

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI BARRE DI ARMATURA SOGGETTE A CORROSIONE LOCALIZZATA

John Cairns¹, Alberto Franchi², Chiara Franzoni³, Giovanni A. Plizzari³

¹ Department of Civil and Offshore Engineering, Heriot Watt University, Edimburgo (UK)

² Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano

³ Facoltà di Ingegneria, Università di Bergamo, viale Marconi 5/A, 24044 Dalmine (BG)

SOMMARIO

Benchè si siano spese molte risorse per comprendere quali fossero le cause ed i meccanismi di innesco e sviluppo della corrosione delle armature da calcestruzzo armato, la valutazione della sicurezza di una struttura corrosa è stata quasi sempre trascurata. Nel presente lavoro si presentano alcuni risultati di prove di trazione e di fatica a basso numero di cicli, effettuate su barre di acciaio Tempcore con una corrosione localizzata realizzata artificialmente per mezzo di una fresa a punta semisferica. I risultati sperimentali mostrano la notevole perdita di duttilità della barra provocata dalla corrosione localizzata ed il notevole decadimento della resistenza a fatica delle barre danneggiate.

SUMMARY

Although much effort has been devoted to understanding the causes and mechanisms of reinforcement corrosion, relatively little attention has been devoted to the structural aspects related to the corroded rebars. In the present paper, experimental results from tensile tests and low cycle fatigue tests on Tempcore bars with a pitting corrosion damage artificially provoked by a spherical milling cutter, are presented. The results show the remarkable loss of ductility as well as the reduced fatigue strength of the damaged bars.

1 INTRODUZIONE

È ben noto che la corrosione è una delle principali cause di degrado delle strutture. Ne sono una dimostrazione i costi di consolidamento o di demolizione (con il conseguente rifacimento) di strutture corrose, cresciuti in maniera esponenziale negli ultimi anni [1]. In tale contesto, risulta chiaro come il problema della durabilità e della resistenza delle strutture attaccate dai fenomeni corrosivi abbia suscitato particolare interesse nei ricercatori.

Benchè si siano spese molte risorse per comprendere quali fossero le cause ed i meccanismi di innesco e sviluppo della corrosione delle armature da calcestruzzo armato, ottenendo peraltro risultati significativi, la valutazione della sicurezza di una struttura corrosa è stata quasi sempre trascurata. Il mantenimento della sicurezza strutturale è comunque un aspetto di primaria importanza per garantire la sicurezza delle vite umane.

Tra i tipi di danneggiamento, la corrosione per vaiolatura (definita nel seguito *pitting corrosion* in accordo con la terminologia anglosassone) delle armature nelle strutture in calcestruzzo armato è causato principalmente dall'attacco che si manifesta in ambienti a

basso tenore di cloruri e debolmente ossidanti che contengono ioni ad azione specifica nei confronti della rottura del film superficiale della barra [2]. A causa dell'intervento degli ioni ad azione specifica (ad esempio gli ioni Cl^-) si ha un aumento locale di acidità che stimola l'accrescimento e lo sviluppo del "cratere" [3]

Gli effetti della corrosione localizzata sulla resistenza a snervamento, a rottura e sulla duttilità della barra sono difficili da stimare. I risultati sperimentali disponibili evidenziano che lo snervamento della barra si sviluppa prima nella sezione danneggiata mentre il resto della barra si trova ancora in campo elastico.

La formazione dei "crateri" riduce ovviamente la sezione resistente delle armature. Anche se questa riduzione comporta evidentemente una riduzione di resistenza, la conseguenza più grave (per la struttura) della "pitting corrosion" è rappresentato dalla perdita di duttilità dell'acciaio. I pochi risultati sperimentali disponibili mostrano infatti che una riduzione di sezione, anche minima, provoca una drastica riduzione della duttilità della barra con tutte le note conseguenze strutturali (limitata ridistribuzione delle azioni flettenti e la limitata dissipazione di energia nelle strutture in zone ad alto rischio sismico [4]).

La minor duttilità è anche dovuta alla concentrazione degli sforzi nella sezione danneggiata dalla corrosione localizzata.

Nel presente lavoro vengono presentati i principali risultati di una sperimentazione finalizzata allo studio del comportamento di barre di armatura ad adherenza migliorata corrose localmente. In particolare sono state effettuate prove di trazione diretta e prove di fatica a basso numero di cicli. Queste ultime sono state condotte imponendo sia una deformazione massima costante per i vari cicli, sia una deformazione crescente durante la prova.

Poiché la corrosione delle armature richiede un notevole impegno e tempi lunghi, nel presente lavoro la corrosione della barra è stata simulata danneggiando appositamente la barra utilizzando una fresa semisferica. Il miglior controllo della geometria del difetto ha favorito il confronto tra i risultati.

2 CARATTERISTICHE DELL'ACCIAIO

L'acciaio utilizzato, rappresentato da barre con diametro di 12, 16, 20 e 24 mm di tipo B500, è ad adherenza migliorata ed è stato laminato a caldo con il processo di tempra e autorinvenimento Tempcore.

Le barre con diametro pari a 20 mm sono state realizzate appositamente con tre diverse modalità di tempra, a cui corrispondono diverse caratteristiche meccaniche legate soprattutto al diverso spessore della corteccia martensitica della barra [5].

Gli acciai utilizzati nella sperimentazione sono conformi alle prescrizioni UNI 6407/88, al D.M. 09/01/96 [8] e alla ENV 10080 [9] che prevedono, per assicurare una eccellente saldabilità, un contenuto massimo di carbonio pari allo 0.22% e un contenuto massimo di carbonio equivalente pari allo 0.50%.

Si riportano in Tabella 1 le caratteristiche, ed in particolare la tensione di snervamento (f_{sy}) e la resistenza media a trazione (f_{st}), dell'acciaio Tempcore utilizzato nella presente ricerca. Le tre diverse resistenze delle barre $\phi 20$ sono identificate come "low strength" (ls), "medium strength" (ms) e "high strength" (hs).

Diametro [mm]	f_{sy} [MPa]	f_{st} [MPa]
12	526	613
16	513	606
20 ls	491	570
20 ms	534	610
20 hs	550	628
24	555	597

Tab. 1 – Caratteristiche meccaniche dell'acciaio.

3 PROVINI E STRUMENTAZIONE

Il danneggiamento della barra provocato dalla "pitting corrosion" è stato simulato asportando una porzione di barra con delle fresse a punta semisferica con codolo cilindrico a più taglienti [6].

Al fine di ricostruire nella maniera maggiormente rappresentativa quello che avviene in modo del tutto casuale in natura, si sono prodotte diverse percentuali di riduzione di sezione (riferite all'area della barra integra) e si sono impiegate fresse con diametro diverso.

La percentuale di area asportata nella sezione maggiormente danneggiata (il cui piano passa per il centro della sfera) corrisponde al 5%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% dell'area della sezione nominale della barra. Ogni percentuale di riduzione di sezione è stata realizzata, ove possibile, con tutti i raggi delle fresse disponibili, cioè 4, 6, 8 e 10 mm [7]. Naturalmente, la geometria della sezione danneggiata artificialmente cambia al variare del diametro della fresa.

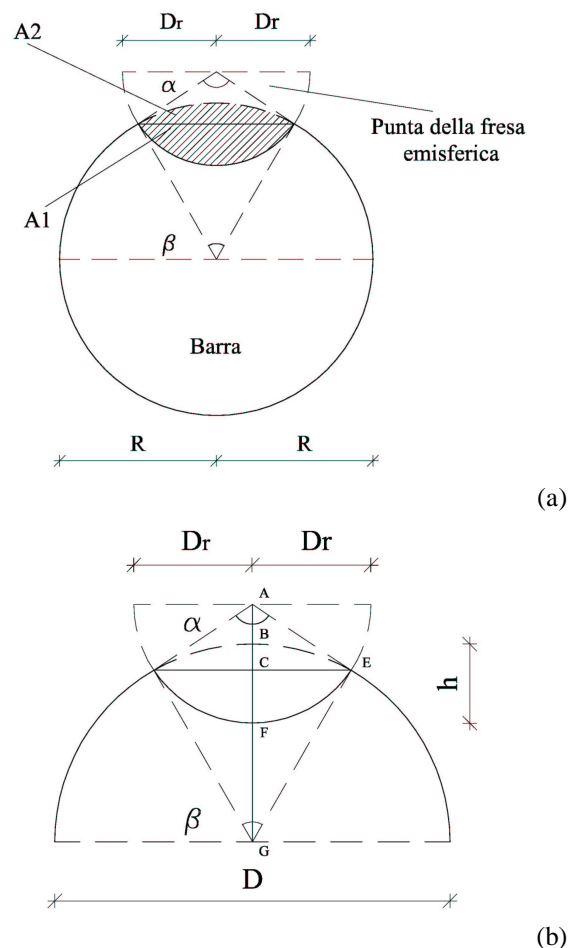


Fig. 1 – Schema di calcolo dell'affondamento della fresa nella barra per ottenere la riduzione di sezione desiderata.

Con semplici considerazioni geometriche è possibile stabilire la profondità di affondamento della fresa (h) per ottenere la riduzione di area resistente desiderata. Lo schema di calcolo utilizzato per la stima dell'area asportata è quello rappresentato in Figura 1 [6]. Nelle barre di grande diametro è stato possibile asportare grandi percentuali di sezione resistente solo con le frese di grande raggio in quanto si è limitato l'affondamento della fresa (h) al raggio della fresa stessa (Fig. 1b).

La deformazione della barra nel tratto danneggiato è stata misurata applicando due trasduttori di spostamento induttivi su basi poste ad una distanza pari a 5 volte il diametro della barra. Uno dei due strumenti è stato posizionato anteriormente alla conca semisferica rappresentante la corrosione mentre l'altro posteriormente ad essa, sul lato integro della barra.

Il carico è stato applicato alla barra ammorsando le sue estremità ai morsetti della macchina di prova Instron 1274/8500 plus presente presso il Laboratorio di Prove Materiali "Pietro Pisa" dell'Università di Brescia.

Il carico è stato imposto applicando alla barra uno spostamento pari a 2 mm/min fino al raggiungimento del limite elastico, di 10 mm/min fino al carico massimo di trazione e di 1 mm/min nel ramo discendente post-picco.

Le misure sperimentali relative al carico applicato alle barre ed agli spostamenti rilevati dai trasduttori sono state acquisite per mezzo di una centralina Spider8 dell'HBM e, attraverso il software Catman, memorizzati su un P.C. La velocità di acquisizione dati è rimasta invariata durante l'esecuzione della prova ed è stata pari ad 1 Hz.

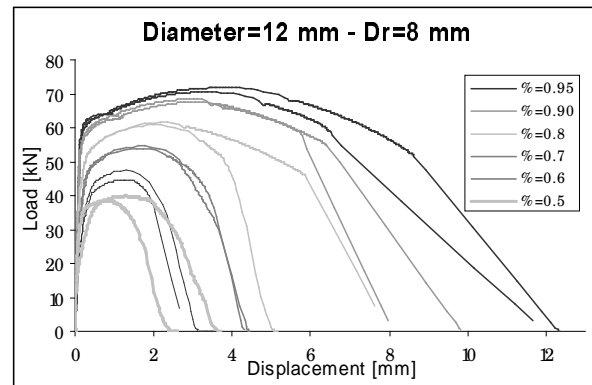
4 PROVE DI TRAZIONE

In questo paragrafo si riportano i principali risultati sperimentali ottenuti dalle prove di trazione su barre danneggiate con diametro 12 mm, rappresentativo del comportamento di una barra di piccolo diametro, e con diametro di 24 mm, tipico di una barra di grande diametro.

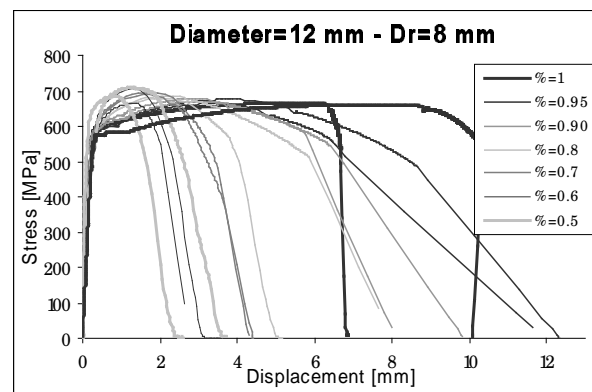
La Figura 2a mostra le curva carico-spostamento ottenute da barra con diametro di 12 mm, con diverse percentuali di area danneggiata da una fresa con raggio (Dr) di 8 mm. Il valore dello spostamento è stato ottenuto mediando i due valori rilevati dai trasduttori induttivi.

Si può notare che la riduzione del carico massimo è proporzionale alla percentuale di area danneggiata. Ciò è confermato dal diagramma sforzo-spostamento, riportato in Figura 2b dove lo sforzo è stato calcolato come rapporto fra il carico e l'area nominale resistente. Particolarmente significativa è la notevole perdita di duttilità della barra causata dalla concentrazione di deformazioni nella zona col difetto. Il valore elevato dello

sforzo massimo rilevato sperimentalmente dalle barre danneggiate è probabilmente dovuto alla presenza di nervature nella zona danneggiata.



(a)



(b)

Fig. 2 –Diagramma carico-spostamento (a) e sforzo-spostamento (b) relativo ad una barra di diametro 12 mm con diverse percentuali di riduzione di sezione provocata da una fresa con raggio di 8 mm.

La Figura 3 mostra le curve sforzo-spostamento ottenute dalla barra con diametro di 12 mm, nelle quali il danneggiamento è stato provocato da una fresa con raggio di 10 mm. Le Figure 4 e 5 mostrano curve analoghe alle precedenti dove però il difetto nelle barre è stato ottenuto con frese aventi raggio di 6 e 4 mm rispettivamente. Si può notare che la geometria del difetto non ha portato a differenze significative nelle curve sforzo-spostamento.

La Figura 6 mostra lo spostamento corrispondente ad un carico post-picco pari al 99% del carico massimo, in funzione della percentuale di area corrosa (artificialmente); si può notare come con una riduzione di area del 50%, lo spostamento massimo diminuisca dell'80%.

Le Figure 7, 8 e 9 mostrano curve analoghe alla precedente ottenute da barre di armatura con diametro di 16, 20 e 24 mm. Si può notare la notevole perdita di duttilità delle barre danneggiate dalla corrosione loca-

lizzata che riduce del 30-40% (rispetto alla barra integra) la duttilità delle barre con sezione ridotta del 5%, e del 80% circa la duttilità delle barre con una percentuale di sezione danneggiata pari al 50% della barra integra.

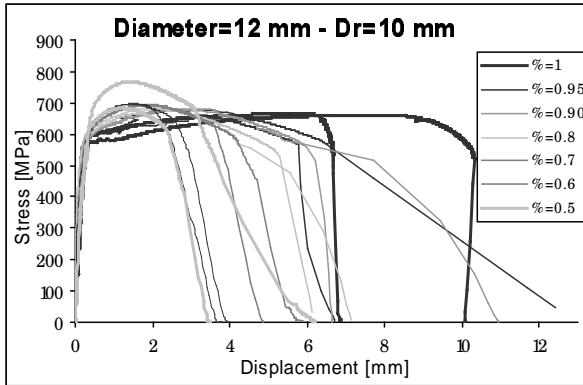


Fig. 3 – Diagramma sforzo-spostamento relativo ad una barra $\phi 12$ mm con diverse percentuali di riduzione di sezione provocata da una fresa con raggio di 10 mm.

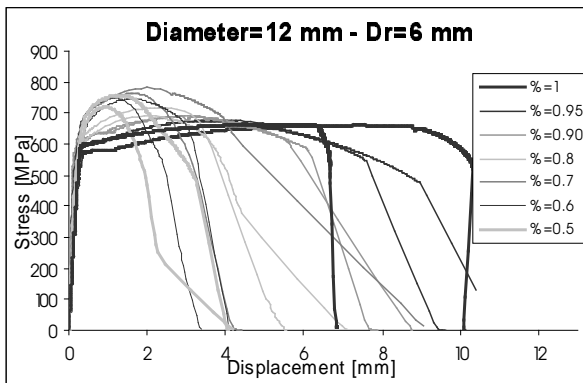


Fig. 4 – Diagramma sforzo-spostamento relativo ad una barra $\phi 12$ mm con diverse percentuali di riduzione di sezione provocata da una fresa con raggio di 6 mm.

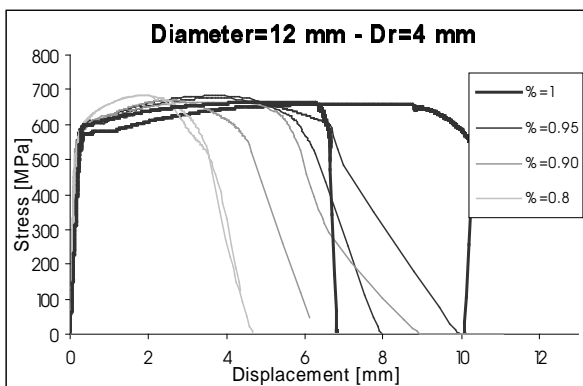


Fig. 5 – Diagramma sforzo-spostamento relativo ad una barra $\phi 12$ mm con diverse percentuali di riduzione di sezione provocata da una fresa con raggio di 4 mm.

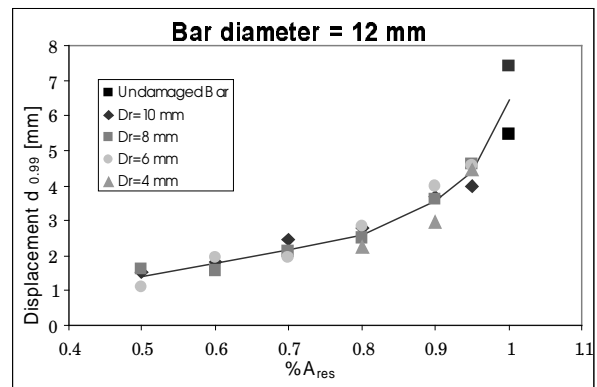


Fig. 6 – Diagramma dello spostamento al picco rilevato dalle barre con diametro di 12 mm con varie percentuali di area danneggiata con frese di diverso diametro.

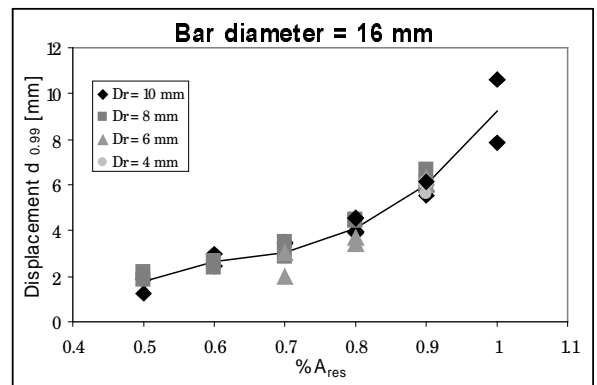


Fig. 7 – Diagramma dello spostamento al picco rilevato dalle barre con diametro di 16 mm con varie percentuali di area danneggiata con frese di diverso diametro.

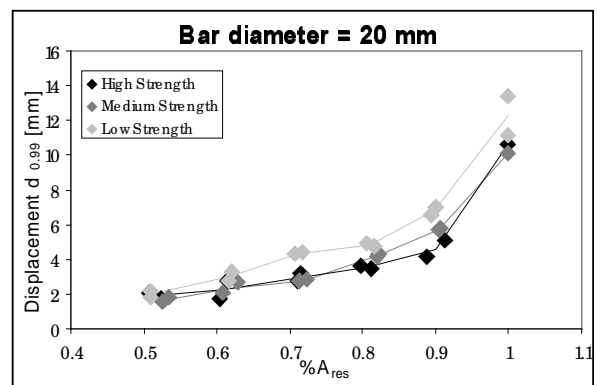


Fig. 8 – Diagramma dello spostamento al picco rilevato dalle barre $\phi 20$ con diversa resistenza e varie percentuali di area danneggiata.

I risultati per la barra $\phi 20$ (Fig. 8) sono relativi a tre diversi valori della resistenza (Tab. 1), caratterizzati da tre diversi valori della cortecchia esterna martensitica del tondino Tempcore©. Si può notare che le barre più resistenti, con una cortecchia esterna di maggior spessore,

sono quelle che risentono maggiormente del danneggiamento per corrosione localizzata in quanto la corrosione asporta la parte esterna più resistente dell'armatura.

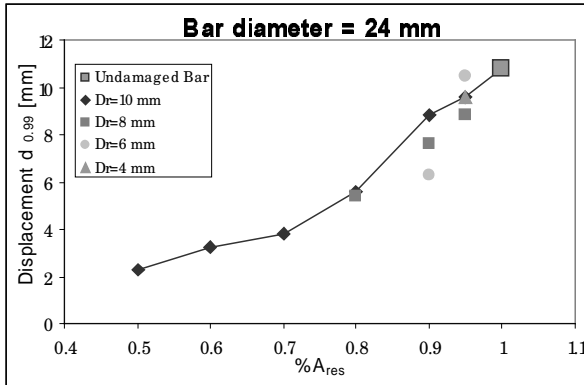


Fig. 9 – Diagramma dello spostamento al picco rilevato dalle barre con diametro di 24 mm e con varie percentuali di area danneggiata con frese di diverso diametro.

5 PROVE CICLICHE

Quando la corrosione riguarda barre in strutture realizzate in aree ad alto rischio sismico, diventa importante lo studio del comportamento a fatica oligociclica delle armature [10]. A tale scopo, nell'ambito della presente ricerca si sono condotte due tipologie di prove cicliche:

- Prove cicliche con deformazione massima costante;
- Prove cicliche con deformazione massima crescente.

5.1 Proveni e strumentazione

Per entrambe le prove cicliche effettuate si sono utilizzate barre con corrosione locale simulata artificialmente. Nelle prove cicliche, non si sono utilizzati i trasduttori di spostamento induttivi per la misura della deformazione che è stata rilevata attraverso lo spostamento relativo tra le estremità della barra misurato dal trasduttore applicato al pistone della macchina di prova.

Le prove sono state sempre effettuate con la macchina dinamica Instron 1274/8500+. I dati sperimentali sono stati acquisiti con una frequenza di 25 Hz con un software sviluppato in ambiente Lab-Windows che ha poi consentito di memorizzare i dati sul disco fisso di un personal computer.

Le prove si sono svolte, come per le prove di trazione, sulle barre con diametro di 12, 16, 20 e 24 mm.

La lunghezza libera della barra compresa tra i morsetti della Instron, è stata scelta pari a 10 volte il diametro nominale della barra.

La percentuale di area asportata è stata pari al 5, 10, 20, 30, 40 e 50%. Per queste prove sono stati scelti solamente due diametri della fresa, in quanto le prove di trazione hanno evidenziato che la geometria della zona danneggiata non influenza in modo rilevante la resistenza delle armature danneggiate. Si è quindi deciso di utilizzare le punte della fresa più piccola e più grande.

Per il calcolo dell'ampiezza di carico relativa ad ogni ciclo è stato necessario utilizzare un software in grado di selezionare, per ogni ciclo, i picchi di carico caratteristici a trazione e a compressione. Un secondo programma ha facilitato la determinazione dell'energia dissipata dalla barra ad ogni ciclo di carico.

5.2 Risultati delle prove cicliche a deformazione costante

Le prove si sono eseguite in controllo di spostamento, imponendo una deformazione simmetrica, pari all'1% della lunghezza libera (l_0) della barra, per la trazione e per la compressione.

La scelta di una deformazione simmetrica fa sì che la barra venga messa nella peggior condizione di carico possibile, infatti, nella realtà la deformazione causata dalla trazione è solitamente superiore alla deformazione applicata alla barra nella fase di compressione.

I principali risultati sperimentali riguardano l'ampiezza di carico e l'energia dissipata rilevate durante l'applicazione dei cicli di carico. Entrambe le grandezze rappresentano una misura del danneggiamento che si verifica nella barra durante l'applicazione dei cicli di carico.

L'andamento tipico del diagramma di una prova ciclica a deformazione massima costante è illustrato nella Figura 10, in cui è ben evidente la riduzione dell'ampiezza di carico all'aumentare del numero di cicli.

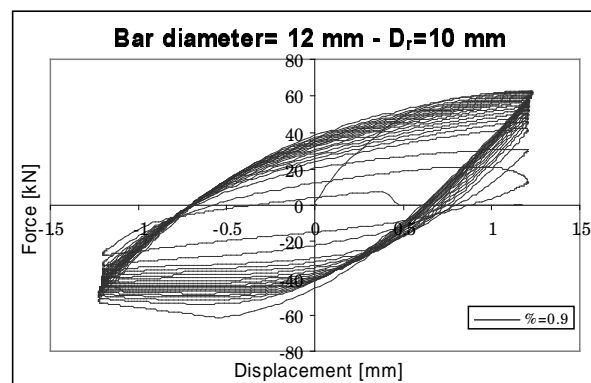


Fig. 10 – Tipico diagramma di una prova ciclica a deformazione costante determinata su una barra $\phi 12$ con percentuale di sezione resistente pari al 90% della sezione nominale integra.

Nella Figura 11 è mostrata una fotografia scattata appena dopo la rottura della barra che è sempre avvenuta nella fase di applicazione del carico di trazione.



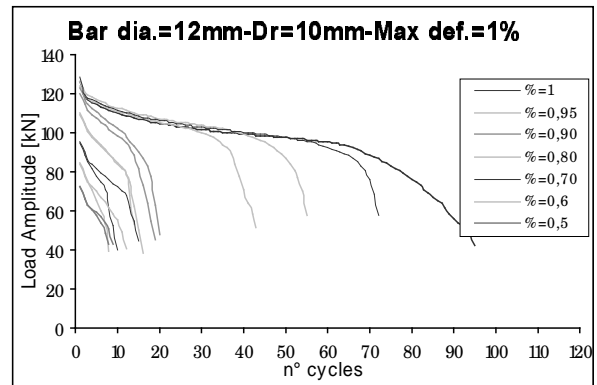
Fig. 11 – Fotografia di una barra tra i morsetti della Instron a fine prova.

Nella Figura 12 si riportano i diagrammi relativi alle prove effettuate sulle barre $\phi 12$ con diverse percentuali di sezione danneggiata da frese con punte di due diversi raggi ($Dr = 10$ e 6 mm); nello stesso diagramma sono anche riportati i risultati relativi al comportamento della barra integra. Si può notare la riduzione dell'ampiezza di carico che diventa sempre più rapida all'aumentare della percentuale di sezione danneggiata. Si può inoltre osservare come una riduzione minima di area resistente porti ad una rapida riduzione del massimo numero di cicli applicabile al provino (rispetto alla barra integra); ciò comporta una notevole peggioramento delle prestazioni di una struttura in calcestruzzo armato sottoposta al sisma.

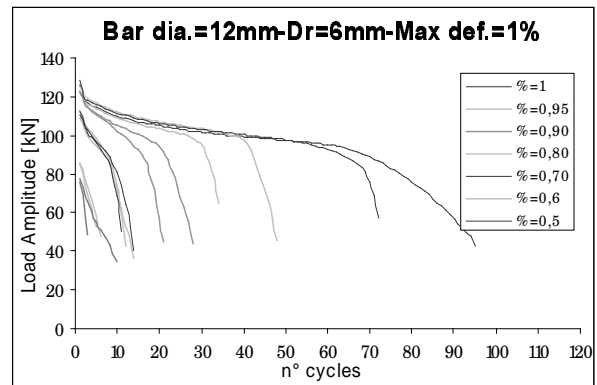
Le Figure 13-16 mostrano il massimo numero di cicli applicati alle barre in funzione della percentuale di area resistente di tutte le barre testate. I diagrammi evidenziano il danno provocato dalla corrosione localizzata sull'armatura con le ovvie conseguenze strutturali. Infatti, basta una piccola percentuale di sezione danneggiata (5%) per ridurre del 40% il numero massimo di cicli applicabile all'armatura. Quando il danneggiamento è invece pari al 10% ($\%A_{res}=0.9$), la resistenza a fatica diventa il 25% di quella della barra integra.

I risultati evidenziano inoltre che la geometria della zona danneggiata non influenza in modo significativo nemmeno la resistenza a fatica delle barre sottoposte a carichi ciclici con deformazione massima costante, con-

fermando ciò che si era già osservato dalle prove monotone di trazione.



(a)



(b)

Fig. 12 –Diagramma dell'ampiezza di carico in funzione del numero di cicli con deformazione massima costante, applicato a barre con diverse percentuali di area danneggiata da una fresa con raggio di 10 mm (a) e di 6 mm (b).

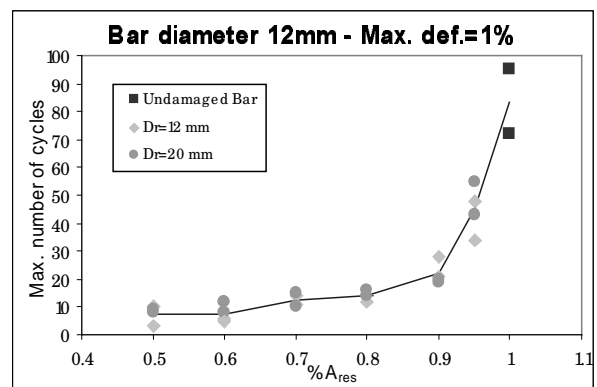


Fig. 13 – Massimo numero di cicli in funzione della percentuale di sezione resistente, applicati alle barre $\phi 12$ sottoposte a prove cicliche con deformazione costante.

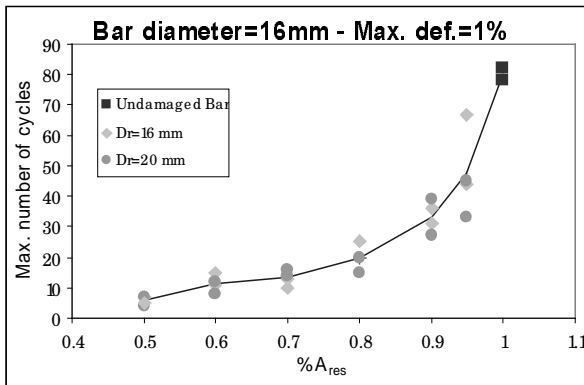


Fig. 14 – Massimo numero di cicli in funzione della percentuale di sezione resistente, applicati alle barre $\phi 16$ sottoposte a prove cicliche con deformazione costante.

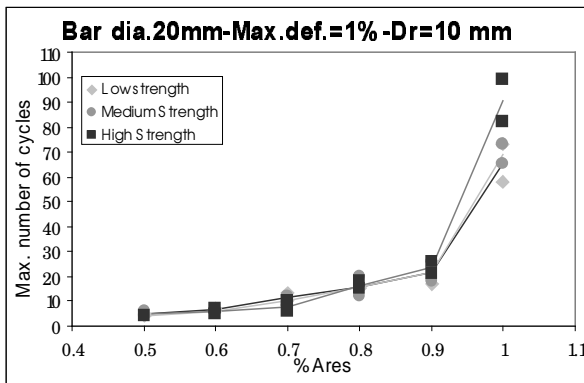


Fig. 15 – Massimo numero di cicli in funzione della percentuale di sezione resistente, applicati alle barre $\phi 20$ sottoposte a prove cicliche con deformazione costante.

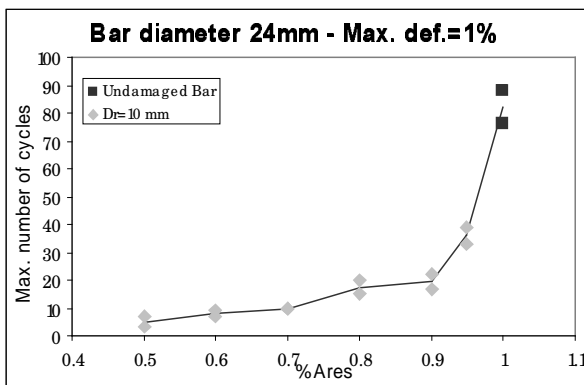
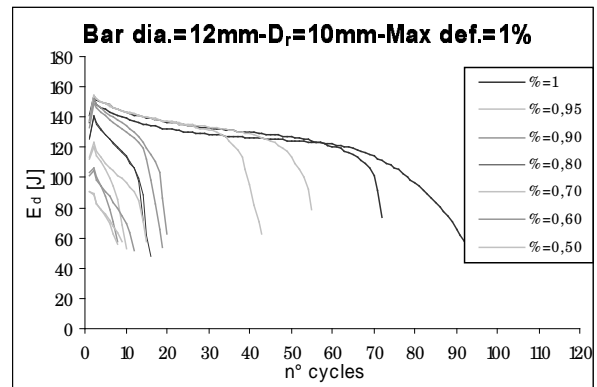


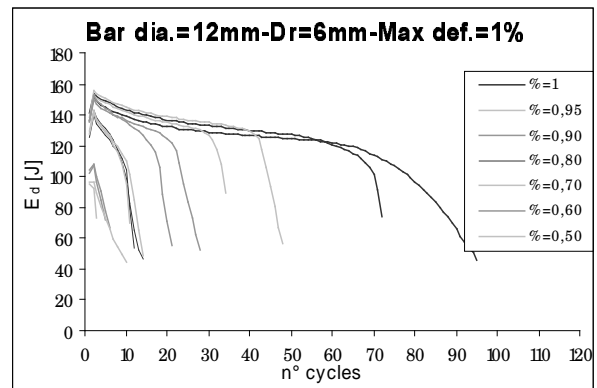
Fig. 16 – Massimo numero di cicli in funzione della percentuale di sezione resistente, applicati alle barre $\phi 24$ sottoposte a prove cicliche con deformazione costante.

Si riporta nella Figura 17 il diagramma dell'energia dissipata in un singolo ciclo (E_d), in funzione del numero dei cicli applicati, per diverse percentuali di area resistente della barra. Come si può notare, la riduzione

dell'energia dissipata è particolarmente evidente anche in barre che hanno subito un piccolo danneggiamento.



(a)



(b)

Fig. 17 – Diagramma dell'energia dissipata nel singolo ciclo in funzione del numero di cicli applicato a barre con diverse percentuali di area danneggiata da una fresa con raggio di 10 mm (a) e di 6 mm (b).

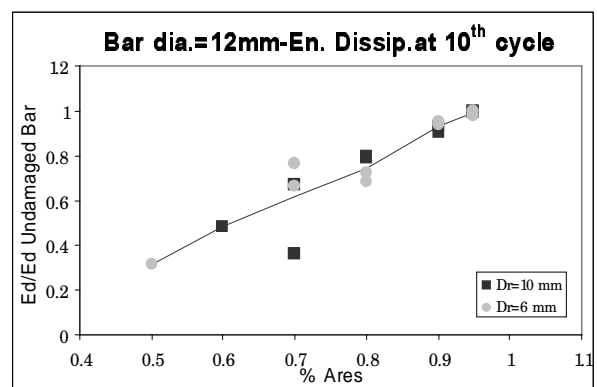


Fig. 18 – Diagramma dell'energia dissipata nel decimo ciclo di carico, rapportata al valore rilevato sulla barra integra, in funzione della percentuale di area resistente di una barra $\phi 12$ danneggiata con frese con raggio di 10 e 6 mm.

Nella Figura 18 si confronta l'energia dissipata nello stesso ciclo di carico, al variare della percentuale di sezione resistente. Prendendo come riferimento il decimo ciclo compiuto, la dissipazione di energia è diagrammata in funzione della percentuale di sezione resistente della barra. L'energia dissipata dalla barra danneggiata è rapportata all'energia dissipata dalla barra integra, per entrambe i diametri delle frese utilizzate. Si può notare che l'energia dissipata nel ciclo diminuisce con l'aumentare della percentuale di sezione danneggiata.

5.3 Risultati delle prove cicliche a deformazione crescente

In questa tipologia di prove, l'incremento di spostamento è stato imposto secondo la relazione:

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

dove:

δ rappresenta la deformazione massima imposta;

l_0 è la luce libera della barra;

$n=0,1,2, \dots$ è il numero del ciclo considerato.

La rottura è avvenuta sempre all'inizio del ciclo di trazione e in generale i provini non hanno compiuto più di 10 cicli totali ai quali corrisponde, in funzione del diametro, una deformazione imposta molto severa.

Nella Figura 19 è mostrato un tipico diagramma sperimentale ottenuto da una barra sottoposta a prova ciclica a deformazione massima crescente durante la prova.

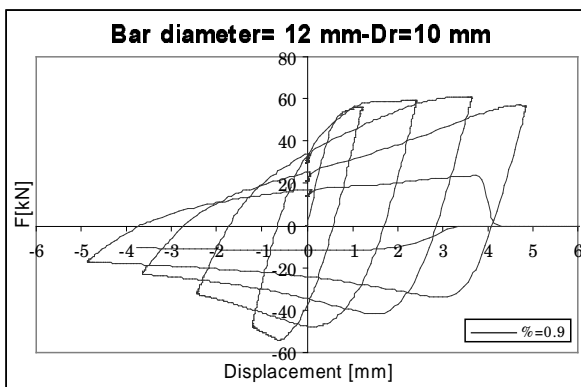
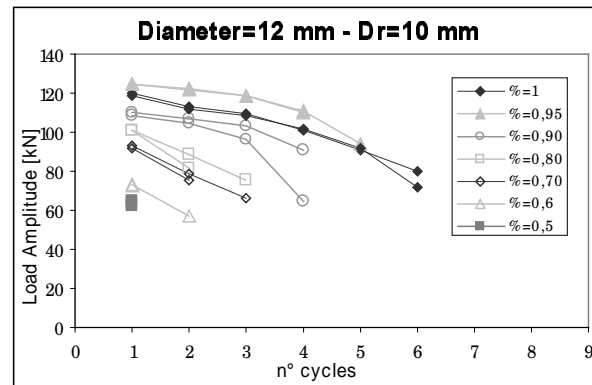


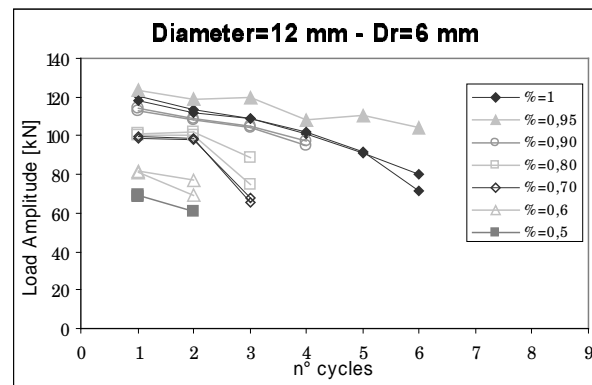
Fig. 19 – Tipico risultato di una prova ciclica determinata su una barra $\phi 12$ con percentuale di sezione resistente pari al 90% della sezione nominale integra.

Nella Figura 20 si riportano i diagrammi relativi all'andamento dell'ampiezza di carico in funzione del numero di cicli compiuti da una barra $\phi 12$, in funzione del numero di cicli applicati al provino. Anche in questo caso risulta evidente come i valori dell'ampiezza di carico si riducano in modo significativo per barre che hanno subito danneggiamenti superiori all'80%. Si può notare inoltre il limitatissimo numero di cicli applicabili al provino. La maggior ampiezza di carico rilevata dalla

barra con 5% di sezione danneggiata, non trova una particolare giustificazione e rientra nella normale dispersione dei risultati di prove di fatica.



(a)



(b)

Fig. 20 – Diagramma dell'ampiezza di carico in funzione del numero di cicli con deformazione massima crescente, applicato a barre $\phi 12$ con diverse percentuali di area danneggiata da una fresa con raggio di 10 mm (a) e di 6 mm (b).

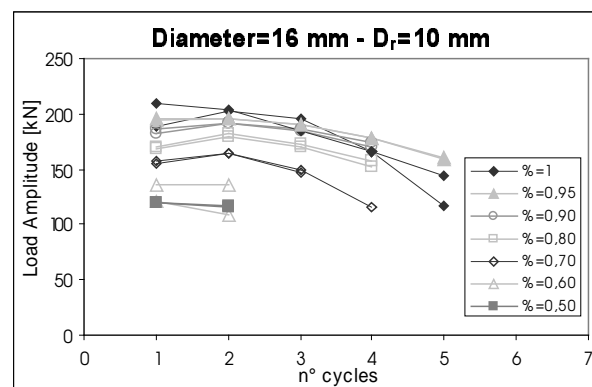


Fig. 21 – Diagramma dell'ampiezza di carico in funzione del numero di cicli con deformazione massima crescente, applicato a barre $\phi 16$ con diverse percentuali di area danneggiata da una fresa con raggio di 10 mm.

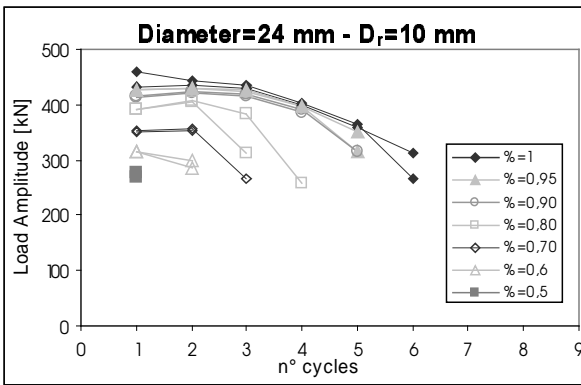
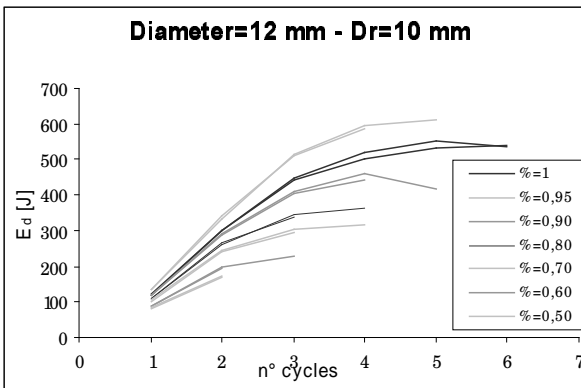
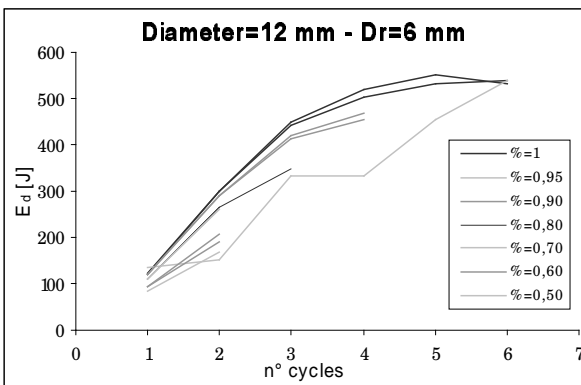


Fig. 22 – Diagramma dell’ampiezza di carico in funzione del numero di cicli con deformazione massima crescente, applicato a barre $\phi 24$ con diverse percentuali di area danneggiata da una fresa con raggio di 10 mm.



(a)



(b)

Fig. 23 – Diagramma dell’energia dissipata in un singolo ciclo in funzione del numero di cicli con deformazione massima variabile, applicato a barre $\phi 12$ con diverse percentuali di area danneggiata da una fresa con raggio di 10 mm (a) e di 6 mm (b).

Le Figure 21 e 22 mostrano la variazione dell’ampiezza di carico rilevata sperimentalmente dalle

barre con diametro di 16 e 24 mm rispettivamente. Si noti, anche per queste barre, la riduzione dell’ampiezza di carico all’aumentare della percentuale di area danneggiata.

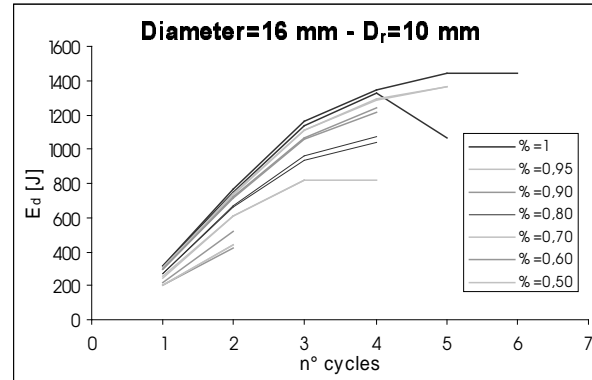


Fig. 24 – Diagramma dell’energia dissipata in un singolo ciclo in funzione del numero di cicli con deformazione massima variabile, applicato a barre $\phi 16$ con diverse percentuali di area danneggiata da una fresa con raggio di 10 mm.

La Figura 23 mostra l’andamento dell’energia dissipata in funzione del numero di cicli, ottenuta sperimentalmente da tutte le barre $\phi 12$ con una diversa percentuale di sezione resistente. Dall’analisi dei diagrammi si nota come nelle barre che hanno subito un danneggiamento, anche solo pari al 10%, la capacità di dissipare energia venga ridotta in maniera sensibile e quindi ne venga compromessa la duttilità. Le Figure 24 e 25 mostrano risultati analoghi ai precedenti, ottenuti dalle barre con diametro di 16 e 24 mm rispettivamente.

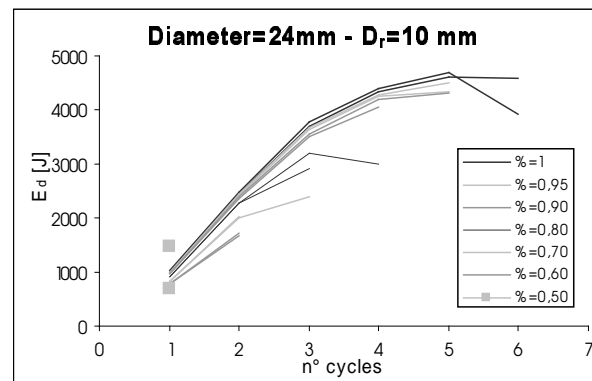


Fig. 25 – Diagramma dell’energia dissipata in un singolo ciclo in funzione del numero di cicli con deformazione massima variabile, applicato a barre $\phi 24$ con diverse percentuali di area danneggiata da una fresa con raggio di 10 mm.

Il meccanismo di rottura è diverso a seconda che si tratti di barre integre, che hanno la tendenza a rompersi

nella sezione compresa fra le nervature trasversali e barre invece con una sezione infragilita dal danneggiamento che rappresenta una discontinuità rilevante della sezione. Ciò è evidenziato dalla Figura 26 che mostra la superficie di rottura di due barre, una integra e una danneggiata al 70%, sottoposte a prove cicliche con deformazione variabile.

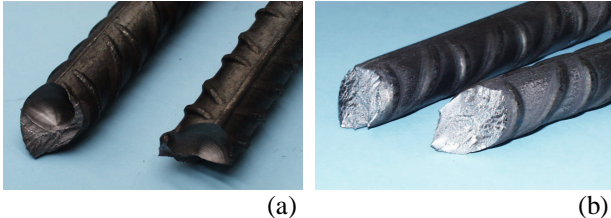


Fig. 26 -Punti di rottura rispettivamente di una barra danneggiata artificialmente (a) e di una barra integra (b) sottoposte a prove cicliche a deformazione costante.

6 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il presente lavoro riguarda una sperimentazione su barre di armatura da calcestruzzo armato con danneggiamento locale provocato dalla corrosione ("pitting corrosion").

I risultati sperimentali evidenziano come la corrosione localizzata possa danneggiare significativamente il comportamento meccanico delle barre di armatura da calcestruzzo armato.

Le prove di trazione hanno messo in evidenza, in aggiunta all'attesa riduzione del carico massimo applicabile alle barre corrose, la drastica riduzione di duttilità a cui conseguono le note limitazioni nel comportamento della trave, legate alla possibilità di redistribuire le azioni e di dissipare energia ove richiesto. La geometria del difetto provocato artificialmente non ha però influenzato particolarmente il comportamento meccanico delle barre.

I risultati delle prove di trazione sono stati confermati dalle prove di fatica a basso numero di cicli con inversione del carico, condotte imponendo sia una deformazione massima costante sia una deformazione massima crescente durante la prova. L'ampiezza massima del carico applicabile si riduce infatti all'aumentare della percentuale di sezione danneggiata dalla corrosione ma soprattutto si verifica una drastica riduzione del numero massimo di cicli applicabile alla barra che, con una perdita di sezione del 10%, diventa pari al 25% di quello applicabile alla barra integra.

Questo risultato quindi evidenzia ancora come la corrosione delle armature comprometta il buon funzionamento delle strutture, in particolare modo quando a queste è richiesta la dissipazione di energia come tipicamente nelle aree ad alto rischio sismico.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] Federal Highway Administration (US) - 1981, Memorandum, "Bridge Deck Deterioration, a 1981 Perspective", Office of Research, December.
- [2] P.Pedefferri - 1986, "La corrosione delle armature nel calcestruzzo", Atti del convegno di studio su manutenzione, riparazione e durabilità delle strutture in cemento armato, Udine, 9-13 Giugno, pp.1-31.
- [3] P.Pedefferri et al. - 1998, "Corrosione nel calcestruzzo e negli ambienti naturali", McGraw-Hill, Milano, p.70.
- [4] J. Cairns - 1997, "Bond of corroded reinforcement", State of the Art Report: "Bond of reinforcement in concrete", F.I.B. Bulletin n. 10, Losanna.
- [5] R. Fratesi - 1998, "Tondo zincato a caldo per l'edilizia", L'industria italiana del cemento, N°735.
- [6] R. Cossandi - 2000, "Caratterizzazione meccanica di barre da c.a. corrose e miglioramenti portati dal rivestimento di zinco su barre in calcestruzzo con elevato tenore di cloruri", Tesi di Laurea, Università degli Studi di Brescia.
- [7] C. Franzoni - 2001, "Caratterizzazione meccanica e durabilità di barre da C.A. rivestite di zinco", Tesi di Laurea, Università degli Studi di Brescia.
- [8] ENV 10080 - 1997, "Acciaio per cemento armato. Armature per cemento armato saldabili nervate B500.
- [9] Ministero dei Lavori Pubblici - 1996, "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche", D.M. 9.1.1996.
- [10] A.Franchi, P.Riva, P.Ronca, R.Roberti, M.La Vecchia - 1997, "Modalità di rottura delle barre di armatura in elementi di calcestruzzo soggetti a carichi ciclici", Dipartimento di Ingegneria Civile, Technical Report N°3.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'Ing. Rossella Cossandi 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, ed in particolare Andrea Del Barba, per l'assistenza fornita nella preparazione dei provini e nella conduzione delle prove sperimentali.

Il materiale utilizzato nelle prove è stato offerto dalla Ferriera Valsabbia S.p.A. che ha anche effettuato i trattamenti termici particolari alle barre. Gli Autori desiderano esprimere un ringraziamento particolare al Dott. Ruggero Brunori, per aver favorito la collaborazione, ed al Sig. Fabrizio Oliva per la preparazione delle barre speciali.