

STUDI E RICERCHE - Vol. 15, 1994
Scuola di Specializzazione in Costruzioni in C.A. - Fratelli Pesenti
Politecnico di Milano, Italia

IN TEMA DI ANCORAGGI E DI FESSURAZIONE LONGITUDINALE
IN ELEMENTI DI CALCESTRUZZO
PROVVISTI DI ARMATURA TRASVERSALE

A. M. Deldossi (*), S. Massimo (*), G. A. Plizzari (**)

SOMMARIO

Il comportamento degli ancoraggi di barre ad aderenza migliorata è spesso influenzato dalla fessurazione da spacco che si sviluppa nel calcestruzzo di ricoprimento e si propaga longitudinalmente alla barra. Il problema viene quindi a dipendere dall'azione di contenimento che, sulla barra ancorata, può essere esercitata dall'armatura trasversale, da eventuali pressioni esterne e dallo stesso calcestruzzo di ricoprimento che, pur fessurato, mantiene una non trascurabile resistenza residua a trazione.

A causa dell'influenza della fessurazione da spacco longitudinale, per poter affrontare il problema dell'ancoraggio in modo generale occorre conoscere il legame tra lo sforzo di aderenza, lo scorrimento e l'apertura della fessura da spacco. A tal fine, sono ancora necessarie prove sperimentali specifiche che consentano di analizzare i fenomeni fessurativi che si sviluppano lungo la barra ancorata e che influenzano l'aderenza. Nel presente lavoro viene illustrata una ricerca sperimentale su ancoraggi di barre ad aderenza migliorata, avente lo scopo di fornire indicazioni relative agli scorrimenti ed all'apertura della fessura da spacco in diversi punti dell'ancoraggio. Particolare attenzione è rivolta allo studio degli effetti dell'azione di contenimento esercitata dall'armatura trasversale e dal calcestruzzo di ricoprimento.

(*) Ingegnere Civile Strutturista - Dipartimento di Ingegneria Civile - Università di Brescia.

(**) Ricercatore - Dipartimento di Ingegneria Civile - Università di Brescia.

1. INTRODUZIONE

Negli ancoraggi o nei giunti per sovrapposizione di barre ad aderenza migliorata aventi diametro superiore a $12\div 14$ mm, a causa degli elevati tassi di lavoro ormai richiesti all'acciaio, si manifesta frequentemente nel calcestruzzo una fessurazione da spacco che, iniziando dalle fessure flessionali dove lo sforzo di aderenza è massimo, tende a propagarsi lungo tutta la barra in piani longitudinali passanti per il suo asse (Tepfers, 1973, Figg. 1,2c). Tale fessurazione da spacco (chiamata anche di "splitting", in accordo con la terminologia anglosassone) è provocata dalla spinta radiale esercitata dai puntoni di calcestruzzo che si formano in corrispondenza delle nervature della barra (Tepfers, 1979; Figg. 2a,b).

Al fine di limitare la fessurazione da spacco e di conseguenza migliorare le caratteristiche di aderenza, risulta fondamentale prevedere un'adeguata azione di contenimento lungo la barra ancorata. Tale azione potrebbe essere garantita dalla resistenza a trazione del calcestruzzo circostante la barra, da eventuali pressioni esterne ma soprattutto da una opportuna armatura trasversale ben distribuita lungo l'ancoraggio (Fig. 3). In mancanza di azione di contenimento, le fessure longitudinali tendono a propagarsi velocemente ed a causare il collasso improvviso dell'aderenza ("collasso per splitting"), in quanto l'apertura della fessura diventa tale da consentire lo scorrimento libero della barra ancorata (Tepfers, 1973; Morita e Kaku, 1979; Giuriani et al., 1991; Plizzari e Schumm, 1990; Reinhardt e Van der Veen, 1990; Fig. 4a). Viceversa, in presenza di un'adeguata azione di contenimento, lo sforzo locale di aderenza può ancora aumentare fintanto che non avviene la rottura per tranciamento dei denti di calcestruzzo tra le nervature della barra; in tal caso si verifica un collasso dell'aderenza per danneggiamento del calcestruzzo circostante la barra ("collasso per pull-out", Giuriani et al., 1991; Plizzari e Schumm, 1990; Fig. 4b).

A causa dell'influenza della fessurazione da spacco longitudinale, per poter affrontare il problema dell'ancoraggio in modo generale occorre conoscere il legame tra lo sforzo di aderenza, lo scorrimento e l'apertura della fessura da spacco (Gambarova e Giuriani, 1985). Una formulazione di tale legame, valido nella zona di influenza Δz di una singola staffa ed in presenza di una fessura da spacco completamente propagata in tale zona di influenza, è stata proposta da Giuriani e Plizzari (1985) sulla base dei risultati sperimentali relativi alla relazione tra lo sforzo di aderenza, lo slittamento e lo sforzo radiale esercitato dalle nervature, ottenuti da Gambarova e Karakoç (1982) e successivamente integrati da Gambarova et al. (1989, 1992), e sulla base del modello teorico dell'azione di contenimento dell'armatura trasversale proposto da Giuriani (1982). La stessa formulazione del legame locale è stata successivamente integrata col contributo all'azione di contenimento dovuto agli sforzi di trazione residui trasmessi tra le facce del calcestruzzo di ricoprimento fessurato per spacco (Plizzari et al., 1987), impiegando il legame sforzo-

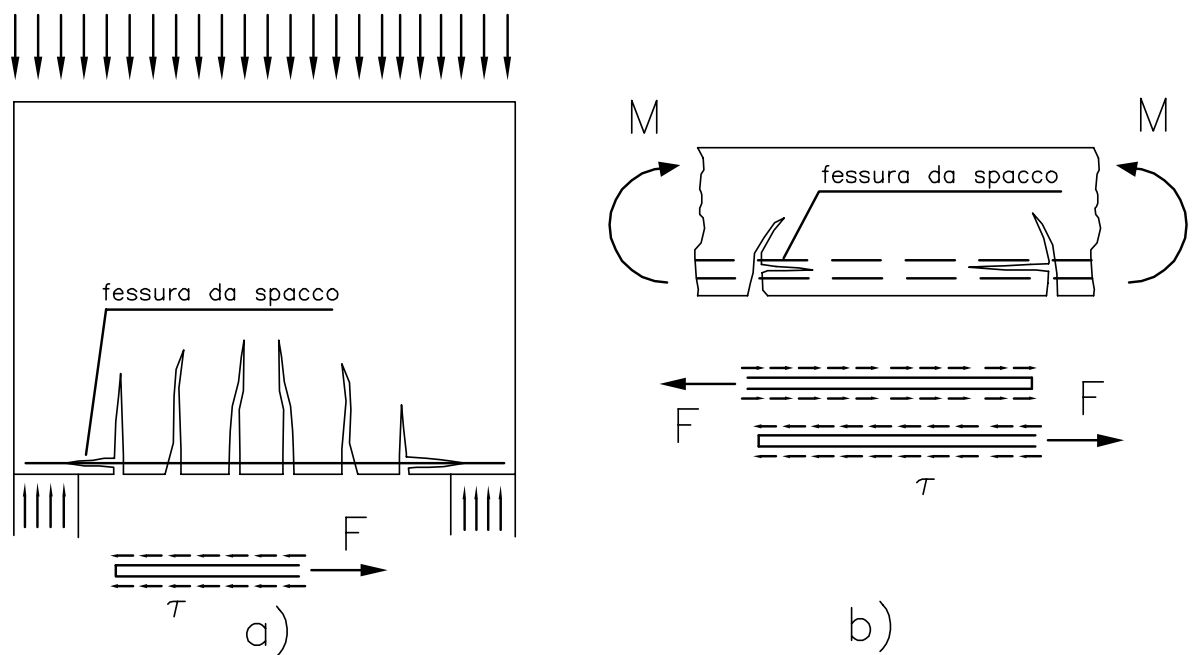


Figure 1: Problemi tipici di aderenza: ancoraggi (a) e giunzioni per sovrapposizione (b).

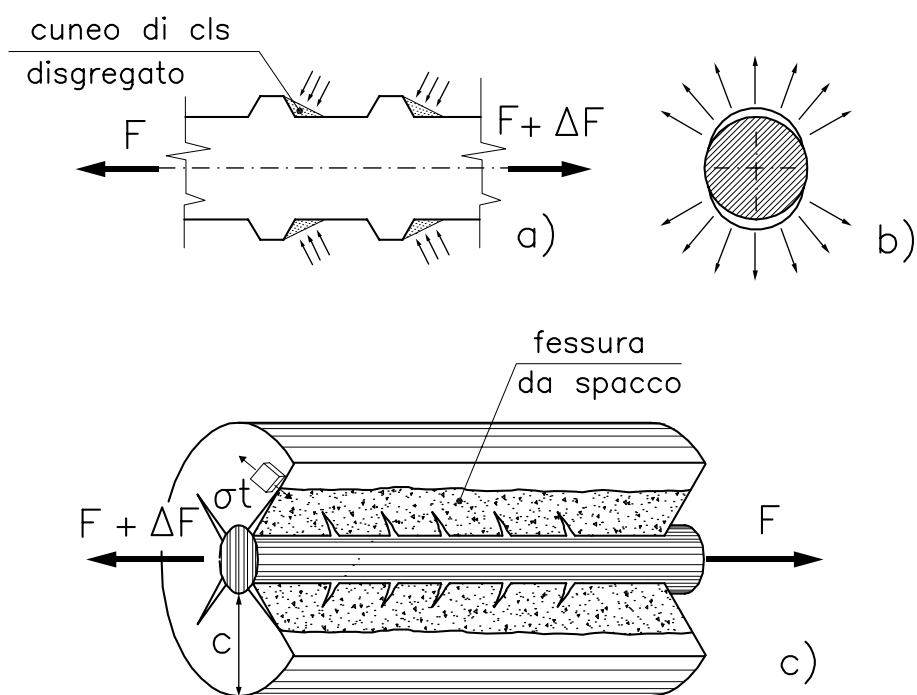


Figure 2: Cunei di conglomerato a monte della nervatura (Tepfers, 1979) (a), spinte radiali da essi esercitate (b) e fessure trasversali e longitudinali da spacco (Gambarova e Karakoç, 1982) (c).

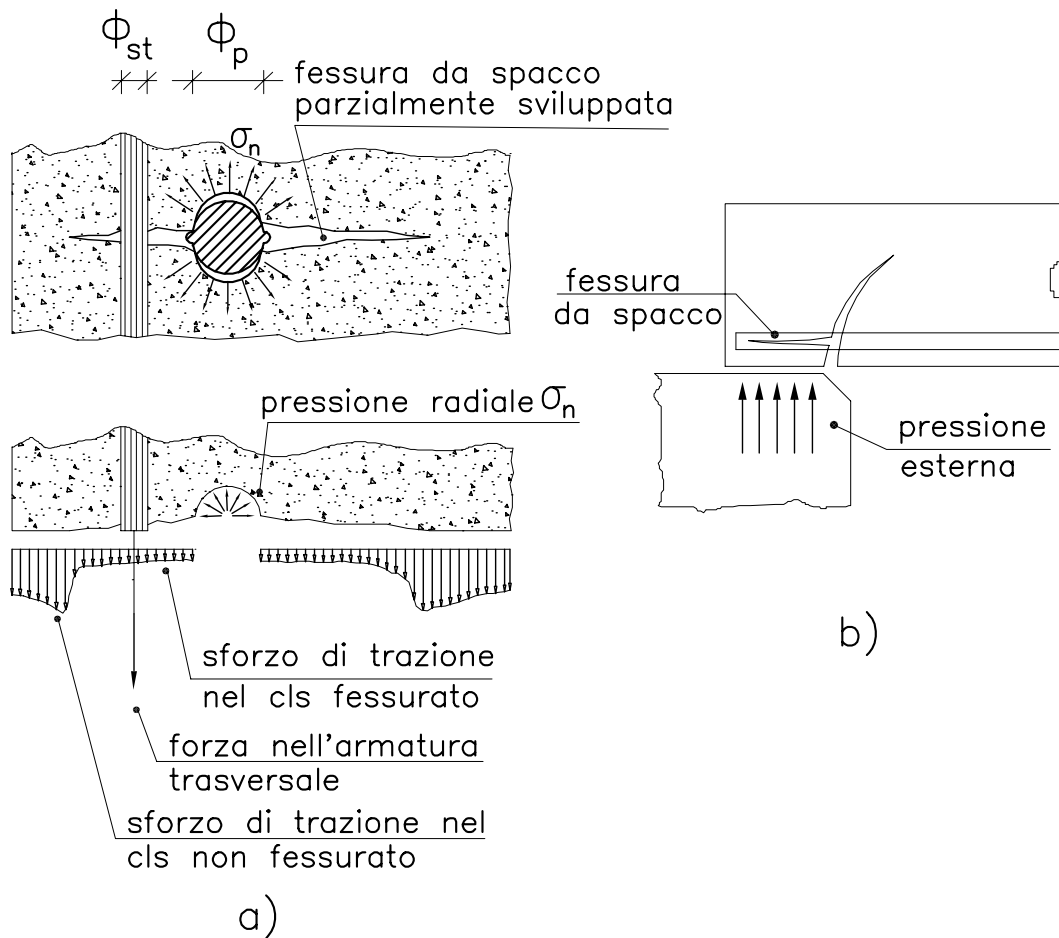


Figure 3: Azioni di contenimento sulla barra ancorata: azione dell'armatura trasversale e del calcestruzzo (Giuriani et al., 1991) (a); azione della pressione esterna (b).

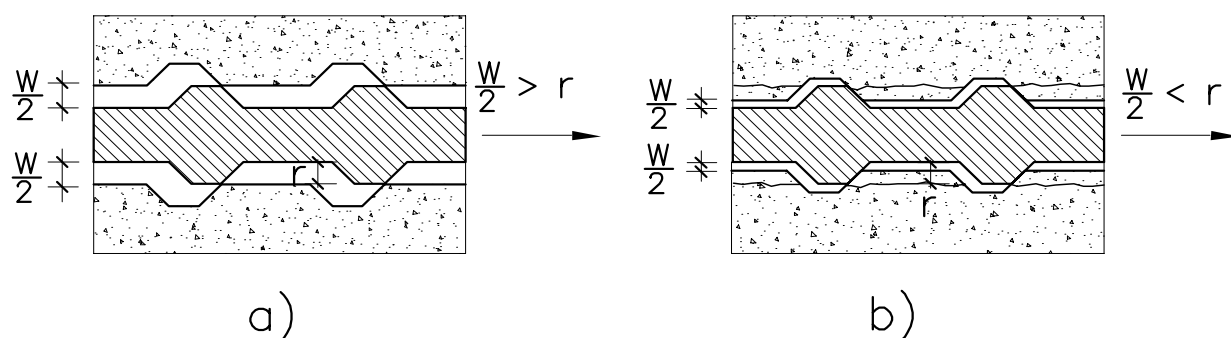


Figure 4: Schema illustrativo del collasso locale dell'aderenza: (a) collasso per incontrollata apertura di fessure da spacco ("collasso per splitting"); (b) collasso per tranciamento dei denti di calcestruzzo tra le nervature ("collasso per pull-out"; Plizzari e Schumm, 1990).

apertura di fessura proposto da Giuriani e Rosati (1987). Un secondo modello teorico del legame locale dell'aderenza in presenza di fessura da spacco è stato proposto da Rosati e Schumm (1992); tale modello considera però solamente l'azione di contenimento esercitata dal calcestruzzo circostante la barra.

Allo scopo di estendere lo studio al comportamento di un intero ancoraggio, sono ancora necessarie prove sperimentali specifiche che consentano di analizzare i fenomeni fessurativi che si sviluppano lungo la barra ancorata e che influenzano l'aderenza. Infatti, i risultati di prove su ancoraggi disponibili in letteratura, riguardano prevalentemente la loro resistenza ultima ma, fornendo poche informazioni sulla fessurazione da spacco, non consentono di far luce sul problema nella sua complessità e quindi sono poco d'aiuto per la corretta formulazione di modelli teorici di comportamento. È ovvia conseguenza che, in mancanza di modelli ampiamente accettati dalla comunità scientifica, le normative (D.M. 14.02.1992, Eurocodice 2) non possono mettere in conto i benefici effetti dell'azione di contenimento sulla resistenza dell'ancoraggio.

Scopo del presente lavoro è lo studio sperimentale del comportamento di ancoraggi di armature ad aderenza migliorata in presenza di più armature trasversali di contenimento. L'attenzione è particolarmente rivolta al diverso comportamento dell'aderenza al variare dell'azione di contenimento dell'armatura trasversale e del calcestruzzo. A tal fine sono state condotte due serie di prove. La prima serie focalizza l'attenzione sull'influenza dell'armatura trasversale di contenimento e a tale scopo sono stati previsti tre tipi di provini, caratterizzati da diversi quantitativi di staffe. La seconda serie si propone di studiare l'influenza del calcestruzzo di ricoprimento e, a tal fine, sono stati previsti due tipi di provini dei quali il primo con fessura da spacco preformata ed il secondo con calcestruzzo integro lungo la barra ancorata.

I risultati sono relativi alla forza applicata alla barra, agli scorrimenti nei punti di estremità dell'ancoraggio ed all'apertura della fessura da spacco, valutata in corrispondenza delle armature trasversali. Allo scopo di valutare l'intero quadro fessurativo che si manifesta sulla superficie del provino, in termini sia di fessure da spacco principali che di fessure secondarie legate alla formazione dei puntoni di calcestruzzo, in alcune prove è stata utilizzata la tecnica interferometrica del Moirè per sovrapposizione di retini (Giuriani e Ronca, 1979; Tassios e Koroneos, 1984).

2. MODELLO SPERIMENTALE

2.1 Caratteristiche geometriche dei provini

La sperimentazione ha riguardato, come si è detto, due serie di prove. Con la prima serie si è voluto studiare il comportamento dell'ancoraggio per diverse percentuali di armatura trasversale di contenimento; con la seconda serie si è voluto studiare il contributo all'azione di contenimento del calcestruzzo. A tal scopo, nei provini della prima serie di prove con una barra principale ancorata e tre barre di contenimento lungo ogni faccia, sono state impiegate barre trasversali aventi diverso diametro e precisamente 6 mm nei provini 1S6P1 e 1S6P2, 8 mm nei provini 1S8P1 e 1S8P2 mentre nei provini 1NSP1 e 1NSP2 non era presente alcuna armatura trasversale (Fig. 5). I provini della seconda serie di prove sono caratterizzati da due barre principali ancorate con tre barre trasversali di contenimento per lato, aventi tutte lo stesso diametro ($\phi_{st}=6$ mm, Fig. 5). Per poter studiare l'influenza dell'azione di contenimento del solo calcestruzzo, in due provini (2S6NTP1 e 2S6NTP2) è stata preventivamente realizzata una fessura ideale lungo il piano A-A per mezzo di un lamierino in alluminio inserito nel cassero (Fig. 5), mentre in altri due provini (2S6P1 e 2S6P2) il calcestruzzo è stato lasciato integro e quindi in grado di esercitare azioni di contenimento con la sua resistenza a trazione, sia prima della fessurazione che a fessurazione avvenuta.

Nella Tabella 1 sono riportate le caratteristiche geometriche delle barre ancorate e dell'armatura trasversale, la larghezza reagente di calcestruzzo tra le barre ancorate ed i corrispondenti indici di contenimento trasversale dell'ancoraggio distinti in (Giuriani et al., 1991):

- indice di contenimento delle staffe $\Omega = A_{st}/A_p^* = (n_{st}A_{st})/(n_p\phi_p\Delta z)$, dove n_p e ϕ_p sono il numero ed il diametro delle barre principali, n_{st} e A_{st} sono il numero e l'area delle staffe nella zona di influenza Δz ;
- indice di contenimento del calcestruzzo $B = (b - n_p\phi_p)/(n_p\phi_p)$, dove b è la larghezza del provino e quindi $(b - n_p\phi_p)$ è la larghezza reagente di calcestruzzo tra le barre ancorate.

Tutte le barre trasversali sono state disposte simmetricamente rispetto al piano B-B in modo da evitare rotazioni relative tra i due blocchi di calcestruzzo C_1 e C_2 dopo la formazione della fessura da spacco (piano A-A, Fig. 5).

Le barre principali, aventi diametro $\phi_p = 20$ mm, sono state lavorate al tornio in modo da ottenere un tratto aderente lungo 180 mm con un totale di 14 nervature in presa; in questo modo il passo Δz delle staffe è risultato di 60 mm.

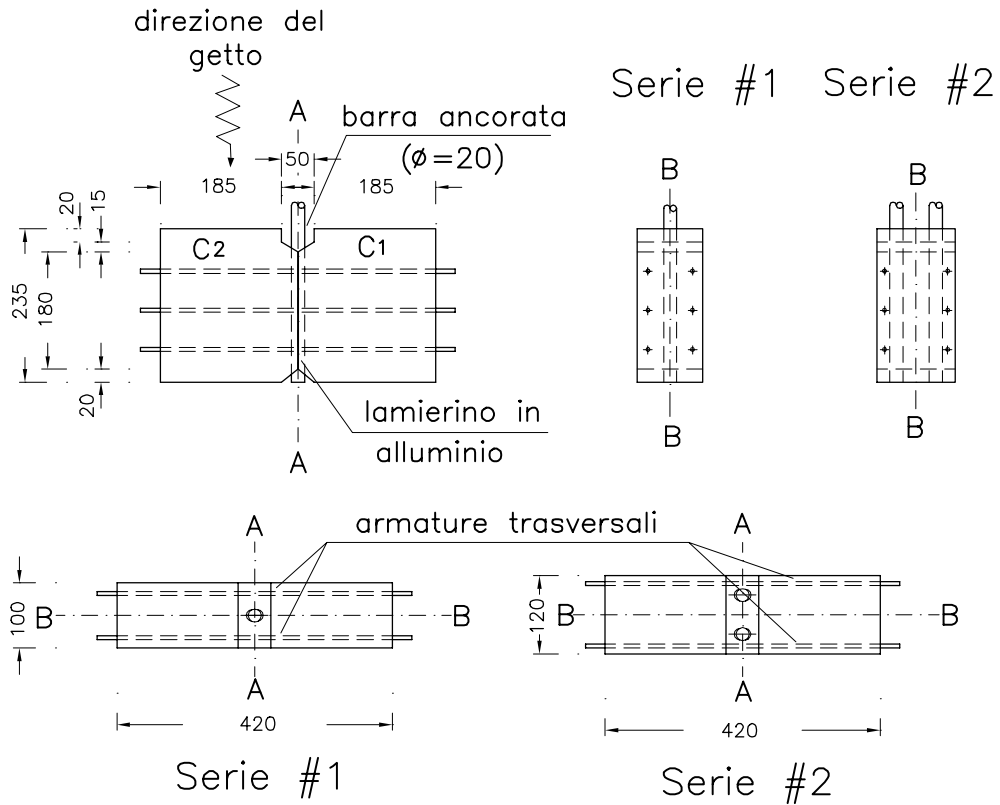


Figure 5: Caratteristiche geometriche dei provini impiegati nelle due serie di prove (misure in millimetri).

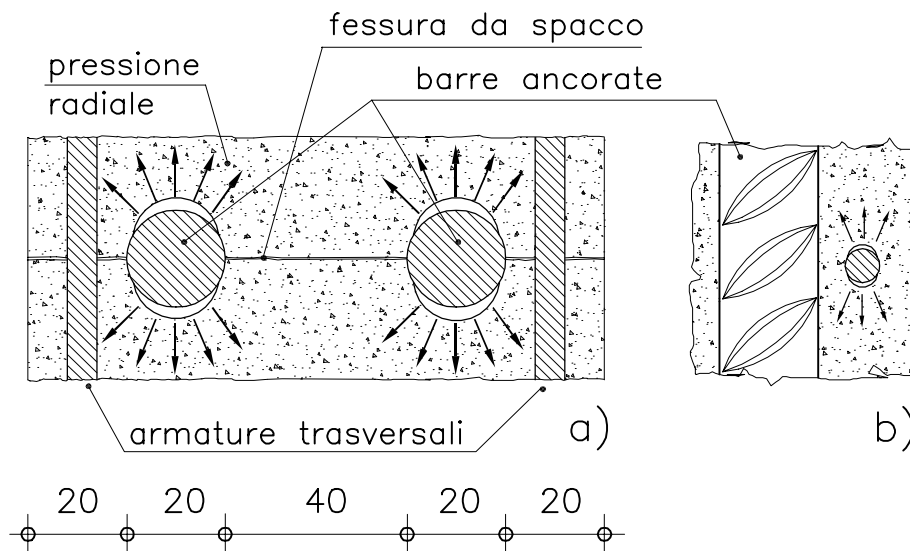


Figure 6: Particolare delle nervature delle barre principali (a) e delle armature trasversali (b) (misure in mm).

Serie	Provino	Armatura princip.	Armatura trasvers.	Largh. reag. calcestruzzo	Ω	B
Prima serie	1NSP1	1 ϕ 20	assente	80 mm	0	-
	1NSP2	1 ϕ 20	assente	80 mm	0	-
	1S6P1	1 ϕ 20	6 ϕ 6	80 mm	0.047	4
	1S6P2	1 ϕ 20	6 ϕ 6	80 mm	0.047	4
	1S8P1	1 ϕ 20	6 ϕ 8	80 mm	0.084	4
	1S8P2	1 ϕ 20	6 ϕ 8	80 mm	0.084	4
Seconda serie	2S6P1	2 ϕ 20	6 ϕ 6	80 mm	0.023	2
	2S6P2	2 ϕ 20	6 ϕ 6	80 mm	0.023	2
	2S6NTP1	2 ϕ 20	6 ϕ 6	fess. preform.	0.023	0
	2S6NTP2	2 ϕ 20	6 ϕ 6	fess. preform.	0.023	0

Table 1: Caratteristiche ed indici di contenimento trasversale delle barre ancorate nei provini delle due serie di prove.

Le barre trasversali di contenimento, disposte ortogonalmente alla fessura da spacco, sono lunghe quanto il prisma così da poter essere considerate illimitate nei confronti dello scollamento vicino alla fessura.

Le nervature delle barre principali sono state disposte in modo da creare spinte radiali prevalentemente nei piani paralleli alle barre di contenimento mentre le nervature delle armature secondarie sono state orientate in modo da evitare spinte radiali a vuoto verso l'esterno (Fig. 6).

Il prisma di calcestruzzo è stato opportunamente sagomato, sia per consentire la misurazione dello scorrimento dell'estremo caricato, che per facilitare la formazione della fessura da spacco nel piano A-A.

Il getto è stato effettuato nella stessa direzione delle armature principali e nel verso opposto a quello del carico, in modo da garantire un migliore comportamento del calcestruzzo nella fase di estrazione (Rehm, 1961; Fig. 5).

Le caratteristiche dei materiali impiegati sono descritte nell'Appendice I.

2.2 Strumentazione

La strumentazione impiegata ha permesso di misurare la forza di estrazione applicata alla barra, gli scorrimenti della barra all'estremo caricato (nel seguito definito anche "di testa") e a quello scarico (nel seguito definito anche "di coda"), e l'apertura della fessura

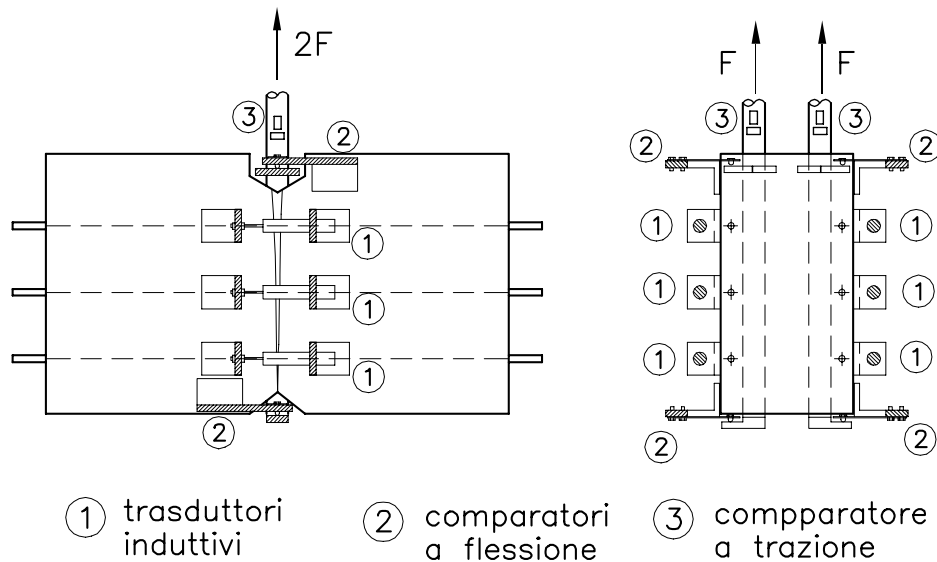


Figure 7: Schema della strumentazione applicata ai provini della seconda serie.

da spacco misurata in corrispondenza delle barre trasversali (Fig. 7).

Per la misura dello scorrimento della barra ancorata, sia all'estremo caricato che all'estremo scarico, nella prima serie di prove sono stati impiegati due trasduttori di spostamento induttivo al fine di depurare eventuali rotazioni della barra ancorata causate da piccole eccentricità nel banco di prova (Deldossi et al., 1993; Fig. 8a). Nella seconda serie di prove, non essendo possibile posizionare due trasduttori di spostamento per entrambe le barre ancorate, sono stati impiegati comparatori a flessione ("clip gauges") che hanno consentito la misura dello spostamento in prossimità della barra, in modo che eventuali rotazioni della stessa non influenzassero eccessivamente la misura dello scorrimento (Deldossi e Massimo, 1993; Fig. 8b). I supporti dei trasduttori induttivi e dei comparatori a flessione sono stati posizionati sulla faccia esterna del provino e non nelle immediate vicinanze della barra (Fig. 8); si ritiene comunque che ciò non influenzi la precisione della misura dello scorrimento in quanto le deformazioni del calcestruzzo possono essere ritenute trascurabili.

L'apertura delle fessure da spacco è stata rilevata in corrispondenza delle sei barre trasversali per mezzo di trasduttori di spostamento induttivi (Fig. 7).

La forza di estrazione applicata alla singola barra ancorata è stata misurata per mezzo di estensimetri elettrici applicati sul tratto tornito della barra.

Allo scopo di valutare l'intero quadro fessurativo che si manifesta sulla superficie del provino, in termini sia di fessura principale da spacco che di fessure secondarie dovute alla formazione dei puntoni di calcestruzzo (Tepfers, 1973; Giuriani e Gelfi, 1982), nelle prove 2S6P2 e 2S6NTP2 è stata impiegata la tecnica del Moirè per sovrapposizione di retini (Giuriani e Ronca, 1979; Tassios e Koroneos, 1984; Deldossi e Massimo, 1993). Negli altri

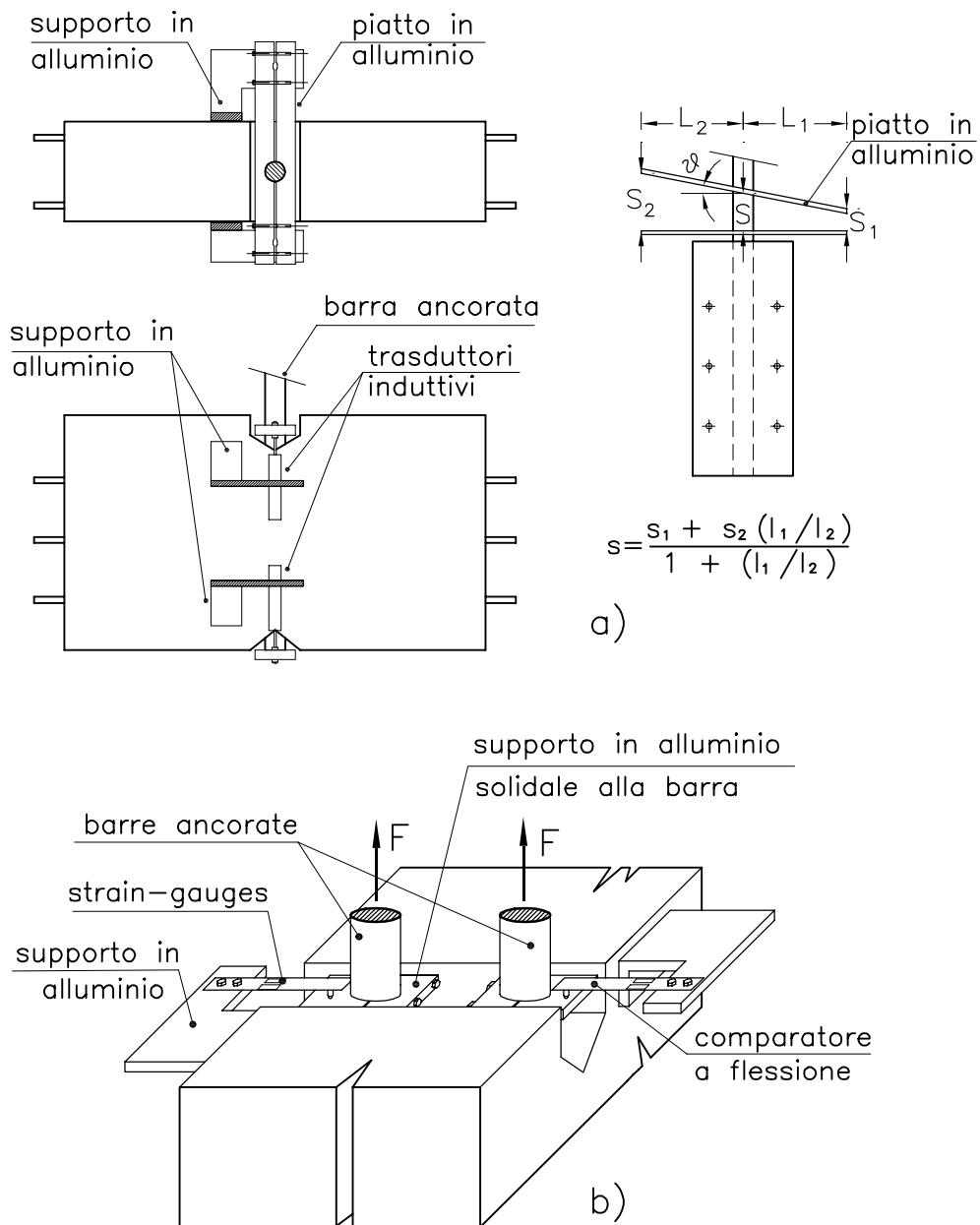


Figure 8: Sistema per la misura degli scorrimenti delle armature ancorate nei provini della prima serie di prove (a) e della seconda serie di prove (b).

provini la misura della lunghezza della fessura da spacco è stata effettuata con l'ausilio di una lente d'ingrandimento (6x); per facilitare le letture, la superficie del provino è stata preventivamente rasata in gesso in corrispondenza della zona di formazione della fessura da spacco.

2.3 Descrizione del banco

Il banco di prova è dello stesso tipo di quello impiegato da Giuriani e Plizzari (1985), adattato per poter applicare il carico per mezzo della pressa Instron 2714 presente nel laboratorio P. Pisa dell'Università di Brescia. Lo stesso banco era già stato utilizzato in precedenti prove sperimentali sul comportamento locale dell'aderenza da Plizzari e Marchina (1994).

Il banco consente ai blocchi di calcestruzzo C_1 e C_2 di allontanarsi tra di loro per permettere la libera apertura della fessura (Fig. 9a). Inoltre, esso consente di effettuare sia prove di estrazione ("pull-out") che di spinta ("push-in"), per poter cogliere l'andamento della curva sforzo di aderenza-scorrimento anche nella fase di rientro dell'armatura.

Il provino è stato incollato con resina epossidica a squadre in acciaio a loro volta collegate al contrasto superiore del banco per mezzo di cerniere ("H", Figg. 9a,b), realizzate mediante una riduzione di spessore delle squadre stesse. Tali cerniere oppongono poca resistenza alla libera apertura della fessura da spacco tra i due blocchi di calcestruzzo C_1 e C_2 , che risultano così collegati tra loro tramite il calcestruzzo e l'armatura trasversale.

2.4 Modalità di prova

Le prove sperimentali sono state condotte in controllo di spostamento, facendo cioè aumentare con continuità lo spostamento della barra principale. La velocità media dello scorrimento dell'estremo caricato, tra l'inizio della prova ed il carico di picco, è risultata pari a $0.6 \mu\text{m}/\text{min}$; tale velocità consente di ritenere le prove di tipo quasi statico.

Le prove sono state condotte fino al raggiungimento di uno scorrimento all'estremo caricato di $4 \div 5 \text{ mm}$ ($1/5 \div 1/4 \phi_p$). Durante le prove sono stati previsti alcuni cicli di scarico e ricarica.

I dati provenienti dagli estensimetri elettrici e dai trasduttori induttivi sono stati registrati ogni 4 secondi circa da una centralina elettronica UPM-100 di costruzione HBM, e quindi memorizzati su un elaboratore. Nei provini con i retini Moirè le frange d'interferenza sono state fotografate con un passo di carico di $\simeq 2.0 \text{ kN}$ ($\simeq P_{max}/75$).

La fotografia di Fig. 10 mostra una vista d'insieme del banco di prova e la centralina di acquisizione dati collegata all'elaboratore.

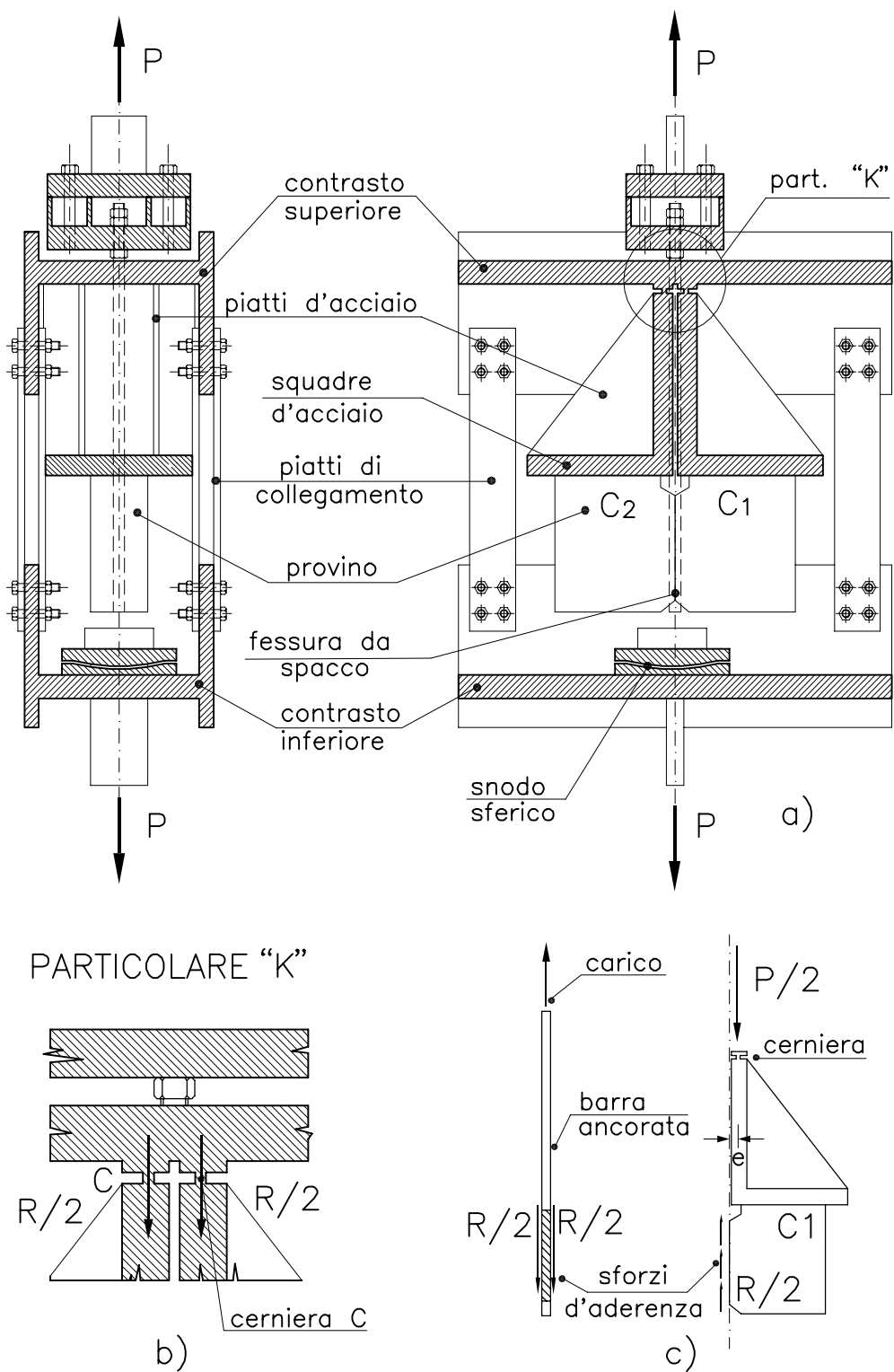


Figure 9: Vista d'insieme del banco di prova (a); particolare delle cerniere (b); schematizzazione delle forze agenti sull'armatura principale e sui contrasti (c).

Figure 10: Vista d'insieme del banco, della strumentazione e del sistema di acquisizione dati.

3. RISULTATI SPERIMENTALI

I risultati sperimentali riguardano la forza di estrazione applicata alla barra ancorata, lo scorrimento degli estremi carico e scarico della stessa, e l'apertura della fessura da spacco in corrispondenza delle armature trasversali di contenimento (Fig. 7). Le Figg. 11 e 12, tipiche per i provini della prima e della seconda serie di prove, mostrano: nel quadrante superiore la forza di estrazione F in funzione dello scorrimento, sia dell'estremo carico che dell'estremo scarico della barra ancorata; nel quadrante inferiore le aperture w_{s1} , w_{s2} e w_{s3} della fessura da spacco longitudinale misurata in corrispondenza delle barre trasversali, in funzione dello scorrimento dell'estremo carico.

Le curve mostrate in Fig. 11a, relative al provino 1NSP1 senza armatura trasversale, si interrompono appena a valle del carico di picco, a causa del collasso dell'ancoraggio per sfilamento della barra principale dai due blocchi di calcestruzzo C_1 e C_2 ; tale sfilamento è stato causato dalla rapida propagazione della fessura da spacco. Infatti, pur essendo le prove condotte in controllo di spostamento, il banco di prova non è risultato sufficientemente rigido da cogliere il ramo discendente delle curve carico-scorrimento. Nella Figura 11b, relativa al provino 1S8P2 della prima serie di prove, è mostrato anche il comportamento dell'ancoraggio durante la fase finale di inversione del carico sulla barra ("push-in"). Si noti che, durante quest'ultima fase, la fessura da spacco si richiude solo parzialmente mantenendo una rilevante apertura residua.

La Figura 12, tipica per la seconda serie di prove, mostra il comportamento di entrambe le barre ancorate nel provino 2S6P1, identificate come "lato destro" e "lato sinistro". I risultati sono diagrammati sia per la prova completa, con valore dello scorrimento massimo pari a $\simeq 4$ mm (Fig. 12a), che per la sola fase iniziale, fino al raggiungimento del carico di picco (Fig. 12b).

I valori del carico massimo F_{max} , dello scorrimento di testa s_{max} in corrispondenza di tale carico, dello sforzo nominale massimo $\sigma_{max}(= 4F_{max}/\pi\phi_p^2)$ e della tensione di aderenza massima $\bar{\tau}(= F_{max}/3\pi\phi_p\Delta z)$, relativi a tutti i provini, sono raccolti in Tabella 2. Per la descrizione completa dei risultati sperimentali si rimanda al lavoro di Deldossi et al. (1993).

Nella Figura 13a vengono confrontate tutte le curve, forza di estrazione-scorrimento di testa della prima serie di prove. Si noti come la curva relativa al provino "1NSP2", senza armature trasversali, sia meno rigida ed evidenzi un carico ultimo inferiore a quello degli altri provini in quanto si è verificato il "collasso per splitting" dell'ancoraggio (Fig. 4a). In tutti gli altri provini la percentuale di armatura trasversale di contenimento è risultata tale da comportare il "collasso per pull-out" dell'ancoraggio (Fig. 4b).

Sia dalla Figura 13 che dalla Tabella 2 si può osservare come il carico ultimo dei provini senza armature trasversali sia circa la metà di quello relativo ai provini con armature di

Provino		Carico massimo F_{max} [kN]	Scorrim. a F_{max} s_{max} [mm]	σ_{max} [MPa]	$\bar{\tau}$ [MPa]
1NSP1		74.84	/	238.3	6.61
1NSP2		50.45	0.209	160.7	4.46
1S6P1		128.90	/	410.5	11.39
1S6P2		131.00	0.923	417.2	11.58
1S8P1		~125.0	0.6÷0.75	~398.	~11.0
1S8P2		135.40	0.781	431.2	11.97
2S6P1	lato destro	73.65	0.490	234.5	6.51
	lato sinistro	71.57	0.413	227.9	6.32
2S6P2	lato destro	75.85	0.513	241.6	6.70
	lato sinistro	78.88	/	251.2	6.97
2S6NTP1	lato destro	75.68	0.588	241.0	6.69
	lato sinistro	68.13	0.481	217.0	6.02
2S6NTP1	lato destro	78.73	0.533	250.7	6.96
	lato sinistro	79.68	/	253.7	7.04

Table 2: Valori del carico massimo, dello scorrimento di testa, dello sforzo nominale massimo σ_{max} e dello sforzo di aderenza medio $\bar{\tau}$ in corrispondenza del carico di picco.

contenimento. La differenza di comportamento tra i provini con armature trasversali di diametro $\phi_{st}=6$ mm e $\phi_{st}=8$ mm è minima, probabilmente perchè la percentuale di armatura delle staffe con diametro di 6 mm e passo $\Delta z=60$ mm è già in grado di esercitare una notevole azione di contenimento. La minore rigidità del provino “1S8P1” rispetto a quella degli altri provini è da considerarsi all’interno delle normali tolleranze sperimentali. Sempre dalla Figura 13b si può osservare come i provini con armatura trasversale di contenimento abbiano un comportamento che si scosta poco dal lineare fino ad un carico di circa 80 kN ($\simeq 2/3P_{max}$). La Figura 13c mostra il confronto tra le curve forza di estrazione-scorrimento di coda relative alla prima serie di prove. Da queste ultime si può osservare che, per tutti i provini, non si ha scorrimento di coda fino ad un valore del carico pari a circa 50 kN; iniziato lo scorrimento di coda, nel provino “1NSP2” ha avuto inizio il ramo discendente mentre negli altri provini il carico è aumentato fino al raggiungimento del valore massimo. Nella Figura 13d è diagrammata la differenza tra lo scorrimento di testa e di coda della barra, in funzione dello scorrimento di testa; nella stessa figura è riportata la retta relativa ad una situazione ideale con scorrimento di coda nullo. Durante la fase iniziale della prova le curve non si discostano molto dalla retta in quanto gli

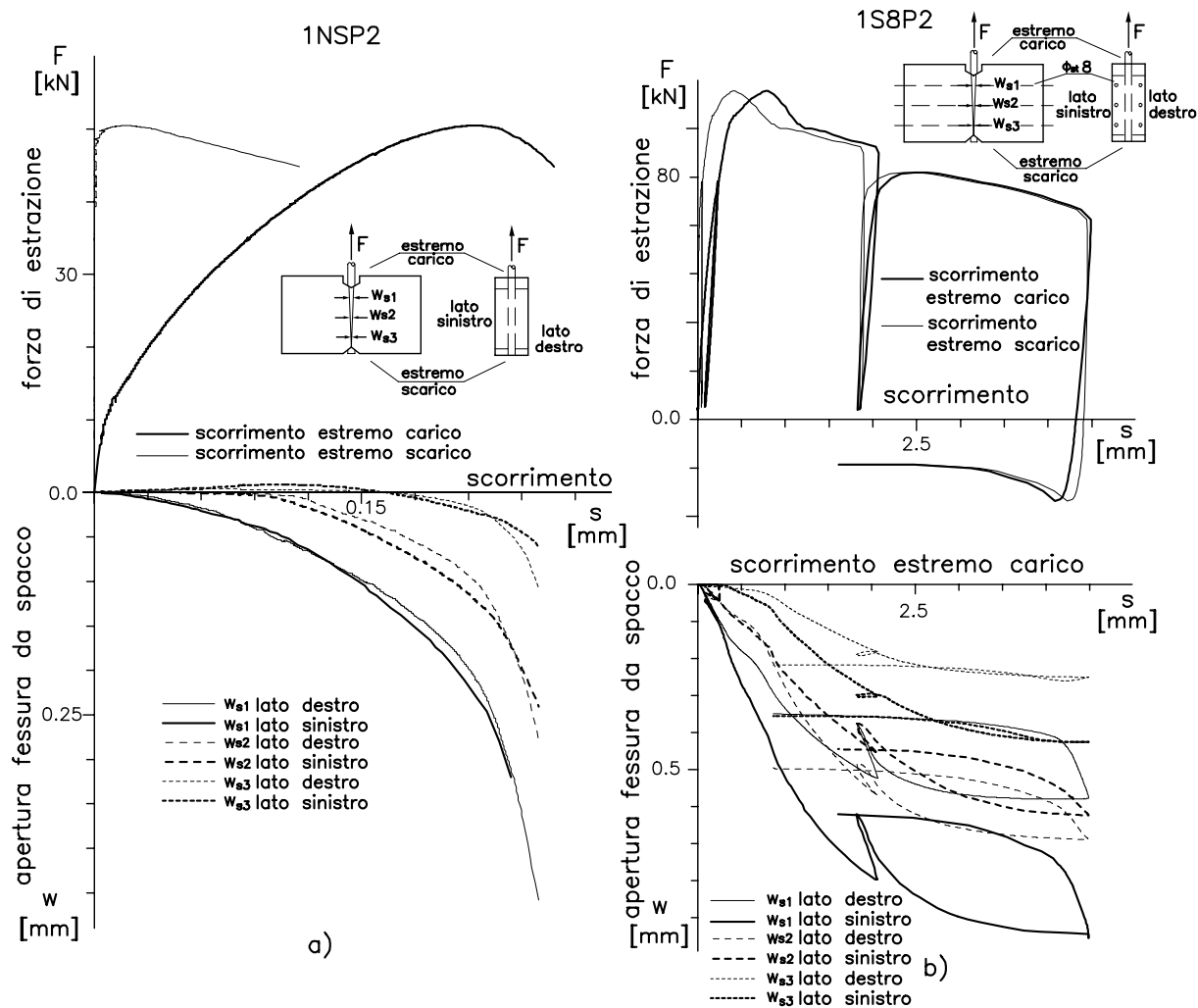


Figure 11: Diagrammi carico-scorrimento e apertura delle fessure da spacco-scorrimento relativi al provino 1NSP2 (a) ed al provino 1S8P2 (b) della prima serie di prove.

scorrimenti di coda sono quasi nulli a causa del modesto valore degli sforzi di aderenza nel tratto finale dell'ancoraggio (estremo non caricato). La differenza tra gli scorrimenti dell'estremo caricato e non caricato tende ad un valore massimo quando si raggiunge il carico di picco per poi decrescere nel successivo ramo discendente della curva forza di estrazione-scorrimento della barra ancorata. In tale tratto, infatti, il danneggiamento del calcestruzzo e la redistribuzione degli sforzi di aderenza lungo l'ancoraggio fan sì che gli scorrimenti tendano a diventare uniformi lungo tutta la barra.

Nelle Figure 14a,b sono riportate le curve forza di estrazione-scorrimento di testa ottenute nella seconda serie di prove. Si noti che le curve relative ai due provini con fessura preformata sono caratterizzate da una minor rigidezza ma dallo stesso carico massimo dei provini senza fessura da spacco preformata. Questo comportamento è meglio evidenziato

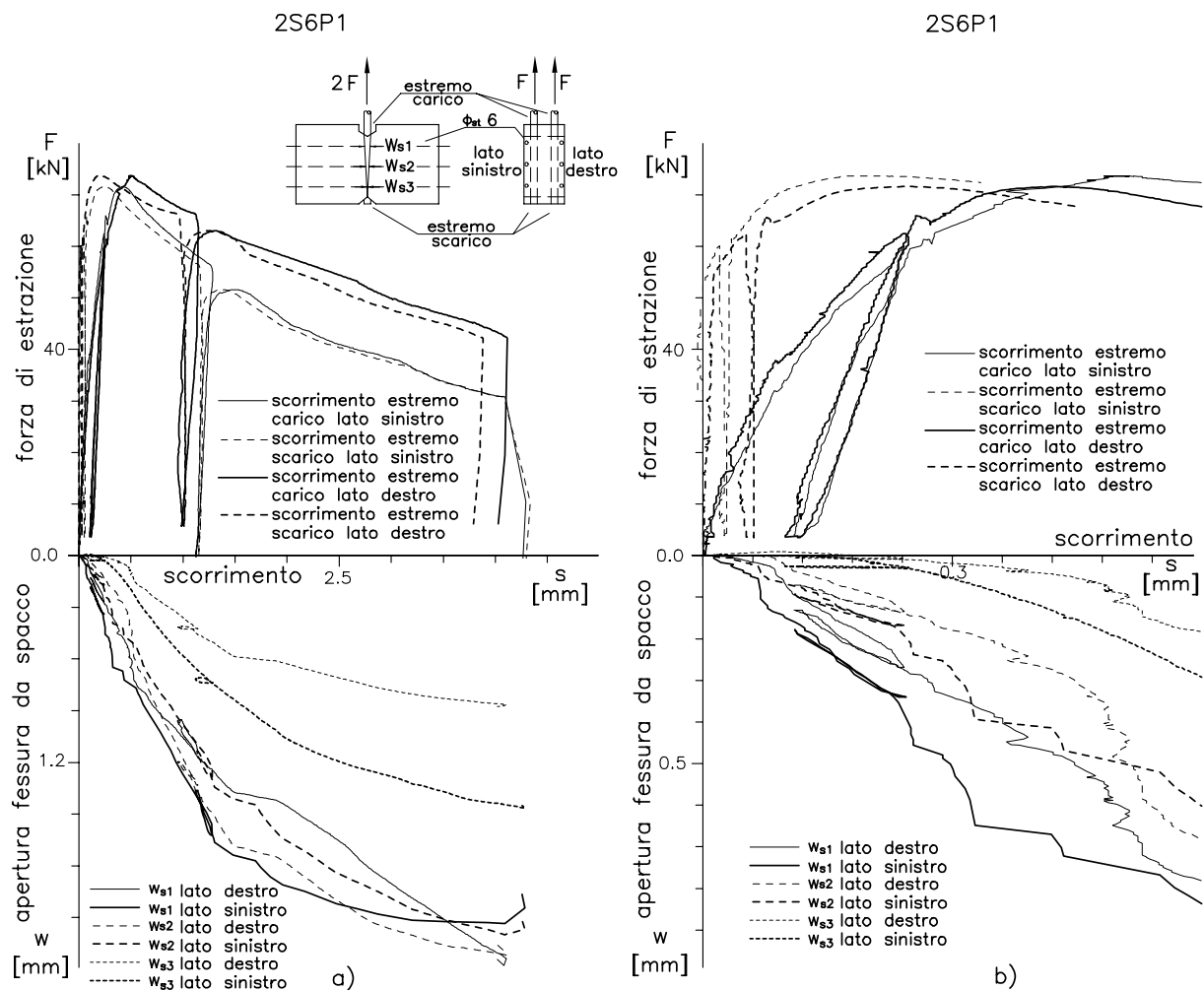


Figure 12: Diagrammi carico-scorrimento e apertura delle fessure da spacco-scorrimento delle due barre ancorate, relativi al provino 2S6P1 della seconda serie di prove, riportati integralmente (a) e fino al valore del carico di picco (b).

in Fig. 14c che mostra le curve medie della forza di estrazione in funzione dello scorrimento di testa ottenute dai provini senza e con fessura preformata. Nella stessa figura viene riportata la differenza tra queste due curve; tale differenza rappresenta il contributo dovuto al contenimento del calcestruzzo. Si noti come tale contributo, irrilevante in corrispondenza del carico massimo a causa del modesto calcestruzzo di ricoprimento e della notevole apertura della fessura da spacco, risulti invece non trascurabile nella fase iniziale della curva carico-scorrimento, che rappresenta il comportamento dell'ancoraggio nelle condizioni di esercizio.

La Figura 14d mostra la differenza tra lo scorrimento di testa e di coda in funzione dello scorrimento di testa per i provini della seconda serie. Come per la prima serie di prove, nella fase iniziale le curve non si discostano molto dalla retta e la differenza

tra gli scorrimenti tende ad un valore massimo in corrispondenza del carico di picco per poi decrescere successivamente nel ramo discendente della curva forza di estrazione-scorrimento della barra principale.

La Fig. 15 mostra la relazione tra lo sforzo ultimo di aderenza $\bar{\tau}$, rapportato alla radice quadrata della resistenza cubica a compressione del calcestruzzo, e l'indice di contenimento delle staffe Ω (Giuriani et al., 1991), per i provini della prima e della seconda serie di prove. Nei provini 1NSP1 e 1NSP2, senza armatura trasversale ($\Omega = 0$), l'azione di contenimento è dovuta al solo calcestruzzo di ricoprimento. Nonostante i pochi risultati ottenuti nella presente ricerca sperimentale non consentano ancora di trarre conclusioni, risulta già evidente che la resistenza ultima dell'ancoraggio aumenta all'aumentare del quantitativo di armatura trasversale presente ma che, oltre un certo valore di Ω , un ulteriore aumento di armatura trasversale non offrirebbe ulteriori benefici alla resistenza dell'ancoraggio. Se tale relazione venisse approssimata con una bilatera, sulla base dei pochi risultati disponibili il valore limite di Ω risulterebbe circa 0.05. Per un utile confronto, sullo stesso diagramma viene riportato il valore della resistenza di progetto dell'aderenza f_{bd} , prevista dall'Eurocodice no.2 per un calcestruzzo con resistenza a compressione simile a quello impiegato nelle presenti prove sperimentali; poichè, come precedentemente sottolineato, l'Eurocodice no.2 non tiene conto dell'armatura trasversale nella valutazione della resistenza dell'ancoraggio, l'indicazione dell'eurocodice è rappresentata da una linea orizzontale.

Le Figg. 16a,b,c e 17a,b,c riportano, per le due serie di prove, l'andamento dell'apertura della fessura da spacco, misurata in corrispondenza delle barre trasversali, in funzione dello scorrimento dell'estremo carico della rispettiva barra ancorata. Come si può osservare, le curve relative al provino senza armatura trasversale 1NSP2 della prima serie di prove, per valori dello scorrimento superiori a 0.1 mm si discostano dalle altre evidenziando valori sensibilmente maggiori (Fig. 16a,b,c). Il comportamento anomalo dell'apertura della fessura da spacco w_{s1} del provino "1S8P1" e w_{s2} del provino "1S6P2" è probabilmente da attribuire ad una leggera inclinazione della barra ancorata rispetto alla superficie esterna del provino, come sembrerebbe confermare l'apertura w_{s3} del provino "1S8P1" che mostra valori inferiori rispetto alle altre curve. Nella Figura 16c si può notare come, per valori dello scorrimento minori di 0.3 mm, in corrispondenza della terza armatura trasversale si verificano delle leggere compressioni; tali compressioni potrebbero essere causate dalla piccola eccentricità tra la risultante degli sforzi tangenziali della barra e la reazione di contrasto sul calcestruzzo, che ha provocato un'azione flettente sul provino (Deldossi et al., 1993). Nella Fig. 17 sono mostrati i risultati della seconda serie di prove: si può notare come i risultati relativi al provino "2S6P1" si discostino sensibilmente dagli altri; gli autori non hanno al momento spiegazioni per tale comportamento anomalo.

Le Figure 16d e 17d mostrano la lunghezza della fessura da spacco, misurata a partire

dall'estremo caricato della barra, in funzione della forza applicata all'armatura principale. Si può notare che le curve hanno un andamento simile ad una bilatera e le curve relative al provino "1NSP2", senza armatura trasversale, risultano notevolmente superiori alle altre in quanto la fessura da spacco si è propagata molto più velocemente (Fig. 16d). L'andamento a bilatera evidenzia due diverse velocità di propagazione della fessura da spacco: lenta fino a circa il 50% del carico di picco e successivamente molto più veloce, sia per i provini senza armatura trasversale che per i provini con armatura trasversale.

La Figura 18a riporta i quadri fessurativi finali dei provini della seconda serie di prove. Si può notare la presenza di diverse fessure secondarie che tendono ad orientarsi secondo un angolo di circa 45° rispetto alla barra ancorata. Tali fessure sono dovute ai puntoni a cono di calcestruzzo, concentrici e con vertice sulla barra ancorata, che si formano lungo l'ancoraggio (Tepfers, 1979); occorre osservare che queste fessure secondarie si sono sviluppate solo dopo il raggiungimento del carico di picco. Per la prima serie di prove non è stata invece rilevata alcuna fessura secondaria sulla superficie del provino; questo è probabilmente dovuto sia al maggior valore del copriferro (il doppio rispetto a quello della seconda serie) che alla maggior percentuale di armatura trasversale, e quindi alla maggior azione di contenimento.

La Figura 18b mostra il profilo della fessura da spacco del provino 2S6P2, misurata per tre diversi valori del carico; tale fessura è stata rilevata attraverso l'elaborazione delle frange Moirè con una precisione di circa 1/100 mm.

4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il lavoro ha riguardato una ricerca sperimentale sul comportamento degli ancoraggi di barre ad aderenza migliorata in presenza di armature trasversali di contenimento. In particolare lo studio è stato rivolto al contributo all'azione di contenimento del calcestruzzo di ricoprimento e dell'armatura trasversale. A tal fine sono state condotte due serie di prove sperimentali. Con la prima serie, costituita da sei provini di calcestruzzo con una barra ancorata e diverse percentuali di armatura trasversale (Fig. 5), si è voluto studiare l'influenza dell'armatura trasversale sul comportamento dell'ancoraggio. Con la seconda serie di prove, costituita da quattro provini con due barre principali ancorate e sei armature trasversali aventi diametro $\phi_{st}=6$ mm, si è voluto studiare il contributo dell'azione di contenimento esercitata dal calcestruzzo; a tale scopo in due provini è stata preformata una fessura ideale da spacco per mezzo di un lamierino, mentre negli altri due provini il calcestruzzo era integro.

I risultati ottenuti, relativi ad un numero limitato di provini a causa della complessità operativa delle presenti prove sperimentali, costituiscono comunque un primo passo verso

la corretta conoscenza del problema. Le principali indicazioni fornite dalla sperimentazione sono riassunte nel seguito:

- nei provini senza armatura trasversale di contenimento, in corrispondenza dell'inizio dello scorrimento dell'estremo scarico della barra ancorata, si è verificato il “collasso per splitting” dell'ancoraggio. In tutti gli altri provini, la percentuale di armatura trasversale di contenimento era tale da causare il “collasso per pull-out” dell'ancoraggio (Fig. 13).
- I provini della seconda serie con fessura da spacco preformata hanno mostrato una minor rigidità ma lo stesso carico massimo dei provini senza fessura preformata (Fig. 14). Tale comportamento può essere spiegato dalla notevole apertura della fessura da spacco e dal modesto valore del calcestruzzo di ricoprimento che, in corrispondenza del carico di picco, rendevano trascurabile l'azione di contenimento del calcestruzzo; l'azione di contenimento risultava così affidata alla sola armatura trasversale, uguale per tutti i provini. L'azione di contenimento del calcestruzzo è risultata comunque significativa sul comportamento dell'ancoraggio nelle condizioni di esercizio.
- Lo sforzo di aderenza massimo $\bar{\tau}$, ipotizzato uniformemente distribuito lungo l'ancoraggio, è aumentato all'aumentare dell'indice di contenimento delle staffe Ω ; comunque, oltre il valore $\Omega \approx 0.05$, non si sono riscontrati apprezzabili incrementi di resistenza dell'ancoraggio (Fig. 15).
- Le curve della propagazione della fessura da spacco in funzione del carico applicato mostrano un andamento simile ad una bilatera che indica due diverse velocità di propagazione della fessura da spacco: più lenta fino a circa il 50% del carico massimo e successivamente molto più veloce, sia per i provini senza che per i provini con armatura trasversale (Fig. 16d).

A conclusione del lavoro, si può aggiungere che le modalità di prova e l'attrezzatura messa a punto in questa ricerca permettono di indagare altri aspetti dell'aderenza in presenza di spacco del calcestruzzo, quali:

- l'influenza delle caratteristiche geometriche delle armature principali e trasversali e del calcestruzzo di ricoprimento;
- gli effetti dovuti all'uso di calcestruzzi speciali, ad esempio ad alta resistenza o fibrorinforzati;
- il degrado dell'ancoraggio in presenza di carichi ciclici.

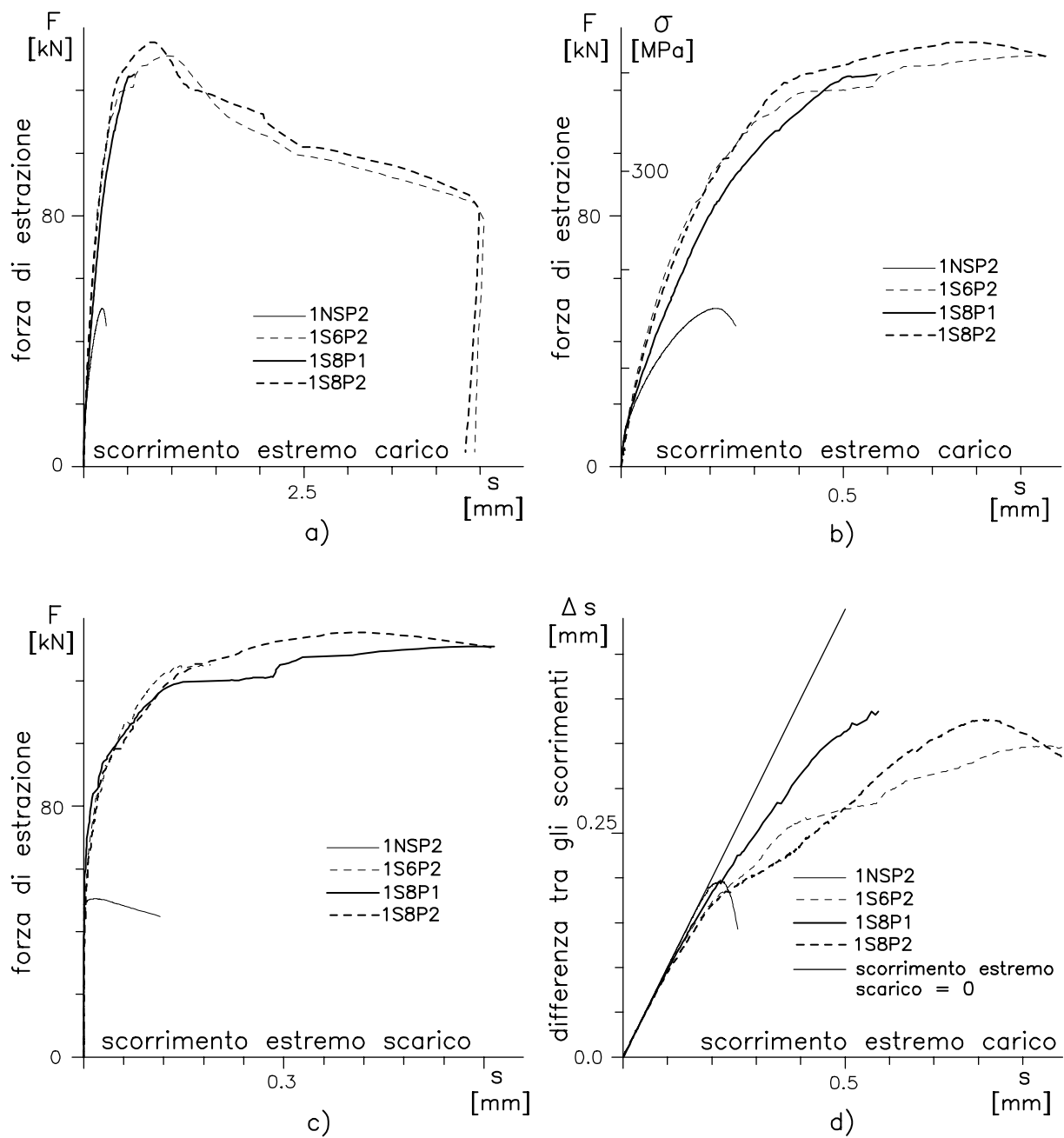


Figure 13: Prima serie di prove: confronto tra le curve carico-scorrimento dell'estremo caricato della barra riportato integralmente (a) e fino al carico di picco (b); confronto tra le curve carico-scorrimento dell'estremo scarico riportate fino al carico di picco (c); rappresentazione della differenza tra gli scorrimenti di estremità in funzione dello scorrimento dell'estremo carico (d).

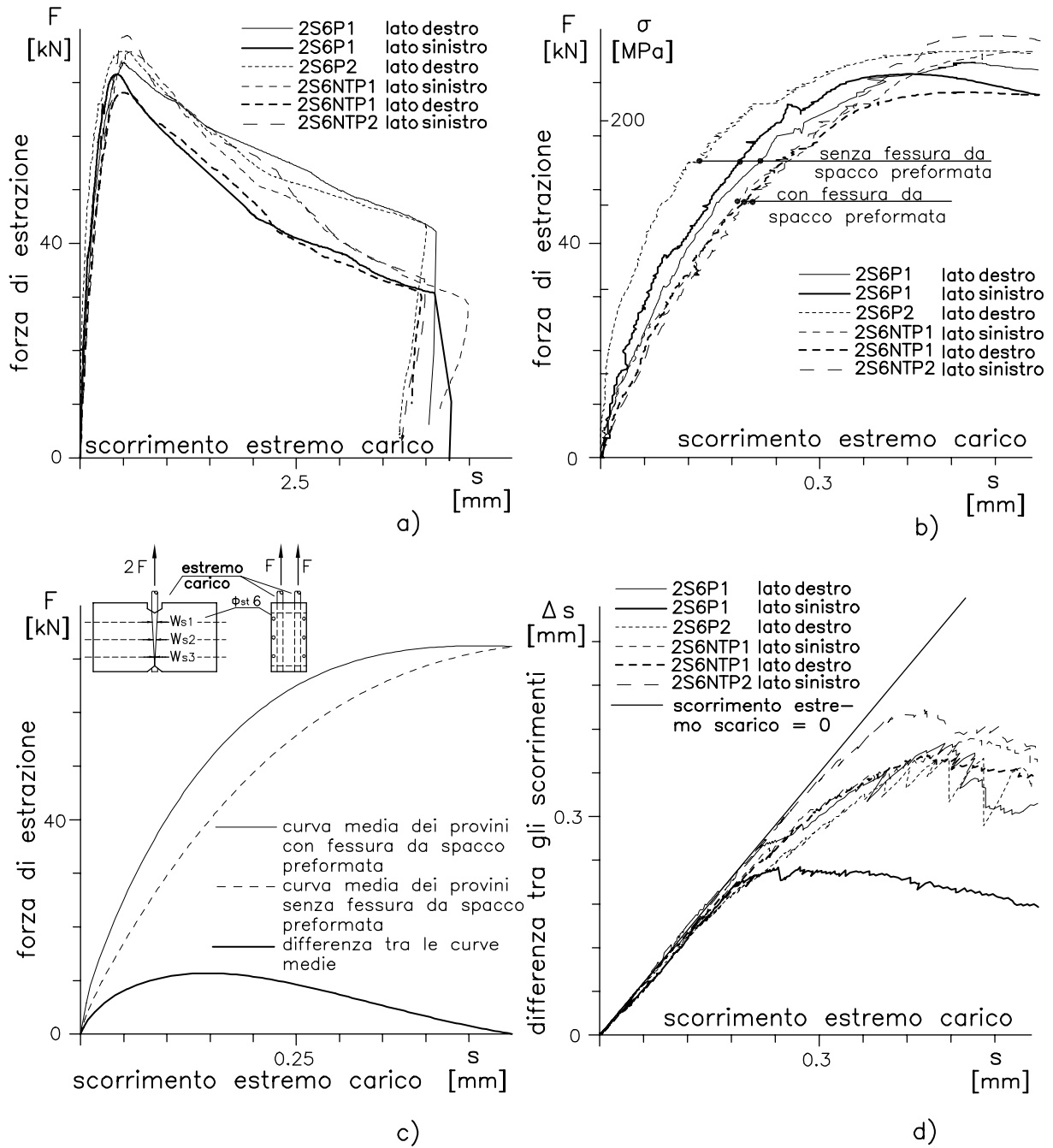


Figure 14: Seconda serie di prove: confronto tra le curve carico-scorrimento dell'estremo carico della barra riportate integralmente (a) e fino al carico di picco (b); confronto tra le curve medie forza di estrazione-scorrimento dell'estremo carico dei provini con e senza fessura da spacco preformata (c); curve della differenza tra gli scorrimenti agli estremi scarico in funzione dello scorrimento dell'estremo carico (d).

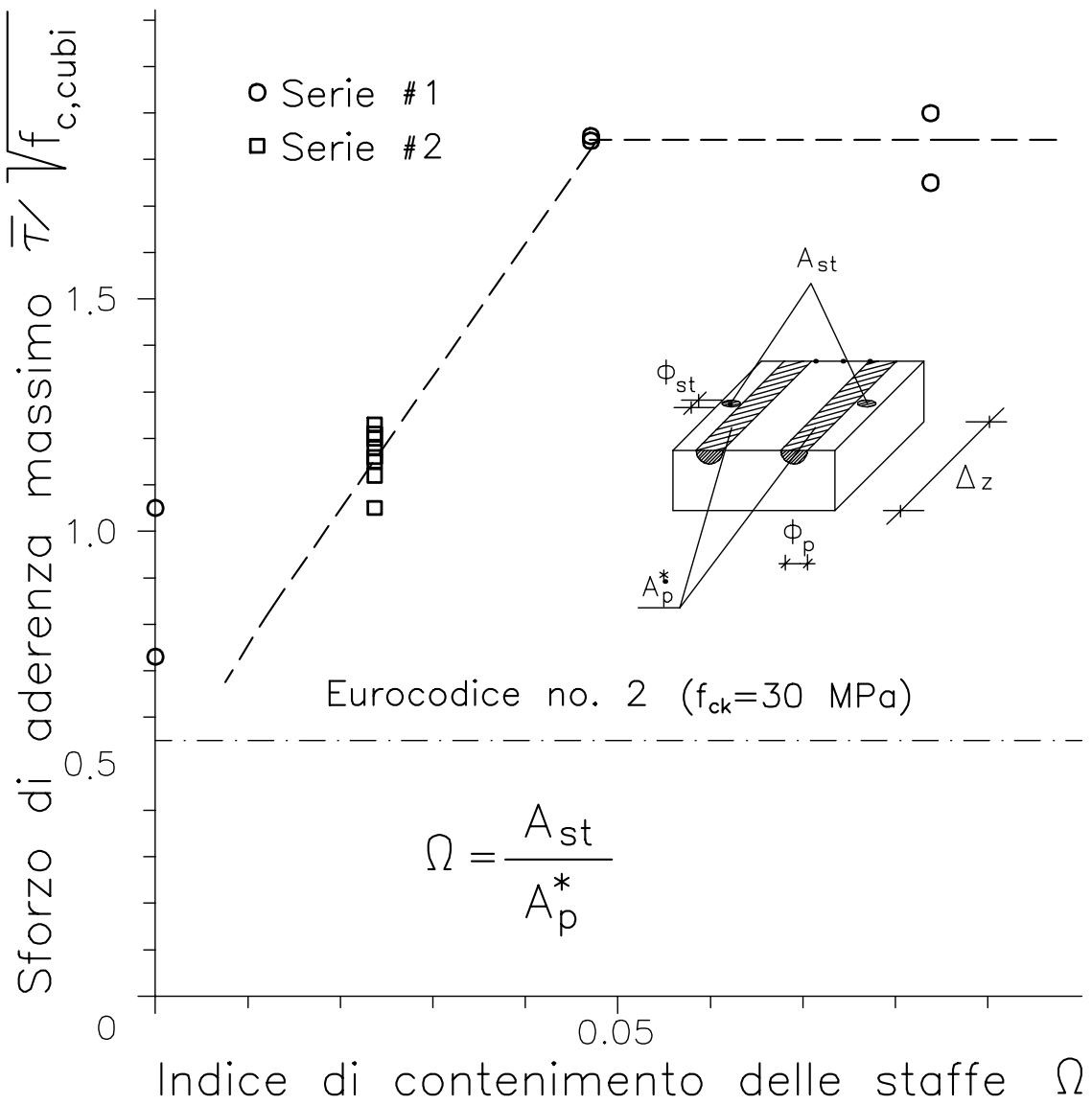
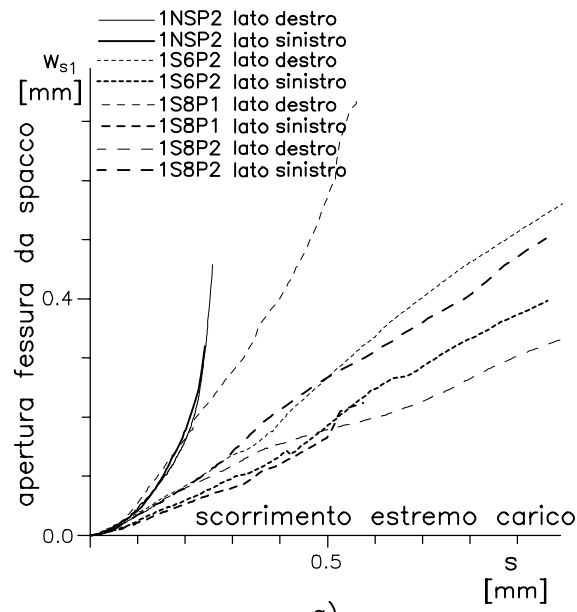
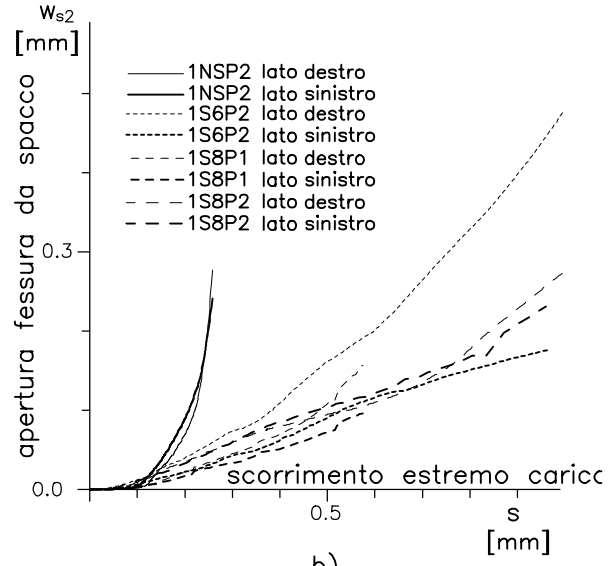


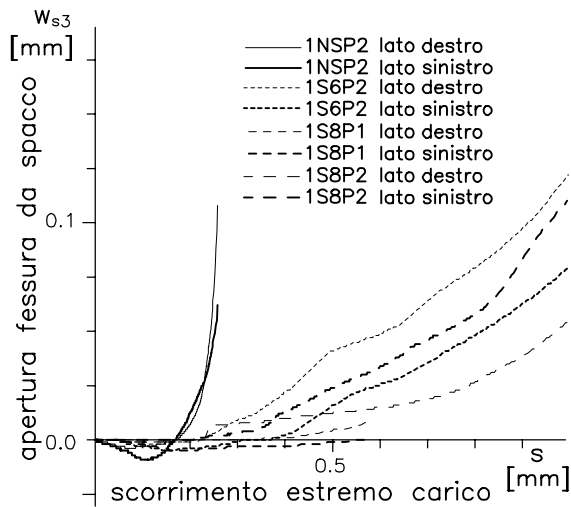
Figure 15: Diagramma dello sforzo di aderenza massimo in funzione dell'indice di contenimento dell'armatura trasversale.



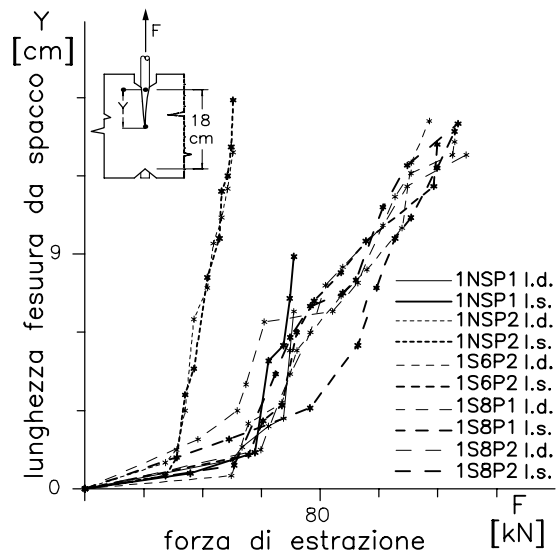
a)



b)

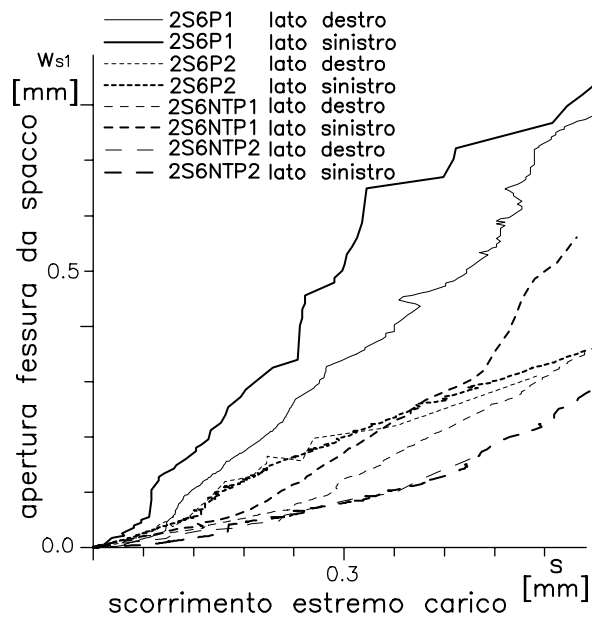


c)

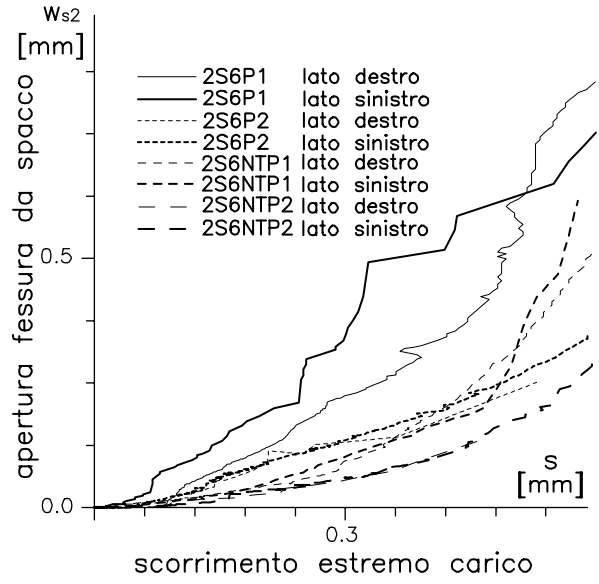


d)

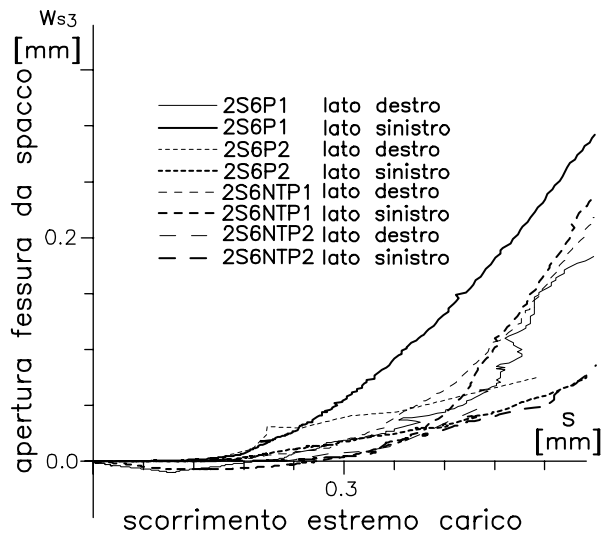
Figure 16: Prima serie di prove: apertura della fessura da spacco w_{s1} (a), w_{s2} (b) e w_{s3} (c) in funzione dello scorrimento dell'estremo carico; lunghezza della fessura da spacco in funzione della forza di estrazione (d).



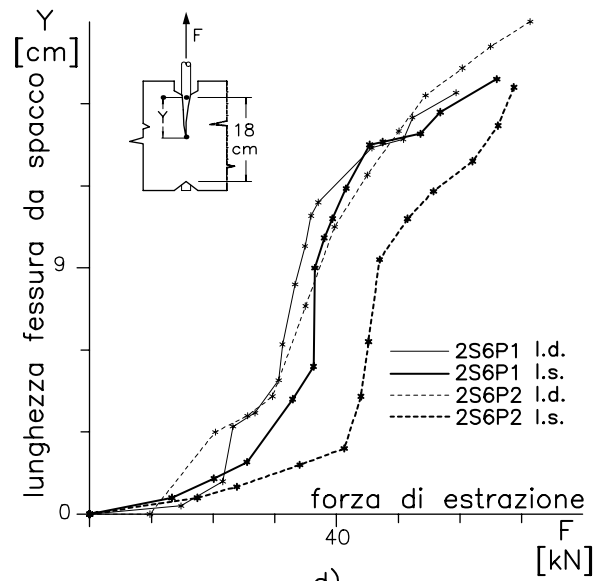
a)



b)



c)



d)

Figure 17: Seconda serie di prove: apertura della fessura da spacco w_{s1} (a), w_{s2} (b) e w_{s3} (c) in funzione dello scorrimento dell'estremo carico; lunghezza della fessura da spacco in funzione della forza di estrazione (d).

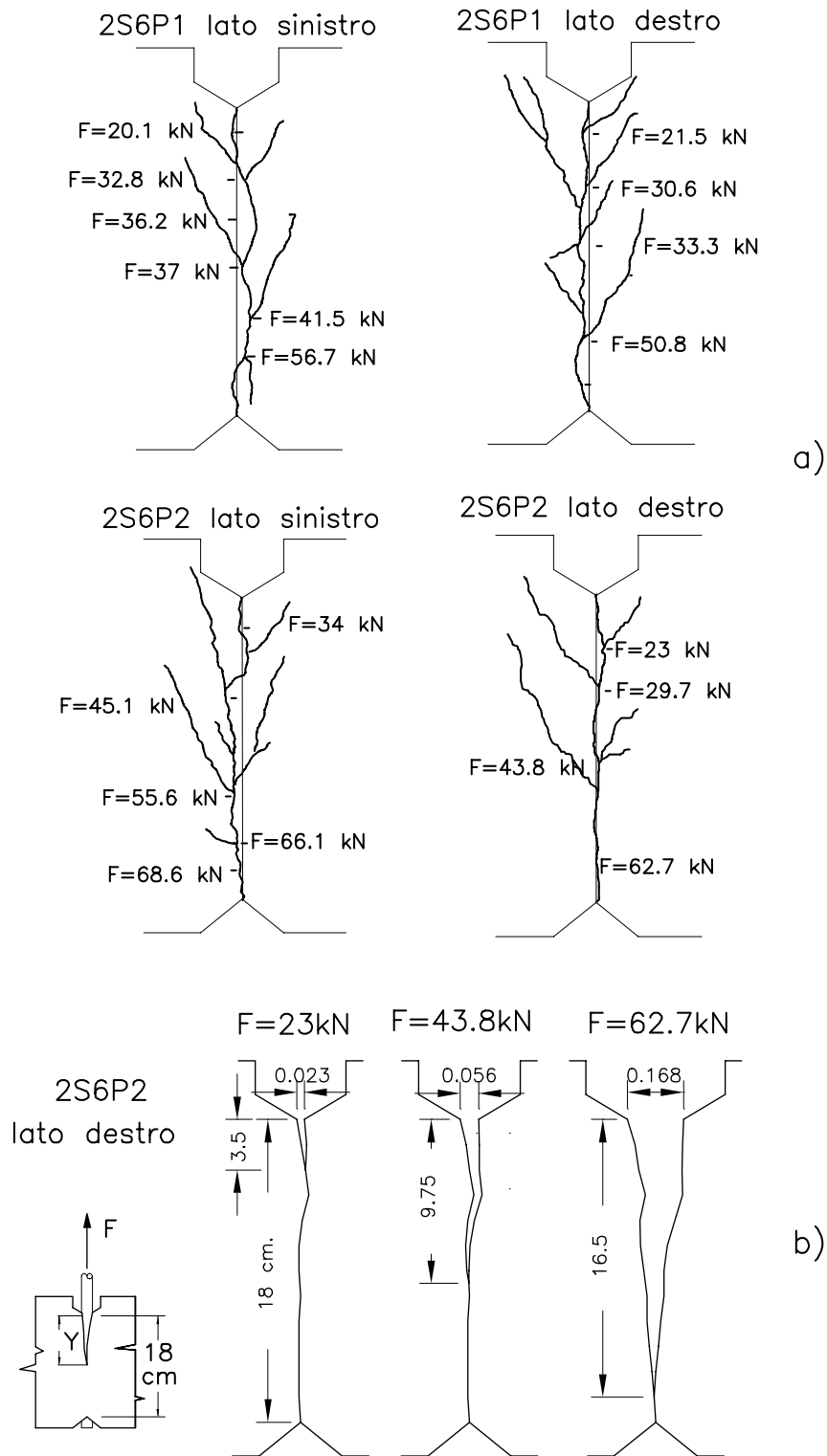


Figure 18: Quadro fessurativo finale rilevato sui due lati dei provini della seconda serie di prove senza fessura da spacco preformata a); fasi di propagazione della fessura da spacco longitudinale sul lato destro del provino “2S6P2”, ottenute dall’elaborazione delle frange Moirè b).

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il Prof. Ezio Giuriani per gli innumerevoli suggerimenti e per il continuo interessamento mostrato durante lo svolgimento della ricerca. Gli autori desiderano inoltre sottolineare che la presente ricerca è stata in parte finanziata con fondi MURST 40% (1990-93) sull'argomento: "Interazione armatura-calcestruzzo e relativi effetti strutturali".

APPENDICE I: CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

A1.1 Calcestruzzo

Per entrambe le prove è stato impiegato calcestruzzo di media resistenza ($f_{ck} \cong 30$ MPa).

La composizione del calcestruzzo impiegato nelle due serie di prove e la granulometria degli inerti sono riportate rispettivamente nelle Tabelle 3 e 4.

Serie	Cemento (R325) [kg/m ³]	Acqua [l/m ³]	rapp. A/C	Inerti [kg/m ³]	Superfluid. [l/m ³]	Slump [cm]
Prima	325	175	0.54	1853	3.3	11
Seconda	325	194	0.597	1853	3.3	7

Table 3: Composizione della miscela di calcestruzzo impiegata per per le due serie di prove.

I getti sono stati eseguiti impiegando casseforme di legno; il calcestruzzo è stato vibrato in tre fasi successive corrispondenti a tre livelli di riempimento del cassero.

Contemporaneamente al getto dei provini, sono stati confezionati sei cilindri di calcestruzzo, aventi un diametro di 10 cm e una lunghezza di 30 cm, e cubetti di calcestruzzo, aventi lato di 15 cm, in numero pari al doppio dei provini confezionati. I provini, i cubetti ed i cilindri di calcestruzzo hanno avuto maturazione in laboratorio, con umidità relativa pari a circa il 70 %. Sui cilindri di calcestruzzo, dopo 28 gg. di maturazione, sono state effettuate prove per la determinazione del modulo elastico tangente $E_{ct,28}$ e secante $E_{cs,28}$ (secondo UNI-6556), della resistenza a compressione $f_{c,28}$ e della resistenza a trazione diretta $f_{ct,28}$. La velocità di carico imposta per la prova di modulo elastico è stata di 0.015 MPa/sec. I provini cubici sono stati impiegati per la determinazione della

Diametro [mm]	Peso [kg/m ³]	Percentuale [%]
0.00÷0.35	229	12.4
0.35÷0.45	39	2.1
0.40÷0.60	51	2.8
0.60÷1.50	223	12
1.50÷2.50	176	9.5
2.50÷3.50	207	11.2
4.00÷6.00	223	12
7.00÷12.0	353	19.1
10.0÷15.0	352	18.9

Table 4: Composizione degli inerti impiegati per il confezionamento del calcestruzzo.

resistenza a compressione $f_{c,cubi}$ al momento della prova (determinata su due cubetti). I risultati ottenuti sono raccolti in Tabella 5.

A1.2 Acciaio

L'acciaio delle barre utilizzate nelle prove è di tipo Fe B 44K ad aderenza migliorata. Nella Tabella 6 sono riportati i valori dei parametri geometrici e meccanici relativi alle barre longitudinali impiegate, descritti anche in Fig. 19

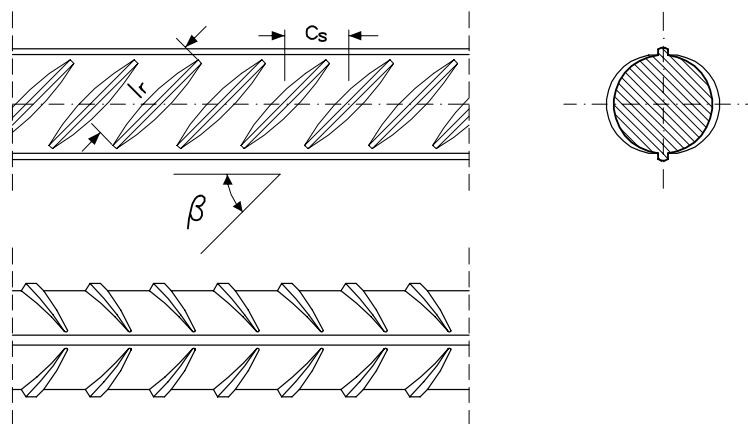


Figure 19: Particolare delle barre d'armatura con indicate alcune caratteristiche geometriche.

APPENDICE II: BIBLIOGRAFIA

Deldossi A.M., e Massimo S. (1993), “Studio sperimentale su barre ancorate in elementi di cemento armato con armatura trasversale di contenimento”, *Tesi per il conseguimento della laurea in Ingegneria Civile, Università di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile*, Ottobre.

Deldossi A. M., Massimo S., e Plizzari G. A. (1993), “Studio sperimentale su barre ancorate in elementi di calcestruzzo armato con armatura trasversale di contenimento”, Technical Report no. 5/93, Università di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile.

D.M. 14.2.1992, “Norme tecniche per le opere in cemento armato, in precompresso, in ferro”, Ministero dei Lavori Pubblici.

Eurocodice no. 2 (1989), “Design of Concrete Structures”, *Part. 1: General Rules and Rules for Buildings*.

Gambarova P. G., e Karakoç C. (1982), “Shear-Confinement Interaction at the Bar-to-Concrete Interface”, P. Bartos Editor, *Bond in Concrete* pp. 82-98. Applied Science Publishers, London, England.

Gambarova P.G., e Giuriani E. (1985), “Discussion of ‘Study of the Transfer of Tensile Forces by Bond.’ by D. H. Jiang, S. P. Shah, and A. T. Andonian.”, *ACI Journal*, Vol. 82, No. 3, pp.381-383.

Gambarova P.G., Rosati G.P., e Sharif O.S. (1992), “Bond and Splitting in Reinforced Concrete”, CEB - Comité Euro International du Béton and RTU - Riga Technical University, *International Conference on: “Bond in Concrete: from Research to Practice”*, Vol. 1, pp 1.48-1.57, Riga, Latvia, October 15-17.

Gambarova P.G., Rosati G.P., e Zasso B. (1989), “Steel-to-Concrete Bond after Splitting: Test results”, *Materials and Structures*, Vol. 22, pp.35-47.

Giuriani E. (1982), “On the Effective Axial Stiffness of a Bar in Cracked Concrete”, P. Bartos Editor, *Bond in Concrete*, pp. 107-126. Applied Science Publishers, London, England.

Giuriani E. e Plizzari G.A. (1985), “Legami locali dell’aderenza in presenza di fessure di “splitting””, *Studi e Ricerche, Scuola di Specializzazione in Cemento Armato F.lli Pesenti, Politecnico di Milano*, Vol. 7, pp. 57-118.

Giuriani E., Plizzari G.A. e Schumm C. (1991), “Role of Stirrups and Residual Tensile Strength of Cracked Concrete on Bond”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, pp. 1-18.

Giuriani E. e Ronca P. (1979), “Il metodo di Moirè per trasparenza per lo studio di travi inflesse in cemento armato”, *Atti del VII Convegno Nazionale A.I.A.S.*, pp. 655-668,

Cagliari 26-29 Settembre.

Giuriani E. e Rosati G.P. (1987), "An Analytical Model for the Study of Crack Propagation in Plain Concrete Elements under Bending", *Studi e Ricerche, Scuola di Specializzazione in Cemento Armato, F.lli Pesenti Politecnico di Milano*, Vol. 9, pp. 107-127.

Malvar R.J. (1991), "Bond of Reinforcement under Controlled Confinement", Technical Report 1833, Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California.

Morita S. e Kaku T. (1979), "Splitting Bond Failures of Large Deformed Reinforcing Bars", *ACI Journal*, Vol. 76, No. 1, pp. 93-110.

Plizzari G.A. e Marchina E. (1994), "Indagine sperimentale sul collasso dell'aderenza in presenza di fessura da spacco longitudinale", *ricerca in corso*.

Plizzari G.A. e Schumm C. (1990), "Sul collasso dell'aderenza per sfilamento della barra e spacco del calcestruzzo", *Studi e Ricerche, Scuola di Specializzazione in Cemento Armato F.lli Pesenti, Politecnico di Milano*, Vol. 12, pp. 81-116.

Plizzari G.A., Schumm C. e Giuriani E. (1987), "The effect of Residual Tensile Strength of Cracked Concrete on the Local Bond-Slip Law after Splitting", *Studi e Ricerche, Scuola di Specializzazione in Cemento Armato F.lli Pesenti, Politecnico di Milano*, Vol. 9, pp. 129-155.

Rehm G. (1961), "Ueber die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton", *Deutscher Ausschuß für Stahlbeton (D.A.f.St)*, Vol. 138, Berlin, Germany.

Reinhardt H.W. e Van der Veen C. (1990), "Splitting Failure of a Strain-Softening Material due to Bond Stresses", Alberto Carpinteri Editor, *Applications of Fracture Mechanics to Reinforced Concrete*, pp. 333-346, Elsevier Applied Science.

Rosati G.P. e Schumm C. (1992), "Modeling of Local Bar-to-Concrete Bond in R.C. Beams", CEB - Comitè Euro International du Bèton and RTU - Riga Technical University, *International Conference on: "Bond in Concrete: from Research to Practice"*, Vol. 3, pp.12.34-12.43, Riga, Latvia, October 15-17.

Tassios T. P. e Koroneos E. G. (1984), "Local Bond-Slip by Means of the Moirè Method", *ACI Journal*, Vol. 81, No. 4, pp.27-34.

Tepfers R. (1973), "A Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars", PhD thesis, Chalmers University of Technology at Goteborg, Sweden.

Tepfers R. (1979), "Cracking of Concrete Cover along Anchored Deformed Reinforcing Bars", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 31, No. 106, pp. 283-301.

APPENDICE III: ON ANCHORAGES AND LONGITUDINAL CRACKING IN R.C. ELEMENTS WITH TRANSVERSE REINFORCEMENT (English Summary)

In anchorages and overlapped splices with ribbed bars having a diameter larger than $12 \div 14$ mm (roughly no.4-5), splitting cracks are often present in the concrete cover because of the highly-stressed rebars. The splitting cracks develop along the anchored bar and, in so doing, they damage the bond, starting from flexural cracks where bar-to-concrete slip is a maximum (Tepfer, 1973; Tepfers, 1979).

In order to control splitting and to improve bond efficiency, a confining action along the anchored bars is needed to withstand the radial pressure due to the ribs. This confining action can be provided by the split concrete-cover (which has a residual tensile strength), by an external transverse pressure (if any) and by the transverse reinforcement distributed along the anchored bars.

If the confining action is not adequate, splitting cracks develop abruptly along the anchored bars and a sudden anchorage collapse occurs (“splitting failure”; Tepfers, 1973; Morita and Kaku, 1979; Reinhardt and Van der Veen, 1990; Giuriani et al., 1991; Plizzari e Schumm, 1990, Fig. 4a). On the contrary, when a confining action is present, bond stresses increase until the compressive failure of the concrete layer around the ribs occurs (“pull-out failure”; Giuriani et al., 1991; Plizzari e Schumm, 1990; Fig. 4b).

Because of the influence of splitting cracks on anchorage response, the anchorage behaviour can be studied if the relationship between the bond stress, the slip and the splitting crack opening is taken into account (Gambarova e Giuriani, 1985). With regard to this relationship, a model valid for a short anchorage (influence zone Δz of one stirrup) was proposed by Giuriani and Plizzari (1985), in which only the confinement due to the transverse reinforcement was included, and by Plizzari et al., (1987), in which the confining contribution of the split concrete cover was also included.

In order to study the whole anchorage behaviour, more specific tests are needed to analyze cracking phenomena which develop around an anchored bar and influence bond response. In fact, most of the experimental results available in the literature regard anchorage strength but, giving little information on cracking phenomena, don't allow to shed light on the problem in its complexity.

The aim of the present research work is to experimentally investigate anchorages with

transverse reinforcement. Particular attention is devoted to the confining contribution of both stirrups and concrete cover. Two series of tests have been performed: in the first series (6 specimens), the influence of the diameter of transverse bars is studied, while in the second series (4 specimens), the confining contribution of concrete cover is analyzed.

The principal results can be summarized as follows:

- In specimens without transverse reinforcement, a sudden splitting collapse of the anchorage occurred at the onset of the slip of the unloaded end, while in the other specimens, the transverse reinforcement percentage was such that a pull-out anchorage failure occurred.
- The larger the stirrup index of confinement $\Omega (= n_{st}A_{st}/n_p\phi_p\Delta z$; Giuriani et al., 1991) was, the higher the maximum bond stress $\bar{\tau}$ became. However, beyond $\Omega \approx 0.05$, no significant increase of bond strength occurred (Fig. 15).
- The splitting-crack propagation rate exhibited a sudden increase when the pull out load was close to $\approx 50\%$ of the peak load (Fig. 16d, 17d).
- Finally, the proposed test modalities and set-up makes it possible to extend the investigation to other important aspects of bond, such as the effects of various arrangements of the main and transverse bars, the bond properties when high performance concretes are used (as High Strength Concrete and Fiber Reinforced Concrete), and bond deterioration due to cyclic loading.

Provino	$f_{c,28}$ [Mpa]	$f_{ct,28}$ [MPa]	$E_{ct,28}$ [MPa]	$E_{cs,28}$ [MPa]	Maturazione [giorni]	$f_{c,cubi}$ [MPa]
1NSP1	34.5	2.75	306000	262000	52	39.4
1NSP2					60	37.3
1S6P1					39	38.1
1S6P2					75	39.4
1S8P1					68	40.0
1S8P2					81	39.7
2S6P1					28.3	2.61
2S6P2	49	32.1				
2S6NTP1	42	33.0				
2S6NTP2	54	33.6				

Table 5: Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo impiegato nelle prove.

Diametro nominale ϕ [mm]	6	8	20	$I_r = \frac{2a_m l_r \sin\beta}{\pi D c_s}$
Diametro del nocciolo D [mm]	6.29	8.15	19.25	
Altezza media nervature a_m [mm]	0.26	0.314	1.13	
Inclinazione nervature β	52°	55°	58°	
Interasse nervature c_s [mm]	5.0	5.6	12.7	
Lunghezza nervature l_r [mm]	11	15	35.0	
Indice d'aderenza I_r	0.0479	0.055	0.0842	
Snervamento f_{sy} [MPa]	505	542	463	
Rottura f_{st} [MPa]	731	614	740	

Table 6: Caratteristiche geometriche e meccaniche delle barre di armatura.