

RESISTENZA A FATICA E ALLA CORROSIONE DI BARRE D'ARMATURA ZINCATE IN CONDIZIONI SIMULANTI LA REALTÀ

Tiziano Bellezze¹, Chiara Franzoni², Romeo Fratesi¹, Giovanni A. Plizzari²

¹ Dipart. di Fisica e Ingegneria dei Materiali e del Territorio, Università di Ancona, Via Brezze Bianche, 60131 Ancona

² Facoltà di Ingegneria, Università di Bergamo, viale Marconi 5/A, 24044 Dalmine (BG)

SOMMARIO

Nel presente lavoro è stato affrontato il problema della durabilità delle strutture in calcestruzzo armato relativamente all'armatura, prendendo in esame la zincatura come metodo di miglioramento della resistenza alla corrosione delle barre. Pertanto, sono state eseguite indagini sperimentali per studiare alcuni problemi ancora aperti relativamente all'uso di barre zincate nelle costruzioni in calcestruzzo armato. In particolare, si è studiata la resistenza a fatica delle barre zincate e l'effetto sacrificale benefico dato dallo zinco del rivestimento, quando esso presenta delle discontinuità.

I risultati sperimentali hanno fornito utili indicazioni sulla resistenza a fatica delle barre zincate, confermando ulteriormente che il processo termico di zincatura non altera le proprietà meccaniche delle barre. I risultati sperimentali hanno anche fornito utili indicazioni sulle dimensioni critiche delle discontinuità nel rivestimento di zinco, soprattutto in ambienti contaminati da cloruri.

SUMMARY

The use of galvanized reinforcing bars has recently received great consideration for increasing the durability of structures. Although successful practical results have been obtained with the use of galvanized reinforcement against corrosion, some questions concerning the protection of bars still remain unanswered. In this paper, fatigue behavior of galvanized rebars is investigated by means of high cycle and low cycle fatigue tests. Furthermore, the corrosion resistance of rebars with discontinuities in the zinc coating, produced during bending procedures or in the welded areas, is experimentally investigated.

Experimental results show that the zinc coating does not modify the fatigue strength of reinforcing bars and that there is a beneficial effect of the zinc coating when discontinuities are present in the rebar.

1. INTRODUZIONE

Una corretta tecnologia del calcestruzzo può incrementare la vita di servizio di una struttura in calcestruzzo armato, ma non può sempre assicurare una completa protezione rispetto alla corrosione delle armature, specialmente in ambienti aggressivi ed in presenza di fessurazione nel copriferro.

Tra le soluzioni proposte per aumentare la resistenza alla corrosione delle armature nel calcestruzzo, è sempre più preso in considerazione l'impiego di barre di acciaio zincate, in quanto queste ultime non risentono del fenomeno della carbonatazione del calcestruzzo e sopportano tenori più elevati di cloruri rispetto all'acciaio non zincato [1,2]. E' inevitabile che l'utilizzo dell'acciaio zincato nelle strutture in calcestruzzo armato comporti dei costi iniziali più elevati; tali costi sono comunque trascurabili se rapportati al costo totale dell'opera e diventano irrilevanti se si tengono in consi-

derazione i costi di ripristino e di mantenimento delle strutture stesse da affrontare nel corso della loro vita di servizio.

Sebbene le armature zincate siano state già utilizzate con successo per realizzare opere in calcestruzzo, anche di un certo prestigio [3-5], alcuni dubbi sollevati dai progettisti o dai potenziali utilizzatori rimangono da approfondire. Tra questi, alcuni riguardano aspetti meccanici, altri riguardano aspetti relativi alla resistenza alla corrosione in particolari condizioni ambientali.

Relativamente al comportamento meccanico, la resistenza a trazione delle barre rivestite di zinco non varia rispetto alle corrispondenti barre black [6]. La sperimentazione sulle barre zincate ha anche riguardato l'aderenza ed i risultati sperimentali hanno evidenziato che non vi sono differenze rispetto alle barre non zincate se lo spessore del rivestimento di zinco è tenuto sotto controllo, durante il processo di zincatura, per non

modificare la geometria delle nervature e, conseguentemente, l'indice di aderenza delle barre.

Il comportamento meccanico delle barre zincate deve essere ulteriormente approfondito relativamente alla loro resistenza a fatica.

Le rotture per fatica nelle barre di armatura interessano inizialmente pochi grani, nei quali la resistenza locale è inferiore alla sollecitazione o viene ad esserlo durante le fasi di carico che danno origine alle sollecitazioni più elevate. La pericolosità di questo tipo di rotture risiede nel fatto che esse possono prodursi in modo del tutto indipendente dalle caratteristiche globali di resistenza del manufatto, purché trovino innesco in grani particolarmente predisposti. Una volta formatasi la lesione, essa si estende progressivamente a causa della concentrazione di tensioni ai suoi estremi, fino al momento in cui la sezione è ridotta al punto che la sezione in questione si rompe bruscamente per effetto del carico.

Anche se è stato sperimentalmente provato che le caratteristiche meccaniche di resistenza a trazione delle barre in acciaio ricoperte di zinco non sono modificate a seguito del riscaldamento a 460 °C nel bagno di zinco fuso, lo stesso comportamento deve essere verificato per barre zincate sottoposte a sollecitazioni cicliche.

Nel presente lavoro, il comportamento a fatica delle barre zincate è studiato sperimentalmente su barre d'armatura con diverso diametro, sia mediante prove di fatica ad alto numero di cicli, per simulare gli effetti del carico variabile nelle condizioni di esercizio, sia mediante prove di fatica a basso numero di cicli per verificare il comportamento allo stato limite ultimo. I risultati ottenuti dalle barre zincate sono stati confrontati con i risultati ottenuti dalle barre black.

Relativamente allo studio dei problemi di corrosione, Swamy [7] ha sottolineato che i risultati ottenuti dalle prove di laboratorio devono essere esaminati con le dovute cautele, perché non sempre si riescono a simulare le condizioni reali di utilizzo delle strutture.

Nella realtà si potrebbero verificare delle discontinuità nel rivestimento di zinco in seguito a scagliatura del rivestimento stesso durante la piega, a elettrosaldatura o al taglio o durante la messa in opera delle barre. Nel presente lavoro, tale effetto è stato studiato in laboratorio su provini di calcestruzzo armati con barre di acciaio zincate, opportunamente assemblate con spezzoni di acciaio nero per simulare discontinuità del rivestimento di zinco.

Le prove sull'acciaio rivestito di zinco sono state effettuate su barre prodotte con un processo di zincatura industriale in semicontinuo per controllare ed evitare eccessive irregolarità nello spessore del rivestimento al fine di non modificare le caratteristiche geometriche delle barre.

2. PROVE DI FATICA

Lo studio della fatica ad alto numero di cicli delle barre di armatura è stato effettuato con riferimento alla normativa sperimentale (Prenorma Europea) ENV 10080 (1998). Questa normativa prevede che il prodotto, sottoposto a prove di fatica con carico assiale, debba sopportare almeno 2×10^6 cicli di carico con sollecitazione massima sul provino non superiore al 60% del valore nominale del carico di snervamento f_{sy} ed una variazione di sollecitazione pari a 180 MPa.

Sono inoltre state effettuate prove di fatica a basso numero di cicli al fine di studiare il comportamento delle barre oltre il limite elastico. La sperimentazione ha riguardato barre di acciaio nero e di acciaio zincato, provenienti dalla stessa colata per confrontare al meglio i risultati ottenuti.

Le prove a basso numero di cicli sono state svolte prevedendo l'inversione del carico ed imponendo una deformazione massima costante o crescente durante la prova.

2.1 Prove di fatica ad alto numero di cicli

Sono state eseguite prove di fatica su provini zincati ad aderenza migliorata con diametro rispettivamente pari a 10, 12, 16, 20 e 24 mm. L'acciaio utilizzato è di tipo B500, con tensione caratteristica nominale di snervamento pari a 500 MPa.

Poiché la lega zinco-ferro e lo zinco puro superficiale non hanno le medesime caratteristiche meccaniche dell'acciaio, lo spessore del rivestimento potrebbe influenzare il comportamento a fatica delle barre. Infatti, il tondo di piccolo diametro possiede una quantità di zinco in superficie maggiore, in quanto è trattenuto dalla coesione dovuta alle nervature che sono molto ravvicinate [8]. Sulla barra di medio diametro, invece, questo fenomeno è meno accentuato.

I provini sono stati preparati seguendo le prescrizioni della normativa ENV 10080. Per le armature nervate, di tipo B500, la ENV 10080 prescrive di applicare 2×10^6 cicli con tensione massima di 300 MPa (pari a $0.6 f_{sy}$) e con un'ampiezza delle sollecitazioni ($2\sigma_A$) pari a 180 MPa (Fig. 1).

In Tabella 1 sono riportati i valori dei carichi applicati durante le prove di fatica sulle barre di diverso diametro.

Le prove sono state eseguite in controllo di carico sulla macchina Instron 1274, con elettronica 8500+, del laboratorio P. Pisa dell'Università di Brescia. Le prove sono terminate dopo l'applicazione di 2×10^6 cicli.

Tutte le barre testate hanno superato la prova non rompendosi e mantenendo intatto il rivestimento di zinco.

	Carico di snervamento [kN]	Ampiezza di carico [kN]	Carico massimo [kN]	Carico medio [kN]
Φ10	39.0	14.04	23.4	16.4
Φ12	56.5	20.35	33.9	23.7
Φ16	100.5	36.20	60.3	42.2
Φ20	163.4	58.84	98.1	68.6
Φ24	226.5	81.54	135.9	95.1

Tab. 1 – Carichi utilizzati durante le prove di fatica ad alto numero di cicli.

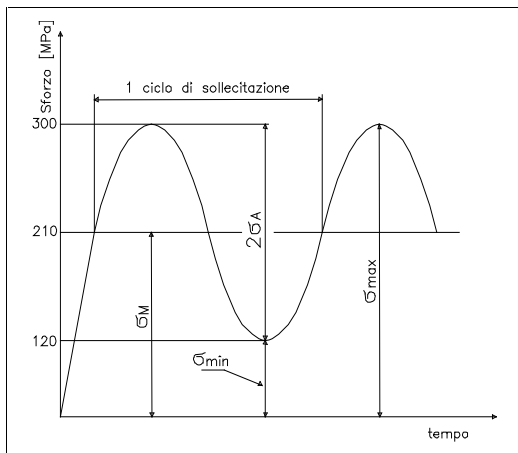


Fig. 1 – Storia di carico delle barre sottoposte alle prove di fatica ad alto numero di cicli.

2.2 Prove a basso numero di cicli

Le prove di fatica a basso numero di cicli sono state condotte imponendo, attraverso la Instron, un prefissato valore di spostamento alle estremità delle barre che sono state ammorsate direttamente nei morsetti della Instron, lasciando libero un tratto di barra con lunghezza pari a 10 volte il diametro (Fig. 2).

Nella prima serie di prove si è imposta una deformazione massima costante mentre nella seconda serie di prove la deformazione massima è stata variata durante la prova.

Il carico applicato al provino è stato misurato dalla cella da 250 kN della Instron mentre gli spostamenti delle barre sono stati misurati dall'LVDT collegato al pistone della macchina di prova.

Per tutte le prove di fatica a basso numero di cicli, sia a deformazione variabile sia a deformazione costante, l'acquisizione dati è stata fatta con una frequenza pari a 0.1 Hz. Durante l'elaborazione dei risultati delle prove, si sono selezionati, per ogni ciclo, i picchi di carico a trazione e a compressione, al fine di determinare l'ampiezza di ogni ciclo di carico che si riduce

all'aumentare dei cicli a causa del danneggiamento per fatica che subisce la barra.

Le prove sono state condotte fino alla rottura per fatica dei provini, avvenuta dopo pochi cicli di carico.

Le caratteristiche meccaniche dell'acciaio utilizzato per le prove di fatica a basso numero di cicli sono riportate in Tabella 2.

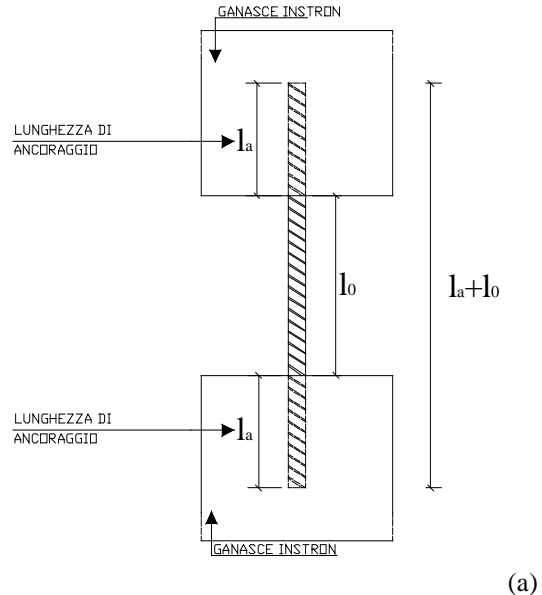


Fig. 2 – Schema di ancoraggio della barra nei morsetti della Instron (a); fotografia della barra all'inizio della prova (b).

Diametro [mm]	f_y [MPa]	f_t [MPa]	A_5 [%]
10	518.7	621.3	28.0
16	513.2	608.1	22.5
24	560.9	655.7	22.5

Tab. 2 – Caratteristiche meccaniche dell'acciaio utilizzato per le prove di fatica a basso e ad alto numero di cicli.

2.2.1 Prove cicliche a deformazione costante

Le prove cicliche a deformazione costante sono state condotte facendo variare la deformazione del provino fino a raggiungere uno spostamento massimo pari all'1% della lunghezza libera (l_0) della barra (Fig. 2a). Con tale spostamento, nella fase di compressione si è verificato lo sbandamento laterale della barra.

La scelta di una deformazione simmetrica per la trazione e per la compressione fa sì che la barra venga messa a sollecitazioni particolarmente gravose; infatti nella realtà, la deformazione per trazione è solitamente superiore alla deformazione per compressione.

Nella Figura 3 viene mostrato uno schema del diagramma carico-spostamento con evidenziato il limite massimo di spostamento e la riduzione dell'ampiezza dei cicli di carico. La Figura 4 mostra un tipico risultato sperimentale, relativamente al diagramma carico-spostamento rilevato durante la prova su una barra con diametro di 16 mm. La Figura 5 evidenzia la barra deformata alla fine della fase di compressione.

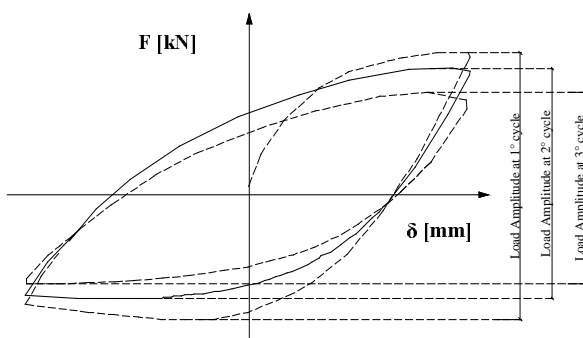


Fig. 3 – Schema di carico delle prove di fatica a basso numero di cicli con deformazione massima costante.

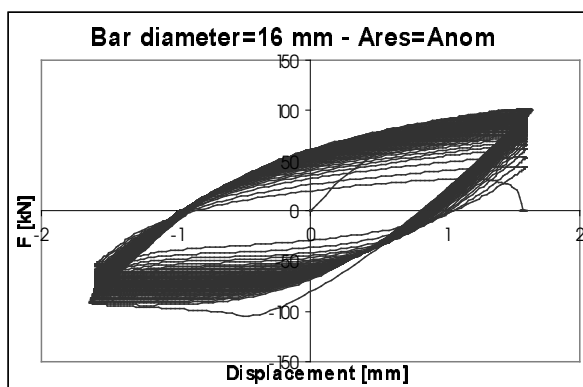


Fig. 4 – Diagramma del carico in funzione dello spostamento ottenuto sperimentalmente da una barra $\phi 16$ con deformazione massima costante.



Fig. 5 – Deformazione della barra al termine della fase di compressione.

La Figura 6 mostra i risultati sperimentali relativi alla variazione dell'ampiezza di carico all'aumentare dei cicli, indice del danneggiamento per fatica, ottenuti dalle prove eseguite su barre con diverso diametro.

Si può osservare che non vi sono differenze sostanziali tra il danneggiamento per fatica delle barre zincate e delle barre black. Il numero massimo di cicli applicati alle barre zincate è risultato simile o leggermente superiore a quello rilevato sulle barre black.

Per approfondire ulteriormente le conseguenze delle prove di fatica, la frattura nella barra è stata analizzata con il SEM; il confronto non ha evidenziato differenze tra le superfici di frattura delle barre con e senza rivestimento di zinco.

2.2.2 Prove cicliche a deformazione variabile

Per completare il confronto tra il comportamento a fatica delle barre rivestite di zinco e non, nelle quali i cicli successivi incrementano le deformazioni plastiche della barra, sono state effettuate prove cicliche con cicli successivi caratterizzati da una deformazione crescente (Fig. 7).

Le prove sono state condotte imponendo una velocità di carico di 0.1 Hz. Le misure sperimentali sono state acquisite con una frequenza di 25 punti al secondo in quanto le deformazioni imposte risultavano notevoli.

Le deformazioni massime imposte durante la prova aumentano con il progredire dei cicli di carico, seguendo la seguente legge:

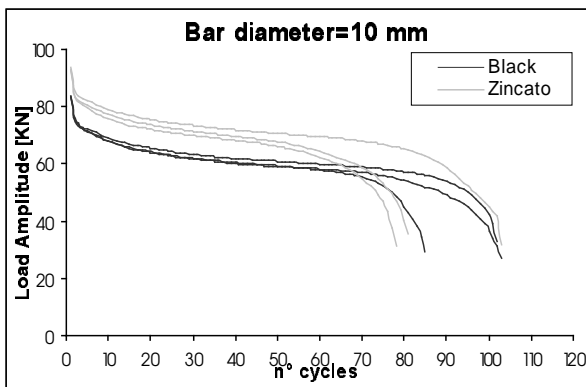
$$\delta = \pm (1 + n)\% \cdot l_0$$

dove:

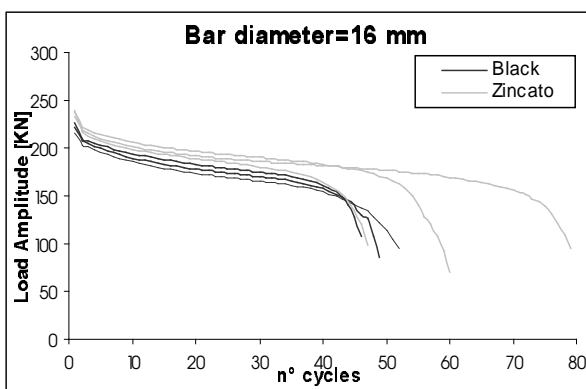
δ rappresenta lo spostamento relativo massimo imposto alle estremità della barra, sia in trazione sia in compressione;

l_0 è la luce libera della barra (Fig. 2a);

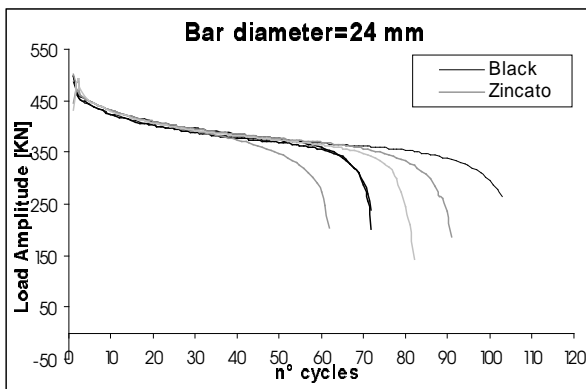
n è il numero progressivo del ciclo.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 – Diagramma dell'ampiezza di carico in funzione del numero di cicli rilevato sperimentalmente sulle barre black e zincate con diametro 10 mm (a), 16 mm (b) e 24 mm (c), sottoposte a prove di fatica con deformazione massima costante.

La Figura 8 mostra un tipico risultato sperimentale, relativamente al diagramma carico-spostamento rilevato durante la prova su una barra con diametro di 16 mm.

La Figura 9 mostra l'ampiezza di carico decrescente misurata durante le prove di fatica sulle barre di diverso diametro. Si può notare che l'ampiezza di carico

registrata sulla barra zincata con diametro di 10 mm, sulla quale lo spessore di zinco diventa percentualmente più rilevante, è risultata maggiore della corrispondente barra black. Nelle barre con diametro di 16 e 24 mm non si evidenziano invece differenze significative tra le barre zincate e le barre black. Anche il numero massimo di cicli applicato alle barre zincate è risultato molto simile a quello delle barre black.

Tale risultato è stato confermato dalle indagini metallografiche effettuate a fine prova che non hanno evidenziato sostanziali differenze fra le fratture, sintomo che l'immersione nel bagno di zinco fuso non modifica la resistenza della barra zincata.

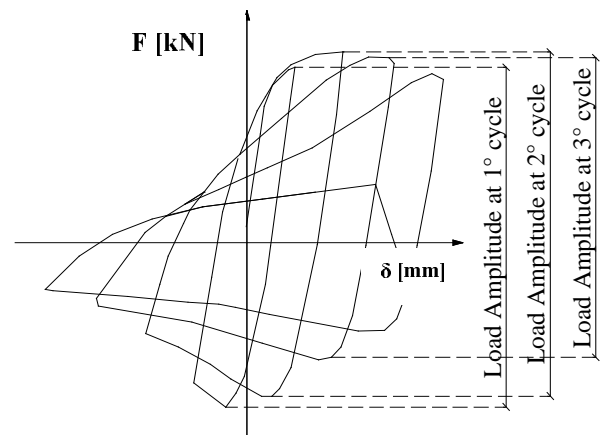


Fig. 7 – Schema di carico delle prove di fatica a basso numero di cicli con deformazione massima variabile.

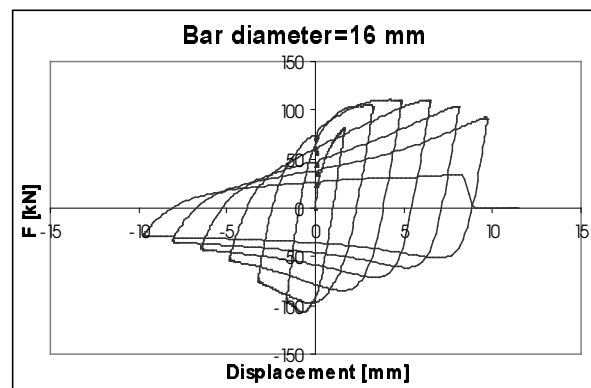
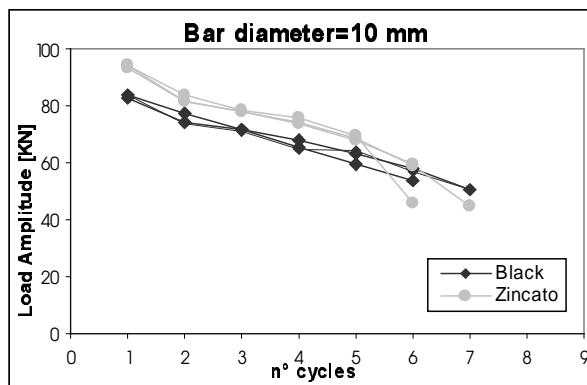


Fig. 8 – Diagramma del carico in funzione dello spostamento ottenuto sperimentalmente da una barra $\phi 16$ con deformazione massima variabile.

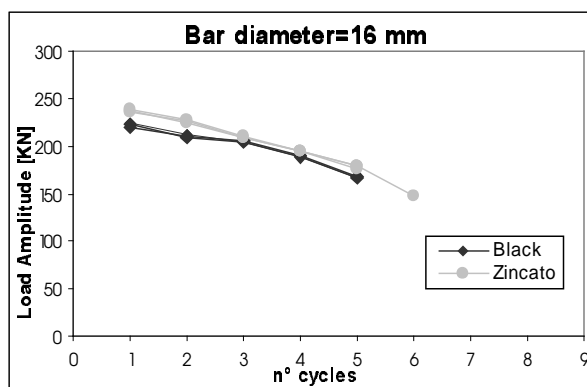
3 RESISTENZA A CORROSIONE IN CORRISPONDENZA DELLE DISCONTINUITA' PRESENTI NEL RIVESTIMENTO DI ZINCO

In presenza di discontinuità sulle barre zincate d'armatura (prodotte da piegatura, saldatura, ecc.), lo

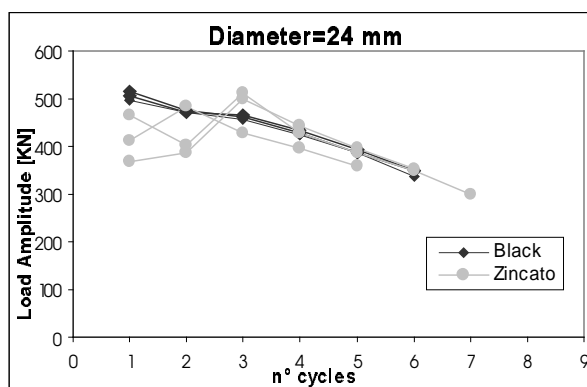
zinc del rivestimento può determinare una protezione catodica nei confronti dell'acciaio nero direttamente esposto all'azione degli agenti corrosivi (effetto sacrificale).



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 – Diagramma dell'ampiezza di carico in funzione del numero di cicli rilevato sperimentalmente sulle barre black e zincate con diametro 10 mm (a), 16 mm (b) e 24 mm (c), sottoposte a prove di fatica con deformazione massima crescente durante la prova.

Allo scopo di studiare l'effetto sacrificale benefico prodotto dal rivestimento di zinco, in presenza di discontinuità, sono stati confezionati vari provini rinforzati con barre ottenute dall'assemblaggio di due barre laterali di acciaio zincato e da uno spezzone di barra centrale di acciaio nero. Variando le dimensioni di quest'ultima, è stato possibile simulare delle discontinuità di dimensione diversa, in modo da valutare fino a che punto la protezione catodica offerta dallo zinco risulti efficace.

3.1 Descrizione dei provini

Sono stati confezionati 16 provini prismatici (140x120x440 mm), utilizzando il cemento tipo CEM II/A-L 42.5 R ed un rapporto acqua/cemento pari 0,70. I provini sono stati rinforzati con una barra (diametro = 12 mm; copriferro = 15 mm) ottenuta assemblando tre barre mantenute elettricamente isolate: due barre laterali di acciaio zincato della stessa lunghezza (comparto anodico) ed una barra centrale di acciaio nero (comparto catodico). Sono state preparate 4 barre differenti, con un diverso rapporto tra superficie del comparto anodico (Sa) e superficie del comparto catodico (Sc), come riportato in Tab. 3.

Sa/Sc	Barre zincate laterali (cm)	Barra nera centrale (cm)
80	16 + 16	0,4
40	18 + 18	0,9
20	15 + 15	1,5
7,5	15 + 15	4,0

Tab. 3 - Barre assemblate con 4 diversi rapporti Sa/Sc.

La Fig. 10 mostra le due barre assemblate con rapporto Sa/Sc = 20 e Sa/Sc = 7,5 nel cassero, pronte per il getto. L'assemblaggio è stato realizzato con degli inserti in PVC e con resina epossidica. In Fig. 10 sono inoltre visibili i cavi elettrici che hanno permesso di effettuare, esternamente ai provini, le misure di corrente di corto circuito. Le superfici dei due comparti sono state ben definite ricoprendo in modo opportuno le barre con la resina epossidica.

Altri due provini sono stati confezionati a parte, senza alcuna barra di rinforzo.



Fig. 10 – Due barre assemblate con rapporto Sa/Sc = 20 (sopra) e Sa/Sc = 7,5 (sotto)

3.2 Stagionatura e condizioni di esposizione ad ambienti corrosivi

Tutti i provini sono stati scasserati dopo 3 giorni dal getto e sono stati maturati all'aria per 28 giorni. Successivamente, 8 provini sono stati sottoposti a cicli di bagnasciuga con acqua ed i rimanenti 8 provini sono stati invece sottoposti a cicli di bagnasciuga con soluzione di NaCl al 5%. I cicli di bagnasciuga sono caratterizzati da 5 giorni di asciugatura e da 2 giorni di bagnatura. La bagnatura in particolare è stata effettuata versando la soluzione in una "vaschetta" in PVC, di forma rettangolare senza fondo, sistemata sulla parte superiore del provino subito dopo il getto ("ponding").

Per ogni condizione di esposizione e per ogni rapporto Sa/Sc, sono stati previsti due provini.

Anche i provini senza barre d'armatura sono stati muniti della vaschetta per il ponding e sono stati sottoposti ai cicli di bagnasciuga con la soluzione salina, per determinare il profilo della concentrazione dei cloruri penetrati all'interno del calcestruzzo.

Alla fine del periodo di esposizione, tutte le barre sono state sottoposte ad esame autoptico, per verificare visivamente il loro stato di corrosione.

3.3 Misure sperimentali

Durante i 270 giorni di sperimentazione, l'accoppiamento galvanico tra le due barre zincate e la barra di acciaio nero centrale è avvenuto esternamente ai provini, congiungendo i cavi saldati ai singoli spezzoni di barra (Fig. 10).

Poco prima del termine di ogni fase di asciugatura e di bagnatura, è stata misurata la corrente galvanica (anche detta corrente di cortocircuito) tra i due comparti, tramite un amperometro a "resistenza zero". Nella stessa sessione di misura, sono stati inoltre misurati rispetto all'elettrodo al calomelano saturo (SCE) i potenziali delle barre, sia in condizioni di accoppiamento galvani-

co ($E_{c,M}$, con $M = Fe$ per acciaio nero o Zn per acciaio zincato), che in condizioni di libera corrosione ($E_{corr,M}$, con $M = Fe$ per acciaio nero o Zn per acciaio zincato). In quest'ultimo caso, la misura veniva effettuata dopo circa 1,5 h dal disaccoppiamento dei due tipi di barra.

3.4 Risultati e discussione

3.4.1 Periodo di stagionatura

Subito dopo il getto e prima di effettuare l'accoppiamento galvanico, l'acciaio zincato presentava un potenziale di corrosione compreso nell'intervallo 1350÷-1400 mV, mentre le barre di acciaio nero presentavano un potenziale di corrosione compreso nell'intervallo -400÷-520 mV. Questi valori di potenziale sono mostrati in Fig. 11 ($E_{corr,Zn}$, per l'acciaio zincato e $E_{corr,Fe}$, per l'acciaio nero), dove, per brevità, sono riportati i diagrammi relativi ai due valori estremi di Sa/Sc.

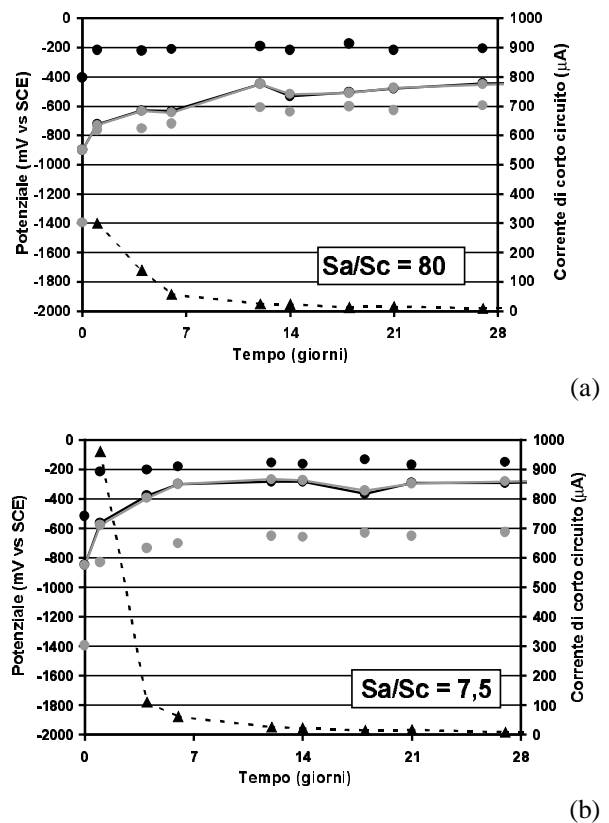


Fig. 11 – Potenziale di libera corrosione, potenziale di coppia e corrente di corto circuito, nel corso dei 28 giorni di stagionatura all'aria: ● $E_{corr,Fe}$; ● $E_{corr,Zn}$; ● $E_{c,Fe}$; ● $E_{c,Zn}$; ...▲... corrente di cortocircuito.

Dopo aver eseguito l'accoppiamento galvanico, l'acciaio nero ha assunto un potenziale compreso nell'intervallo $-850 \div -1050$ mV ($E_{c,Fe}$, Fig. 11), molto prossimo al potenziale di immunità termodinamica, in riferimento all'ambiente alcalino determinato dalla matrice cementizia.

Ad un giorno dal getto, lo zinco del rivestimento è divenuto passivo ed il suo potenziale di corrosione si è stabilizzato nell'intervallo $-750 \div -850$ mV ($E_{c,Zn}$, Fig. 11). In Fig. 11, si vede inoltre che i potenziali di coppia $E_{c,Fe}$ ed $E_{c,Zn}$ sono quasi sovrapposti ed in particolare per $Sa/Sc = 80$ sono entrambi lontani da $E_{corr,Fe}$ e vicini a $E_{corr,Zn}$: ciò sta ad indicare che si ha una efficace protezione catodica da parte dello zinco nei confronti della discontinuità più piccola della serie (Tab. 3). Invece per $Sa/Sc = 7,5$, in presenza cioè di una discontinuità di dimensioni maggiori, i potenziali di coppia sono più vicini a $E_{corr,Fe}$, proprio ad indicare che in questo caso la protezione catodica è risultata meno efficace. Naturalmente, per i valori Sa/Sc intermedi ($Sa/Sc = 40$ e 20), per i quali non sono stati riportati i diagrammi, i potenziali di coppia sono risultati compresi tra quelli già illustrati in Figura 11.

Da queste osservazioni sperimentali, risulta chiaro che il rivestimento di zinco determina una protezione catodica minore all'aumentare dell'area della discontinuità ad esso adiacente. In ogni caso, il ferro del substrato lasciato scoperto, in corrispondenza delle discontinuità, si corroderà più lentamente rispetto ad una comune barra di acciaio nero. Si esplica in questo modo l'effetto benefico prodotto dal rivestimento di zinco e, di conseguenza, il rallentamento del processo di riduzione della sezione resistente della barra d'armatura.

Le correnti di cortocircuito sono risultate alte solo nei giorni subito dopo il getto a causa della elevata differenza di potenziale tra zinco attivo e acciaio; inoltre sono risultate crescenti al diminuire del rapporto Sa/Sc .

3.4.2 Periodo di esposizione dei provini a cicli di bagnasciuga con acqua potabile.

Nel corso dei cicli in bagnasciuga con acqua potabile, la protezione catodica offerta dal rivestimento di zinco nei confronti delle discontinuità ha mostrato un'efficacia simile a quella vista in precedenza, durante il periodo di stagionatura. Anche in questo caso vengono di seguito riportati i soli diagrammi relativi al rapporto $Sa/Sc = 80$ e $7,5$ (Fig. 12).

Dato che i potenziali di coppia (Fig. 12) si sono discostati significativamente dal potenziale di corrosione del ferro ($E_{corr,Fe}$), per tutto il periodo di esposizione, si deduce che la protezione ha funzionato per tutta la durata della sperimentazione. Comunque per $Sa/Sc = 7,5$ (discontinuità di dimensione più elevata), l'efficacia della protezione catodica giunge al limite verso la fine dell'esposizione (i potenziali di coppia, $E_{c,Zn}$ e $E_{c,Fe}$ si

avvicinano al potenziale di libera corrosione dell'acciaio $E_{corr,Fe}$; v. Fig. 12).

Per quanto riguarda infine le correnti di cortocircuito, come mostrato nella Figura 12, esse raggiungono valori più elevati nel corso dei primi cicli di bagnasciuga, per diventare molto basse in seguito.

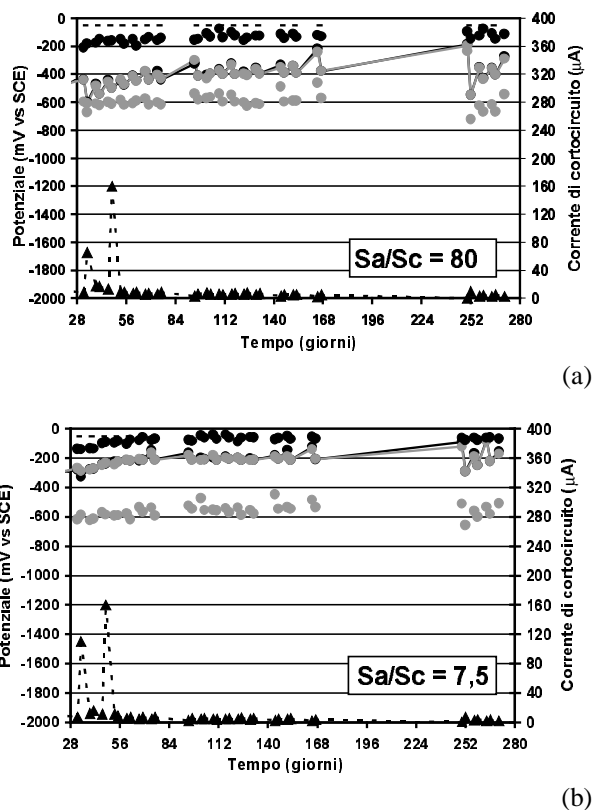


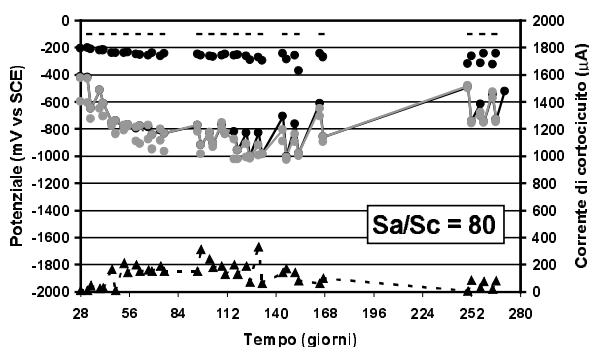
Fig. 12 – Potenziale di libera corrosione, potenziale di coppia e corrente di corto circuito, nel corso dei cicli di bagnasciuga con acqua del rubinetto: ● $E_{corr,Fe}$; ● $E_{corr,Zn}$; ○ $E_{c,Fe}$; ○ $E_{c,Zn}$; ▲▲▲ corrente di cortocircuito; — periodi di bagnato.

3.4.3 Periodo di esposizione dei provini a cicli di bagnasciuga con soluzione di NaCl al 5%.

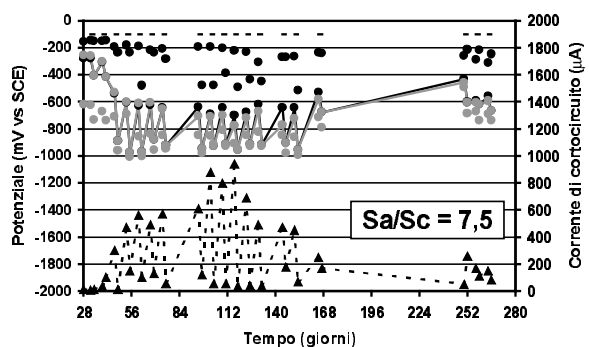
In questo caso la protezione catodica è stata efficace per tutto il periodo di esposizione e per tutti i rapporti Sa/Sc (anche per quei valori a cui corrispondono i grafici non mostrati in Fig. 13).

Dopo 3 cicli di bagnasciuga, le barre d'acciaio zinco hanno esercitato, nei confronti delle discontinuità di acciaio nero, la "prevenzione catodica" all'attacco dei cloruri. Infatti, le discontinuità hanno assunto un potenziale sufficientemente negativo ($E_{c,Fe}$) da trovarsi in una condizione in cui le velocità di corrosione non sono molto elevate, avendo inoltre trovato che il livello di cloruri ha raggiunto, ad una distanza dalla superficie di

15 mm, una concentrazione di circa il 4%, rispetto al peso di cemento [9,10].



(a)



(b)

Fig. 13 – Potenziale di libera corrosione, potenziale di coppia e corrente di corto circuito, nel corso dei cicli di bagnasciuga con soluzione di NaCl al 5%: ● $E_{corr,Fe}$; ● $E_{corr,Zn}$; —●— $E_{c,Fe}$; —●— $E_{c,Zn}$; ...▲... corrente di cortocircuito; ***periodi di bagnato.

Molto probabilmente, la “prevenzione catodica” è rimasta ancora efficace nei cicli successivi al terzo, poiché il potenziale delle discontinuità è rimasto ancora a valori piuttosto negativi ed il tenore di cloruri non è significativamente aumentato al di sopra del 4%.

Confrontando i diagrammi di Fig. 12 e Fig. 13, si nota che il potenziale di libera corrosione dell'acciaio zincato ($E_{corr,Zn}$) è risultato più negativo nel caso di esposizione a cicli di bagnasciuga in cloruri: ciò indica che lo zinco in ambiente contaminato da cloruri perde abbastanza rapidamente il suo stato di passività.

Infine, le correnti di cortocircuito sono risultate più elevate rispetto a quelle registrate nel caso precedente (cfr. Fig. 12 e 13), sia per la più elevata forza elettromotrice ($E_{corr,Fe} - E_{corr,Zn}$) che si ha nel caso di esposizione in ambiente cloridrico, che per la perdita dello stato di passività da parte dello zinco. I livelli di corrente più elevati sono stati misurati a valori di Sa/Sc più bassi, in corrispondenza dei quali, con una discontinuità

di dimensioni maggiori, si ha un più alto consumo dello zinco adiacente.

Sulla base dei risultati ottenuti, si può dedurre che se una barra d'armatura zincata presenta una discontinuità di dimensioni relativamente limitate, il rivestimento ad essa adiacente la protegge catodicamente. La protezione catodica comporta naturalmente il consumo di zinco contenuto nel rivestimento e di conseguenza, con il passare del tempo, altro ferro della barra viene a contatto con l'ambiente corrosivo. Si ottiene quindi un ingrandimento della superficie di discontinuità, fino a che la protezione catodica risulterà inefficace nelle zone più interne, dove avrà inizio la corrosione del ferro, come avviene nelle comuni barre di acciaio nero. Questo processo illustra sostanzialmente il meccanismo con cui avviene l'allungamento della vita di un'armatura zincata. Con riferimento ai problemi strutturali, ciò significa che la sezione resistente delle barre zincate si ridurrà in tempi più lunghi rispetto a quelli relativi alle barre d'acciaio nero.

L'allungamento della vita determinato dalla zincatura delle barre, con il meccanismo sopra illustrato, si colloca nel modello concettuale proposto da Yeomans [11] in un intervallo di tempo che viene chiamato “periodo di protezione”.

In definitiva, lo studio della protezione catodica su discontinuità del rivestimento di zinco ha consentito di dare ulteriori delucidazioni sul funzionamento dell'effetto benefico da esso prodotto.

3.4.4 Analisi autoptica delle barre d'armatura

Dall'indagine autoptica, si è trovato che tutte le barre d'acciaio nero non hanno presentato ruggine rossa. Si è concluso pertanto che la protezione catodica offerta dal rivestimento di zinco, adiacente alle discontinuità, è stata efficace per tutto il periodo di esposizione, sia in bagnasciuga con acqua che in bagnasciuga con cloruri. Comunque, in entrambi gli ambienti di corrosione, nel caso dei provini con Sa/Sc = 7,5 (discontinuità di dimensione maggiore), lo zinco del rivestimento adiacente alla barra nera è risultato più consumato, come ci si doveva aspettare dopo aver preso in esame le misure elettrochimiche. Questa evidenza sperimentale è stata più marcata per i provini sottoposti a cicli di bagnasciuga con i cloruri, per i quali le barre zincate, in prossimità della giunzione con l'acciaio nero, hanno presentato addirittura delle piccole zone di ruggine rossa. Molto probabilmente, una discontinuità delle dimensioni di 40 mm (Tab. 1), su una barra d'armatura zincata, può risultare critica in ambiente contaminato da cloruri, tanto che lo zinco adiacente viene attaccato in profondità fino agli strati inferiori a base di composti di Zn-Fe.

4 CONCLUSIONI

Dall'analisi dei dati delle prove di fatica effettuate su tutti i diametri sperimentati, emerge in modo netto la considerazione alla quale si era già in parte giunti sulla base dei risultati delle prove di trazione su barre da c.a. rivestite di zinco e cioè che l'immersione nel bagno di zinco fuso delle barre non provoca alcun danno né a livello meccanico, come si è potuto apprezzare conducendo tre diverse tipologie di prove, né a livello microstrutturale, accertato questo a seguito di approfondite analisi metallurgiche.

Dall'indagine svolta relativamente alla resistenza alla corrosione è emerso che il rivestimento di zinco ha determinato un'efficace protezione catodica nei confronti delle discontinuità simulate; in particolare esso ha determinato una "prevenzione catodica" quando l'ambiente era contaminato dai cloruri.

Le analisi autoptiche hanno confermato quanto ottenuto con le indagini elettrochimiche. Si è visto inoltre che una discontinuità di 40 mm, nelle condizioni sperimentali che si sono avute in questo lavoro, può risultare critica soprattutto in presenza degli ioni cloruro.

Sono state illustrate infine le modalità con cui il rivestimento di zinco ritarda in generale la corrosione delle barre d'armatura e pertanto il processo di riduzione della loro sezione resistente; quest'ultimo aspetto ha una importante validità di carattere strutturale.

In ogni caso, dalle prove di laboratorio è possibile osservare l'effetto sacrificale prodotto dal rivestimento di zinco nei confronti delle discontinuità, che lasciano esposto il ferro sottostante all'azione degli agenti corrosivi. In pratica, il rivestimento di zinco ritarda l'inizio della corrosione delle barre d'armatura, secondo il modello concettuale proposto da Yeomans.

Sulla base delle ultime considerazioni fatte, risulta chiaro che l'effetto benefico prodotto dall'armatura zincata non determina solamente un miglioramento della resistenza a corrosione, ma anche un rallentamento del processo di riduzione della sezione resistente delle barre, che è un fattore di interesse più strettamente strutturale.

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] K.W.J. Treadaway, B.L. Brown, R.N. Cox - 1980, "Durability of Galvanized Steel in Concrete", in *Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete*, STP 713, ASTM, Philadelphia, pp 120-131.
- [2] S.R. Yeomans, - 1994, "Performance of Black, Galvanized and Epoxy-Coated Reinforcing Steel in Chloride-Contaminated Concrete", *Corrosion*, 50 (1), 72-81.
- [3] C. Andrade, A. Macias, - 1989, "Galvanized Reinforcements in Concrete" in *Surface coatings-2*, El-

sevier Applied science, London - New York, pp 137-182.

- [4] C. Andrade, J.D. Holst, U. Nurnberger, J.D. Whiteley, N. Woodman - 1992, "Protection systems for reinforcement", *Buletin d'Information N° 211*, CEB Lausanne.
- [5] D. Stark - 1980, "Measurement Techniques and Evaluating of galvanized Steel in Concrete Structures in Bermuda", in *Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete*, STP 713, ASTM, Philadelphia, pp 132-141.
- [6] A. Franchi, R. Fratesi, G. Moriconi, G.A. Plizzari, - 1999, "Caratteristiche meccaniche di aderenza al calcestruzzo di barre di armatura in acciaio zincato", *Giornate AICAP 99*, Torino, 4-6 Novembre 1999, Vol. 1, pp. 53-62
- [7] R. N. Swamy, - 1990, "Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction", Ed. C.L. Page, K.W.J. Treadway and P.B. Bamforth, Elsevier Applied Science, London, p.586.
- [8] E. Guardini - 1999, "Le armature di calcestruzzo armato ricoperto di zinco: caratterizzazione meccanica e resistenza a corrosione", *Tesi di Laurea*, Università degli Studi di Brescia.
- [9] L. Bertolini, F. Bolzoni, P. Pedferri, L. Lazzari, T. Pastore - 1998, "Cathodic protection and cathodic prevention in concrete: principles and applications", *J. Appl. Electrochem.*, 28(12) pp. 1321-1331.
- [10] P. Pedferri, L. Bertolini - 1996, "La corrosione nel calcestruzzo e negli ambienti naturali", McGraw-Hill, Milano, p. 70.
- [11] S.R. Yeomans - 1994, "Proceedings of International Conference University of Sheffield", Ed. R.N. Swamy, 24-28 July 1994, Sheffield Academic Press, Sheffield, Vol II, pp. 1299-1309.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia Piero Gallinetti per l'aiuto fornito nella conduzione delle prove di laboratorio e le elaborazioni numeriche. Si ringraziano anche i tecnici del Laboratorio Pietro Pisa dell'Università di Brescia e quelli del Laboratorio di Prove Materiali e Strutture dell'Università di Ancona per l'assistenza fornita nella preparazione dei provini e nella conduzione delle prove sperimentali.

La ricerca sperimentale per la caratterizzazione meccanica dell'acciaio zincato è stata svolta nell'ambito di una convenzione di ricerca tra la Società Galva Rebar s.r.l. e l'Università di Brescia.