

BOND-SLIP E MECCANICA DELLA FRATTURA NELLE MEMBRATURE DI C.A. SOGGETE A CARICHI CICLICI

Alessandro P. Fantilli, Paolo Vallini

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi, 24 -10129 Torino
Fantilli@polito.it - Vallini@athena.polito.it*

Sommario

Lo studio dei tiranti di conglomerato cementizio armato consente di indagare in modo semplice ed efficace la fessurazione e l'aderenza delle strutture di c.a. soggette a carichi ripetuti. Con riferimento ad alcuni risultati ottenuti da prove condotte su elementi semplicemente tesi, si propone un modello in grado di definire lo stato di sforzo e di deformazione nell'armatura e nel conglomerato, tenendo in conto la meccanica della frattura non lineare del calcestruzzo teso ed il fenomeno di aderenza-scorrimento tra i due materiali. In presenza di azioni cicliche, tanto nel legame τ -slip che regola l'aderenza, quanto nel legame σ -w che definisce il contributo coesivo in fessura, sono considerati gli effetti del danneggiamento, responsabili del comportamento isteretico della risposta strutturale. Con il modello proposto è possibile definire sia il ruolo di questi due legami durante la fase di scarico e di richiusura delle lesioni, sia le modifiche da apportare ai modelli coesivi e di aderenza-scorrimento più utilizzati nelle analisi numeriche.

Abstract

The analysis of reinforced concrete tension members allows researchers to investigate efficiently the concrete fracture and the bond-slip in RC structures subject to repeated loads. Referring to some experimental results obtained from uniaxial tensile tests, a model is proposed to define stresses and strains in steel and concrete, taking into account both the fracture mechanics of concrete and the bond-slip between the two materials. When repeated load are applied, the damage effects with regard to the τ -slip and the σ -w cohesive models, must be also considered. Due to damage, reinforced concrete structures show a hysteretic behaviour. With the proposed model it is possible to define the role of both laws and to refine them during the unloading phase of each cycle, when cracks close up again.

1. Introduzione

Le azioni ripetute possono danneggiare le strutture di c.a. indipendentemente dall'intensità con cui si manifestano. Nella fase di esercizio, quando l'impegno strutturale è lontano dallo stato limite ultimo, generalmente l'azione ciclica può limitare la funzionalità della costruzione senza comprometterne la capacità portante [1]. Invece, nel caso di azioni sismiche, di intensità prossime a quelle massime sopportabili, l'azione ripetuta pur agendo per un breve periodo produce un forte danneggiamento nelle membrature. Si nota in particolare una riduzione della rigidità e della capacità di dissipare energia. In strutture di c.a. complesse, l'analisi della risposta strutturale a seguito di terremoti viene unicamente a dipendere dalla resistenza dei suoi elementi componenti [2]. Il comportamento meccanico di un telaio soggetto ad azioni ripetute, ad esempio, è legato a quello dei nodi trave colonna ove si concentrano le sollecitazioni ed il danno strutturale; per questa ragione tali zone sono normalmente denominate "regioni critiche" [3]. Dalle numerose prove, eseguite sia sui nodi interni [4] che esterni [5] al telaio, appare evidente la perdita di rigidità della struttura con l'aumentare del numero di cicli. Di questa situazione sono principalmente responsabili il fenomeno fessurativo ed il deterioramento del conglomerato, soggetto a forti azioni di trazione e compressione, nonché lo sfilamento delle armature delle travi e dei pilastri a causa della progressiva perdita di aderenza tra le barre d'acciaio ed il circostante conglomerato. Non appare dunque corretto riprodurre il comportamento isteretico delle strutture di c.a. soggette ad azioni sismiche trascurando il fenomeno di aderenza-scorrimento e la meccanica della frattura del conglomerato. Infatti, entrambi i meccanismi condizionano la forma del legame curvatura μ -momento M di strutture soggette a carichi monotoni [6] e di membrature sottoposte ad azioni ripetute, sia nella fase di esercizio che a stato limite ultimo. Per un concio di trave o di colonna, la definizione di μ - M richiede la risoluzione di un sistema di equazioni differenziali ed integrali che si deducono imponendo le condizioni di equilibrio, di congruenza ed il rispetto dei legami costitutivi del materiale e dell'aderenza. Occorre sottolineare che per un elemento inflesso o pressoinflesso le equazioni che governano il problema non differiscono sostanzialmente da quelle di un tirante [7]. In altre parole, il fenomeno di aderenza tra la barra d'armatura ed il conglomerato teso unitamente al meccanismo di frattura del calcestruzzo, in un primo approccio possono essere indagati con riferimento ad una porzione di conglomerato che interagisce con l'armatura. Attraverso il semplice studio dei tiranti è possibile evidenziare in modo razionale quegli aspetti, come ad esempio deformabilità e fessurazione in esercizio e la capacità portante a stato limite ultimo, che riguardano in generale tutte le strutture in conglomerato cementizio armato. In alcuni contributi teorici e sperimentali presenti in letteratura si è studiato il danneggiamento delle strutture semplicemente tese di c. a. soggette ad azioni ripetute. In qualche caso, tuttavia, i risultati non sono utili perché si è indagato il fenomeno di aderenza-scorrimento separatamente da quello fessurativo, attraverso le prove cosiddette di "pullout".

Le prime analisi sugli effetti combinati della fessurazione e della riduzione di aderenza, risalgono alle prove di Bresler & Bertero [8]. In tale contributo, riferito ad un tirante con una singola fessura, attraverso la misura delle deformazioni in vari punti della barra d'acciaio, gli autori misero in evidenza la presenza di tensioni residue nell'armatura al termine delle fasi di scarico di ciascun ciclo. Con riferimento a questa indagine sperimentale, nel presente lavoro si vuole indagare il ruolo dei legami costitutivi sulla risposta strutturale degli elementi semplicemente tesi. In particolare, introducendo un opportuno modello, si intende evidenziare l'interazione tra il legame coesivo che modella la fessurazione del conglomerato e la legge aderenza-scorrimento nell'intorno della fessura. Dal confronto dei risultati numerici con quelli sperimentali, emerge la necessità di apportare modifiche ai legami di aderenza e coesivi per meglio interpretare la fase di scarico.

2. Modellazione dei tiranti di c. a. soggetti ad azioni cicliche

In regime di azioni ripetute, è particolarmente sentita la necessità di far dipendere la deformabilità di un tirante di c.a. tanto dal fenomeno fessurativo, quanto dal meccanismo di aderenza. Per questo motivo, si avanza la proposta di un modello in grado di definire lo stato di tensione e di deformazione nel calcestruzzo e nell'acciaio in un concio, tenendo conto del meccanismo di frattura del calcestruzzo e dell'aderenza-scorrimento tra la barra ed il conglomerato. In modo particolare, si fa riferimento al tirante con una sola fessura rappresentato in Fig. 1a, già indagato in [8, 9].

La formulazione matematica del problema è analoga a quella adottata per lo studio teorico dei nodi di un telaio [10] (Fig. 1): il tratto analizzato è di lunghezza definita, limitato alle estremità da una fessura di ampiezza w nota e da una sezione ove la trazione nel calcestruzzo è nulla (Stadio II). La definizione del comportamento strutturale dell'elemento raffigurato in Fig. 1b, richiede il rispetto di condizioni statiche e geometriche. In particolare, in ciascuna sezione trasversale deve essere soddisfatta l'equazione di equilibrio (Fig. 1c):

$$\sigma_c \cdot A_c + \sigma_s \cdot A_s = N \quad (1)$$

dove σ_c e σ_s sono le tensioni nel calcestruzzo e nell'acciaio ed A_c e A_s le rispettive aree. Analoga condizione di equilibrio riguarda anche l'interfaccia tra i due materiali. Con riferimento ad un tratto elementare di barra d'armatura di lunghezza dz , deve risultare (Fig. 1d):

$$\frac{d\sigma_s}{dz} = \frac{p_s}{A_s} \cdot \tau(s(z)) = f_1(s(z)) \quad (2)$$

dove p_s è il perimetro delle barre d'acciaio e $\tau(s(z))$ è lo sforzo di aderenza.

Le condizioni di congruenza sono applicate sia nella singola sezione, dove si impone che le deformazioni di acciaio ϵ_s e calcestruzzo ϵ_c rimangano piane (Fig. 1e), sia all'interfaccia tra

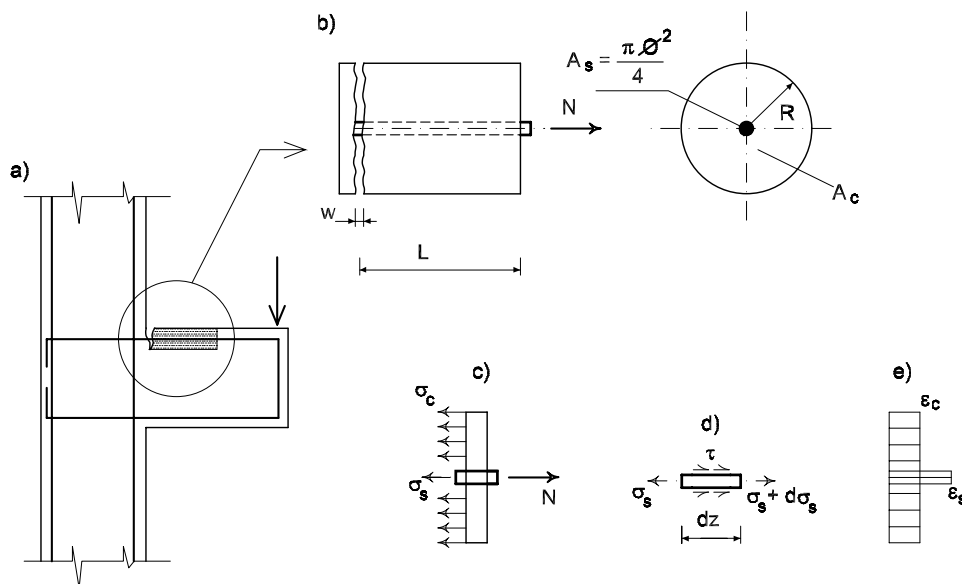


Figura 1
Il concio di tirante considerato nel modello proposto.

i due materiali. In tali zone, lo scorrimento $s(z)$ (o slip) rappresenta la differenza di spostamento di due punti originariamente affacciati sulla superficie di contatto tra acciaio e calcestruzzo.

Dalla derivazione di $s(z)$ si ricava la seguente condizione:

$$\frac{ds}{dz} = \varepsilon_s(z) - \varepsilon_c(z) = f_2(z). \quad (3)$$

La soluzione del problema richiede l'integrazione numerica delle equazioni differenziali (2) e (3) con metodi di tipo esplicito, essendo le funzioni f_1 ed f_2 incognite [9]. Si suppone inoltre che l'azione esterna generi una progressiva crescita dell'ampiezza di fessura w (Fig. 1b), solo in tal caso è garantita l'univocità di risultato. Nel concio in esame, stabilito il valore di w , nell'estremità fessurata ($z = 0$) è noto lo scorrimento $s(0) = w/2$. Esplorando le sezioni che si susseguono tra la fessura ed il bordo libero, lo scorrimento si riduce, fino a cambiare segno. Nello stesso tratto, per effetto delle tensioni di aderenza τ , lo sforzo di trazione viene progressivamente trasferito dall'acciaio al calcestruzzo. Alla distanza L (lunghezza del concio), la condizione di contorno corrisponde alla situazione di Stadio II, ove la tensione nel calcestruzzo è nulla. Dal punto di vista computazionale, per un assegnato valore di w , occorre determinare quel particolare valore dello sforzo normale N che, attraverso la soluzione del sistema di equazioni (1-3), permette di raggiungere lo Stadio II nella sezione distante L dalla fessura.

3. Le leggi costitutive

Per completare la formulazione del problema, alle precedenti equazioni (1-3) devono associarsi le leggi costitutive dei materiali, la relazione τ - s tra gli sforzi di aderenza e gli scorrimenti ed il legame tensione-ampiezza di fessura σ - w . Per l'acciaio e per il calcestruzzo si ipotizza un comportamento lineare elastico, definito dai rispettivi moduli elastici E_s (Fig. 2a) ed E_c (Fig. 2b). Questa assunzione è giustificata dal limitato impegno dei materiali nelle condizioni di esercizio. Viceversa, quando nel calcestruzzo lo stato di tensione supera la resistenza a trazione f_{ct} si forma una fessura, sulle cui facce, ipotizzate piane e parallele, lo stato di sforzo è calcolato in accordo con il "Continuous Function Model" di Fig. 2c [11]. Il legame di aderenza-scorrimento è modellato con riferimento alla relazione τ - s rappresentata in Fig. 2d e Fig. 2e [12]; tale modellazione è comprensiva dei fenomeni che si possono manifestare per effetto della fessurazione parziale (fessure che non appaiono in superficie) e delle fessure di "splitting".

Nel legame σ - w e nel modello τ - s , è necessario considerare, rispettivamente, la richiusura delle fessure e l'eventuale cambio di segno degli scorrimenti a seguito dell'azione ciclica. Per tale ragione oltre alla curva di inviluppo, il "Continuous Function Model" riportato in Fig. 2c, prevede anche un ramo di scarico, per ipotesi coincidente con quella di ricarica, definito dalla seguente equazione:

$$\sigma = \sigma_p + \frac{f_{ct}}{3 \frac{w_p}{w_c} + \beta} \left[0.014 \left(\log \frac{w}{w_p} \right)^5 - 0.57 \sqrt{\frac{w}{w_p}} \right] \quad (4)$$

dove σ_p e w_p sono le coordinate del punto A sulla curva di inviluppo e $\beta = 0.4$. Nel legame di aderenza [12] la curva di inviluppo è composta da quattro parti, da cui hanno origine i rami lineari di scarico e ricarica (Fig. 2d).

Nel presente lavoro, l'analisi del tirante non è limitata al solo carico, scarico e successivo ricarica, pertanto nella definizione dei legami di aderenza τ - s e σ - w devono includersi gli effetti prodotti dal danneggiamento.

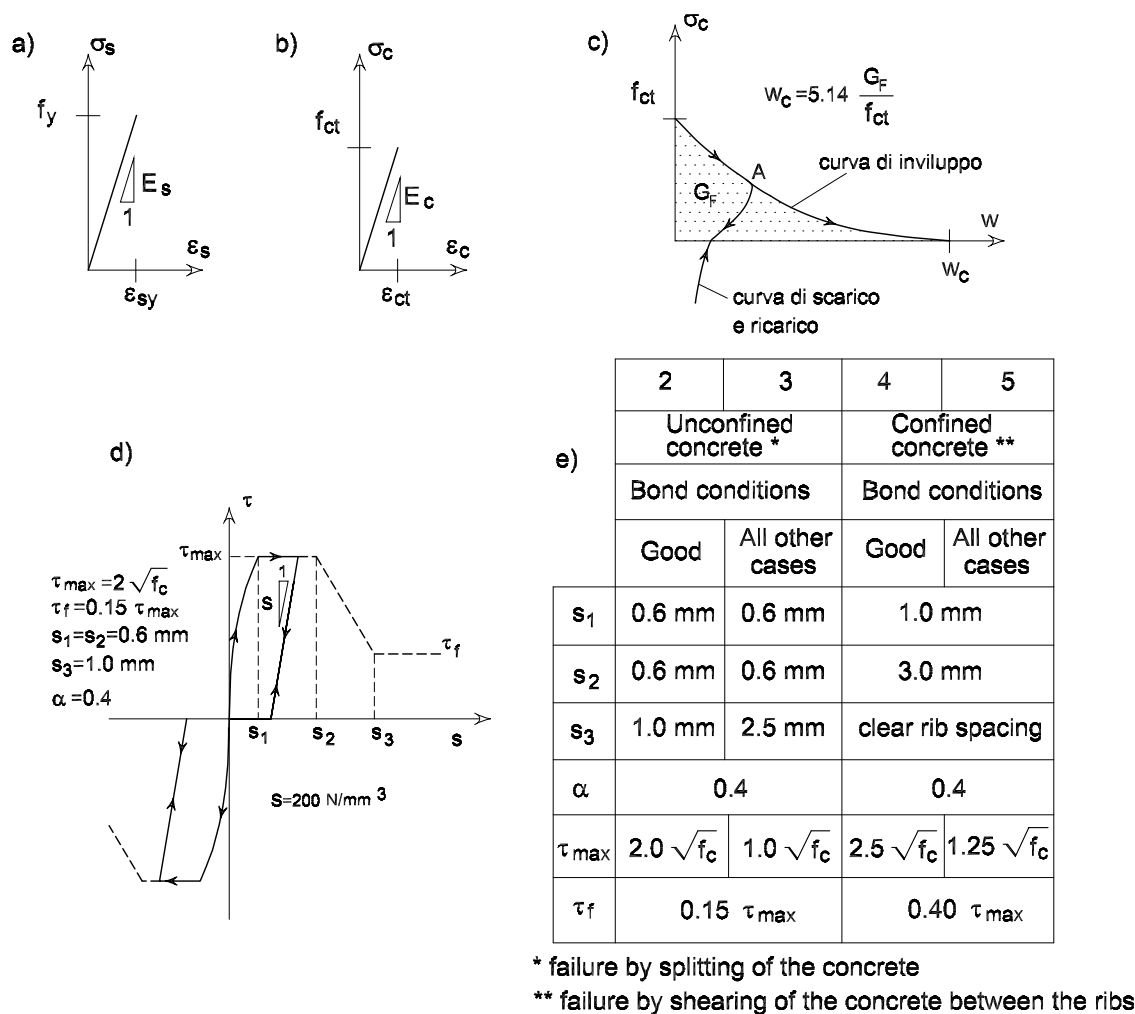


Figura 2
 Le leggi costitutive adottate nel modello proposto.

3.1 Il danneggiamento nei legami $\sigma-w$ e $\tau-s$

Le curve di involucro dei legami disegnate in Fig. 2c e Fig. 2d rappresentano le leggi costitutive relative al caso di carichi monotoni, mentre i rami di scarico possono essere impiegati solo nelle analisi in cui è possibile escludere il danneggiamento [13]. Anche per queste situazioni è necessario apportare alcune modifiche alla legge aderenza-scorrimento [12] ed al legame coesivo [11]. La crescita graduale delle fessure e la possibile richiusura, in presenza od in assenza di danneggiamento, rende complicata l'identificazione della zona di calcestruzzo confinato e non. A tale definizione, come è noto, è legata la riduzione di aderenza in uno spazio convenzionalmente misurato da una distanza pari a cinque volte il diametro delle barre d'armatura nell'intorno della fessura. Si tratta di una grossolana approssimazione della realtà fisica, poiché prescinde dall'apertura delle fessure che dovrebbe invece influenzare la dimensione della zona a limitata aderenza. L'ampiezza delle lesioni può infatti crescere gradualmente, mentre nell'approccio normativo [12] la zona soggetta ad una riduzione di aderenza è costante. Analogamente, in presenza di scarichi è possibile che sulle facce della fessura siano presenti tensioni di compressione ed un conseguente confinamento, che in teoria non dovrebbe richiedere la riduzione dell'aderenza. Onde evitare tali incertezze, in questa sede si preferisce solo definire un

legame il danneggiamento senza la riduzione di aderenza nell'intorno della fessura. Il modello adottato, schematicamente illustrato in Fig. 3a e Fig. 3b, prevede la curva di inviluppo di Fig. 2c ed un comportamento isteretico ai vari cicli di carico in accordo con il modello di Pochanart & Harmon [14]. In tal modo il problema della riduzione di aderenza nell'intorno della fessura ricade sulla corretta definizione del ramo di scarico della legge σ - w di Fig. 2c [11]. Come evidenziato nelle prove sperimentali [8], tale legame non può essere utilizzato con soddisfacente precisione nell'analisi dei tiranti di calcestruzzo armato, in cui durante la fase di scarico si presentano fessure di ampiezza $w > w_c$ (Fig. 2c) [9]. In queste situazioni gli sforzi di coesione sono nulli, ma non appena la fessura si richiude si producono non trascurabili tensioni di compressione. Quando $w > w_c$, si suppone che la curva di scarico e carico sia definita sempre dall'equazione (4), valutata per $w_p = w_c$ (Fig. 3c). Si ipotizza inoltre una tensione di compressione massima pari ad $f_{ct}/2$. In altre parole, si suppone che per $w > w_c$, i cicli di carico e scarico producano un danneggiamento simile a quello prodotto dai cicli interni alla curva di inviluppo di σ - w [15].

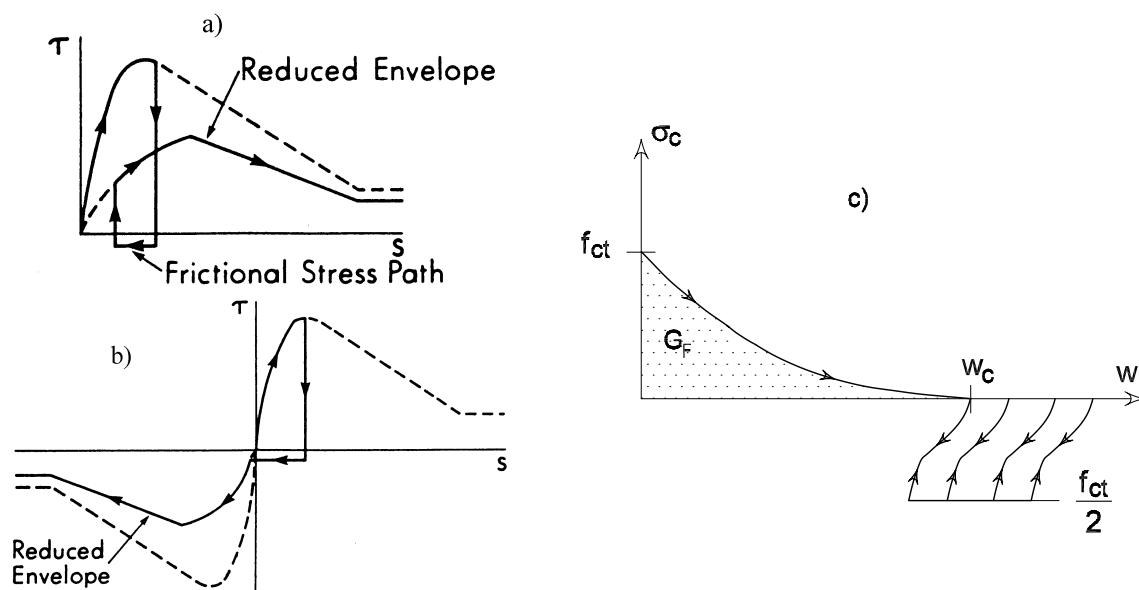


Figura 3
Il danneggiamento nei legami di aderenza e coesivo.

4. Confronto con le risultanze sperimentali

L'elemento indagato in [8], simile al tirante rappresentato in Fig. 1, consiste in un cilindro di calcestruzzo armato con una sola barra d'acciaio, alle cui estremità libere è applicato il carico N . In Fig. 4a sono riportate le caratteristiche geometriche e meccaniche dell'elemento di Fig. 2b e la variazione dell'azione esterna N all'undicesimo ciclo. La sperimentazione ha permesso di ricavare le deformazioni ϵ_s lungo l'armatura per livelli discreti dell'azione applicata. Poiché il livello di sollecitazione si è sempre mantenuto al di sotto del limite di snervamento, appare corretta l'ipotesi di comportamento lineare elastico dell'acciaio. In Fig. 4b, le deformazioni ϵ_s ricavate con il modello proposto sono poste a confronto con i valori misurati sperimentalmente durante la fase di ricarico dell'undicesimo ciclo. In particolare, per $N = 0$ si nota la presenza di tensioni residue nell'acciaio in corrispondenza della lesione, dove, a seguito della richiusura della fessura durante lo scarico, sono presenti sforzi di compressione nel calcestruzzo. La simulazione numerica appare in buon accordo con i dati sperimentali, a convalida dell'approccio proposto e delle leggi costitutive adottate.

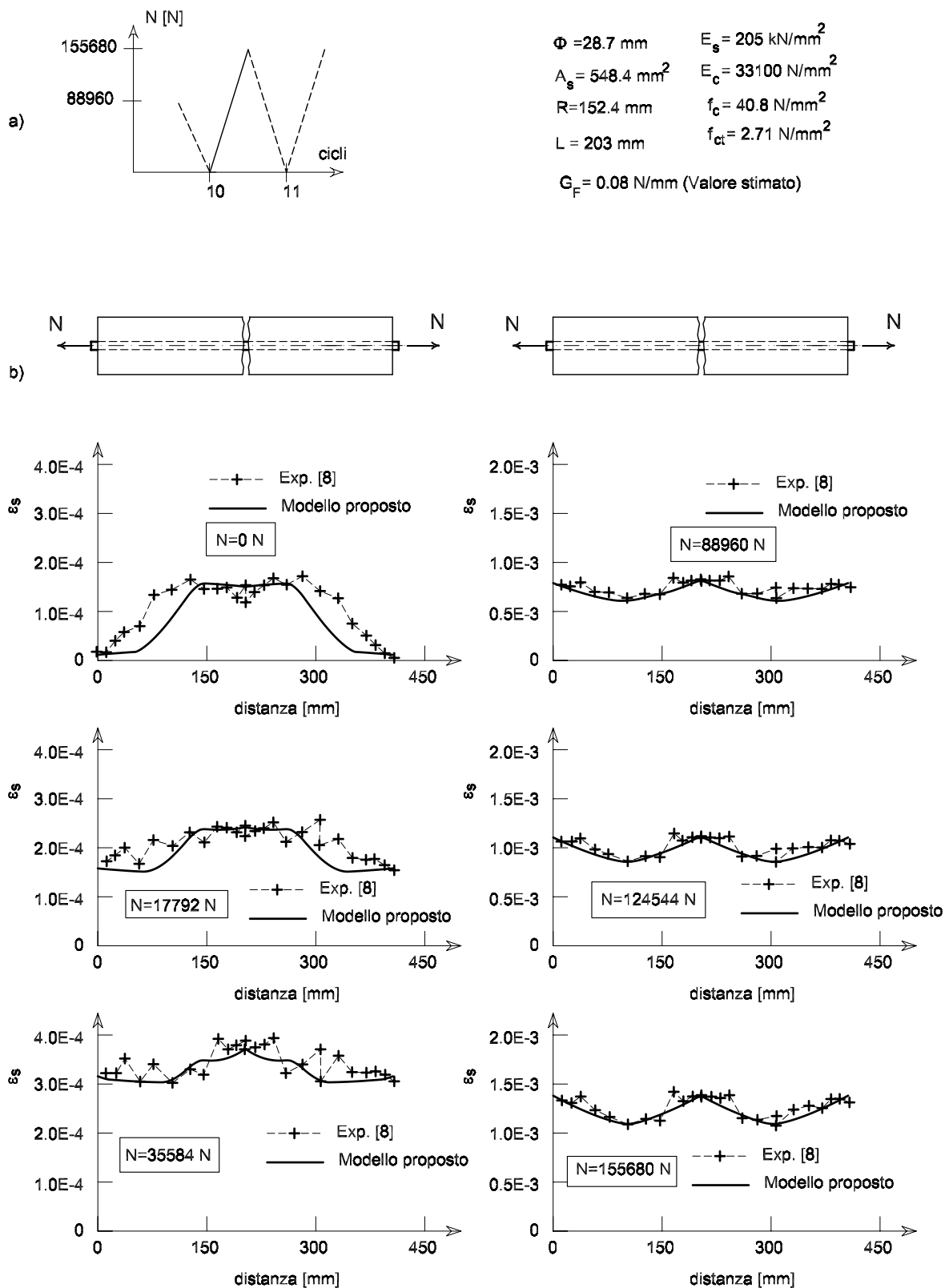


Figura 4
I risultati del modello proposto e le misure sperimentali [8].

5. Osservazioni Conclusive

La necessità di controllare il fenomeno fessurativo nelle strutture soggette a carichi ciclici, ha giustificato gli sforzi rivolti alla realizzazione di un modello meccanico in grado di definire lo stato di tensione e di deformazione in un tirante di c.a., in presenza di una singola fessura. Attraverso questa modellazione si è evidenziato il ruolo giocato dall'aderenza e dalla meccanica della frattura anche per ampiezze di fessura notevoli. Con tale approccio è possibile definire con maggiore rigore i legami costitutivi da adottare, al fine di riprodurre correttamente lo stato di coazione che si sviluppa nella barra d'acciaio e nel calcestruzzo allo scarico. Il buon accordo con i risultati sperimentali lascia prevedere interessanti sviluppi anche per la modellazione delle strutture inflesse.

Bibliografia

- [1] Comité Euro-International du Béton (CEB), “*Serviceability Model*”, CEB Bulletin d'information n. 235, **1997**.
- [2] Bertero V.V., Popov E.P., “*Seismic Behaviour of Ductile Moment-Resisting Reinforced Concrete Frames*”, In Reinforced Concrete Structures in Seismic Zones, ACI Special Publication **SP-53**, 247-291, **1977**.
- [3] Paulay T., Park R., Priestley J. N., “*Reinforced Concrete Beam-Column Joints Under Seismic Actions*”, ACI Journal, **75(11)**, 585-593, **1978**.
- [4] Durrani A. J., Wight J. K., “*Behavior of Interior Beam-to-Column Connections Under Earthquake-Type Loading*”, ACI Journal, **82 (3)**, 343-349, **1985**.
- [5] Ehsani M. R., Wight J. K., “*Exterior Reinforced Concrete Beam-to-Column Connections Subjected to Earthquake-Type Loading*”, ACI Journal, **82 (4)**, 492-499, **1985**.
- [6] Fantilli A. P., Ferretti D., Iori I., Vallini P., “*Flexural Deformability of Reinforced Concrete Beams*”, Journal of Structural Engineering-ASCE, **124(9)**, 1041-1049, **1998**.
- [7] Kwak H. G., Kim S. P., “*Nonlinear Analysis of RC Beam Subject to Cyclic Loading*”, Journal of Structural Engineering-ASCE, **127(12)**, 1436-1444, **2001**.
- [8] Bresler B., Bertero V., “*Behavior of Reinforced Concrete Under Repeated Load*”, ASCE Journal of Structural Division, **94(7)**, 1567-1590, **1968**.
- [9] Fantilli A.P., Vallini P., “*A study on R/C tension members under repeated load*”, In Fracture Mechanics of Concrete Structures IV, Cachan-France, 1557-1566, **2001**.
- [10] Ayoub A., Filippou F. C., “*Mixed formulation of Bond-Slip Problems Under Cyclic Loads*”, Journal of Structural Engineering-ASCE, **125(6)**, 661-671, **2001**.
- [11] Hordijk D. A., “*Local approach to fatigue of concrete*”, Doctoral Thesis, TU-Delft, **1991**.
- [12] Comité Euro-International du Béton (CEB), “*CEB-FIP Model Code 1990*”, CEB Bulletin d'Information 213-214, **1993**.
- [13] Eligehausen R., Popov E.P., Bertero V.V., “*Local Bond Stress-Slip Relationship of Deformed Bars Under Generalized Excitations*”, Report UCB/EERC 83-23, University of California, Berkeley, **1984**.
- [14] Pochanart S., Harmon T., “*Bond Slip Model for Generalized Excitations Including Fatigue*”, ACI Materials Journal, **86(5)**, 465-474, **1989**.
- [15] Plizzari G. A., Cangiano S., Alleuzo S., “*The Fatigue Behaviour of Cracked Concrete*”, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, **20(8)**, 1195-1206, **1997**.