evidenza come a seconda delle caratteristiche di potenziale e di pH il materiale può trovarsi in condizioni di immunità termodinamica, passivazione o corrosione.

Di seguito (Table 3) si riportano i valori di potenziale di corrosione trovati per tutti i campioni a diversi tempi di immersione nella soluzione elettrolitica simulante l'ambiente aggressivo.

Dai dati si evince come il potenziale di corrosione si mantiene nell'intorno del valore -1V/Ag/AgCl ovvero -0.8V/SHE per i provini zincati e -0.5 V/Ag/AgCl ovvero -0.2V/SHE per il provino non protetto con lo zinco.

Dal diagramma di Pourbaix si evince che l'acciaio zincato è in condizioni di immunità termodinamica, mentre l'acciaio non protetto è in condizioni di corrosione e il Fe si scioglie come Fe²⁺.

La resistenza di polarizzazione è stata valutata nell'intorno del potenziale di corrosione, attuando un'approssimazione a bassi campi ed in particolare muovendoci nell'intorno del potenziale di corrosione

di +20mV e -20mV in quanto polarizzare i provini può variarne le caratteristiche.

Table 3. Corrosion potential as a function of exposure time/
Potenziale di corrosione al variare del tempo di esposizione

| Sample | Exposure times | Corrosion Potential |
|----------|----------------|---------------------|
| | hour | V/ Ag/AgCl |
| B450C_1 | 0 | -0.99 |
| | 144 | -1.01 |
| | 192 | -1.01 |
| | 240 | -1.00 |
| | 744 | -1.05 |
| | 1100 | -1.02 |
| B450C_2 | 0 | -1.02 |
| | 144 | -1.06 |
| | 192 | -1.06 |
| | 240 | -1.01 |
| | 744 | -1.03 |
| | 1100 | -1.03 |
| B450C_3 | 0 | -1.02 |
| | 144 | -1.02 |
| | 192 | -1.04 |
| | 240 | -1.04 |
| | 744 | -1.02 |
| | 1100 | -1.01 |
| B450C_4 | 0 | -1.02 |
| | 144 | -1.04 |
| | 192 | -1.05 |
| | 240 | -1.04 |
| | 744 | -1.03 |
| | 1100 | -1.03 |
| B450C_5 | 0 | -0.99 |
| | 144 | -1.02 |
| | 192 | -1.02 |
| | 240 | -1.02 |
| | 744 | -1.02 |
| | 1100 | -1.04 |
| B450C_NZ | 0 | -0.56 |
| | 144 | -0.56 |
| | 192 | -0.53 |
| | 240 | -0.54 |
| | 744 | -0.55 |
| | 1100 | -0.56 |

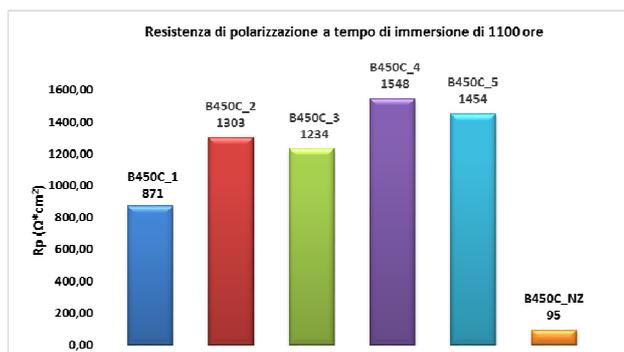


Figure 5. Polarization resistance to finally exposure times / Resistenza di polarizzazione dei campioni al tempo di immersione più lungo.

La figura 5 riporta le resistenze di polarizzazione dei provini immersi nell'elettrolita per 1100 ore. Da essa si evidenzia che la resistenza di polarizzazione varia tra 871 e 1548 Ωcm² per le barre zincate; mentre presenta un valore di 95 Ωcm² in assenza di zincatura.

Al termine del periodo di immersione dei provini nell'elettrolita, si possono determinare le curve di polarizzazione complete, effettuando una polarizzazione non più a bassi campi, ma con valori di correnti più alti, in questo modo si può determinare la densità di corrente di corrosione:

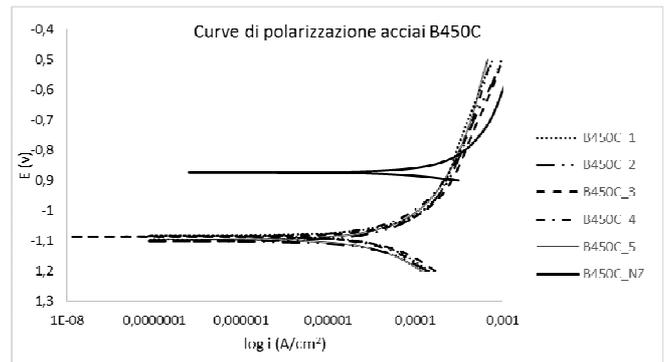


Figure 6. Potentiodynamic polarization curves after immersion times in the simulated corrosion / Curve di polarizzazione dopo l'immersione nell'elettrolita simulante l'ambiente corrosivo

Come si può vedere dal grafico anche variando lo spessore di zincatura non si hanno significative variazioni del potenziale di corrosione e della densità di corrente di corrosione. Il provino non zincato presenta una netta variazione del valore di potenziale di corrosione rispetto ai provini zincati ed un aumento della densità di corrente di corrosione.

La densità di corrente di corrosione è un dato importante perché fornisce informazioni sulla cinetica del processo corrosivo; inoltre conoscendo la velocità con cui evolve il processo corrosivo è possibile risalire alla perdita di spessore del rivestimento in un dato arco di tempo e quindi fare previsioni sulla durata di vita del manufatto.

Le curve di polarizzazione dedotte utilizzando il software Power Suite sono state normalizzate rispetto alla superficie laterale del cilindro che circonda il rivestimento. In realtà la superficie coinvolta nel processo di corrosione è più grande a causa della morfologia del rivestimento stesso che presenta numerose cavità.

Pertanto si sono confrontati i valori trovati con un dato più certo, ricavato operando su un campione di zinco puro del quale si conosce esattamente la superficie esposta, coincidente con quella misurata geometricamente, e quindi ricavare il fattore con il quale scalare i dati acquisiti.

Di seguito si riportano le curve di polarizzazione dell'acciaio B450C zincato e dello zinco puro. Per tale confronto si è scelto di prendere un provino con uno spessore di zinco intermedio ed in particolare

B450C_3 in quanto, come evidenziato nella figura 6, i valori della densità di corrente di corrosione non variano apprezzabilmente tra i provini zincati:

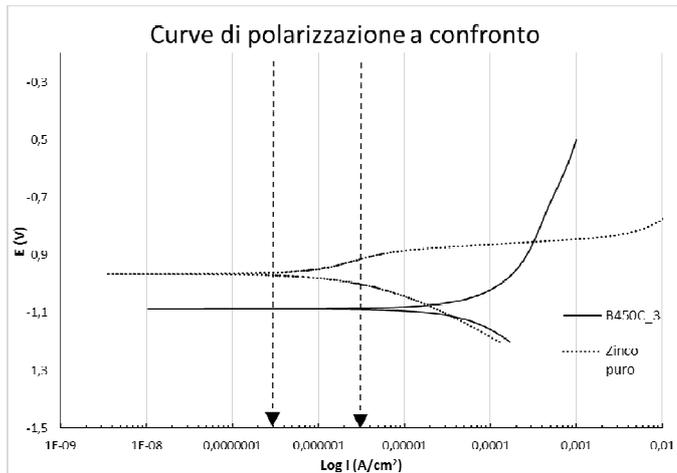


Figure 7. Potentiodynamic polarization curves of sample B450C_3 after immersion times in the simulated corrosion and Zinc / Curve di polarizzazione del campione B450C_3 dopo l'immersione nell'elettrolita simulante l'ambiente corrosivo e dello Zinco

La densità di corrente di corrosione, stimata graficamente, per l'acciaio B450C_3 è di $3 \mu A/cm^2$; mentre per lo Zinco è di $0.3 \mu A/cm^2$.

La densità di corrente di corrosione stimata per l'acciaio non zincato B450C_NZ è di $30 \mu A/cm^2$, di gran lunga maggiore rispetto a quello registrato per i provini zincati.

Dalla densità di corrente di corrosione si può calcolare la velocità di corrosione istantanea espressa in perdita di massa o di spessore per unità di tempo.

L'espressione che fornisce lo spessore consumato in un determinato arco temporale è:

$$\frac{s}{t} = \frac{i \times P_M}{z \times F \times \rho} \quad (8)$$

Dove i è la densità di corrente di corrosione misurata, P_M è il peso molecolare, z è il numero di elettroni coinvolti F è la costante di Faraday e ρ è la densità.

Sostituendo i valori sopra indicati per i provini zincati si ottiene una velocità di 0.045 mm/anno.

Tuttavia, per le considerazioni fatte a proposito della morfologia del rivestimento questo valore va scalato di un fattore 10 ottenendo una velocità di 0.0045 mm/anno.

Tale valore evidenzia che i provini zincati hanno un'ottima resistenza alla corrosione, proporzionale allo spessore del rivestimento di zinco, permettendo di ottenere una maggiore vita utile della struttura. Per quanto riguarda il provino non zincato, si è ottenuta una velocità di corrosione di 0.45 mm/anno quindi una velocità di 100 volte superiore rispetto all'acciaio protetto con lo zinco.

5 ADERENZA ACCIAIO - CALCESTRUZZO

L'aderenza tra le barre di armatura e il calcestruzzo è una caratteristica di fondamentale importanza per i manufatti in calcestruzzo armato. Nelle barre lisce l'aderenza è garantita da un'interazione chimico-fisica tra l'acciaio e il calcestruzzo, mentre nelle barre ad aderenza migliorata è dovuta ad un'interazione di tipo meccanico dovuta alla conformazione geometrica della barra che consente l'ingranamento tra le nervature della stessa e il calcestruzzo. La geometria della nervatura è caratterizzata dall'indice di aderenza espresso dal rapporto tra la superficie delle nervature che si oppongono allo scorrimento della barra e la superficie laterale della barra di lunghezza pari al passo delle nervature. Il comportamento in termini di aderenza viene determinato attraverso prove sperimentali su provini di calcestruzzo in cui è annegata la barra di acciaio, come per le prove beam-test o di pull-out. L'aderenza della barra dipende da numerosi fattori, quali la dimensione dell'elemento, la posizione e l'inclinazione delle barre nel getto. Durante il processo di zincatura, può capitare che lo zinco depositandosi sul substrato di acciaio produca una variazione dell'altezza delle nervature, riducendo di conseguenza l'indice di aderenza.

Per lo studio dell'influenza del rivestimento di zinco sull'aderenza acciaio-calcestruzzo si sono condotte prove di pull-out su barre zincate di diametro $\Phi 8$ e $\Phi 12$ mm immerse in provini di calcestruzzo. Le stesse prove sono state condotte su barre di ugual diametro, non protette dallo zinco. Le barre sono caratterizzate da un indice di aderenza pari a 0.15 (condizione che soddisfa la norma UNI EN ISO 15630-1), mentre il calcestruzzo utilizzato ha una resistenza cubica media R_c misurata a 15 giorni di 36.67 N/mm². I provini di calcestruzzo nei quali sono state annegate le barre hanno un diametro di 140 mm e un'altezza di 180 mm. La lunghezza del tratto aderente è pari a 5 volte il diametro come evidenziato nella figura 8 nella quale è descritto il sistema di misura dello scorrimento.

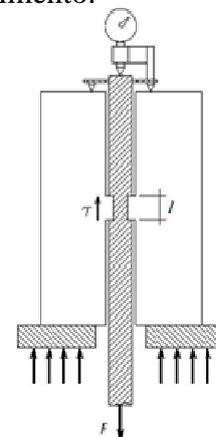


Figure 8. Pull-out test proposed by Rehm (1961) / Pull-out test proposto da Rehm (1961)

Table 4. Pull-out test results of the unprotected steel bars $\Phi 8$ /
Prova di pull-out di barre in acciaio non protetto $\Phi 8$

| τ | s |
|-------------------|-------|
| N/mm ² | mm |
| 0 | 0 |
| 20.01 | 6.84 |
| 12.22 | 10.27 |
| 12.67 | 11.99 |
| 12.08 | 13.69 |
| 12.55 | 15.60 |
| 11.26 | 18.05 |
| 12.37 | 20.90 |
| 10.25 | 24.67 |
| 2.77 | 38.16 |

Table 5. Pull-out test results of galvanized steel bars $\Phi 8$ /
Prova di pull-out di barre in acciaio zincato $\Phi 8$

| τ | s |
|-------------------|-------|
| N/mm ² | mm |
| 0 | 0 |
| 18.34 | 4.50 |
| 18.46 | 4.75 |
| 11.96 | 6.97 |
| 4.16 | 13.84 |
| 4.91 | 15.75 |
| 5.11 | 17.80 |
| 4.20 | 23.64 |
| 3.92 | 24.27 |
| 5.29 | 26.60 |
| 4.22 | 34.83 |
| 4.81 | 36.81 |

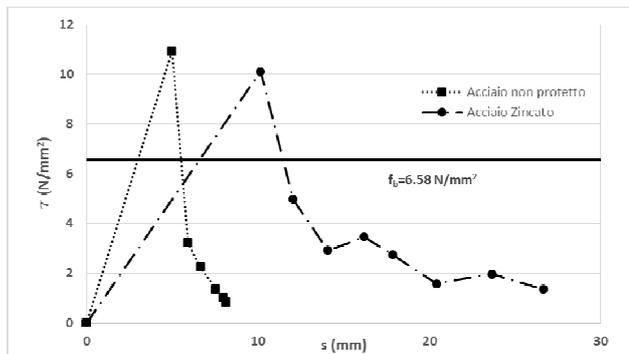


Figure 9. Bond stress - displacement for the $\Phi 8$ bars / Tensione di aderenza – scorrimento per barre $\Phi 8$

Table 6. Pull-out test results of the unprotected steel $\Phi 12$ / Risultati della prova di pull-out dell'acciaio non protetto $\Phi 12$

| τ | s |
|-------------------|------|
| N/mm ² | mm |
| 0 | 0 |
| 10.93 | 5.00 |
| 3.22 | 5.92 |
| 2.26 | 6.65 |
| 1.37 | 7.56 |
| 1.02 | 8 |
| 0.85 | 8.13 |

Table 7. Pull-out test results galvanized steel/ Risultati della prova di pull-out acciaio zincato

| τ | s |
|-------------------|-------|
| N/mm ² | mm |
| 0 | 0 |
| 10.12 | 10.15 |
| 4.98 | 12.05 |
| 2.26 | 6.65 |
| 2.92 | 14.08 |
| 3.47 | 16.21 |
| 2.74 | 17.90 |
| 1.58 | 20.42 |
| 1.97 | 23.65 |
| 1.36 | 26.67 |

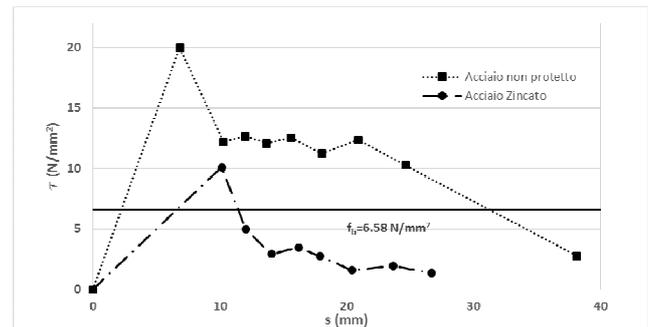


Figure 10. Bond stress - displacement for the $\Phi 12$ bars / Tensione di aderenza – scorrimento per barre $\Phi 12$

Nelle tabelle 4 e 5 e nelle figure 9 e 10 si riportano i dati forniti dalle prove, indicando nelle ordinate le tensioni tangenziali τ all'interfaccia acciaio calcestruzzo e nelle ascisse gli scorrimenti registrati s . Inoltre, è riportato il valore della tensione di aderenza f_b valutato, secondo le indicazioni del D.M. 14/01/2008, in funzione della resistenza cilindrica a compressione f_c :

$$f_b = 2.25 \times 0.3 \times f_c^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

Nei casi in esame, ponendo la resistenza cilindrica $f_c = 0.83 R_c = 30.44 \text{ N/mm}^2$ si ha $f_b = 6.58 \text{ N/mm}^2$. Come si evince dai dati sperimentali, la zincatura riduce la qualità del meccanismo di trasferimento delle tensioni tangenziali al calcestruzzo. Questo comportamento è più evidente per le barre $\Phi 8$ mm ed è causato dal parziale livellamento dei risalti da parte dello zinco. Quanto sopra evidenzia che bisogna mantenere uno spessore del rivestimento tale da modificare solo leggermente l'altezza delle nervature, in modo che gli effetti negativi in termini di aderenza diventino trascurabili.

6 CONCLUSIONI

The morphological analysis results and the estimate of the polarization resistances allow to conclude that galvanization (even the thinnest coating among those investigated) is effective at protecting steel from ag-

gressive environment. It brings the corrosion potential to a value providing thermodynamic immunity, as expected from an effective cathodic protection. There was no evidence of pitting phenomena despite the high concentration of Cl⁻, as shown by the morphological analysis of the specimens surfaces, as well as by polarization curves. Furthermore, keeping a zinc coating thickness that does not modify the ribs height, assures no change in steel-concrete bond.

L'analisi dei risultati morfologici e la stima delle resistenze di polarizzazione hanno consentito di concludere che la zincatura (anche la più sottile tra quelle investigate) è efficace nel proteggere l'acciaio dall'ambiente aggressivo. Essa porta il potenziale di corrosione ad un valore che garantisce l'immunità termodinamica, come previsto nel caso di un'efficace protezione catodica. Non sono stati evidenziati fenomeni di pitting nonostante l'alta concentrazione di Cl⁻, come testimoniato dall'analisi morfologica delle superfici dei campioni, nonché dalle curve di polarizzazione. Inoltre, se si mantiene uno spessore di zincatura tale da non modificare l'altezza delle nervature l'aderenza acciaio-calcestruzzo non viene modificata.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la TecnoZinco di Carini (PA) per la fornitura dei campioni utilizzati nella campagna sperimentale ed in particolare l'ing. A. Di Cristofalo, e la SIDERCEM S.r.l. "Istituto di ricerca e sperimentazione sui materiali da costruzione" di Caltanissetta per aver permesso lo svolgimento delle prove di aderenza.

REFERENCES

- Bamonte, P., Coronelli, D. & Gambarova P.G. 2002. Normal – Strength and High – Performance concrete: Size effect in smooth anchorages. *Studies and researches – V.23,2002 Graduate school in Concrete structures – Fratelli Pesenti Politecnico di Milano, Italy*
- Bertagnoli, G., Mancini, G. & Tondolo, F. 2006. Bond deterioration due to corrosion and actual bearing capacity. *Proceedings of the 2nd fib congress June 5-8, 2006 – Naples, Italy.*
- Colajanni, P. Recupero, A. Ricciardi G. & Spinella N. 2016. Failure by corrosion in PC bridges: a case history of a viaduct in Italy. *International Journal of Structural Integrity Vol.7 pp.181-193.*
- Franchi, A., Fratesi, R., Moriconi, G. & Plizzari, G. 1999. Caratteristiche meccaniche e di aderenza al calcestruzzo di barre di armatura in acciaio zincato. *Atti del convegno Giornate AICAP 99, Torino, 4-6 Novembre 1999, Vol.1 pp.53-62.*
- Franchi, A., Fratesi, R. & Plizzari, G. A. Corrosione e prevenzione delle strutture in c.a.. *L'Edilizia n°130.*
- Franchi, A., Crespi, P., Fratesi, R. Plizzari, G. A., Riva, P. & Ronca, P. 2001. Nuovi sviluppi della ricerca sugli acciai da

c.a.: duttilità, fatica oligociclica, acciaio zincato e prove su colonne in c.a. per zone ad alto rischio sismico. *Convegno ATE: "Nuove sfide per l'industria edilizia" Politecnico di Milano 22 Febbraio 2001.*

- Franchi, A., Fratesi, R. & Plizzari, G. A. 2001. Seismic behavior of R.C. Columns with zinc coated rebars. *Proc. Of Con-SeCO1, Banthia N. Ed., Vancouver, BC, Canada.*
- Fratesi, R., Moriconi, G. & Coppola, L. 1996. The influence of steel galvanizations on rebars behaviour in concrete. *Corrosion of reinforcement in concrete construction. Edited by C.L. Page, P.B.. Bamforth and J.W. Figg, Pub. By Royal Society of Chemistry 630-641*
- Kelly, R. G., Scully J. R., Shoosmith, D. W. & Buchheit, R. G. 2002. *Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering.* Marcel Dekker.
- Ligier V., Hihn J.Y., WeaRy M. & Tachez M. 2001. The effects of 20 kHz and 500 kHz ultrasound on the corrosion of zinc pre-coated steels in [Cl⁻] [SO₄²⁻] [HCO₃⁻] [H₂O₂] electrolytes, *Journal of Applied Electrochemistry 31. pp. 213-222.*
- Li H.Y., & Duan Wei J.Y. D.D. 2013. Comparison on corrosion behaviour of arc sprayed and zinc-rich coating. *Surface e Coatings Technology 235, pp. 259-266.*
- MacEachern L., Dunlap R.A. & Obrovac M.N. 2015. Li-ion battery negative electrodes based on the Fe_xZn_{1-x} alloy system. *Journal of Non-Crystalline Solids 409, pp.183-190.*
- Mazza, B., Pedferri, P. & Sinigaglia, D. 1974. *Corrosione e protezione dei materiali metallici" Vol.I.* Milano: Clup.
- Pedferri, P. & Bertolini, L. 2000. *La durabilità del calcestruzzo armato.* Milano: McGraw-Hill Companies.
- Stark D. 1980. Corrosion of reinforcing steel in concrete. *Ed.D.E.Tonini and J.M. Gaidis; ASTM STP 71, American Society for Testing Materials, Philadelphia, 132*
- D.M. 14/01/2008 Norme tecniche per le costruzioni EUROCODE 2 *Design of concrete structures*
- FIB Task Group Bond Models 2000 *Bond of reinforcement in concrete*
- UNI EN ISO 1461:2009 *Rivestimenti di zincatura per immersione a caldo su prodotti finiti ferrosi e articoli di acciaio, specificazioni e metodi di prova.*
- UNI EN ISO 14713-1:2010 *Rivestimenti di zinco -Linee guida e raccomandazioni per la protezione contro la corrosione di strutture di acciaio e di materiali ferrosi -Parte 1: Principi generali di progettazione e di resistenza alla corrosione; -Parte 2: Rivestimenti di zincatura per immersione a caldo.*