

COMPORTAMENTO MECCANICO DI BARRE DANNEGGIATE DALLA CORROSIONE

J. Cairns ^[1], A. Franchi ^[2], C. Franzoni ^[3], G.A. Plizzari ^[3]

^[1] Department of Civil and Offshore Engineering, Heriot Watt University, Edinburgh (UK)

^[2] Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano

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

RIASSUNTO

Benchè le ricerche effettuate sullo studio delle cause e dei meccanismi di innesco e sviluppo della corrosione delle armature da calcestruzzo armato abbiano fornito risultati significativi, la valutazione della sicurezza di una struttura corrosa è stata quasi sempre trascurata. Nel presente lavoro si presentano alcuni risultati di prove di trazione, 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.

PAROLE CHIAVE

Armature da calcestruzzo armato, corrosione localizzata; duttilità, concentrazione degli sforzi.

1 INTRODUZIONE

La corrosione delle armature è ampiamente riconosciuta come una delle principali cause di degrado delle strutture in calcestruzzo armato. 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 dalla corrosione abbia suscitato particolare interesse nei ricercatori.

Benchè le ricerche effettuate sullo studio delle cause e dei meccanismi di innesco e sviluppo della corrosione delle armature da calcestruzzo armato abbiano fornito risultati significativi, la valutazione della sicurezza di una struttura con armature corrose, problema di primaria importanza per la sicurezza della vita umana, non è stata ancora sufficientemente approfondita.

Tra i tipi di danneggiamento, la corrosione per vaiolatura (definita nel seguito *pitting corrosion* in accordo con la terminologia anglosassone) è causata 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 della corrosione localizzata [3].

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 della "*pitting corrosion*" è rappresentata dalla perdita di duttilità dell'acciaio. I pochi risultati sperimentali disponibili mostrano infatti che una riduzione di sezione, anche se minima e circoscritta ad una piccola zona della barra, provoca una drastica riduzione della duttilità della barra stessa, con tutte le note conseguenze strutturali (limitata redistribuzione delle azioni flettenti e limitata dissipazione di energia nelle strutture in zone ad alto rischio sismico [4]). La ridotta duttilità è dovuta ad un meccanismo noto alla meccanica della frattura, che vede una concentrazione degli sforzi all'apice del cratere con la successiva localizzazione delle deformazioni che comporta la propagazione della cricca.

Nel presente lavoro vengono presentati alcuni risultati di una sperimentazione finalizzata allo studio del comportamento a trazione di barre di armatura ad aderenza migliorata corrose localmente. In particolare, i risultati riguardano le prove di trazione diretta svolte nell'ambito di un

programma di ricerca più vasto. Poiché la corrosione delle armature richiede tempi di esposizione agli agenti aggressivi non compatibili con le normali esigenze di un laboratorio, nel presente lavoro la corrosione della barra è stata simulata danneggiando appositamente la barra con una fresa a punta semisferica. Il miglior controllo della geometria del difetto ha favorito il confronto tra i risultati ottenuti da barre con difetti caratterizzati da una diversa dimensione e geometria. Il comportamento sperimentale è stato infine simulato con un semplice modello numerico che permette di comprendere meglio gli effetti della localizzazione delle deformazioni nell'intorno dei tratti di barra corrosi.

2 CARATTERISTICHE DELL'ACCIAIO

Le prove sono state effettuate su barre con diametro di 12, 16, 20 e 24 mm di acciaio tipo B500 ad aderenza migliorata, laminato a caldo con il processo di tempra e autorinvenimento Tempcore©. Le barre con diametro di 20 mm sono state realizzate appositamente con tre diverse modalità di tempra, a cui corrispondono diverse caratteristiche meccaniche (a parità di composizione chimica), 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 un contenuto massimo di carbonio pari allo 0.22% e un contenuto massimo di carbonio equivalente pari allo 0.50% per assicurare una eccellente saldabilità.

Si riportano in Tabella 1 le principali caratteristiche meccaniche dell'acciaio Tempcore utilizzato nella presente ricerca, relative alla tensione media di snervamento (f_{sy}) e di rottura (f_{st}). Le tre diverse resistenze delle barre $\phi 20$ sono identificate come "low" (l), "medium" (m) e "high" (h).

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

Tabella 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 frese a punta semisferica con codolo cilindrico a più taglienti [6].

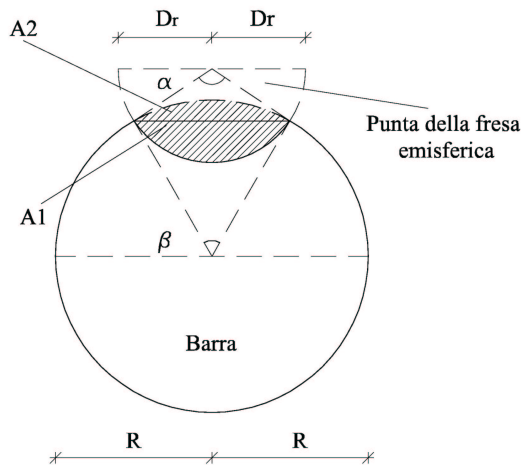


Figura 1 – Particolare di una barra danneggiata artificialmente con una fresa a punta sferica.

Al fine di studiare gli effetti della dimensione del difetto, si sono prodotte diverse percentuali di riduzione di sezione impiegando frese con diametro diverso. In particolare, 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 frese disponibili, cioè 4, 6, 8 e 10 mm [7]. Naturalmente, la geometria della sezione danneggiata artificialmente cambia al variare del diametro della fresa (Fig. 2a).

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 2a [6]. Nelle barre di grande diametro è stato possibile asportare grandi percentuali di sezione resistente solo con le frese di grande raggio (D_r) in quanto si è limitato l'affondamento della fresa al raggio della fresa stessa.



(a)



(b)

Figura 2 – Schema del difetto artificialmente provocato nella barra con una fresa emisferica (a); strumentazione applicata alla barra (b).

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 emisferica rappresentante la corrosione mentre l'altro è stato posizionato posteriormente ad essa, sul lato integro della barra (Fig. 2b).

Le prove di trazione sono state effettuate con la 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 relativo tra le estremità con una velocità di 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. con una velocità di acquisizione pari ad 1Hz.

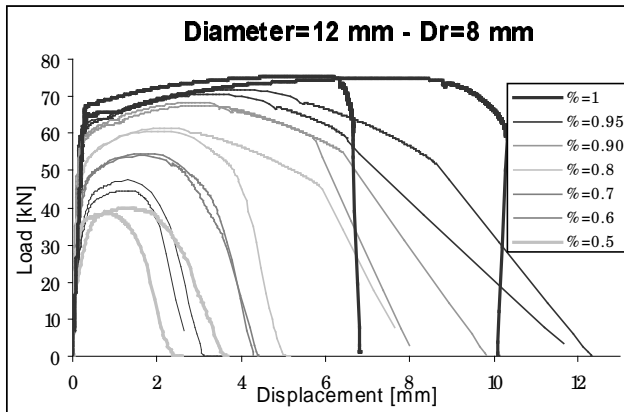
4 PROVE DI TRAZIONE

Nel presente paragrafo si riportano tipici risultati sperimentali ottenuti dalle prove di trazione su barre con diametro 12 mm, rappresentativi del comportamento di barre di piccolo diametro, e con diametro di 24 mm, tipici per barre di grande diametro.

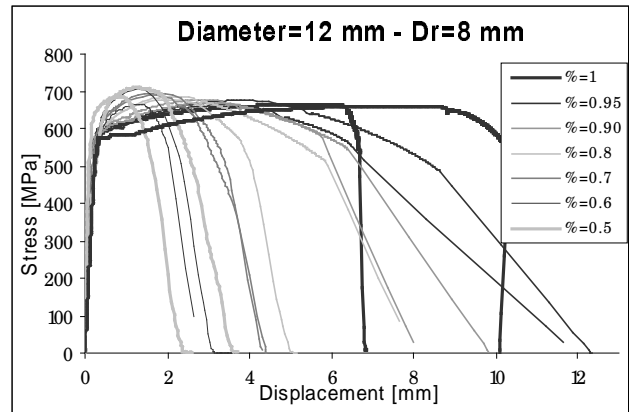
La Figura 3a mostra le curve carico-spostamento (inteso come allungamento della base di misura presa uguale a 60mm) ottenute da una barra con diametro di 12 mm con diverse percentuali di area danneggiata da una fresa con raggio (D_r) di 8 mm. Il valore dello spostamento è stato ottenuto mediando i due valori rilevati dai trasduttori induttivi (Fig. 2b); 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 3b, 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.

La Figura 4 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, 6 e 4 mm; si può notare che la geometria del difetto non ha portato a differenze significative nelle curve sforzo-spostamento.

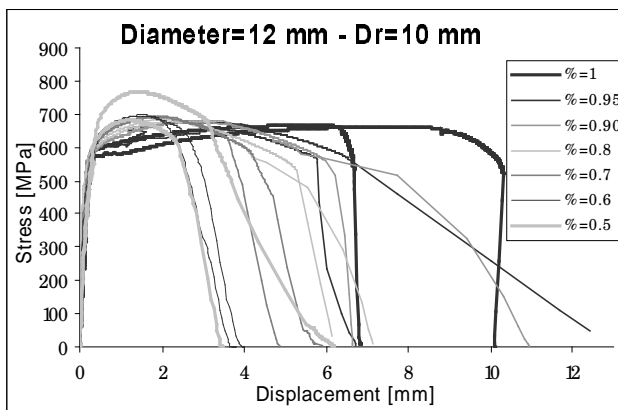


(a)

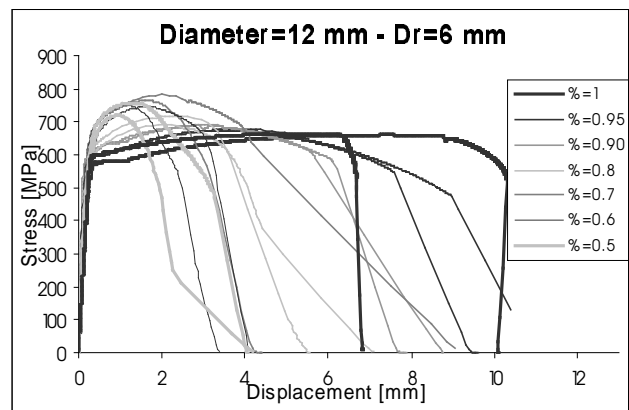


(b)

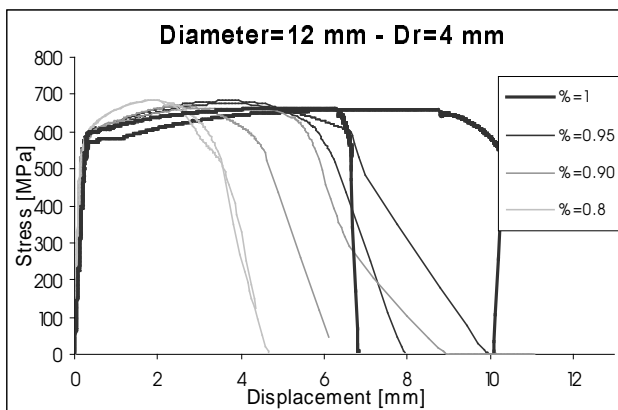
Figura 3 –Diagramma carico-spostamento (a) e sforzo-spostamento (b) relativo ad una barra $\phi 12$ mm con diverse percentuali di riduzione di sezione provocata da una fresa con raggio di 8 mm.



(a)



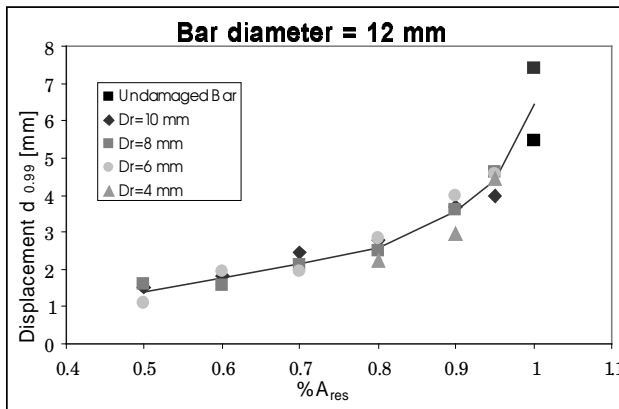
(b)



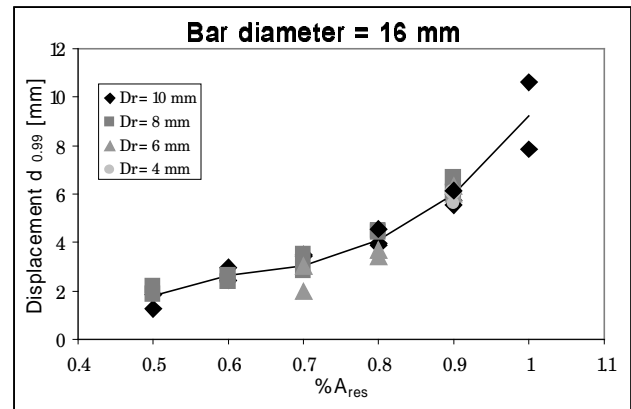
(c)

Figura 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 10 mm (a), di 6 mm (b) e di 4 mm (c).

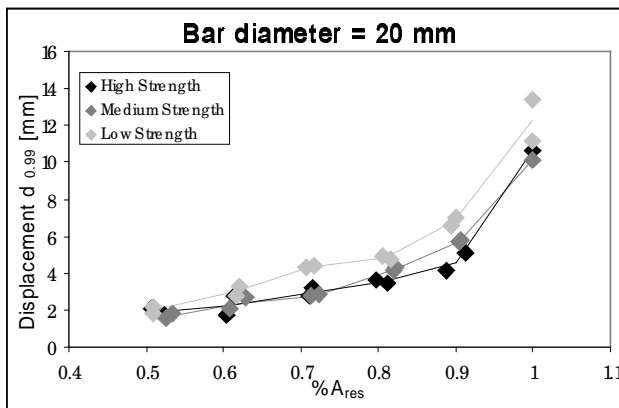
La Figura 5 mostra lo spostamento corrispondente ad un carico post-picco pari al 99% del carico massimo, rilevato sperimentalmente dalle barre di diverso diametro, in funzione della percentuale di area corrosa. Si può notare la notevole perdita di duttilità delle barre danneggiate dalla corrosione localizzata che riduce del 30-40% (rispetto alla barra integra) la duttilità delle barre con sezione ridotta del 5% e dell'80% circa la duttilità delle barre con una percentuale di sezione danneggiata pari al 50% della barra integra. I risultati per la barra $\phi 20$ sono relativi a tre diversi valori della resistenza (Tab. 1), caratterizzati da tre diversi valori della cortecchia esterna martensitica del tondino Tempcore© (Fig. 5c). 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.



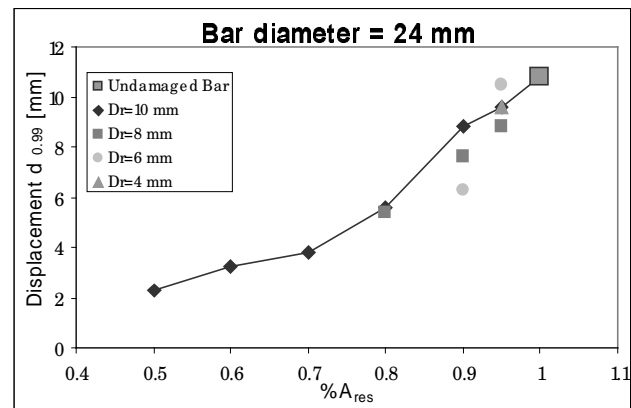
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5 – Diagramma dello spostamento al picco rilevato dalle barre con diametro di 12 mm (a), 16 mm (b), 20 mm (c) e 24 mm (d), con varie percentuali di area danneggiata con frese di diverso diametro.

5 MODELLAZIONE NUMERICA

Al fine di studiare gli effetti della localizzazione delle deformazioni, il comportamento delle barre corrose è stato simulato numericamente, in prima approssimazione, con un semplice programma di calcolo che fornisce il diagramma carico-spostamento della barra a partire dal diagramma sforzo-deformazione del materiale. Il programma mette in conto l'incremento degli sforzi dovuto alla riduzione di sezione e non alla concentrazione degli sforzi dovuto a difetti localizzati [10]. Il legame costitutivo dell'acciaio della barra è schematizzato con una trilatera che riproduce il tratto iniziale elastico, un secondo tratto rettilineo con pendenza pari a 2060 MPa che rappresenta lo snervamento, seguito da un terzo tratto rettilineo che simula l'incrudimento fino al carico di picco. Il diagramma sforzo-deformazione del materiale, adottato dal modello numerico, è stato determinato

sperimentalmente da una prova di trazione diretta su una barra integra, proveniente dalla stessa colata delle barre utilizzate per la prova di corrosione. Per quanto descritto precedentemente, il modello numerico non consente di simulare la strizione che si verifica nella sezione più sollecitata della barra.

Nella simulazione numerica la barra è discretizzata con una serie di piccoli conci con lunghezza scelta in fase di input, assunta nel presente lavoro pari a 5 mm, ognuna caratterizzata da una sezione resistente e dal legame sforzo-deformazione (σ - ϵ) fornito in input. L'applicazione di un carico di trazione provoca sforzi maggiori e quindi maggiori deformazioni, nelle sezioni maggiormente danneggiate che, raggiungendo più rapidamente la deformazione ultima dell'acciaio, provocano la prematura rottura della barra.

Il modello numerico è stato utilizzato per simulare il comportamento a trazione di due barre che hanno subito una corrosione accelerata ottenuta immergendo un provino di calcestruzzo contenente la barra, fessurato in mezzeria, in una soluzione al 5% di cloruri ed accoppiando armature nel calcestruzzo con della grafite in un circuito elettrico [7]. Nella prima barra corrosa (Test 1), la corrosione è prevalentemente superficiale e generalizzata, mentre nella seconda barra (Test 2) è presente una corrosione piuttosto profonda diffusa in più zone della barra (Fig. 6).

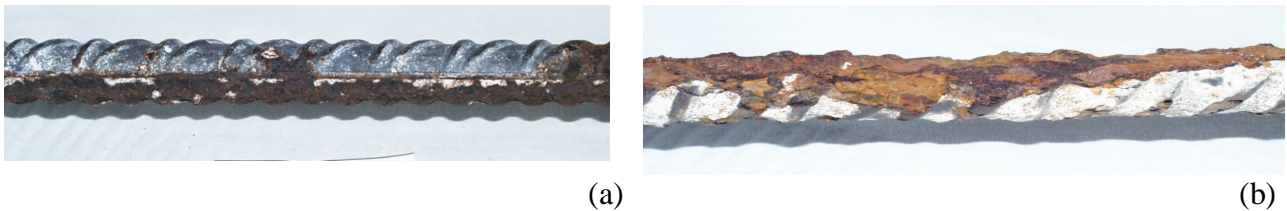


Figura 6 – Fotografie delle barre danneggiate dalla corrosione accelerata: Test 1 (a) e dal Test 2 (b).

Al programma sono state fornite le aree equipesanti di ogni concio, determinate con un rilievo accurato della geometria della barra corrosa, eseguito inserendo l'armatura in un contenitore cilindrico graduato (di precisione) pieno di acqua e misurando le variazioni di volume provocate dall'immersione graduale della barra con passo pari alla lunghezza di un singolo concio (5 mm).

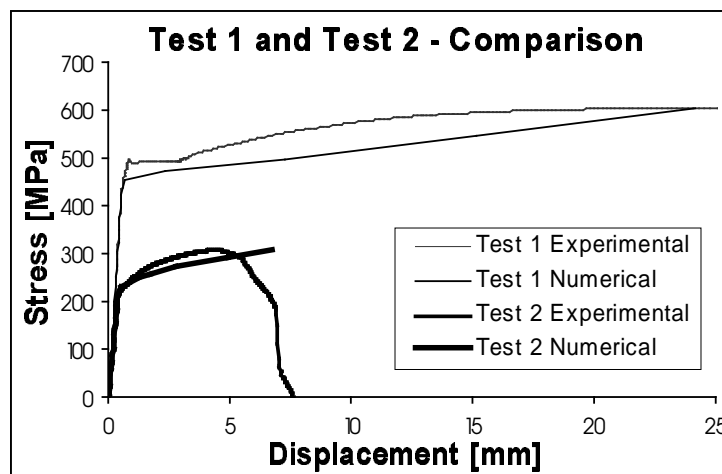


Figura 7 – Diagramma sforzo-spostamento ottenuto sperimentalmente e con la simulazione numerica.

La Figura 7 mostra il confronto tra la curva carico-spostamento ottenuta sperimentalmente e numericamente sulle due barre. Non essendo presente un difetto localizzato, cioè non potendo prevedere a priori la posizione della sezione di rottura, sulla barra sono stati applicati tre trasduttori di spostamento in serie, ognuno su una base di misura di 80 mm (5 diametri), che hanno consentito di misurare gli allungamenti su un tratto centrale di barra con lunghezza di 240 mm. Si può notare

che il modello numerico, sia pur semplice ed approssimato, è in buon accordo con i risultati sperimentali fino al carico di picco, raggiunto il quale il confronto non è più significativo in quanto il modello non include gli effetti di non linearità geometrici necessari per cogliere il fenomeno della strizione lungo la barra. La semplificazione prevede infatti che il terzo ramo della trilatera continui a salire anche dopo aver raggiunto il carico di picco. I risultati evidenziano il diverso stato di danneggiamento delle due barre; infatti, la barra relativa al Test 2, più corrosa (Fig. 8), evidenzia una minor resistenza ma soprattutto una notevole perdita di duttilità.

Le Figure 8 e 9 mostrano, rispettivamente per il Test 1 e 2, la variazione del diametro e dell'area equipesante, rilevati sperimentalmente dalle due barre (Figg. 8a e 9a); nelle stesse figure è mostrata la distribuzione delle deformazioni determinata numericamente in corrispondenza di una forza di trazione (N) pari al 50, al 75 e al 95% del carico massimo rilevato sperimentalmente durante la prova (Figg. 8b e 9b). Si può notare come, sebbene approssimato, il modello evidenzi la concentrazione delle deformazioni nelle zone in cui si ha la riduzione della sezione causata dalla corrosione localizzata della barra.

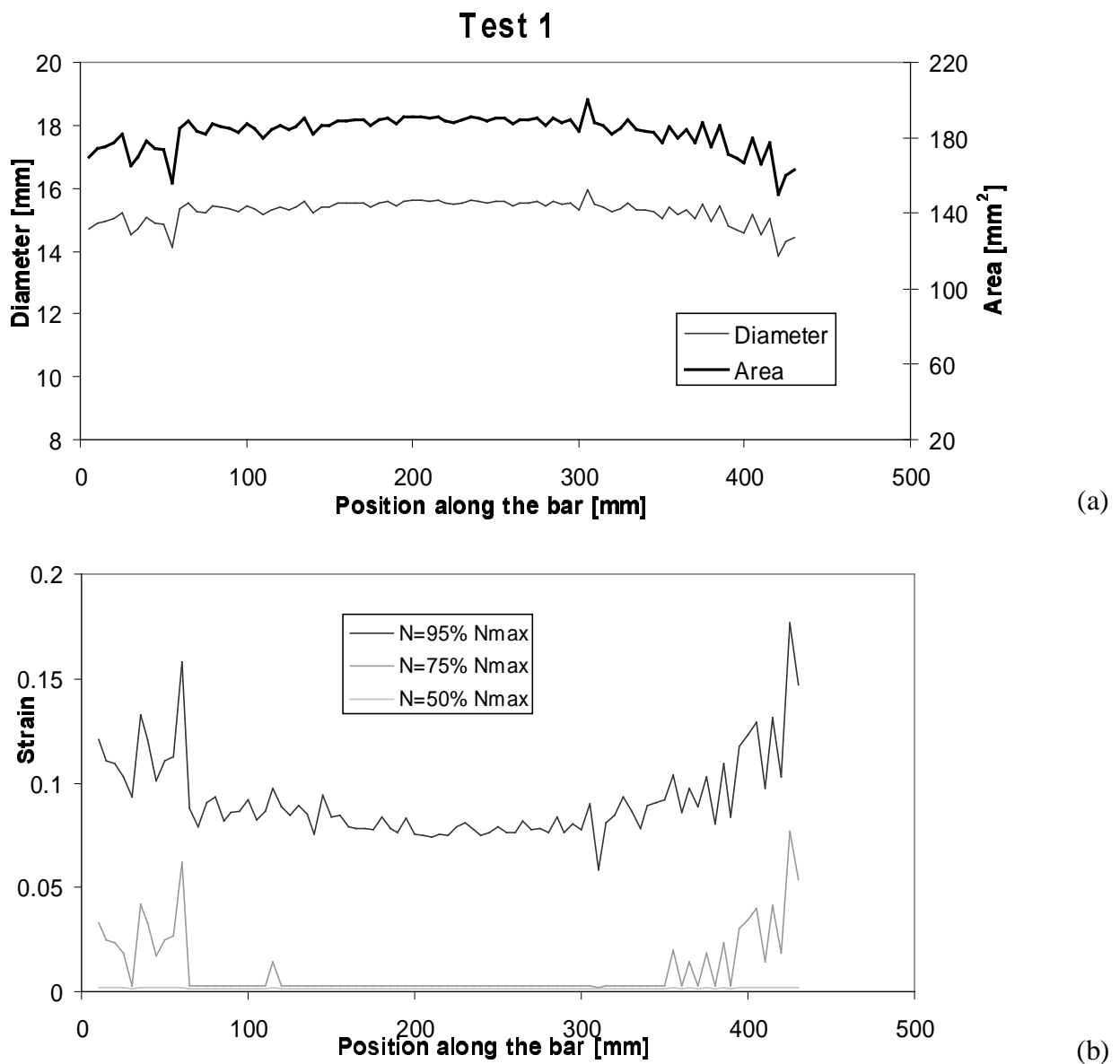


Figura 8 – Diagrammi dell'area e del diametro (a) e delle deformazioni (b) corrispondenti al 50, 75 e 95% del carico massimo, in funzione della posizione lungo la barra utilizzata nel Test 1.

La concentrazione delle deformazioni nel Test 1, con una leggera corrosione, è evidente quando la forza di trazione è tale da plasticizzare le zone maggiormente danneggiate (con gli altri tratti di barra ancora in campo elastico) mentre le deformazioni tendono ad uniformarsi in corrispondenza del carico massimo (Fig. 8b). Viceversa, nel Test 2 con una sezione molto danneggiata dalla corrosione (posizionata a circa 380 mm dall'estremità di sinistra; Fig. 9a), la deformazione nella sezione molto danneggiata rimane sempre notevolmente superiore a quella delle altre sezioni della barra e ne provoca un prematuro collasso con una evidente riduzione dell'allungamento a rottura (Fig. 7). L'elevato valore delle deformazioni determinate numericamente in corrispondenza del 95% del carico massimo, è prevalentemente dovuto alla approssimazione accettata per il terzo ramo della trilatera che, come precedentemente sottolineato, continua anche dopo il raggiungimento del carico di picco.

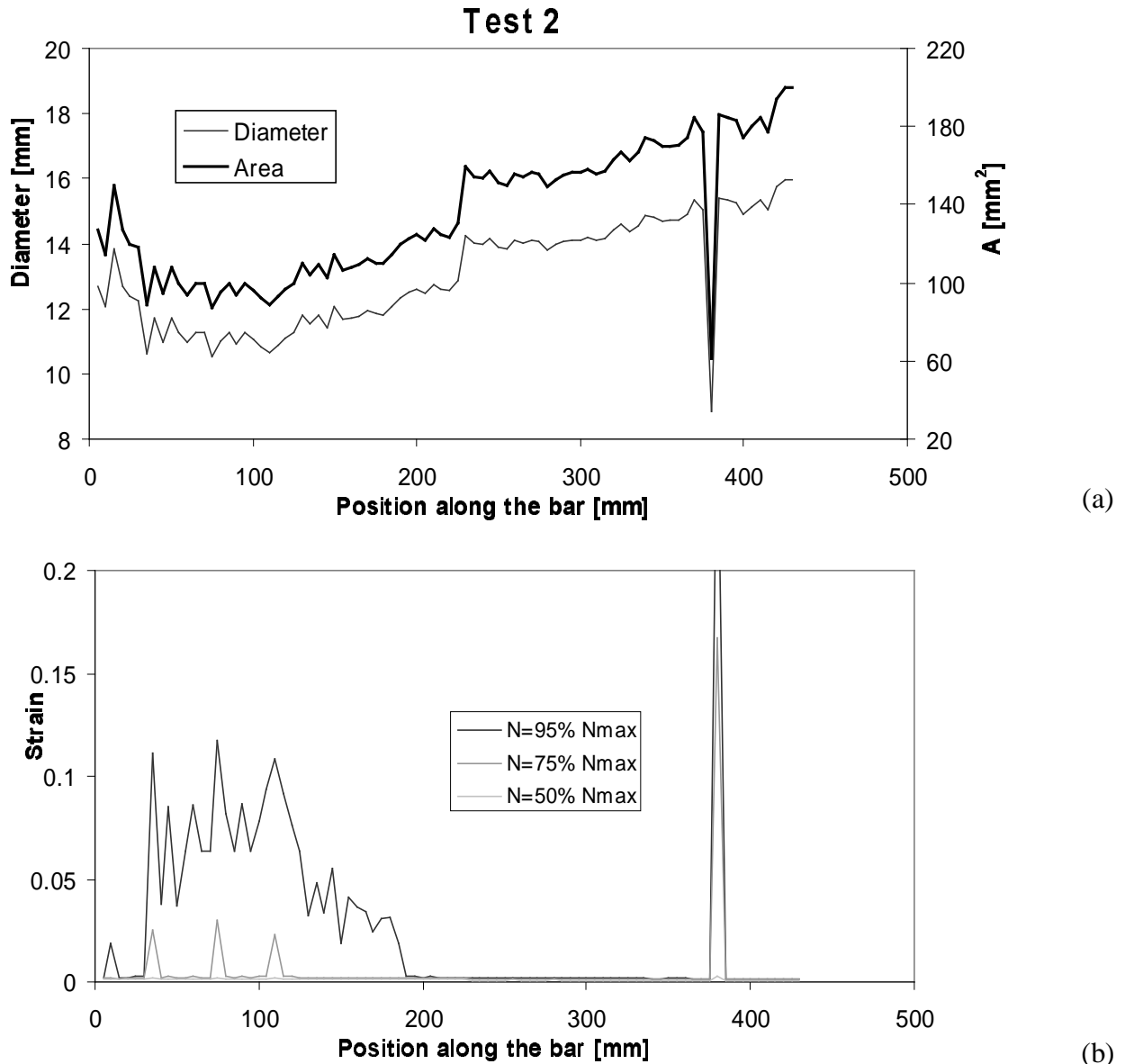
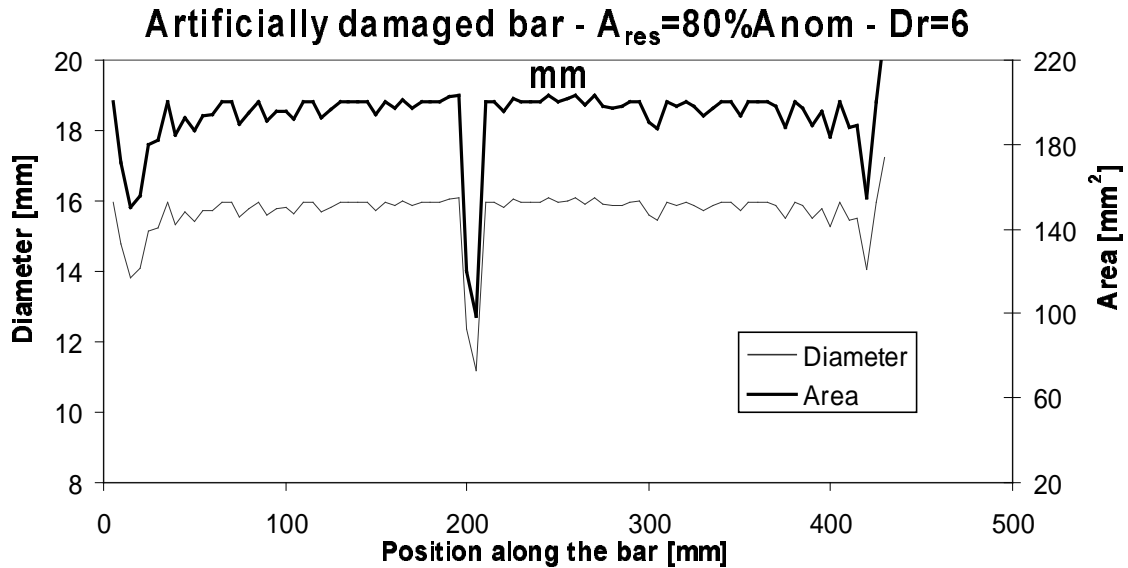


Figura 9 – Diagrammi dell'area e del diametro (a) e delle deformazioni (b) corrispondenti al 50, 75 e 95% del carico massimo, in funzione della posizione lungo la barra utilizzata nel Test 2.

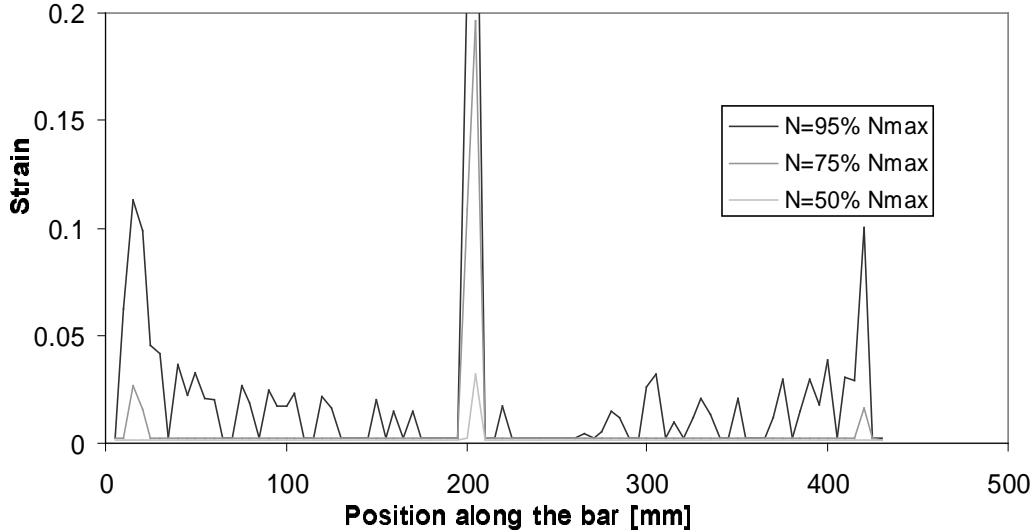
Allo scopo di verificare ulteriormente la localizzazione delle deformazioni nelle barre danneggiate dalla corrosione, si è simulato numericamente il comportamento di una barra corrosa artificialmente (Fig. 1) con una fresa con raggio di 6 mm fino ad ottenere una sezione resistente pari all'80% della barra integra. A tale scopo, la geometria della barra è stata rilevata sempre con intervalli di 5 mm; il diametro e l'area della sezione equipesante sono riportati in Figura 10a che

consente di individuare la posizione del difetto, localizzato a circa metà barra. La variazione del diametro equipesante nel tratto iniziale e finale della barra è prevalentemente imputabile alle nervature.

L'andamento delle deformazioni corrispondenti ai soliti tre livelli del carico di trazione è riportato in Figura 10b; si può ancora notare come le deformazioni, concentrandosi nella zona danneggiata, portino alla rapida rottura della barra causata dal raggiungimento della deformazione ultima nella sezione maggiormente danneggiata dalla corrosione.



a)



(b)

Figura 10 – Diagrammi dell'area e del diametro (a) e delle deformazioni (b) corrispondenti al 50, 75 e 95% del carico massimo, in funzione della posizione lungo la barra corrosa artificialmente con una fresa con raggio di 6 mm e con area asportata pari al 20% della sezione nominale.

6 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il presente lavoro riguarda una sperimentazione su barre di armatura da calcestruzzo armato con danneggiamento locale provocato da corrosione localizzata.

I risultati sperimentali evidenziano come tale corrosione 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 strutturale, legate alla possibilità di ridistribuire le azioni e di dissipare energia ove richiesto. La geometria del difetto, provocato artificialmente, non ha però influenzato particolarmente il comportamento meccanico delle barre.

Un semplice modello numerico ha consentito di mettere in evidenza la concentrazione delle deformazioni nelle sezioni danneggiate dalla corrosione e, sebbene non considerasse l'intensificazione degli sforzi analizzabile con la meccanica della frattura, ha fornito una buona approssimazione del comportamento reale di due barre di armatura danneggiate dalla corrosione

In conclusione, i risultati sperimentali e numerici evidenziano come la corrosione delle armature possa compromettere il buon funzionamento delle strutture in calcestruzzo armato, in particolar modo quando a queste è richiesta una elevata capacità di dissipare energia.

8 BIBLIOGRAFIA

- [1] Federal Highway Administration (US) - 1981, Memorandum, "Bridge Deck Deterioration, a 1981 Perspective", Office of Research, December.
- [2] P. Pedferri - 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. Pedferri 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] D. Broek - 1986, "Elementary Engineering Fracture Mechanics", 4th Edition, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

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.

I 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.