

Politecnico di Milano
Corso di Perfezionamento per le
Costruzioni in Cemento Armato
Fratelli Pesenti

STUDI E RICERCHE
n°4 1982

Italcementi S.p.A. – Bergamo Editrice



SUL FENOMENO DELLO SCOLLAMENTO PROGRESSIVO E
SUI MOVIMENTI DELLE ARMATURE IN PROSSIMITA'
DI FESSURE IN VIA DI FORMAZIONE

Ezio Giuriani^(o) , Piero Gelfi^(oo)

SOMMARIO

Per il confronto con i risultati teorici, viene studiato sperimentalmente il fenomeno dello scollamento progressivo della barra di armatura nelle vicinanze di una fessura e i suoi movimenti rispetto al calcestruzzo circostante fin dal momento nel quale la fessura inizia ad aprirsi. La tecnica sperimentale è quella interferometrica del moiré per sovrapposizione di retini, i quali applicati nella faccia di un prisma di calcestruzzo consentono di rilevare attraverso le frange di interferenza gli spostamenti relativi: in particolare quelli dell'armatura che è disposta parallelamente alla faccia e senza ricoprimento in modo da risultare "visibile" dall'esterno.

I risultati sono in buon accordo con quelli teorici ottenuti dallo studio del problema dell'aderenza impiegando legami locali sforzo di aderenza-slitamento del tipo a trilatera.

(o) Professore Associato di Tecnica delle Costruzioni, Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano, Milano, Italia.

(oo) Incaricato per l'Attività Didattica Sussidiaria della Sezione Staccata di Brescia del Politecnico di Milano, Brescia, Italia.

1. PRESENTAZIONE DEL PROBLEMA

Per le strutture in calcestruzzo armato il passaggio dal primo stadio non fessurato al secondo fessurato avviene attraverso una fase transitoria durante la quale le fessure iniziano a formarsi nelle zone più sollecitate e via via progrediscono aumentando l'ampiezza e la lunghezza.

La rapidità della evoluzione del quadro fessurativo e della penetrazione delle fessure è funzione di molteplici fattori, a volta anche complessi, dipendenti dai carichi, dai vincoli e anche dalle caratteristiche delle barre, soprattutto nei riguardi dell'aderenza.

Frequentemente la penetrazione delle fessure aumenta progressivamente col carico, ma a volte può anche essere istantanea come per le travi con sezione ad armatura molto debole.

Quando l'evoluzione del quadro fessurativo caratterizza in modo rilevante il comportamento dell'intera struttura, si rende necessario e importante lo studio locale della singola fessura, sia per riguardo alla sua penetrazione sia per riguardo alla sua apertura. Molto studiato attualmente è anche il problema della penetrazione della fessura nel calcestruzzo non armato, per il quale si presta l'approccio della meccanica della frattura opportunamente adattato alle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo.

Quando si tratta di calcestruzzo armato risulta comunque determinante l'effetto dell'armatura che contrasta l'apertura della fessura.

L'importanza del problema, già sottolineata in /1/, richiede un approfondimento delle conoscenze sul comportamento dell'armatura soprattutto quando l'apice di una fessura, che avanza in direzione trasversale alla barra, raggiunge l'armatura oltrepassandola poi di poco. In questa fase l'effetto di "cucitura" dei lembi della fessura da parte dell'armatura è determinante e la sua capacità a contrastare l'apertura e l'avanzamento della fessura dipende esclusivamente dalla entità degli sforzi di aderenza che si manifestano nell'interfaccia armatura-calcestruzzo. Data la modesta ampiezza della fessura in prossimità dell'apice, la sua apertura può essere compatibile con la sola deformabilità allo scorrimento del calcestruzzo senza che si manifestino slittamenti finiti nell'interfaccia armatura-calcestruzzo.

In questa situazione l'impegno a trazione dell'armatura aumenta localmente

a causa degli sforzi di aderenza conseguenti all'"incollaggio" dell'armatura al calcestruzzo (fase dell'adesione chimica); in Fig. 1 b,c,d vengono illustrate tre possibili situazioni che possono verificarsi per differenti situazioni al contorno. Superata la resistenza dell'adesione chimica, l'armatura comincia a scollarsi dal calcestruzzo lungo tratti via via crescenti, lungo i quali è possibile lo spostamento relativo sulla interfaccia armatura-calcestruzzo. In questa situazione (Fig. 1-e) l'ampiezza della fessura cresce e quindi anche l'avanzamento dell'apice può riprendere con rapidità. L'azione di "cucitura" comunque continua e anzi può aumentare in quanto, crescendo gli slittamenti, aumentano gli sforzi di aderenza trasmessi per ingranamento nel calcestruzzo delle nervature della barra.

Tale effetto può farsi sentire anche quando l'apice della fessura si è ormai molto allontanato dalla barra come in Fig. 1-f).

Lo studio della propagazione della fessura risulterebbe poco affidabile senza una conoscenza sicura e dettagliata del fenomeno qualitativamente sopra descritto, il cui effetto statico può essere illustrato bene mediante il legame tra lo sforzo di trazione dell'armatura nella sezione fessurata e l'apertura Δ della fessura stessa (Figg. 1-b,c,d,e,). In una precedente ricerca teorica /3/ si sono ricavati tali legami in forma chiusa considerando il fenomeno dello scollamento progressivo descritto precedentemente e, riguardo all'aderenza, considerando nell'interfaccia armatura-calcestruzzo legami locali sforzo di aderenza - slittamento del tipo a trilatera, che appaiono in buon accordo con le curve sperimentali nel campo di piccoli spostamenti relativi.

Occorre osservare che la stessa soluzione teorica, applicabile anche quando lo stato fessurativo è più avanzato, può essere impiegata utilmente per la risoluzione di altri problemi delle strutture in calcestruzzo armato che sono altrettanto attuali di quelli della propagazione delle fessure. Al riguardo si ricordi il calcolo delle effettive deformazioni degli elementi fessurati nei quali le armature risentono degli effetti irrigidenti prodotti dal calcestruzzo teso compreso tra le fessure /4/, ad opera dell'aderenza. Di molto interesse poi per gli elementi bidimensionali, il problema della trasmissione del taglio per ingranamento degli inerti tra i lembi della fessu-

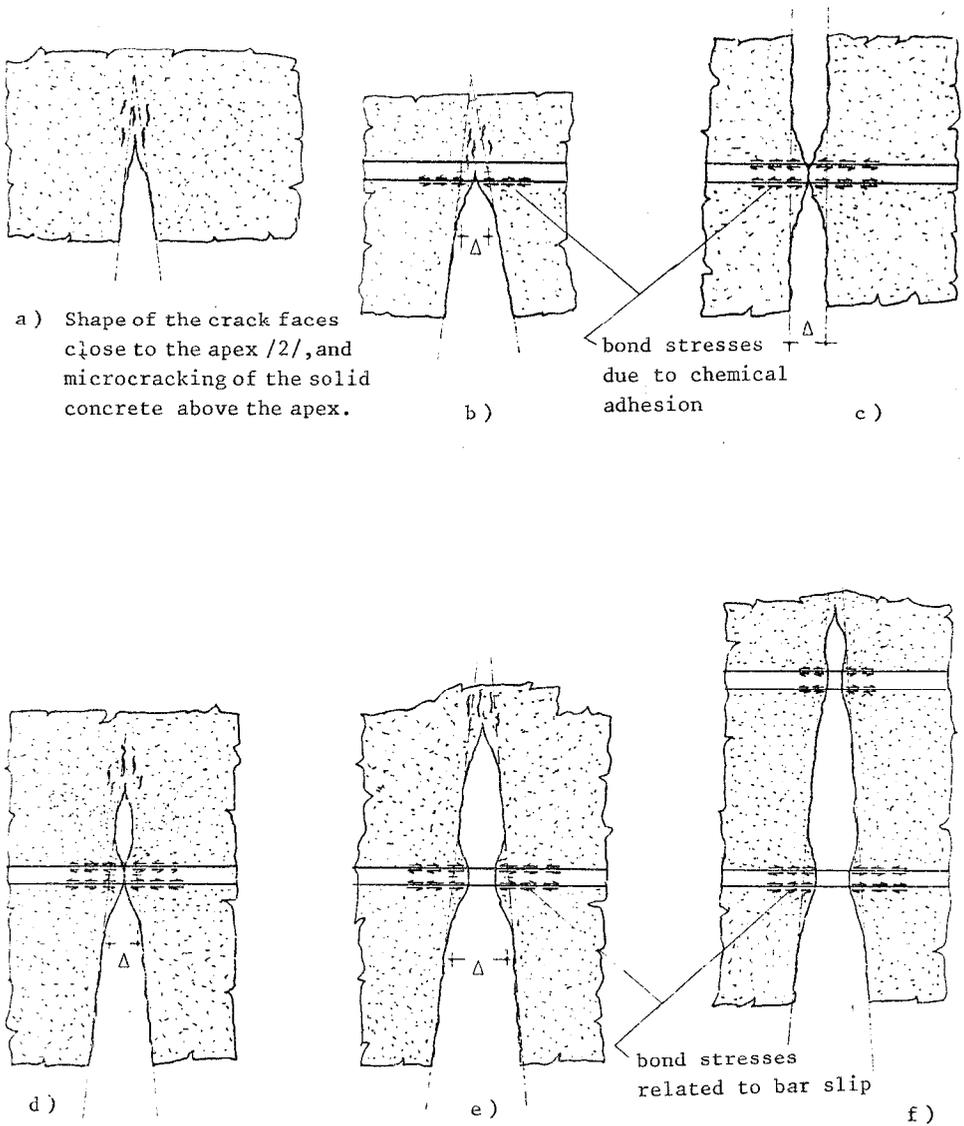


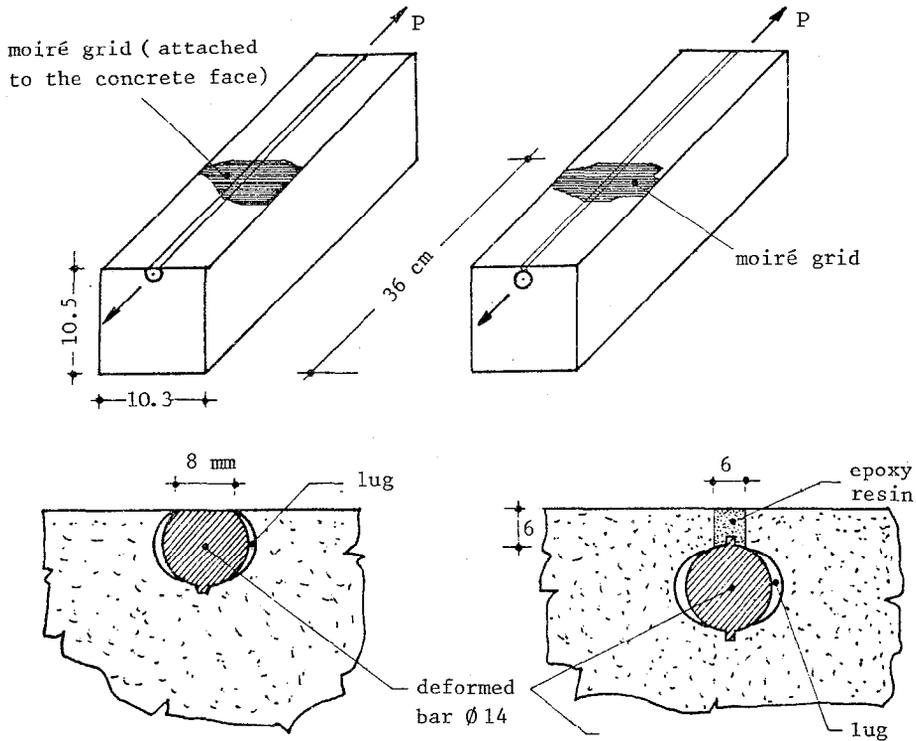
FIG. 1 - Reinforcement effects when the crack propagates as far as the bar or beyond it.
 Effetti dell'armatura quando la fessura si propaga vicino ad essa.

ra /5/, la quale può svilupparsi in virtù di una efficace azione di contenimento che contrasti l'apertura della fessura. Tale azione di contenimento può essere esercitata dall'armatura trasversale alla fessura, la quale al crescere dell'apertura aumenta la sua sollecitazione di trazione locale conformemente alla meccanica dello scollamento progressivo.

La presente ricerca sperimentale si propone in primo luogo di mostrare e illustrare con immagini significative ottenute mediante l'interferometria, le modalità dello scollamento progressivo e dei movimenti relativi armatura-calcestruzzo nell'intorno della fessura, quando la fessura perpendicolare alla barra inizia ad aprirsi e fino a quando, al crescere della apertura, viene raggiunto e superato lo snervamento dell'armatura. In secondo luogo lo scopo della ricerca è quello di controllare i risultati teorici sui legami sforzo dell'armatura-apertura di fessura soprattutto nel campo dei piccoli spostamenti, problema che a parere dell'autore avrà importanza crescente date le molteplici applicazioni che si rendono possibili.

La tecnica sperimentale è quella interferometrica del moiré per sovrapposizione, già largamente impiegata per lo studio della fessurazione di elementi di calcestruzzo armato /2/. Tale tecnica si è dimostrata particolarmente adatta per il problema allo studio, in quanto permette di misurare con continuità sia gli spostamenti relativi tra armatura e calcestruzzo lungo la barra, sia la penetrazione e l'apertura delle fessure. I vantaggi sono particolarmente evidenti quando iniziano ad aprirsi le fessure e quando si snerva l'acciaio dati i notevoli gradienti dello spostamento relativo e delle deformazioni in gioco nell'intorno della fessura.

In tal caso le tecniche già sperimentate da alcuni autori con l'impiego degli estensimetri elettrici disposti lungo la barra, non fornirebbe un risultato affidabile in quanto le misure sarebbero puntuali e inoltre le dimensioni degli estensimetri sarebbero maggiori di quelle dei tratti dove il fenomeno subisce rapide variazioni. Si tenga presente poi che la tecnica interferometrica ha il vantaggio di fornire direttamente lo slittamento.



Case a) : the bar appears on the specimen surface.

Case b) : the bar is completely covered by the concrete.

FIG. 2 - Characteristics of the two different test specimens.

Caratteristiche dei due provini il primo con armatura affiorante e il secondo con armatura ricoperta.

Mechanical characteristics of concrete

- Average cylindrical strength : $f_c = 33.8 \text{ N/mm}^2$ measured on three cylinders.

- Elastic modulus : $E_c = 38360 \text{ N/mm}^2$.

Geometrical characteristics of the deformed bar used in the tests

$d = 14$ mm nominal diameter

$\phi = 13.95$ mm diameter of the equivalent round bar

$c = 8$ mm pitch of the ribs

$a_m = .8$ mm average height of the ribs

$\beta = 56^\circ$ angle of the ribs

$l_R = 20$ mm length of the ribs

$D_K = 13.2$ mm diameter of the core of the bar

$$I_R = \frac{2 a_m l_R \cos(90-\beta)}{\pi D_K c} = .818 \text{ bond index}$$

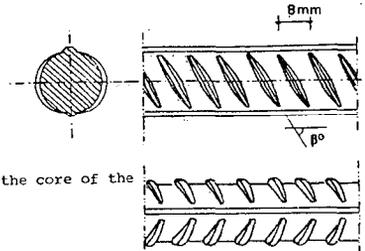


FIG. 3 - Characteristics of concrete and reinforcement.

Caratteristiche del calcestruzzo e delle armature.

2. TECNICA SPERIMENTALE E MODALITA' DI PROVA

Lo studio sperimentale viene condotto con la tecnica interferometrica del moiré per sovrapposizione di retini applicati sulla faccia laterale del prisma di calcestruzzo di Fig.2 adiacente alla quale è disposta l'armatura. Il retino incollato al calcestruzzo è ottenuto da una lastra fotografica del tipo "stripping" cioè con supporto staccabile dalla gelatina fotosensibile, in modo che complessivamente il modesto spessore del retino e del collante^(*), non opponendo resistenza, non influenza gli spostamenti relativi tra il calcestruzzo e l'armatura, e in altre parole la formazione delle fessure /2/. Il retino di riferimento, vincolato alla sezione di estremità del prisma, viene fatto aderire all'altro con interposizione di olio. Ogni movimento relativo tra il retino incollato che si deforma come la faccia del prisma (e si lacerava dove nasce una fessura) e il retino indeformato di riferimento, provoca le frange di interferenza che sono linee di livello dello spostamento ortogonale alle linee del retino: ogni frangia rappresenta un incremento di spostamento pari a 2.54 centesimi di millimetro essendo i retini da 1000 linee/pollice.

Per cogliere i movimenti dell'armatura si sono adottate due tecniche differenti chiaramente illustrate nelle figure 2 a) e b) :

la prima consiste nel fare affiorare sulla faccia del prisma di calcestruzzo e quindi dei retini la stessa armatura ottenuta da una usuale barra di 14 mm di diametro, opportunamente lavorata lungo il fianco in modo da ottenere una superficie piana complanare alla faccia del prisma (Fig.2 a). La seconda consiste nel fare affiorare una nervatura longitudinale di resina epossidica incollata lungo il fianco di una armatura ordinaria $\emptyset 14$ ^(●), in modo che la barra risulta in una posizione più interna e quindi in presenza di copri ferro (Fig.2 b). La nervatura di resina, dato il suo modesto modulo elastico, segue le deformazioni della barra senza alterare le sue sollecitazioni e scorre liberamente nel calcestruzzo di ricoprimento in virtù delle sue superfici laterali perfettamente lisce e ricoperte di paraffina.

(*)Dopo aver staccato il supporto rimane incollata la sola gelatina impressionata con l'immagine del retino e lo spessore si riduce a 1+2 centesimi di millimetri.

(●)Prima del getto tale armatura viene fissata alla cassaforma con la nervatura di resina a contatto con la cassaforma stessa.

Occorre osservare che il primo provino (Fig. 2 a) può simulare il comportamento della barra quando, per errori di posizionamento durante il getto, viene ad essere a contatto con la cassaforma, mentre il secondo può rappresentare il caso dell'armatura con copriferro fessurato longitudinalmente (fessura di splitting preformata).

In entrambi i casi le pressioni radiali usualmente agenti attorno all'armatura /6/ e particolarmente intense quando gli slittamenti sono grandi, vengono contrastate dal calcestruzzo solido più interno; per evitare spinte dell'armatura verso l'esterno, le nervature a lunetta trasversali alla barra sono state orientate in modo da provocare spinte parallele alla faccia del calcestruzzo (Figg. 2 a e b). I risultati riportati nel seguito indicano per il primo provino bassi valori degli sforzi di aderenza in gioco, probabilmente anche per il fatto che durante il getto l'armatura non è stata avvolta completamente dal calcestruzzo ^(●); per il secondo caso gli sforzi di aderenza sono risultati confrontabili con quelli sperimentali delle armature ben ricoperte /7/.

L'eccentricità dell'armatura e quindi del carico di trazione applicato ad essa nelle sezioni di estremità, provoca nel prisma di calcestruzzo una sollecitazione di trazione e flessione. Le fessure pertanto non attraversano istantaneamente l'intera sezione come avverrebbe nel caso centrato; per questa ragione risulta impossibile misurare direttamente gli sforzi dell'armatura nella sezione fessurata almeno fin tanto che la fessura non si è estesa a tutta la sezione ^(▲), come si verifica solo per carichi prossimi ai valori di snervamento della barra. D'altro canto l'introduzione di un'altra barra sulla faccia opposta per evitare la flessione avrebbe comunque causato l'inconveniente della fessurazione istantanea dell'intera sezione e di conseguenza l'istantaneo scollamento di buona parte della barra. Lo scollamento progressivo può essere invece studiato dettagliatamente nell'intorno

(●) All'atto della scasseratura erano visibili cavità di piccole dimensioni lungo entrambi i fianchi dell'armatura.

(▲) Tale misura avrebbe quindi potuto essere fatta solo indirettamente, attraverso il calcolo teorico, oppure attraverso la deduzione delle deformazioni della barra.

delle sezioni di estremità, dove il carico applicato alla barra è noto, tenendo conto che l'intero prisma si comporta come il tronco di calcestruzzo compreso tra due fessure preformate di un elemento strutturale, e che in fondo l'interazione armatura-calcestruzzo non sarebbe differente nel caso delle fessure che si formano progressivamente.

L'importanza di questo studio comunque non solo è connessa con la descrizione del fenomeno, ma come già detto anche in vista del controllo dei risultati teorici /3/.

Per quanto riguarda le caratteristiche geometriche del prisma e delle armature e le principali caratteristiche dei materiali impiegati si vedano la Fig. 2 e la Fig. 3.

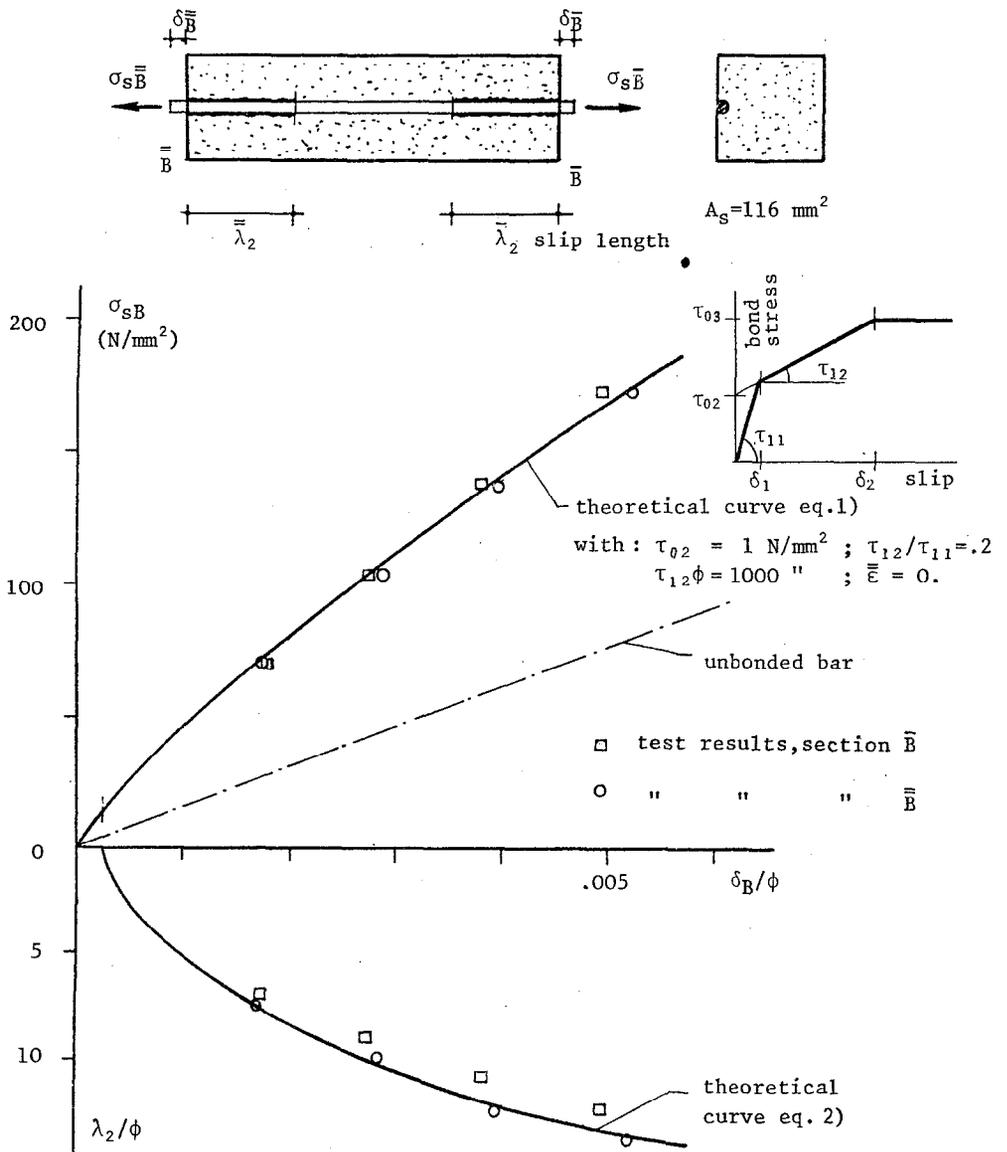
La prova è stata condotta facendo crescere il carico fino a superare ampiamente lo snervamento dell'armatura raggiungendo anche la fase di incrudimento: si sono applicati incrementi di carico pari a 4 kN in corrispondenza di ciascun passo, che veniva effettuato all'incirca ogni 10 minuti primi.

3. RISULTATI

Gli effetti interferometrici dei due provini vengono riportati e commentati dettagliatamente nell'appendice III: l'elaborazione delle frange consente di ricavare gli spostamenti relativi tra calcestruzzo ed armatura.

I risultati sperimentali di maggior rilievo riguardano lo scollamento progressivo dell'armatura vicino alle due sezioni estreme. I movimenti dell'armatura e la lunghezza del tratto scollato sono messi ben in evidenza nelle Figg. A1 e A2 dell'appendice. Le frange preesistenti all'applicazione del carico ("mismatch" iniziale) di Fig. A1 per $P=0$, dopo una leggera inflessione in seguito alle deformazioni di scorrimento elastico del calcestruzzo attorno alla barra ($P=4$ kN) diventano discontinue a causa degli slittamenti dell'armatura, i quali risultano via via crescenti e si manifestano in tratti sempre più lunghi, come appare nelle fotografie dalle differenze di ordine di frangia tra calcestruzzo e armatura ($P=8-20$ kN).

Le Figg. 4 a) e b) sono di particolare importanza in quanto descrivono sinteticamente questo fenomeno e forniscono elementi utili per l'analisi teorica.



Case a)

FIG. 4 - Theoretical and experimental curves of maximum steel stress σ_{sB} and of slip length λ_2 , as a function of slip δ_B .
 Curve teoriche e sperimentali dello sforzo dell'armatura e della lunghezza di scollamento in funzione dello slittamento delle sezioni estreme.

Facendo riferimento alle due sezioni esterne \bar{B} (a destra) e \bar{B} (a sinistra), in ordinate vengono riportati i valori dello sforzo σ_{SB} , mentre in ascissa i valori dello slittamento δ_B in rapporto al diametro ϕ della barra.

Nel quadrante inferiore vengono invece riportati, in funzione di δ_B , i valori della lunghezza del tratto λ_2 , dove l'armatura scivola in seguito allo scollamento. Accanto ai punti che rappresentano i valori sperimentali per le due sezioni di estremità, vengono riportate anche le curve teoriche ricavate mediante le relazioni 21) e 23) del lavoro /3/:

$$\sigma_{SB} = \left(\sqrt{4\tau_{12}\phi E_s} / \frac{1-\tau_{12}/\tau_{11}}{\tau_{02}/(\tau_{12}\phi)} \right) \left\{ \left[\frac{1-\tau_{12}/\tau_{11}}{\tau_{02}/(\tau_{12}\phi)} \right]^2 \left[\frac{\tau_{02}}{\tau_{12}\phi} + \frac{\delta_B}{\phi} + \frac{\bar{\epsilon} E_s}{\lambda_2/\phi} \frac{1}{4\tau_{12}\phi} \right]^2 - \left[1 + \frac{\bar{\epsilon} E_s}{\lambda_2/\phi} \frac{1-\tau_{12}/\tau_{11}}{4\tau_{02}} \right]^2 + \frac{\tau_{12}}{\tau_{11}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad 1) (\bullet)$$

$$\delta_B/\phi = \tau_{02}/(\tau_{12}\phi) \left[\cosh(\bar{k}_2\lambda_2/\phi) + \sqrt{\tau_{12}/\tau_{11}} \sinh(\bar{k}_2\lambda_2/\phi) - 1 + \tau_{12}/\tau_{11} \right] / (1 - \tau_{12}/\tau_{11}) + \bar{\epsilon} \left[\cosh(\bar{k}_2\lambda_2/\phi) - 1 \right] / (\bar{k}_2^2\lambda_2/\phi) \quad 2)$$

A tale riguardo si fa presente che tali relazioni sono state ottenute studiando il problema dell'aderenza mediante leggi locali sforzo di aderenza-slittamento del tipo a trilatera come è indicato nello schema riportato nella stessa figura.

L'ottimo accordo tra i risultati teorici e sperimentali relativi ai due provini con armatura affiorante (Fig. 4a) e con armatura interna (Fig. 4b) è stato ottenuto in realtà senza una misura diretta dei parametri $\tau_{02}, \tau_{11}, \tau_{12}$ connessi con l'aderenza. I valori riportati in figura, ai quali si riferiscono le curve teoriche, sono quelli che rendono possibile l'accordo tra i risultati teorici e sperimentali (▲).

(●) Questa relazione in forma chiusa che può essere di grande utilità per i problemi connessi con la fessurazione descritti nell'introduzione, è stata riportata in /3/ con un errore di stampa, essendo stato ommesso il segno di divisione tra il primo e il secondo fattore del secondo membro.

(▲) A tal proposito occorre osservare che tale accordo non potrebbe essere casuale, date le molte condizioni che i punti sperimentali impongono: la curva infatti deve collegare non solo i 4 punti sperimentali del legame $\sigma_{SB} - \delta_B$, ma anche quelli del legame $\lambda_2 - \delta_B$.

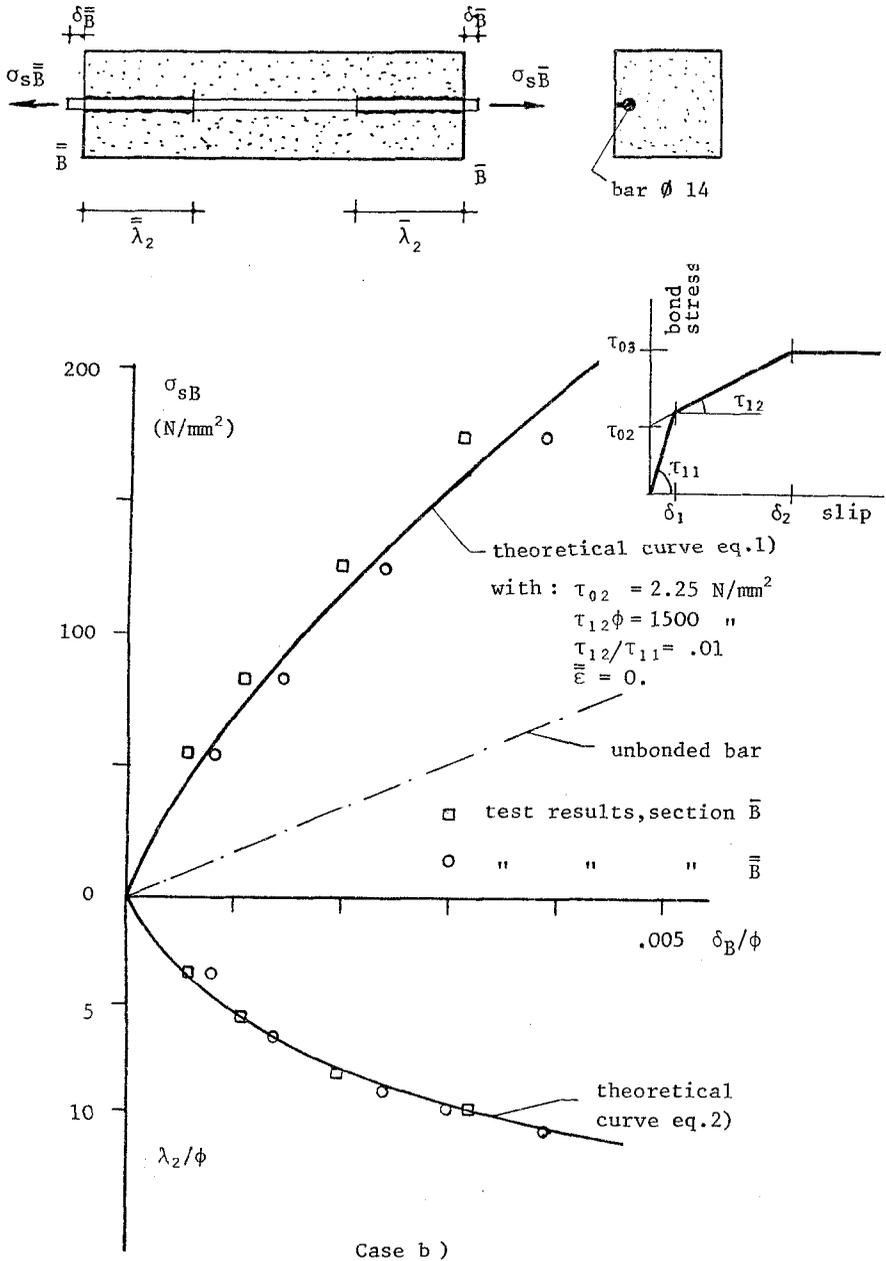


FIG. 4 - Theoretical and experimental curves of maximum steel stress σ_{sB} and of slip length λ_2 , as a function of slip δ_B .
 Curve teoriche e sperimentali dello sforzo dell'armatura e della lunghezza di scollamento in funzione dello slittamento delle sezioni estreme.

I valori dei parametri indicati in Fig. 4b del caso con armatura interna sono comunque in buon accordo con quelli sperimentali dell'aderenza ottenuti in /7/. Il basso valore del parametro τ_{02} (resistenza dell'adesione chimica) richiesto per il "fitting" dei diagrammi di Fig. 4a, è invece in accordo con quanto detto precedentemente in merito alle piccole cavità riscontrate lungo i fianchi dell'armatura affiorante, dovute ad una mancanza di costipamento locale: si aggiunga poi anche il fatto che la posizione più esterna dell'armatura riduce necessariamente la rigidità del collegamento armatura-calcestruzzo.

Entrambi le curve teoriche sono ricavate ritenendo nulle le deformazioni a trazione $\bar{\epsilon}$ del calcestruzzo nelle sezioni di mezzeria.

Nelle Fig. 4a e b vengono riportate anche le rette che rappresentano la soluzione elastica nel caso in cui, in assenza di aderenza, l'armatura fosse libera di scorrere nel calcestruzzo.

Le Figg. 5a, b relative ai due provini mostrano le curve sperimentali degli slittamenti dell'armatura lungo l'armatura stessa per quattro differenti passi di carico prima che si formino le fessure. Si noti che per $\sigma_{sB}=172 \text{ N/mm}^2$ (Fig. 5a) e $\sigma_{sB}=182 \text{ N/mm}^2$ (Fig. 5b) lo scollamento è quasi completo e praticamente tutta l'armatura è soggetta a slittamenti finiti. Lo slittamento dell'armatura inizia invece a manifestarsi poco prima del secondo passo di carico ($P = 8 \text{ kN}$: si veda l'appendice III).

Per valori inferiori del carico, quando gli sforzi dell'acciaio sono inferiori a $40 \div 50 \text{ N/mm}^2$, è ancora attiva l'adesione chimica in accordo con i risultati teorici ottenuti in /3/ (si veda la Fig. 13 b del citato lavoro).

In Fig. 6 sono riportati gli slittamenti dell'armatura del provino a barra interna per alcuni passi di carico, dopo che si è formata la prima fessura. Si nota che al crescere del carico le curve evolvono con regolarità nel tronco a destra \bar{BC} , il quale peraltro successivamente non si fessura; diversamente si comporta l'altro tronco a causa della seconda fessura, che si forma quando il carico supera il valore di 440 N/mm^2 . In corrispondenza della fessura le curve dello slittamento subiscono una discontinuità e invertono il segno: la discontinuità rappresenta l'apertura della fessura.

La Fig. 7, relativa allo stesso provino ad armatura interna, mostra invece le deformazioni ϵ_s dell'acciaio lungo tutta l'armatura, per tre significati

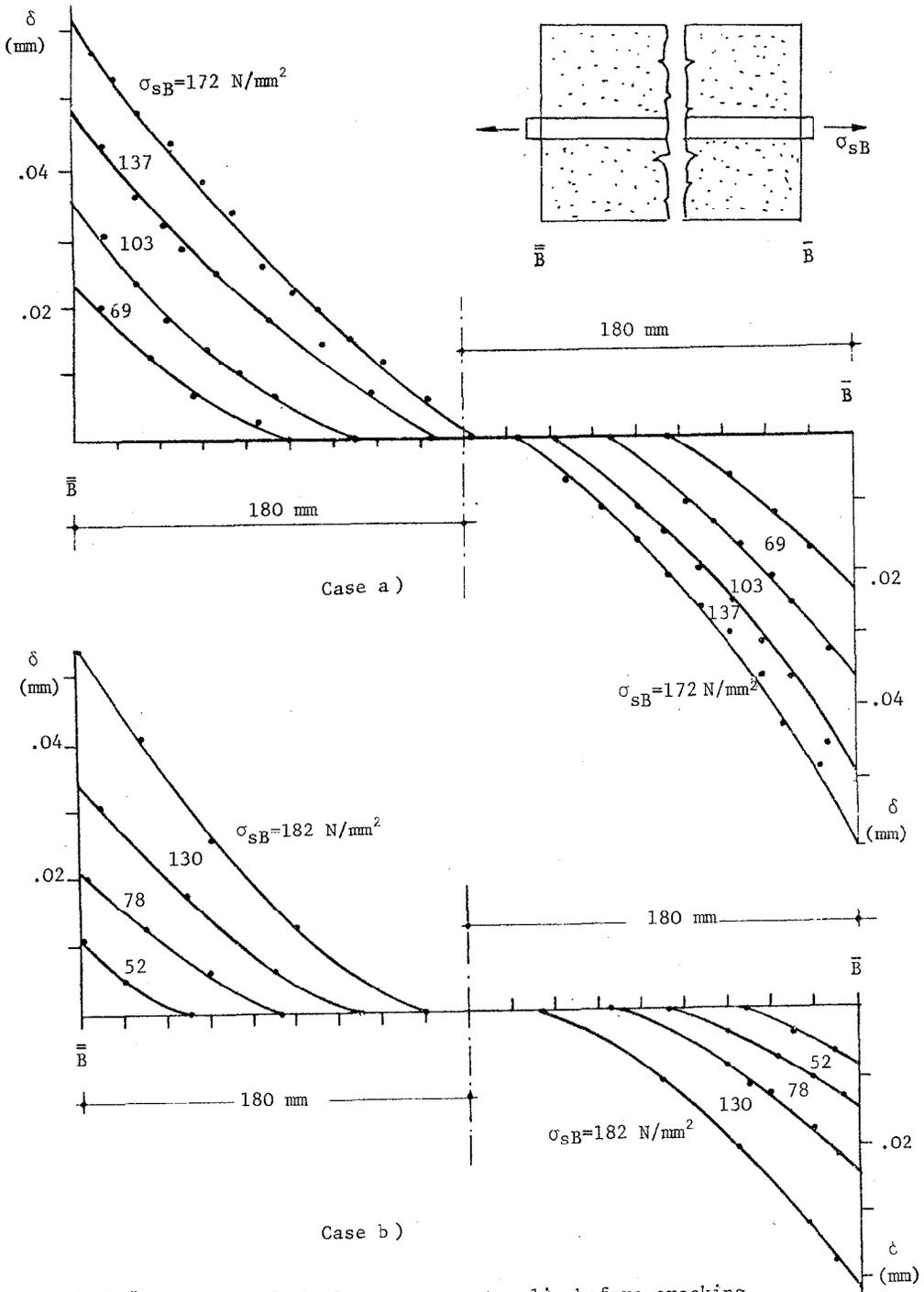


FIG. 5 - Curves of the bar-to-concrete slip before cracking.
Slittamenti della barra prima della fessurazione.

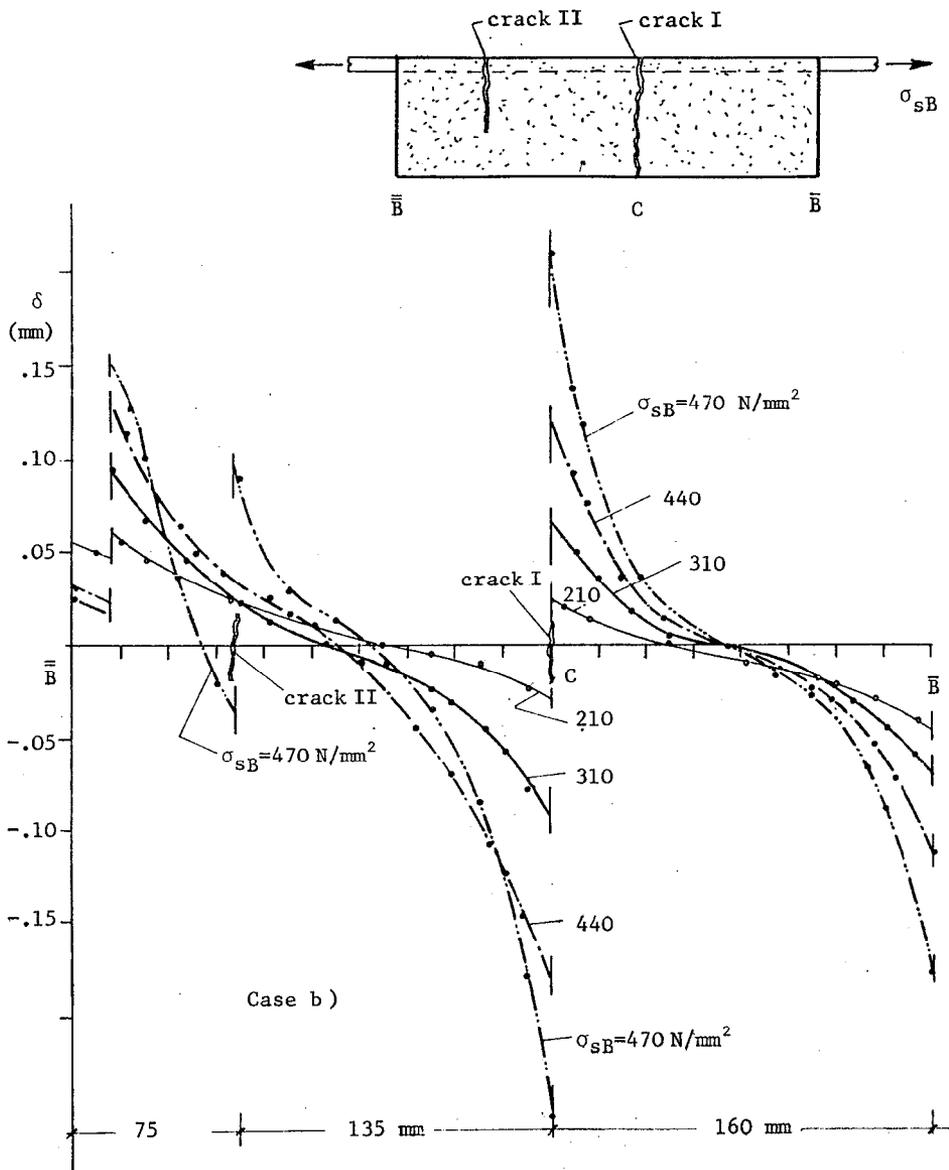


FIG. 6 - Curves of the bar-to-concrete slip after the onset of cracking. Slittamenti della barra in presenza di fessurazione (caso b).

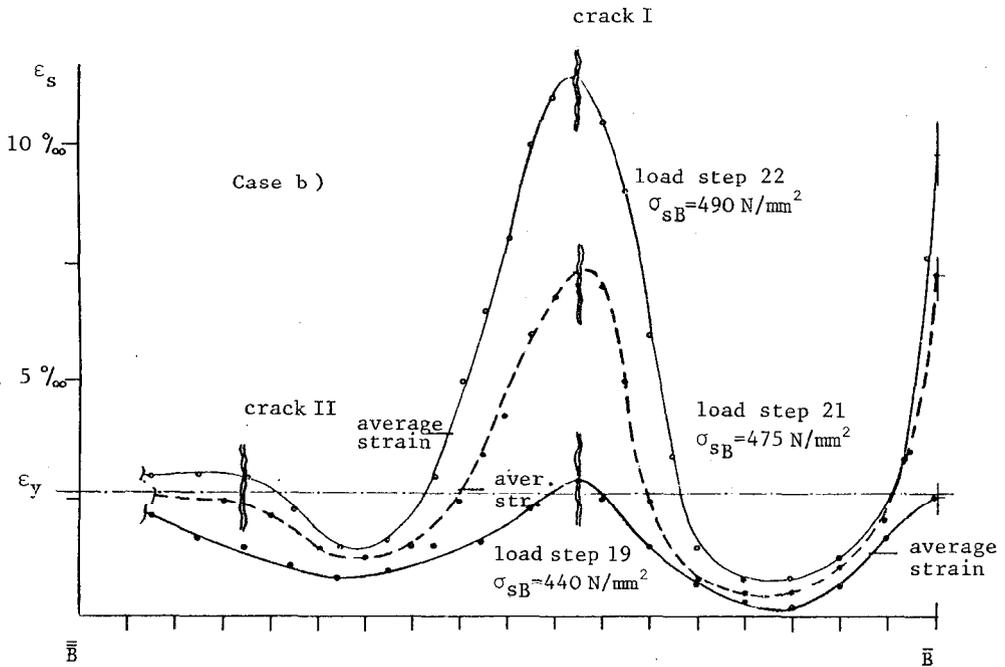
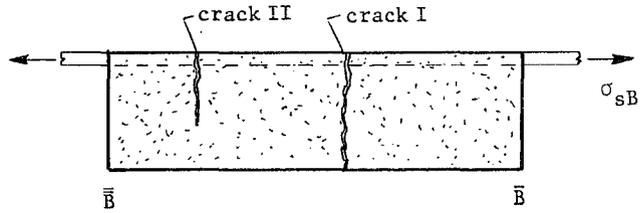


FIG. 7 - Curves of the actual steel strain along the bar axis: note the extended peaks above the yielding strain ϵ_y , close to the crack I and to the end sections. Deformazioni della barra per tre passi di carico oltre lo snervamento: si noti no i picchi di deformazione attorno alla fessura I e vicino alle sezioni estreme.

vi passi di carico appena prima e successivamente allo snervamento. Si noti che il tratto di armatura che si plasticizza è localizzato in corrispondenza della fessura I e delle sezioni di estremità, mentre tra la fessura e le sezioni estreme il comportamento è elastico essendo la deformazione minore del limite di snervamento ϵ_y . Nel tronco a sinistra nonostante la fessura II, che però non è estesa a tutta la sezione, le deformazioni sono praticamente in campo elastico.

Nelle Figg.A1 dell'appendice III, per valori del carico superiori a 67.5 kN, e nelle Fig. A2 per valori superiori a 73 kN, sono ben visibili le zone plastiche, dove si manifesta l'infittimento delle frange di interferenza.

Nonostante il valore modesto delle deformazione media del tirante nel 22-esimo passo di carico, (il suo valore è riportato, come per le altre curve, con un trattino orizzontale in Fig.7), i picchi di deformazione locali superano il valore del 10‰.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro rientra in un programma di ricerca finanziato dal C.N.R. (Cons. Naz. delle Ricerche). Le prove sono state condotte presso il Laboratorio dell'Istituto Tecnico "Nicolo' Tartaglia" di Brescia la cui organizzazione ha grandemente facilitato il lavoro degli Autori.

Si desidera ringraziare il Prof. Sandro Dei Poli, Direttore del Corso di Perfezionamento, per la puntualizzazione di alcuni aspetti del problema.

APPENDICE I - SIMBOLI

- ()_B : indice delle sezioni di estremità oppure della sezione fessurata.
- σ_s, ϵ_s : sforzi e deformazioni dell'armatura.
- ϵ_y : valore della deformazione di snervamento dell'acciaio.
- $\bar{\epsilon}$: massima deformazione del calcestruzzo teso compreso tra le fessure.

- δ : spostamento relativo tra armatura e calcestruzzo (slittamento).
- $\Delta = 2\delta_B$: apertura della fessura.
- A_S, A_C : area della sezione della barra e del calcestruzzo.
- \emptyset : diametro dell'armatura.
- P : carico applicato all'estremità del provino.
- τ_{ad} : sforzo di aderenza nell'interfaccia armatura-calcestruzzo.
- $\tau_{01}, \tau_{11}, \tau_{02}, \tau_{12}$: parametri che caratterizzano il legame locale aderenza-slittamento del tipo a trilatera (v.Fig.4).

APPENDICE II - BIBLIOGRAFIA

- /1/ Bazant E., Cedolin L., "Fracture Mechanics of Reinforced Concrete", Journal of the Eng. Mech. Div. ASCE, vol. 106, No.EM6, Proc. Paper 15917 December 1980.
- /2/ Giuriani E., Ronca P., "La fessurazione di una trave in c.a. analizzata per via ottico-interferometrica" Atti del VIII Convegno Naz. dell'Assoc. Ital. per l'Analisi delle Sollecitazioni (A.I.A.S.), Firenze, Settembre 1980.
- /3/ Giuriani E., "On the effective axial stiffness of a bar in cracked concrete", Bond in Concrete ed. by P.Bartos, Dept. of Civ. Engr., College of Technology, Paisley (Scotland) 1982, pp. 107, 126.
- /4/ Giuriani E., "Theoretical Analysis of the Early Second Stage in R.C. Beams", C.E.B. Meeting - Pavia october 1981 - C.E.B. Bulletin n. 153.
- /5/ Gambarova P.G., "On aggregate interlock mechanism in reinforced concrete plates with extensive cracking", IABSE Colloquium on "Advanced Mechanics of R.C.", Final Report, Delft, December 81, pp.99, 120.
- /6/ Tepfers R., "Cracking of Concrete Cover Along Anchored Deformed Reinforcing Bars", Magazine of Concrete Research, Vol. 31, No. 106, March 1979.
- /7/ Giuriani E., "Experimental Investigation on the Bond-Slip Law of Deformed Bars in Concrete", IABSE Colloquium on "Advanced Mechanics of R.C.", Final Report, Delft December 81.

APPENDICE III - EVOLUZIONE DELLE FRANGE DURANTE LO SCOLLAMENTO DELL'ARMATURA
E LA FORMAZIONE DELLE FESSURE

Le Figg. Al mostrano le frange di moiré del caso di barra affiorante (Fig. 2a) per ciascun passo di carico. Per carico nullo ($P = 0$) sono presenti numerose frange dovute alle deformazioni permanenti (mismatch) del retino incollato che si producono durante l'operazione di incollaggio /2/. Gli spostamenti forniti da tali frange sono quindi fittizi in quanto preesistenti all'applicazione del carico, e pertanto devono essere sottratti a quelli delle fotografie successive. In corrispondenza del primo passo ($P = 4$ kN) si notano modeste deformazioni nelle adiacenze della barra e molto vicino alle sezioni estreme; le frange ortogonali all'armatura subiscono una leggera inflessione in prossimità dell'armatura e pertanto, non determinandosi discontinuità di spostamento longitudinale, le deformazioni sono da attribuirsi alla deformazione di scorrimento elastico del calcestruzzo circostante l'armatura (senza slittamenti: fase dell'adesione chimica).

Le frange del secondo passo di carico ($P = 8$ kN) mostrano una discontinuità in corrispondenza dell'armatura, che vicino alle sezioni estreme è pari a circa metà frangia, il che rivela uno slittamento (spostamento relativo) di 1,1 centesimi di millimetro: la lunghezza di armatura che slitta è limitata e non va oltre un valore pari a $6 \div 7$ volte il diametro della barra. Il comportamento rispetta bene la simmetria. Le discontinuità delle frange sono sempre più marcate per i successivi passi di carico (●). Quando il carico raggiunge 16 kN, è visibile una linea che segna le discontinuità delle frange anche nel calcestruzzo vicino alla sezione di estremità a sinistra. Tale discontinuità rivela la presenza di una microfessura, con apertura massima di circa 1 centesimo di millimetro, formatasi in corrispondenza di una nervatura della barra, e arrestatasi ad una distanza molto limitata: solo successivamente quando il carico raggiunge il valore di 36 kN tale microfessura

(●) Lo spostamento relativo tra barra e calcestruzzo si ottiene moltiplicando la costante dei retini pari a .0254 mm per la differenza degli ordini di frangia ottenuta numerando progressivamente sia le frange del calcestruzzo che quelle dell'armatura e assumendo come comune frangia di ordine zero una frangia indeformata di mezzeria.

ra si estende fino alla sezione di estremità provocando il ben noto distacco del cono terminale di calcestruzzo /6/. Quando il valore del carico è di 20 kN si nota anche una microfessura a metà del prisma che, formatasi da un lato del prisma, si estende solo fino all'armatura. Nel passo successivo (P= 24 kN) tale microfessura (con apertura di circa 1 centesimo di millimetro) si propaga oltre l'armatura anche se con un ramo non perfettamente allineato al primo.

Si nota che nelle adiacenze della fessura le frange rivelano una discontinuità che indica lo slittamento dell'armatura tendendo essa a sfilarsi dal calcestruzzo per consentire l'aprirsi della fessura stessa. La frangia A indicata in figura mostra chiaramente l'inversione del verso dello spostamento dell'armatura che prima della formazione della fessura avviene verso destra e successivamente (P = 36 kN) verso sinistra dove si apre la fessura.

Quando il carico raggiunge 36 kN iniziano a formarsi altre microfessure, che si sviluppano successivamente provocando il distacco del cono di calcestruzzo sia nelle adiacenze della fessura trasversale che in quelle della sezione di estremità a sinistra. Per il carico di 53 kN il cono della sezione a destra è ben visibile; anche nelle adiacenze della fessura trasversale le microfessure del cono si sono estese, anche se la microfessura di destra si è propagata in modo anomalo, quasi parallelamente alla fessura principale.

Si notino le marcate discontinuità di frangia che rivelano grandi slittamenti dell'armatura sia nelle zone di estremità che nelle adiacenze della fessura centrale: nei due blocchi di calcestruzzo a destra e a sinistra della fessura lo slittamento è nullo in corrispondenza delle sezioni di mezzeria, come è indicato nella fotografia del carico P = 36 kN.

Fino al carico di 67 kN (passo 19) non si formano altre fessure: ma in corrispondenza del 20° passo di carico (P = 67.5 kN) sono evidenti i segni dello snervamento dell'armatura localizzato vicino alle sezioni di estremità dove le frange diventano molto fitte. Solamente nel passo successivo (P=67 kN), dato che la fessura centrale si è estesa su tutta la sezione e il carico assiale viene sopportato dalla sola armatura, lo snervamento si manifesta anche nelle adiacenze di tale fessura: come rivelano le frange molto fitte,

tale tratto ha una estensione molto limitata la cui lunghezza non supera il valore di due volte il diametro della barra. La limitata estensione del tratto plastico limita quindi la duttilità dell'intero elemento.

Solamente quando l'aderenza è pressoché distrutta lungo tutta la barra in seguito alla formazione di numerose altre fessure (passo 24), lo snervamento si estende a quasi tutta la barra. Dato che il valore del carico è superiore a quello di snervamento, si ritiene di aver raggiunto l'incrudimento dell'acciaio. In questi ultimi passi la fessura centrale ha una apertura di circa 1 mm.

Le fotografie di Fig. A2 mostrano le frange corrispondenti ai vari passi di carico del provino di Fig. 2b con armatura interna. Anche per tali figure è possibile fare considerazioni del tutto simili a quelle del caso precedente. Occorre osservare che la fessurazione non è simmetrica: la parte a sinistra è soggetta ad una fessurazione più fitta fin dal 10° passo di carico ($P=32$ kN) e, data anche l'irregolarità nella distanza tra le fessure, gli spostamenti relativi dell'armatura appaiono meno regolari di quelli della parte a destra come mostrano le irregolarità degli effetti ottici. Si noti inoltre che la nervatura di resina epossidica solidale alla barra rende la discontinuità delle frange meno netta che nel caso precedente: questo fatto porta sensibili vantaggi nei riguardi della interpretazione e della numerazione delle frange.

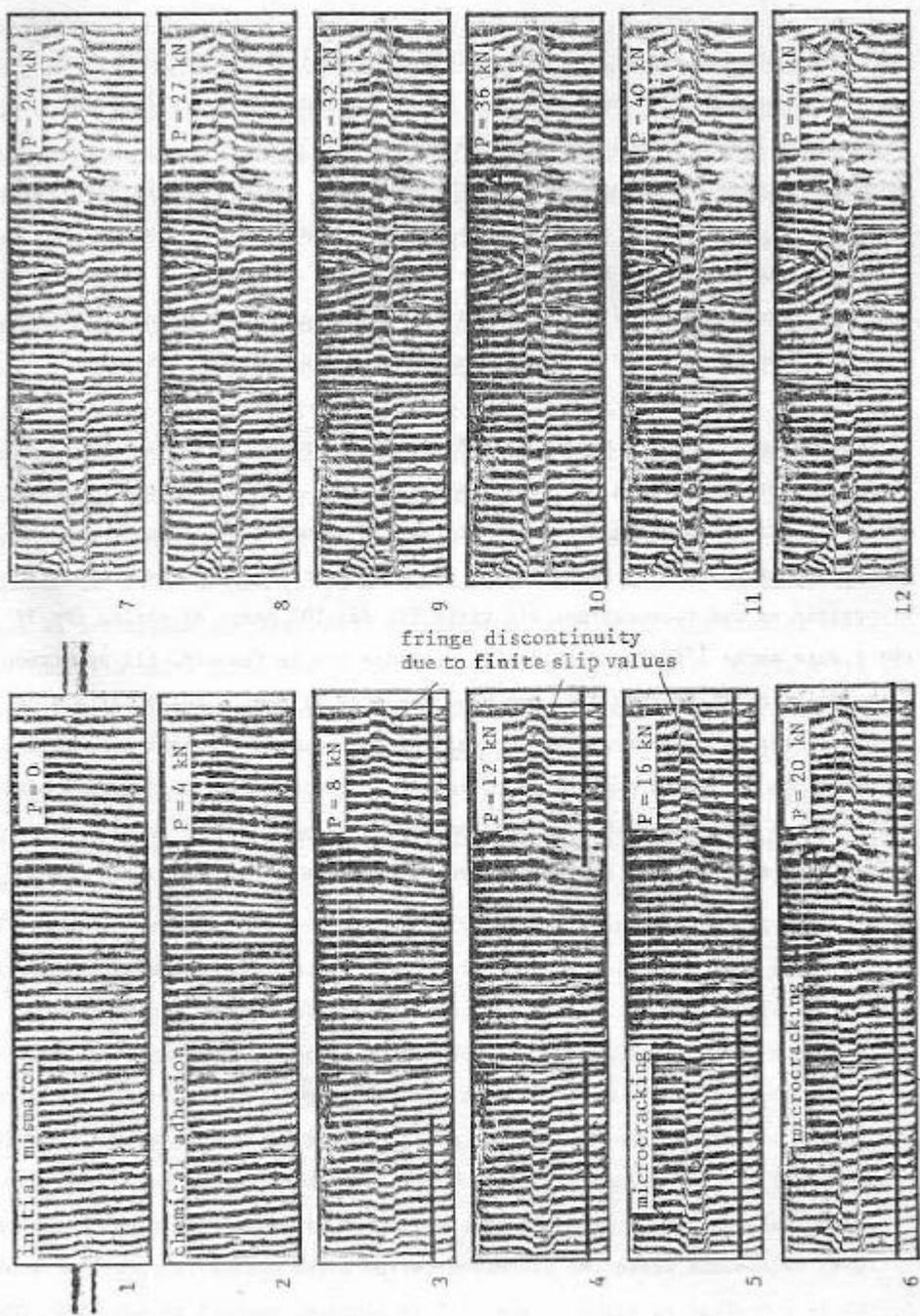


FIG. A1 - Interference effects for different load steps. Case a)
 Frange di interferenza per ciascun passo di carico (caso a).

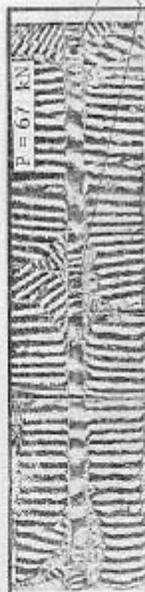
yielding of the bar



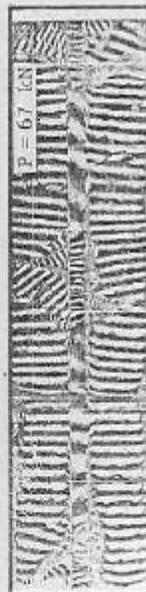
19



20



21



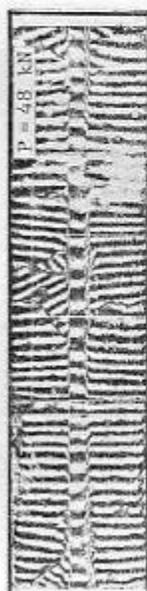
22



23



24



13



14



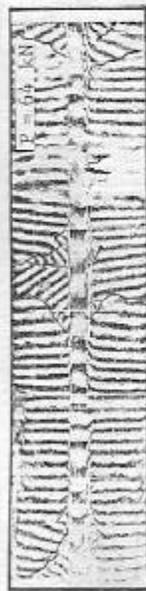
15



16



17



18

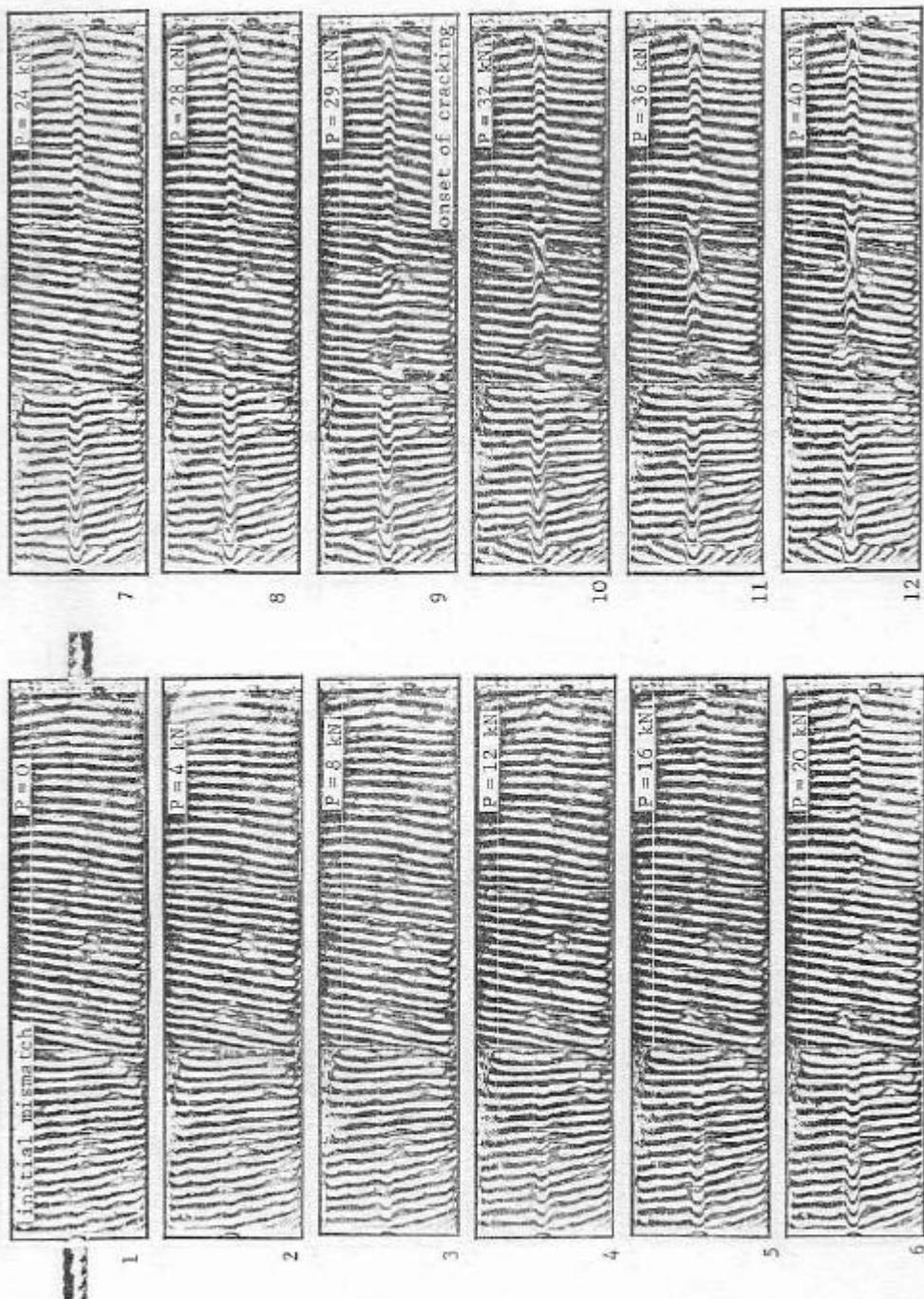
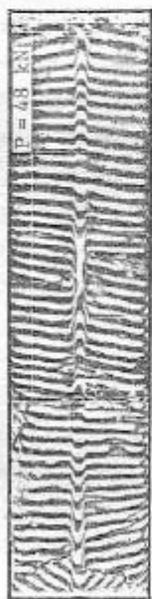


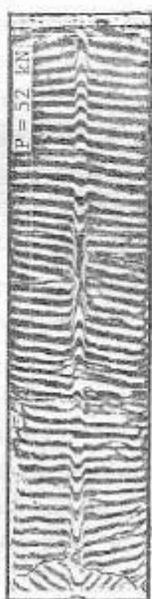
FIG. A2 - Interference effects for different load steps. Case b)
 Frange di interferenza per ciascun passo di carico (caso b).



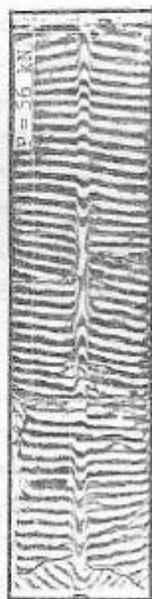
13



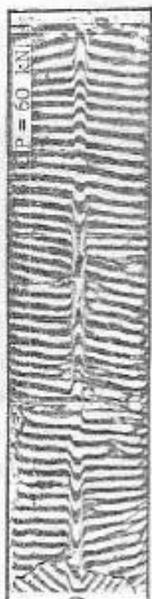
14



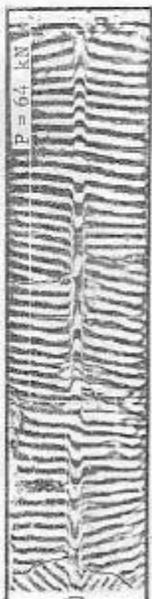
15



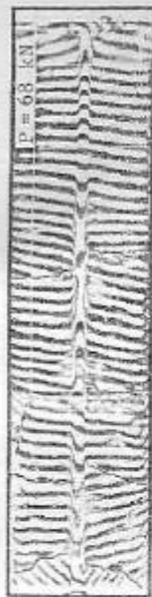
16



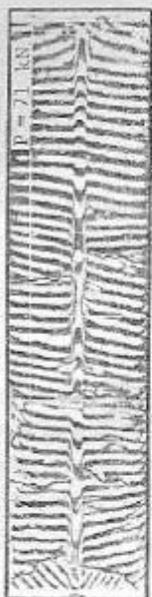
17



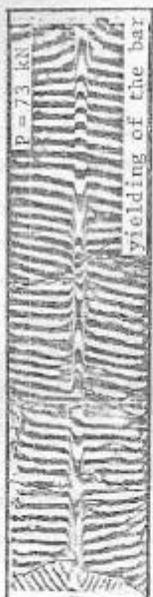
18



19



20



21



22



23



24

APPENDICE IV - A STUDY OF SLIP-ZONE PROPAGATION AT THE BAR-TO-CONCRETE
INTERFACE IN CRACKED CONCRETE

The analysis of bar-to-concrete interaction at the onset of cracking is becoming increasingly relevant in r.c. elements. Among the many problems still open to investigation, the modalities of crack propagation are of great interest, with particular reference to the role of the reinforcement, which, although shown in ref. /1/, requires a more extended analysis, namely when the crack tip reaches and/or crosses a bar.

The effectiveness of the reinforcement in arresting a crack depends on the bond characteristics. Should chemical adhesion be good enough at the bar interface, crack propagation would be stopped at first (Figs.1a,b,c,d), but subsequently the bar would begin to slip close to the through cracks and then inwards along the bar, because of the progressive loss of chemical adhesion. As a consequence, the crack opening increases (Figs.1e,f) and the crack propagation starts again.

The crack propagation is also affected by the "lacing effects" of the bars crossing the crack faces (Figs.1e, f), and these effects are related to the steel stresses in the cracked planes.

Within the above mentioned broad field of reinforcement-concrete interaction, the first objective of this researchwork is the experimental analysis of the progressive spreading of the slip zone along the bar, starting from the planes containing a through crack. In the same time the distribution of the local strain along a bar is examined, with particular reference to the localised strains close to a through crack. A second objective is the control of the reliability of the theoretical relationship between the steel stress at the crack and the crack opening (which is related to the bar slip in the crack plane). This relationship has been already introduced in a previous paper /3/.

The experimental method here adopted is based on the Moiré Interferometric Effects. This method /2/ makes it possible to obtain a full-field vision of the interface displacements between the two materials. In this way the displacements are recorded with continuity, and the local effects (such as localised strains after steel yielding) can be thoroughly measured because the moiré grids behave like zero baselength strain gages.

In order to analyse the displacements of the reinforcement, two different concrete specimens reinforced with one single bar have been tested (Figs 2a

2b). In the first specimen (case a) the bar is machined in such a way that a part of its surface is flush with the external surface of the specimen. This arrangement simulates a situation with the bar cover tending to zero. In the second specimen (case b) the bar location is more inside the concrete mass, and the bar displacements are transferred to the specimen surface by means of a longitudinal rib made of epoxy resin and attached to the bar side. No friction is present at the rib-to-concrete interface because of a thin paraffin layer. This arrangement simulates a situation with the bar cover subjected to longitudinal splitting.

The progressive spreading of the slip zone is analysed close to the end sections of the specimens, where the behaviour is the same as in the zones close to real through cracks (Figs. A1 , A2 of Appendix III) .

For the above-mentioned end sections the stress σ_{sB} and the length λ_2 of the slip zone are plotted versus the local slip δ_B , at increasing load values (Figs.4a , b) , for both r.c. specimens. The experimental curves are compared with the theoretical curves obtained through eqs.(1) and (2) and the agreement is very satisfactory in both cases. In the theoretical analysis a tri-linear bond/slip law has been introduced as suggested by previous test results /7/.

Finally, the strain distribution in the steel, for three different load values, is shown in Fig.7 , with reference to the second specimen (case b). At the load step 19 the steel is close to yielding, while at the load steps 21 and 22 the peaks of the deformations are very large and well beyond yielding, both at the end sections and at the internal sections with through cracks.

As a concluding remark, one should note that because of the satisfactory agreement between the theoretical closed-form relationship $\sigma_{sB}(\delta_B)$ proposed in /3/ and the experimental results. the above mentioned relationship is reliable and sufficiently accurate. This relationship may be effectively used also in the analysis of other problems, such as the deformability of cracked beams subjected to bending /4/ and the confinement capacity of the reinforcement crossing a crack, when shear has to be transferred via Aggregate Interlock /5/.