

**Studio sul collasso dell'aderenza  
in presenza di armatura trasversale**

**Giovanni A. PLIZZARI**

**Egidio MARCHINA**

*La presente ricerca è stata finanziata dalla Ferriera Valsabbia S.p.A. di Odolo (BS). I risultati riportati nel presente lavoro sono stati pubblicati anche nel Technical Report N.5-8/96 del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Brescia.*

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Descrizione delle prove</b>	<b>7</b>
2.1	Caratteristiche dei provini . . . . .	7
2.2	Strumentazione . . . . .	13
2.3	Descrizione del banco . . . . .	14
2.4	Modalità di prova . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Caratteristiche dei materiali</b>	<b>17</b>
3.1	Calcestruzzo . . . . .	17
3.2	Acciaio . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Risultati sperimentali</b>	<b>21</b>
4.1	Presentazione dei risultati sperimentali . . . . .	21
4.2	Legame sforzo di aderenza-scorrimento . . . . .	24
4.3	Tensioni nell'armatura trasversale . . . . .	24
4.4	Apertura della fessura da spacco . . . . .	29
4.5	Resistenza dell'aderenza . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Considerazioni conclusive</b>	<b>37</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>41</b>
<b>A</b>	<b>Diagrammi delle prove sperimentali</b>	<b>47</b>

# Chapter 1

## Introduzione

Negli ancoraggi e nelle giunzioni per sovrapposizione di armature ad aderenza migliorata le nervature esercitano una pressione radiale e provocano la formazione di tensioni circonferenziali sul calcestruzzo circostante la barra (Fig. 1.1a). Quando le tensioni circonferenziali superano la resistenza a trazione del calcestruzzo ha inizio la formazione delle fessure longitudinali da spacco (comunemente denominate “fessure di splitting”) che, partendo dalla barra, si sviluppano lungo piani che la contengono (Fig. 1.1b). Nelle travi le fessure da spacco iniziano dalle fessure flessionali dove lo sforzo di aderenza è massimo e tendono a propagarsi lungo tutta la barra (Fig. 1.2) [3].

Al fine di limitare la fessurazione da spacco e quindi di migliorare l’aderenza, risulta fondamentale prevedere una adeguata azione di contenimento lungo la barra ancorata. Tale azione di contenimento è in generale fornita dal calcestruzzo di ricoprimento con la sua resistenza residua a trazione [4, 5], da eventuali pressioni esterne [6, 7, 8], e dall’armatura trasversale presente lungo la barra [9, 10] (Fig. 1.3). Quest’ultimo contributo diventa particolarmente importante nelle travi con piccoli valori del copriferro e dell’interferro dove, in assenza di armatura trasversale, le fessure da spacco tendono a propagarsi velocemente ed a causare il collasso improvviso dell’aderenza (collasso per “splitting”, Fig. 1.4a), in quanto l’apertura della fessura diventa tale da consentire lo scorrimento libero della barra ancorata [3, 11, 12]. Viceversa, in presenza di un’adeguata azione di contenimento, lo sforzo locale di aderenza può aumentare fino alla rottura per tranciamento dei denti di calcestruzzo tra le nervature della barra (Fig. 1.4b); in questo caso si verifica il collasso locale dell’aderenza per danneggiamento del calcestruzzo circostante la barra (collasso per “pull-out”). In situazioni intermedie l’armatura trasversale potrebbe consentire di evitare il collasso per “splitting” ma la tensione presente in essa potrebbe superare la resistenza di progetto prima del raggiungimento della resistenza dell’aderenza.

Poichè il legame locale dell’aderenza è influenzato dalla fessurazione di spacco, per poter affrontare il problema in modo generale occorre innanzitutto conoscere il legame locale tra lo sforzo di aderenza e lo slittamento che metta in conto l’apertura della fessura da spacco. Sulla base di relazioni teoriche e/o empiriche, fornite dai risultati di studi sui singoli fenomeni che governano l’aderenza, nel lavoro [10] è stato proposto

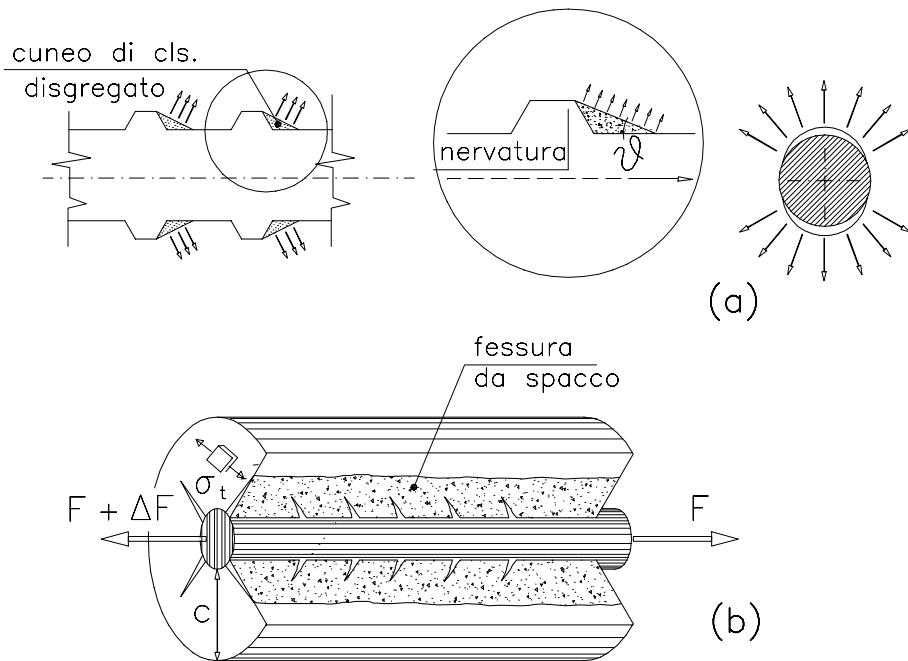


Figure 1.1: Cunei di conglomerato a monte della nervatura [1] e spinte radiali da essi esercitate (a); fessure trasversali e longitudinali da spacco [2] (b).

un modello teorico per il legame locale sforzo di aderenza-slittamento in presenza di fessure da spacco. A tale modello è stato successivamente aggiunto il contributo al contenimento fornito dalla resistenza a trazione del calcestruzzo fessurato lungo il piano contenente le barre ancorate [12, 14]. Il modello teorico è risultato in ottimo accordo con alcuni risultati sperimentali ottenuti sia dagli autori [10] che da altri ricercatori [9]. Il modello proposto da Giuriani e Plizzari tiene conto dei singoli meccanismi resistenti che intervengono e che sono stati studiati separatamente da diversi ricercatori [15, 16, 17, 5]. Tale modello richiede però conferme sperimentali, considerando che molti dei parametri che lo caratterizzano sono legati a relazioni di tipo empirico.

Sulla base del modello proposto in [12] Plizzari e Schumm [13] che hanno successivamente approfondito il problema specifico del collasso locale dell'aderenza, determinando una relazione in forma chiusa tra la massima tensione nell'armatura trasversale e la sua percentuale lungo l'ancoraggio. Questa relazione rappresenta certamente uno strumento importante per la progettazione in quanto consente di controllare la crisi dell'armatura trasversale nei problemi di ancoraggio; si deve però osservare che sarebbe ancora più utile disporre di una relazione tra la tensione dell'aderenza e l'area dell'armatura trasversale presente lungo la barra ancorata.

Scopo del presente lavoro è lo studio sperimentale del comportamento e del collasso dell'aderenza nella zona di influenza di una singola staffa ( $\Delta z$ , Fig. 1.2), al variare del quantitativo di armatura trasversale. A tale scopo, per evidenziare gli effetti

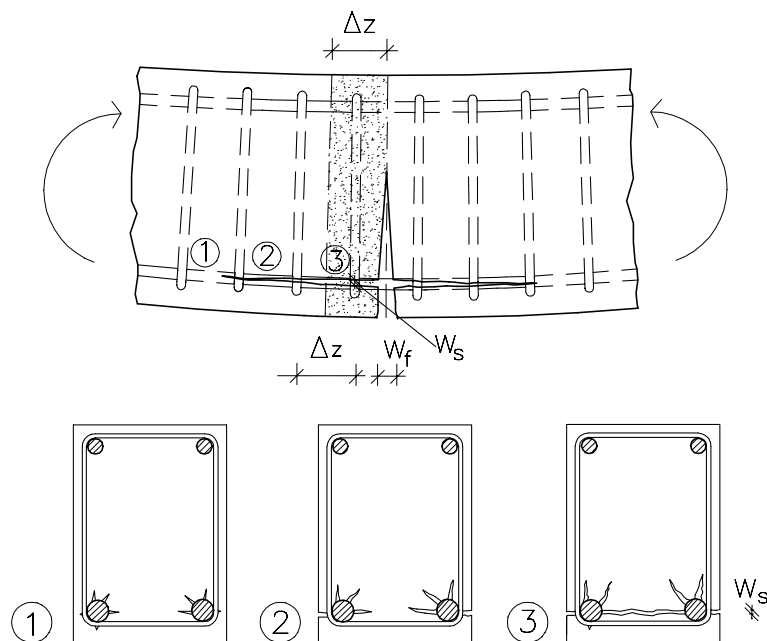


Figure 1.2: Fessura flessionale e fessura longitudinale da spacco.

della fessura da spacco, sono state impiegate barre di relativamente grande diametro ( $\phi_p=24$  mm), caratterizzate da una elevata spinta radiale, ed armature trasversali aventi diametro variabile da 5 a 10 mm. I risultati sono relativi alla forza applicata alla barra, agli scorrimenti nei punti di estremità dell'ancoraggio, all'apertura della fessura da spacco ed alla tensione nelle armature trasversali. I risultati sperimentali di interesse progettuale, quali la resistenza dell'ancoraggio e la tensione nell'armatura trasversale, sono confrontati con i valori del modello teorico proposto in [12] e con i valori prescritti dall'Eurocodice 2 [18].

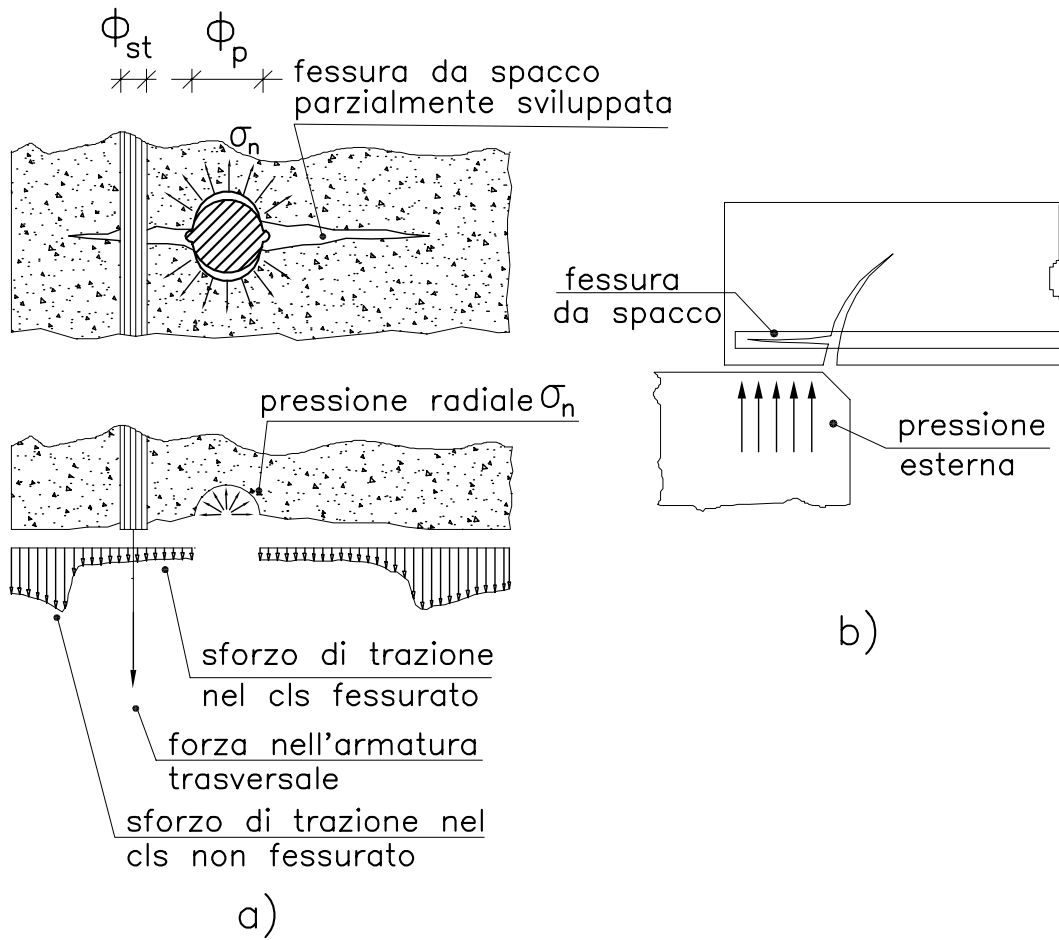


Figure 1.3: Azioni di contenimento sulla barra ancorata [12].

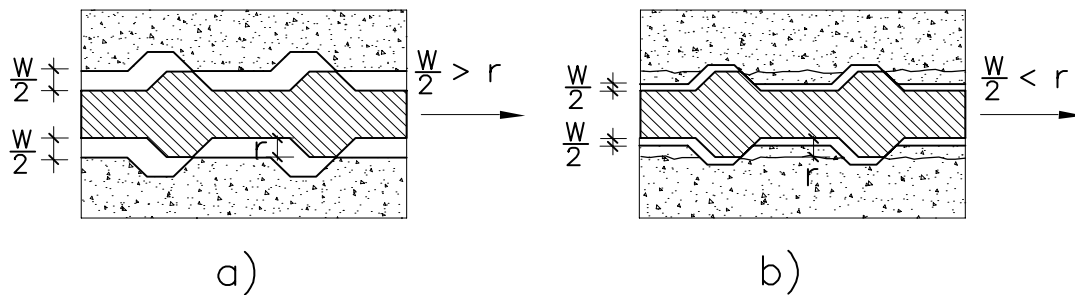


Figure 1.4: Collasso locale dell'aderenza per "splitting" (a) e per "pull-out" (b) [13].

# Chapter 2

## Descrizione delle prove

### 2.1 Caratteristiche dei provini

Per lo studio del comportamento dell'aderenza sono state effettuate prove di estrazione su due barre ancorate in un prisma di calcestruzzo. I provini sperimentali hanno lo scopo di simulare il comportamento di due barre ancorate in una trave, nella zona di influenza ( $\Delta z$ ) di una staffa a due braccia (Fig. 2.1); il blocco di calcestruzzo è stato semplificato posizionando le barre ancorate nel piano di simmetria AA del provino (Fig. 2.2b). La lunghezza del tratto ancorato delle barre, pari alla distanza tra le armature trasversali ( $\Delta z$ ), è stata assunta pari a 150 mm; tale lunghezza è stata controllata rimuovendo le nervature esterne a tale tratto per mezzo di una tornitura della barra in modo da disattivare l'aderenza (Fig. 2.3). Le due armature trasversali sono state assunte di diametro variabile da 5 a 10 mm allo scopo di studiare gli effetti della diversa azione di contenimento delle staffe. Per poter valutare l'azione di contenimento del solo calcestruzzo, sono state anche effettuate prove su elementi sprovvisti di armatura trasversale.

La massima sollecitazione nell'armatura trasversale si verifica quando le barre ancorate sono molto vicine tra di loro, cioè quando il copriferro e l'interferro sono molto piccoli; in questo caso la fessura da spacco tende a propagarsi nel piano contenente le barre (Fig. 1.2). Per poter simulare sperimentalmente questa situazione, le armature sono state orientate con le nervature dirette verso i blocchi di calcestruzzo C1 e C2, in modo da favorire la formazione della fessura da spacco lungo il piano di simmetria AA passante per l'asse delle armature ancorate (Fig. 2.2b). La formazione della fessura in tale piano è stata favorita anche dalla presenza di due angolari di acciaio posizionati alle estremità del provino. Le armature trasversali di contenimento, disposte ortogonalmente alla fessura da spacco, sono lunghe quanto il prisma in modo da poter essere considerate illimitate nei confronti dello scollamento che si verifica in corrispondenza della fessura. Le loro nervature sono state orientate in modo da non creare spinte verso la superficie esterna del provino (Fig. 2.2c).

Quando si progettano ancoraggi di armature ad aderenza migliorata, si deve fare riferimento a due parametri particolarmente significativi.



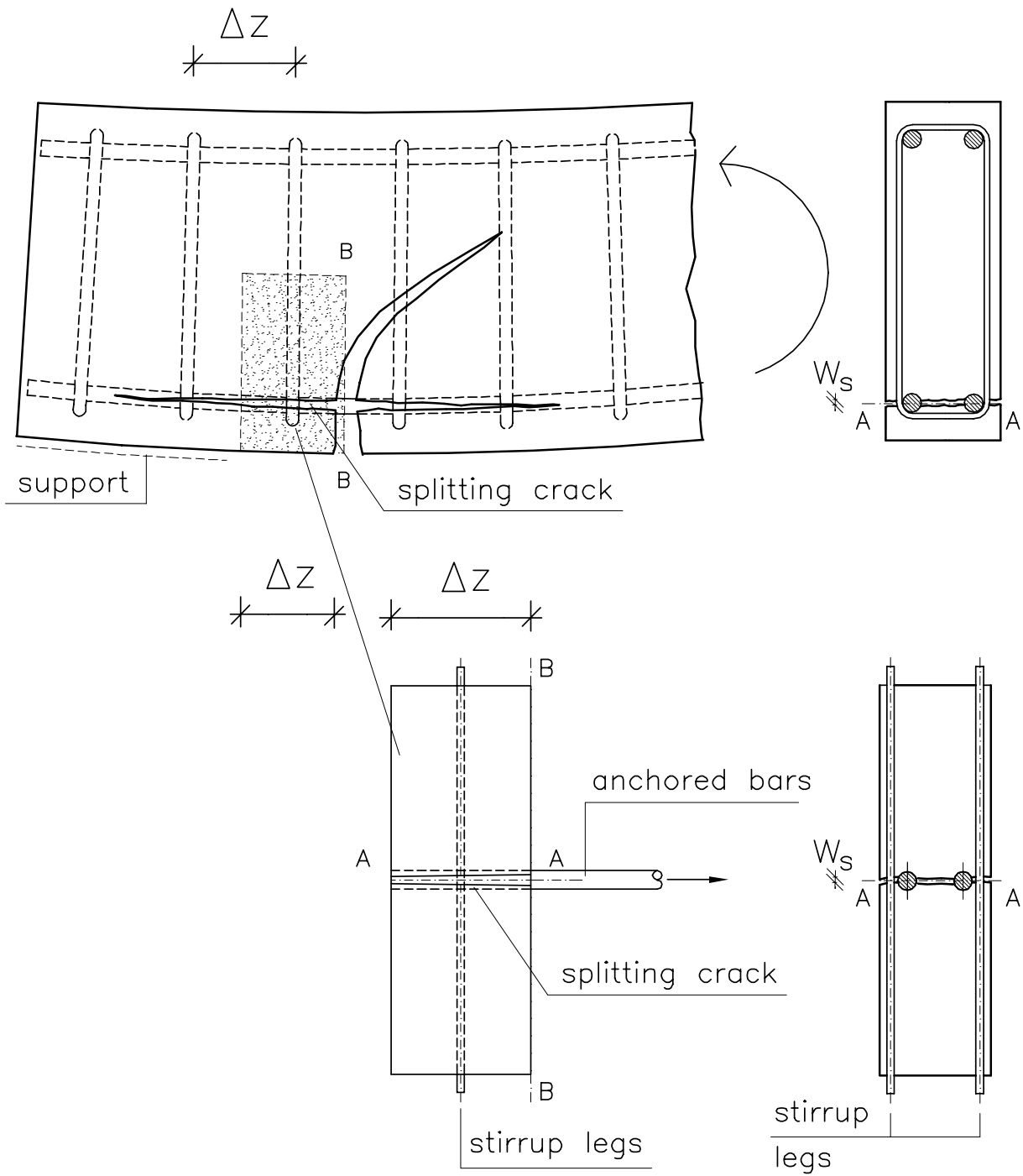


Figure 2.1: Schema del provino sperimentale.

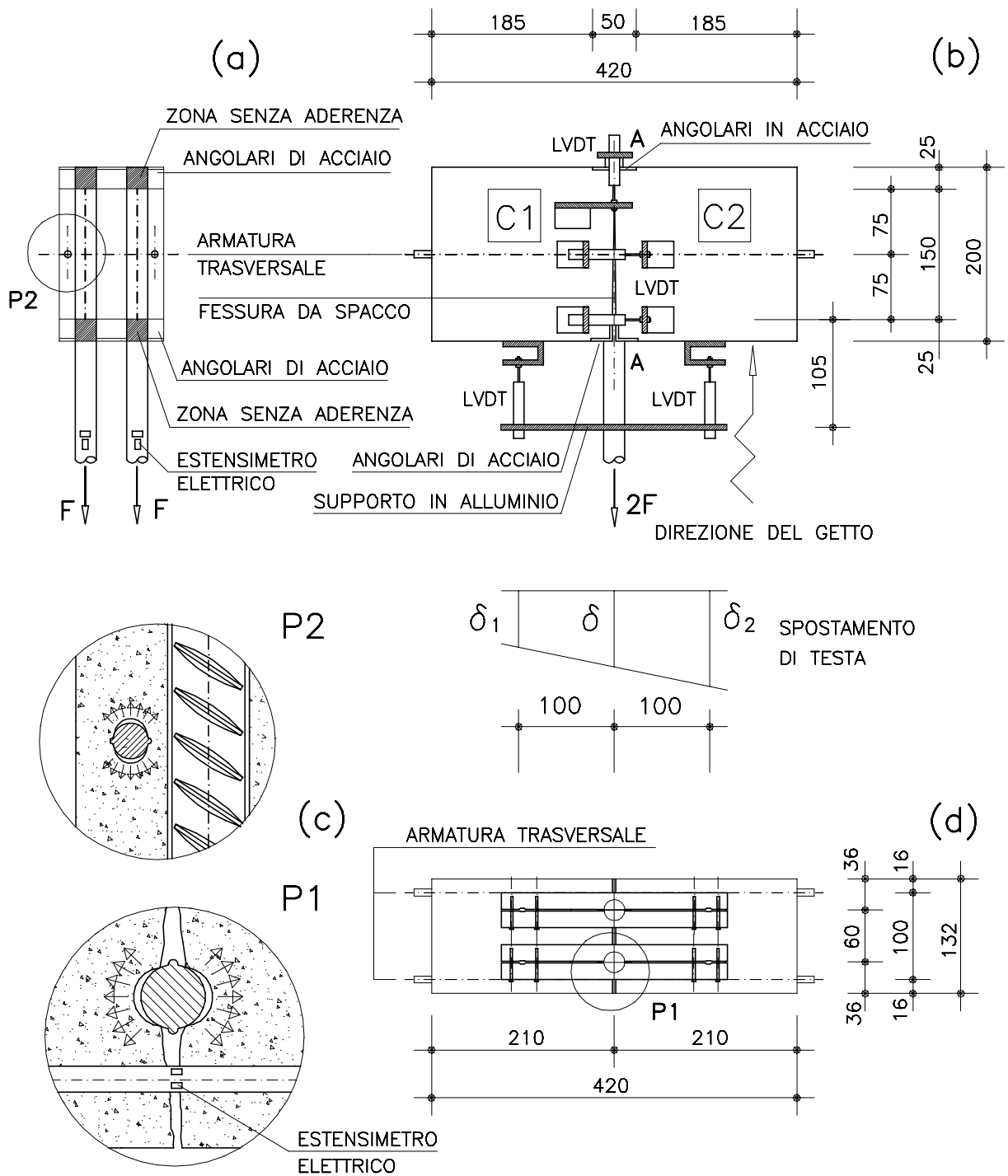


Figure 2.2: Caratteristiche geometriche dei provini (misure in millimetri).

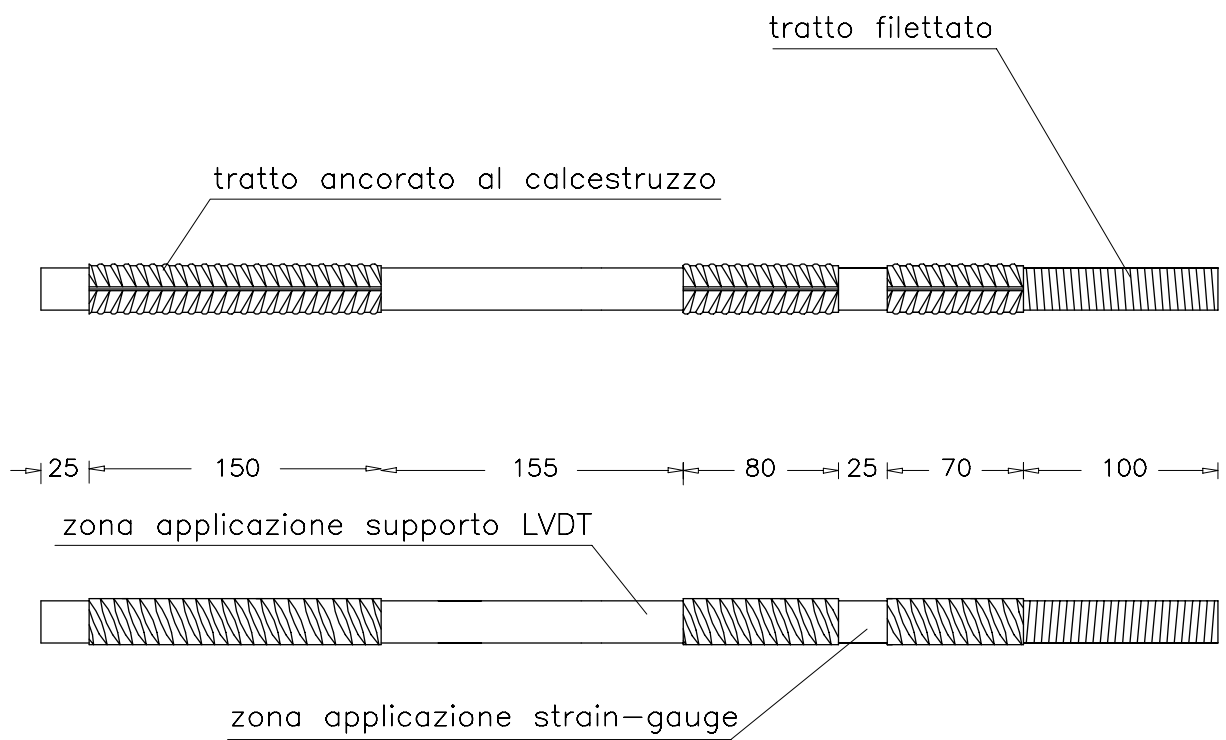


Figure 2.3: Particolare delle armature impiegate.

- Il primo è l'*Indice di contenimento delle staffe*, definito come

$$\Omega = \frac{A_{st}}{A_p^*} = \frac{n_{st}A_{st}}{n_p\phi_p\Delta z}, \quad (2.1)$$

dove  $n_p$  e  $\phi_p$  sono il numero ed il diametro delle barre principali,  $n_{st}$  e  $A_{st}$  sono il numero e l'area delle staffe in  $\Delta z$  (Fig. 2.4). Tale indice è particolarmente indicato per rappresentare l'azione di contenimento delle armature trasversali ed interviene nel modello di Giuriani e Plizzari [10]. Un indice simile era già stato impiegato da Morita e Fujii [19] per rappresentare la resistenza ultima di ancoraggi con armatura trasversale.

- Il secondo è l'*Indice di contenimento del calcestruzzo* [12], definito come

$$B = \frac{(b - n_p\phi_p)}{n_p\phi_p} \quad (2.2)$$

dove  $b$  è la larghezza della trave (Fig. 2.4).

Nella Tabella 2.1 sono riportati, per tutti i provini, i diametri delle staffe ed i corrispondenti valori di  $\Omega$ .

La larghezza di tutti i provini, pari a 132 mm, è stata scelta in modo da avere un piccolo spessore del calcestruzzo di ricoprimento, vicino ai minimi previsti dalle normative; a tale spessore corrisponde un valore di  $B$  pari a 1.75.

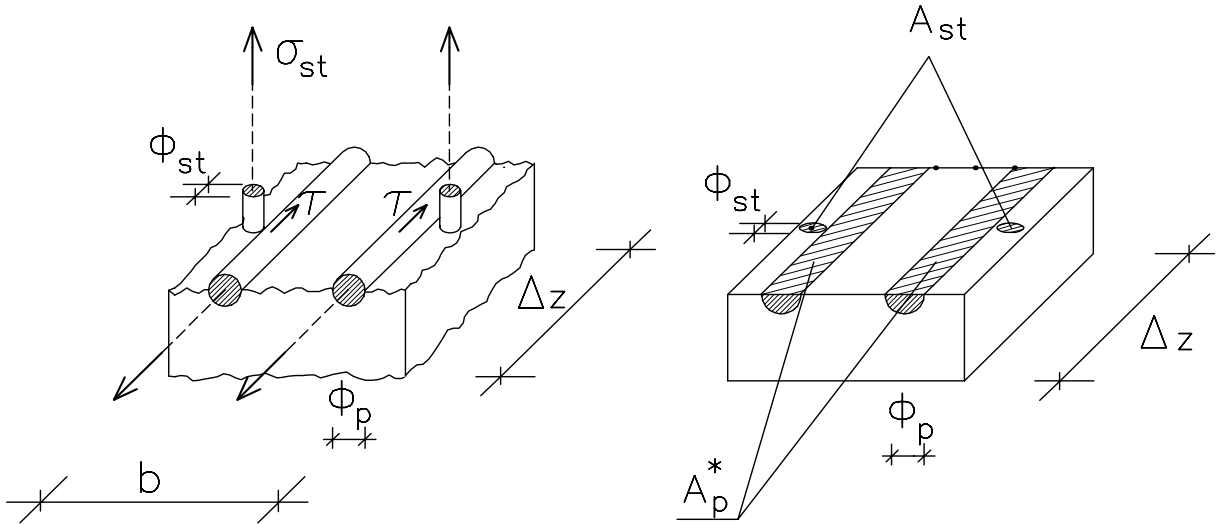


Figure 2.4: Caratteristiche geometriche dell'armatura ancorata e dell'armatura trasversale.

Il getto è stato effettuato nella stessa direzione delle armature principali e nel verso opposto a quello della forza di estrazione  $F$ , in modo da garantire un migliore comportamento del calcestruzzo durante la prova [20] (Fig. 2.2a).

Provino	$\phi_{st}$ [mm]	$\Omega$	$A_{st1L}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{st1R}$ [mm <sup>2</sup> ]
15NSP1	-	0	-	-
15NSP2	-	0	-	-
15S5P1	5	0.005454	19.29	19.29
15S5P2	5	0.005454	17.00	19.29
15S5P3	5	0.005454	18.01	19.02
15S5P4	5	0.005454	18.30	18.47
15S5P5	5	0.005454	19.29	19.29
15S6P1	6	0.007854	23.77	28.39
15S6P2	6	0.007854	23.05	28.39
15S6P3	6	0.007854	28.39	28.39
15S6P4	6	0.007854	28.39	28.39
15S8P1	8	0.01396	44.60	45.80
15S8P2	8	0.01396	46.90	48.54
15S8P3	8	0.01396	48.77	48.77
15S8P4	8	0.01396	48.77	48.77
15S10P1	10	0.021817	71.12	70.74
15S10P2	10	0.021817	75.54	73.97
15S10P3	10	0.021817	73.21	71.71
15S10P4	10	0.021817	75.71	75.71

Table 2.1: Caratteristiche geometriche dell'armatura trasversale dei provini.

## 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") ed a quello scarico (nel seguito definito anche "di coda"), l'apertura della fessura da spacco (misurata in corrispondenza sia dell'estremo caricato che delle barre trasversali) e la tensione nell'armatura trasversale (Fig. 2.2b).

Per la misura dello scorrimento all'estremo caricato di ogni barra ancorata, sono stati impiegati due trasduttori di spostamento induttivi (*Linear Variable Differential Transformers*), al fine di depurare eventuali rotazioni della barra (Fig. 2.2b). I contrasti degli LVDT sono stati posizionati sulla faccia del provino a contatto con la piastra di contrasto. La misura dello scorrimento di testa  $\delta_L$  è stata determinata depurando dallo spostamento misurato  $\delta$ , la deformazione elastica della barra nella zona tra il punto di applicazione degli LVDT e l'inizio del tratto ancorato, pari a circa 105 mm (Fig. 2.2b). La misura dello scorrimento dell'estremo libero è stata effettuata impiegando un trasduttore di spostamento per ogni barra, posizionato nelle immediate vicinanze della barra.

L'apertura delle fessure da spacco è stata rilevata sempre per mezzo di LVDT; la misura del trasduttore praticamente coincide con l'apertura della fessura da spacco in quanto la deformazione elastica del calcestruzzo in tale zona può essere ritenuta trascurabile.

La forza di estrazione applicata alla singola barra ancorata è stata misurata per mezzo di estensimetri elettrici (Figg. 2.2a e 2.3). Il carico totale applicato al provino è stato misurato anche dalla cella di carico da 250 kN della macchina di prova Instron 1274; tale misura ha consentito di effettuare un controllo sui valori ottenuti dagli estensimetri elettrici.

Come le barre ancorate, anche alcune staffe sono state strumentate con estensimetri elettrici, in corrispondenza della sezione di mezzeria AA (Fig. 2.2c); ciò ha consentito di misurare la loro deformazione e, fintanto che sono rimaste in campo elastico, lo sforzo presente in esse. L'applicazione degli estensimetri ha richiesto lo spianamento di una piccola parte della barra e quindi una leggera riduzione della sua sezione reagente (Tab. 2.1); tale sezione è stata determinata dalla curva di taratura, assumendo un modulo di elasticità tangenziale dell'acciaio pari a 206000 MPa.

Tutti i segnali analogici provenienti dagli estensimetri e dagli LVDT sono stati convertiti in segnali digitali da una centralina HBM UPM100, e quindi memorizzati in un personal computer con una frequenza di circa 0.2 Hz.

La formazione e la propagazione della fessura da spacco è stata evidenziata applicando sulla faccia del provino, in corrispondenza della zona della fessura, un sottile strato di gesso. La posizione dell'apice della fessura da spacco durante la sua propagazione lungo il provino è stato rilevato per mezzo di una lente di ingrandimento (6x).

## 2.3 Descrizione del banco

La prova di estrazione rappresenta certamente uno dei metodi più semplici per effettuare prove di aderenza; questo tipo di prova è influenzata però dall'azione di contenimento che si verifica a causa dell'attrito tra la superficie del provino e la piastra di contrasto che, al contrario dell'azione di contenimento dovuta all'armatura trasversale ed al calcestruzzo, è legata solamente alla prova sperimentale e non al comportamento della barra ancorata nella struttura. Tale azione varia inoltre da prova a prova e durante la prova stessa, a causa della variazione del carico di estrazione. Per evitare questa azione di contenimento, le prove sono state effettuate impiegando il banco di prova proposto da Plizzari, Deldossi e Massimo [21] che consente la libera apertura della fessura da spacco principale (lungo il piano AA di Fig. 2.2b), in quanto lungo tale piano sono state separate le piastre di contrasto inferiori (Fig. 2.5). Queste sono collegate alle piastre superiori per mezzo di barre filettate che, comportandosi come bielle, non esercitano alcuna azione di contenimento sul provino. Un banco per prove di estrazione che consentiva la libera apertura della fessura da spacco era già stato impiegato da Giuriani e Plizzari [10].

All'aumentare dell'apertura della fessura da spacco i blocchi di calcestruzzo sono soggetti ad una rotazione relativa ed il punto di contatto con la piastra di contrasto tende a localizzarsi in corrispondenza della barra ancorata, riducendo in questo modo l'eccentricità tra la forza di contrasto e gli sforzi tangenziali sulla barra [10]; la presenza degli angolari di acciaio consente quindi di limitare le deformazioni di compressione locali del calcestruzzo.

Il banco è predisposto per essere inserito nella macchina di prova servocontrollata Instron 1274-8500, presente nel laboratorio P. Pisa dell'Università di Brescia. Il banco nel suo complesso si può ritenere sufficientemente rigido per poter condurre prove a controllo di spostamento.

## 2.4 Modalità di prova

Le prove sperimentali consistono nell'applicare una forza di estrazione di tipo quasi statico alla barra ancorata nel provino di calcestruzzo. Il servocontrollo della macchina è stato realizzato attraverso la corsa del pistone e quindi dello spostamento dell'estremo caricato della barra. La velocità di spostamento imposta alla macchina di prova è stata pari a 0.002 mm/min fino al raggiungimento del carico di picco, oltre il quale la velocità veniva aumentata gradualmente. In realtà, la velocità di scorrimento effettiva dell'estremo caricato della barra è risultata ben inferiore a quella imposta dalla macchina di prova a causa dei giochi presenti nelle unioni bullonate e della deformabilità elastica del banco. La velocità dello scorrimento all'estremo caricato della barra è risultata mediamente di 0.0005 mm/min fino al raggiungimento del carico di picco, ed è aumentata fino a 0.025 mm/min nella fase finale della prova. La Figura 2.6 mostra il tipico andamento dello scorrimento all'estremo caricato della barra in funzione del tempo, ottenuto dal provino 15S8P1. La velocità di spostamento imposta consente di

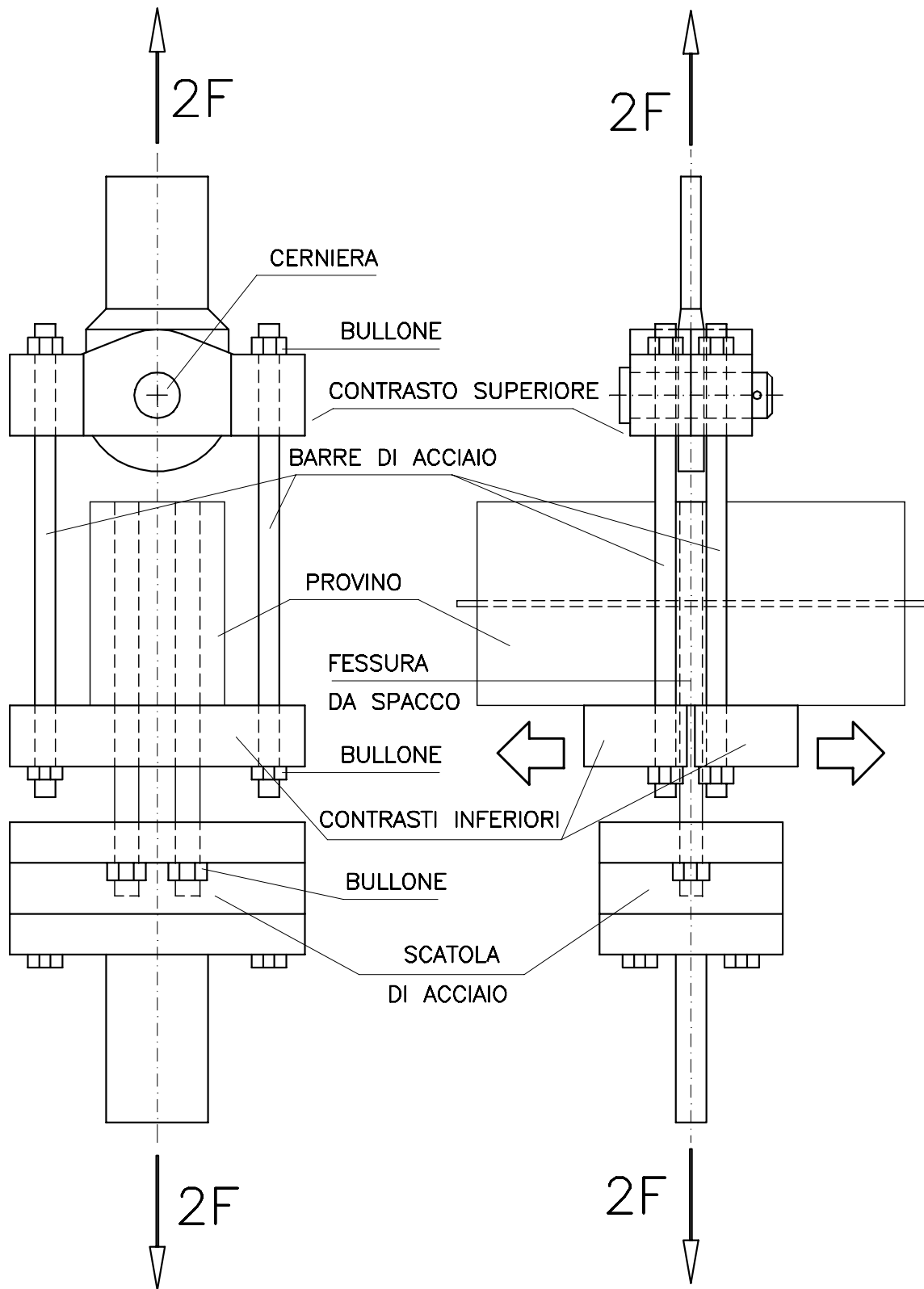


Figure 2.5: Vista d'insieme del banco di prova.



considerare la prova di tipo quasi statico. Durante le prove sono stati effettuati due o tre cicli di scarico e ricarica. Le prove sono state condotte fino ad uno scorrimento massimo di 4-5 mm, pari a circa un terzo della distanza fra le nervature.

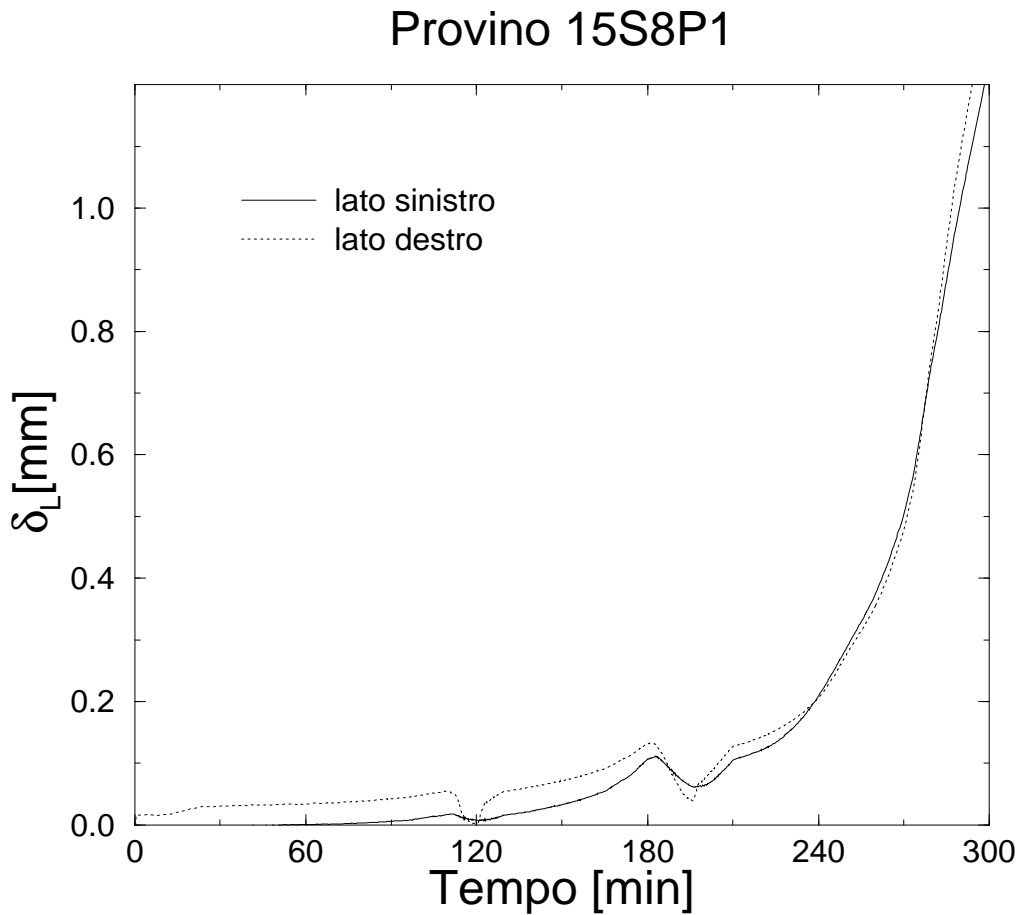


Figure 2.6: Diagramma dello scorrimento all'estremo caricato della barra in funzione del tempo ottenuto dal provino 15NSP1.

# Chapter 3

## Caratteristiche dei materiali

### 3.1 Calcestruzzo

Per le prove è stato impiegato calcestruzzo di media resistenza avente la seguente composizione:

- cemento Portland Tipo II 32.5R A/L-R: 325 kg/m<sup>3</sup>;
- acqua: 175 l/m<sup>3</sup> (rapporto acqua/cemento = 0.54);
- aggregati tondeggianti di natura silicea: 1853 kg/m<sup>3</sup>;
- superfluidificante 3,3 l/m<sup>3</sup>.

Le classi granulometriche e la distribuzione degli aggregati utilizzati è riportata nella Tabella 3.1.

Diametro [mm]	Peso [kg/m <sup>3</sup> ]	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 3.1: Composizione degli aggregati impiegati per il confezionamento del calcestruzzo.

I getti sono stati eseguiti impiegando casseforme di legno pretrattate con liquido disarmante; 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 ( $\phi=10$  cm,  $l=30$  cm), e cubetti di calcestruzzo ( $l=15$  cm) in numero pari al doppio dei provini confezionati.

La lavorabilità del calcestruzzo è stata misurata attraverso la prova di “slump” che ha fornito un abbassamento del cono pari a circa 150 mm.

La scasseratura è stata eseguita dopo 72 ore dal getto. I provini, i cubetti ed i cilindri di calcestruzzo sono stati fatti maturare in acqua ( $T \approx 20^\circ\text{C}$ ) fino a due settimane dalla prova; successivamente i provini hanno proseguito la 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 secante  $E_{cs,28}$ , della resistenza a compressione  $f_{c,28}$  e della resistenza a trazione diretta  $f_{ct,28}$ ; i risultati ottenuti sono riportati in Tabella 3.2. I provini cubici sono stati impiegati per la determinazione della resistenza a compressione  $f_{c,cubi}$  al momento della prova (determinata su due cubetti). I risultati ottenuti sono raccolti in Tabella 4.1.

Provino	$f_{c,28}$ [MPa]	$f_{ct,28}$ [MPa]	$E_{cs,28}$ [MPa]
15S5P1	25.6	3.11	26870
15S5P2			
15S6P1			
15S6P2			
15S8P1	21.2	2.49	23799
15S8P2			
15S10P1			
15S10P2			
15NSP1	25.4	3.03	29198
15NSP2			
15S5P3	26.9	2.86	27829
15S6P3			
15S8P3			
15S10P3			
15S5P4	31.5	3.66	28297
15S5P5			
15S6P4			
15S8P4			
15S10P4			

Table 3.2: Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo impiegato nelle prove dopo 28 giorni di maturazione.

## 3.2 Acciaio

L'acciaio delle barre utilizzate nelle prove è di tipo Tempcore© Fe B 44 k ad aderenza migliorata, ad eccezione delle barre  $\phi=5$  mm, utilizzate per l'armatura trasversale, costituite da acciaio trafilato a freddo. Nella Tabella 3.2 sono riportati i valori dei parametri geometrici e meccanici delle barre impiegate, descritti anche in Fig. 3.1

Diametro nominale $\phi$ [mm]	5*	6	8	10	24
Diametro del nocciolo $D$ [mm]	4.87	5.47	7.33	9.18	22.7
Diametro barra equipesante [mm]	4.96	6.01	7.88	9.82	23.6
Altezza media $a_{m,1}$ [mm]	0.27	0.366	0.468	0.505	1.18
delle nervature $a_{m,2}$ [mm]		0.376	0.424	0.495	1.15
$a_{m,3}$ [mm]		0.357	0.447	0.548	1.18
Inclinazione $\beta_1$	60°	51°	53°	56°	59°
delle nervature $\beta_2$		45°	43°	48°	68°
$\beta_3$		63°	63°	67°	52°
Interasse $c_{s,1}$ [mm]	3.5	5.4	6.2	6.55	15
delle nervature $c_{s,2}$ [mm]		5.3	6.1	6.65	14.5
$c_{s,3}$ [mm]		5.3	6.1	6.75	14
Lunghezza $l_{r,1}$ [mm]	4.55	11	15	16	40
delle nervature $l_{r,2}$ [mm]		12	17	18	38
$l_{r,3}$ [mm]		9	13	16	44
Indice di aderenza $I_r$	0.058	0.0615	0.0690	0.0673	0.0801
Tensione di snervamento $f_{sy}$ [MPa]	647	535	607	564	573
Tensione di rottura $f_{st}$ [MPa]	682	595	677	664	676

(\*) = acciaio trafilato a freddo

Table 3.3: Caratteristiche geometriche e meccaniche delle barre di armatura.

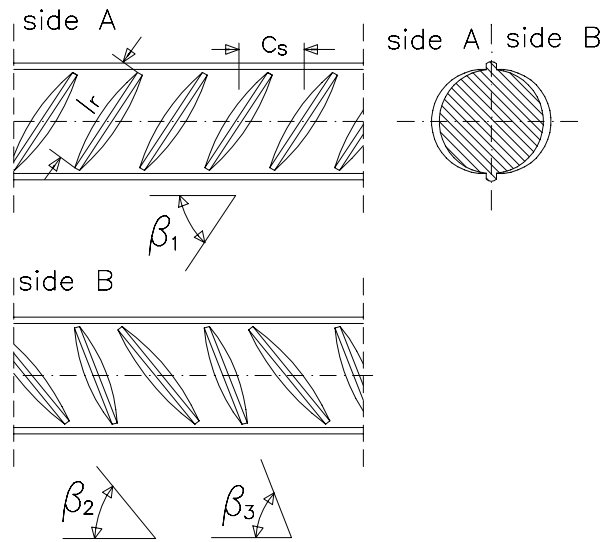


Figure 3.1: Particolare delle barre d'armatura con indicate alcune caratteristiche geometriche.

# Chapter 4

## Risultati sperimentali

### 4.1 Presentazione dei risultati sperimentali

I risultati sperimentali riguardano le relazioni tra la forza di estrazione applicata alla barra ancorata, il suo slittamento di “testa” e di “coda” (relativo ai punti iniziale e finale dell’ancoraggio rispettivamente) e l’apertura della fessura da spacco. La Fig. 4.1 mostra i risultati tipici di ogni prova, ottenuti dal provino 15S5P3, con armatura trasversale avente diametro pari a 5 mm. In particolare, la figura mostra il carico di estrazione  $F$ , l’apertura della fessura da spacco misurata in corrispondenza dell’armatura trasversale  $w_s$ , la tensione nelle staffe  $\sigma_{st}$  e lo scorrimento all’estremo libero (di “coda”) della barra  $\delta_F$ , tutti in funzione dello scorrimento all’estremo caricato (di “testa”)  $\delta_L$ . I risultati sono mostrati sia per l’intera prova che fino al carico di picco, per entrambe le armature ancorate. Le curve relative alla tensione nell’armatura trasversale sono state interrotte in corrispondenza della tensione di snervamento dell’acciaio, riportato in Tab. 3.2.

I valori del carico massimo  $F_{max}$ , dello scorrimento di testa in corrispondenza di tale carico  $\delta_{L,max}$ , dello sforzo nominale massimo  $\sigma_{max}$ , della tensione di aderenza massima  $\tau_{max}$ , della resistenza cubica a compressione  $f_{c,cubi}$  e del tempo di maturazione al momento della prova, relativi a tutti i provini, sono raccolti nella Tabella 4.1.

La tensione di aderenza massima  $\tau_{max}$  è stata ricavata nell’ipotesi di una distribuzione uniforme degli sforzi lungo l’intero ancoraggio di lunghezza  $\Delta z$  (=150mm):

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{\pi \phi_p \Delta z} \quad (4.1)$$

La Figura 4.2 mostra, per alcuni provini, la forma dei denti di calcestruzzo compresi tra le nervature, rilevata lungo la sezione XX nel tratto centrale del provino di lunghezza  $L$  (=40 mm) dopo aver terminato la prova. La polvere di calcestruzzo disgregato a contatto con la superficie frontale delle nervature (Fig. 1.1a) è stata preventivamente rimossa per mezzo di aria compressa. La forma dei denti di calcestruzzo è stata misurata facendo scorrere un LVDT a molla lungo la sezione XX. L’effetto dell’armatura trasversale sull’aderenza è messo in evidenza anche dalla forma e dall’altezza media  $h_m$  delle nervature di calcestruzzo danneggiato. Tale altezza diminuisce infatti all’aumentare

## 15S5P3

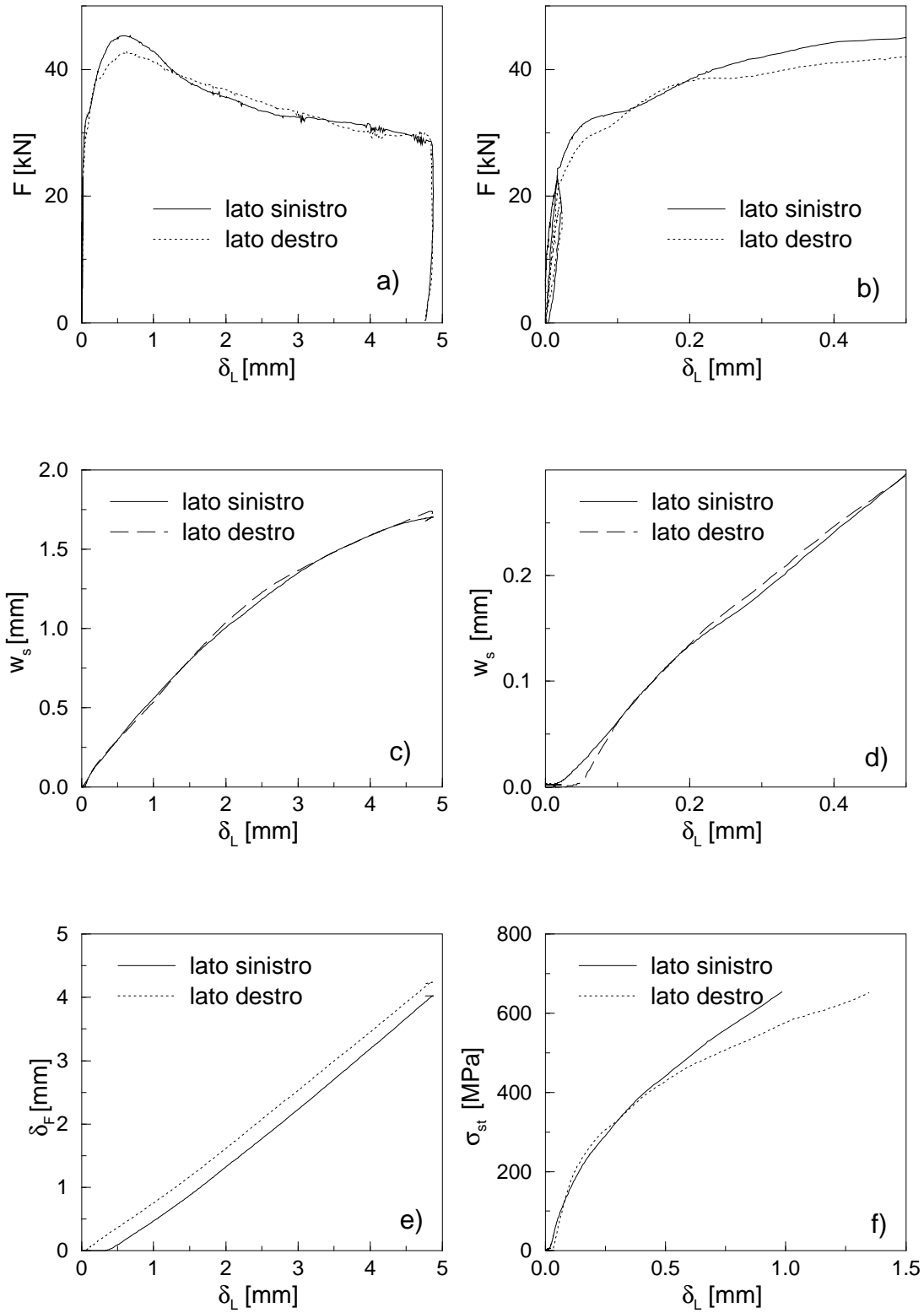


Figure 4.1: Tipici risultati sperimentali ottenuti dal provino 15S5P3.

Provino		Maturaz. [giorni]	$F_{max}$ [kN]	$\delta_{L,max}$ [mm]	$\sigma_P$ [MPa]	$\tau_{max}$ [MPa]	$f_{c,cubi}$ [MPa]
15NSP1	lato destro	35	32.3	0.065	71.4	2.86	31.4
	lato sinistro		29.9	0.054	66.1	2.64	
15NSP2	lato destro	144	47.9	0.082	106.0	4.24	32.8
	lato sinistro		52.9	0.092	116.9	4.68	
15S5P1	lato destro	28	52.7	0.621	116.5	4.66	33.7
	lato sinistro		56.4	0.568	124.6	4.98	
15S5P2	lato destro	51	56.5	0.514	124.8	4.99	36.3
	lato sinistro		54.0	0.528	119.5	4.78	
15S5P3	lato destro	19	45.3	0.675	100.2	4.01	27.7
	lato sinistro		42.8	0.632	94.7	3.79	
15S5P4	lato destro	133	54.5	0.507	120.5	4.82	37.6
	lato sinistro		58.0	0.483	128.2	5.13	
15S5P5	lato destro	139	62.4	0.369	138.0	5.52	37.4
	lato sinistro		59.9	0.368	132.5	5.30	
15S6P1	lato destro	44	60.7	0.697	134.1	5.36	35.3
	lato sinistro		60.2	0.595	133.0	5.32	
15S6P2	lato destro	76	56.7	0.543	125.4	5.02	38.7
	lato sinistro		63.1	0.628	139.6	5.58	
15S6P3	lato destro	159	52.4	0.558	115.8	4.63	33.3
	lato sinistro		51.0	0.622	112.7	4.51	
15S6P4	lato destro	151	59.0	0.194	130.4	5.22	36.9
	lato sinistro		57.8	0.196	127.7	5.11	
15S8P1	lato destro	55	58.2	0.562	128.6	5.14	26.9
	lato sinistro		60.7	0.491	134.2	5.37	
15S8P2	lato destro	62	59.3	0.798	131.1	5.24	28.2
	lato sinistro		54.8	0.685	121.1	4.85	
15S8P3	lato destro	161	59.2	0.572	130.9	5.24	33.3
	lato sinistro		52.4	0.594	115.8	4.63	
15S8P4	lato destro	146	59.2	0.439	130.8	5.23	37.6
	lato sinistro		65.4	0.613	144.5	5.78	
15S10P1	lato destro	58	49.7	0.571	109.9	4.39	27.2
	lato sinistro		56.1	0.567	124.0	4.96	
15S10P2	lato destro	65	57.0	0.687	125.9	5.04	27.9
	lato sinistro		56.9	0.563	125.7	5.03	
15S10P3	lato destro	166	71.0	0.394	157.0	6.28	33.2
	lato sinistro		75.3	0.330	166.4	6.66	
15S10P4	lato destro	153	74.7	0.157	165.1	6.60	38.2
	lato sinistro		69.5	0.410	153.7	6.15	

Table 4.1: Valori del carico, dello scorrimento all'estremo caricato della barra, dello sforzo nominale massimo e dello sforzo di aderenza medio valutati in corrispondenza del carico di picco e valori della resistenza cubica a compressione misurata al momento della prova.



dell'area dell'armatura trasversale a causa della maggior azione di contenimento che consente una minore apertura della fessura da spacco. Nei provini 15NSP1 e 15NSP2 senza staffe, così come nei provini con staffe di piccolo diametro (5 o 6 mm),  $h_m$  è molto vicina all'altezza delle nervature della barra adottata ( $\approx 1.45$  mm). L'altezza delle nervature nei provini 15S6P3 e 15S6P4 ( $\phi_{st}=6$  mm) è leggermente maggiore di quella dei provini 15S5P4 e 15S5P5 ( $\phi_{st}=5$  mm); questo comportamento, apparentemente anomalo, è probabilmente dovuto al diverso valore della tensione di snervamento delle armature (Tab. 3.2) e dalla diversa resistenza del calcestruzzo dei provini (Tab. 4.1).

## 4.2 Legame sforzo di aderenza-scorrimento

Nella Figura 4.3 vengono confrontate tutte le curve sforzo di aderenza-scorrimento di testa fino al raggiungimento del carico di picco; in questa figura lo sforzo di aderenza è rapportato alla resistenza a compressione del calcestruzzo, mentre lo scorrimento di testa è rapportato al diametro della barra principale. Si noti come la curva relativa ai provini 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. 1.4a). Si può inoltre osservare che, all'aumentare del diametro delle staffe, la rigidità e la resistenza dell'aderenza aumenta, evidenziando l'importanza dell'armatura trasversale. Si può notare che la differenza di comportamento tra i provini con armature trasversali di diametro  $\phi_{st}=5$  mm e  $\phi_{st}=6$  mm è minima, probabilmente anche a causa della notevole differenza tra la resistenza allo snervamento dell'acciaio trafilato a freddo impiegato per le staffe aventi diametro di 5 mm e l'acciaio laminato a caldo per le staffe con diametro di 6 mm (Tab. 5). La relazione tra la resistenza dell'aderenza e la percentuale di armatura trasversale verrà ripresa e discussa dettagliatamente nel paragrafo 4.5. Si può notare come, sempre a causa dello snervamento dell'armatura trasversale, le curve relative ai provini con staffe  $\phi_{st}=5$  mm evidenzino un improvviso cambio di pendenza dopo una fase iniziale quasi lineare.

## 4.3 Tensioni nell'armatura trasversale

La Fig. 4.4 mostra il legame tra la tensione nelle staffe, determinata sulla base della loro area effettiva (Tab. 1), e lo scorrimento di testa della barra. Le curve sono riportate fino al carico di picco e sono state interrotte in corrispondenza della tensione di snervamento delle staffe (Tab. 5). Purtroppo gli estensimetri elettrici a diretto contatto col calcestruzzo non hanno sempre fornito risultati significativi (in quanto era stata applicata solo una leggera protezione per non modificare sensibilmente l'aderenza della staffa), e quindi sono disponibili solamente un numero ridotto di curve sperimentali. Queste curve mostrano inoltre una notevole dispersione dei risultati, causata anche dalla naturale irregolarità della fessura da spacco che non ha sempre attraversato l'armatura trasversale esattamente in corrispondenza dell'estensimetro; in questi casi il tratto di

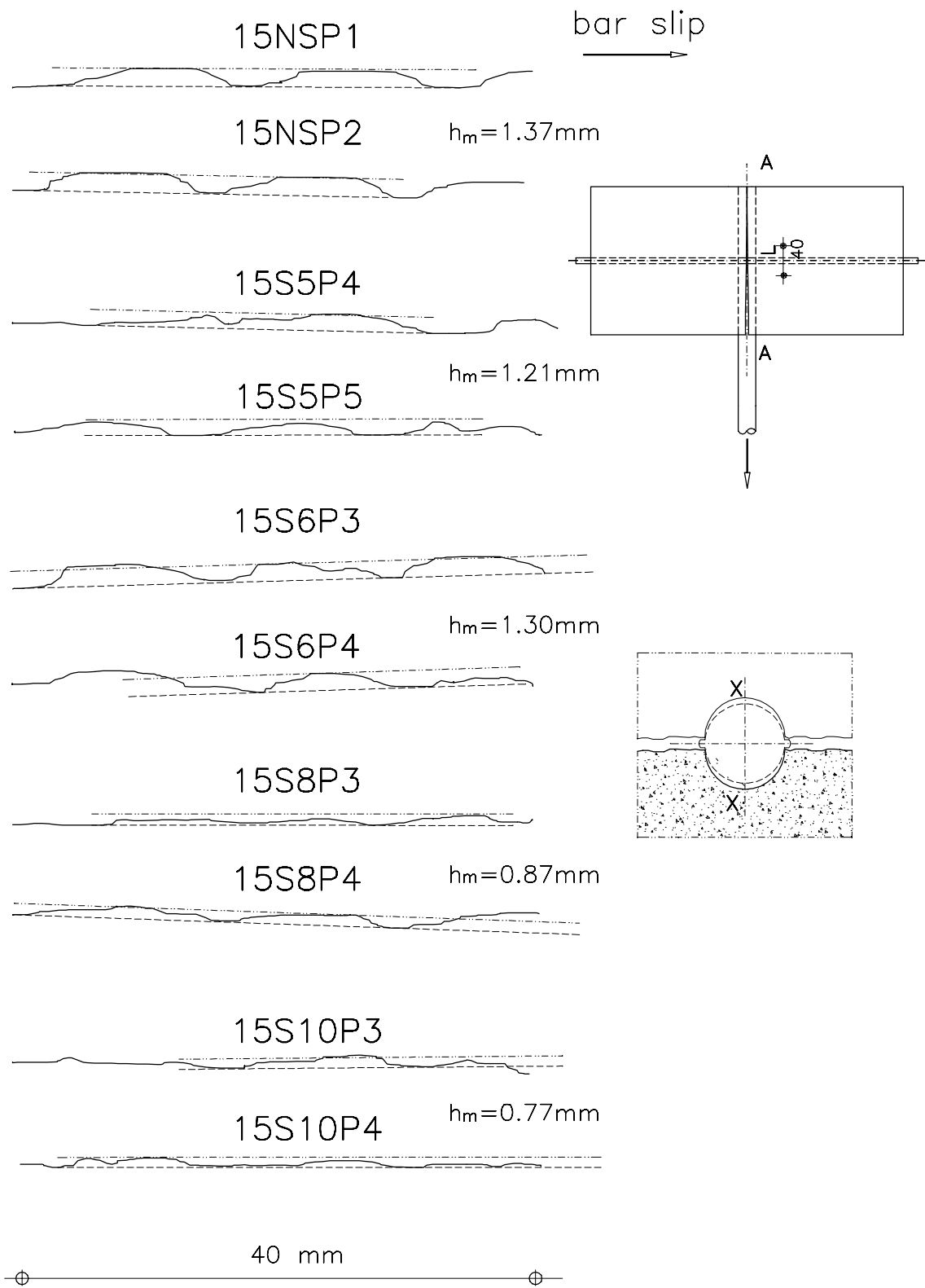


Figure 4.2: Forma dei “denti” di calcestruzzo tra le nervature rilevate su alcuni provini con diversa armatura trasversale al termine delle prove.

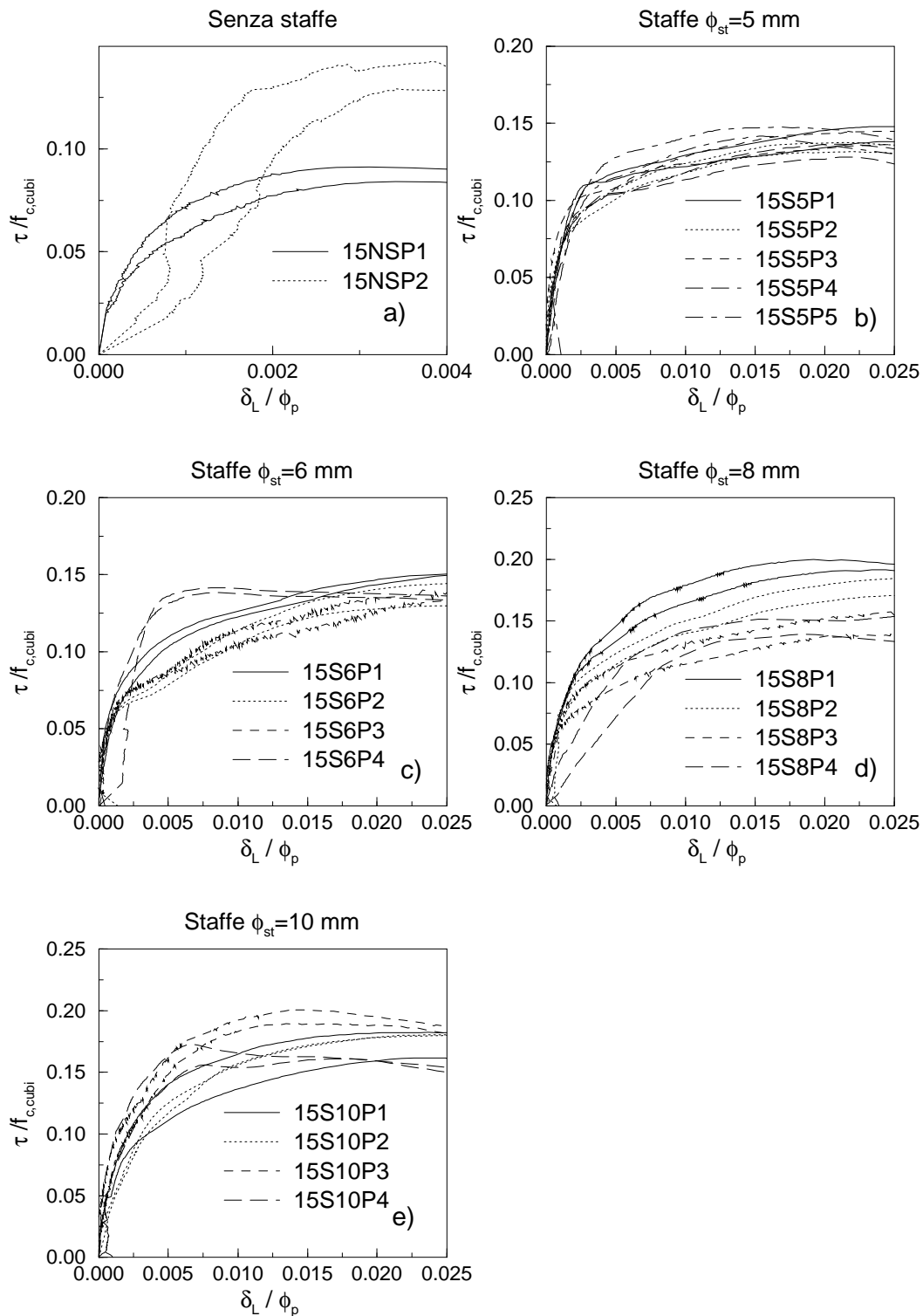


Figure 4.3: Diagrammi dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento dell'estremo caricato della barra fino al carico di picco ottenuti dai provini con staffe di diverso diametro.

armatura trasversale con lo *strain gauge* non era sottoposto alla massima trazione che si verifica in corrispondenza della fessura da spacco.

I risultati ottenuti mostrano chiaramente che la tensione nelle armature trasversali di piccolo diametro ha raggiunto il valore di snervamento. I quadrati riportati sulle curve corrispondono al raggiungimento, nella barra ancorata, della tensione caratteristica dell'aderenza  $f_{bk}$  prevista dall'Eurocodice No. 2 [18]; si può notare che tale tensione è raggiunta per elevati valori della tensione nelle staffe, che a volte superano la tensione di snervamento caratteristica dell'acciaio, soprattutto quando le armature trasversali sono di piccolo diametro (il simbolo pieno indica il raggiungimento dello snervamento della barra prima del raggiungimento della resistenza caratteristica dell'aderenza). Tale aspetto diventa ancora più significativo se si tiene conto che, come precedentemente sottolineato, le curve sperimentali non sempre forniscono la massima tensione effettivamente presente nelle staffe e che, allo stato tensionale dovuto all'aderenza, si sovrappongono altri effetti legati alle varie azioni presenti sulla struttura. Questo ancora una volta sottolinea l'importanza del corretto dimensionamento dell'armatura trasversale lungo gli ancoraggi, in quanto potrebbe verificarsi altrimenti il raggiungimento della resistenza di progetto dell'armatura trasversale prima del raggiungimento della resistenza di progetto dell'aderenza, con conseguente riduzione del carico ultimo della struttura. Trascurando l'attrito tra il cuneo di calcestruzzo disgregato che si forma sulla superficie frontale della nervatura ed il calcestruzzo circostante [22], è facile determinare una relazione tra la risultante  $S$  delle pressioni radiali e lo sforzo di aderenza  $\tau$  [9](Fig. 4.5); facendo riferimento alla zona  $\Delta z$  si ha:

$$S = \left(\frac{\tau}{\tan \theta}\right) \phi_p \Delta z \quad (4.2)$$

dove  $\theta$  è l'angolo compreso tra il cuneo di calcestruzzo disgregato e la barra. Trascurando l'azione di contenimento del calcestruzzo fessurato, tale spinta radiale è equilibrata dall'azione di contenimento dell'armatura trasversale:

$$n_{st} A_{st} \sigma_{st} = S = \left(\frac{\tau}{\tan \theta}\right) n_p \phi_p \Delta z \quad (4.3)$$

Dall'equazione precedente si ottiene la seguente relazione tra l'angolo  $\theta$ , lo sforzo di aderenza e la tensione nell'armatura trasversale:

$$\theta = \arctan\left(\frac{n_p \phi_p \Delta z}{n_{st} A_{st}} \frac{\tau}{\sigma_{st}}\right) = \arctan\left(\frac{1}{\Omega} \frac{\tau}{\sigma_{st}}\right) \quad (4.4)$$

La relazione sperimentale tra l'angolo  $\theta$  e lo sforzo di aderenza  $\tau$  è mostrata in Fig. 4.6 per i provini in cui è stato possibile rilevare la tensione nell'armatura trasversale. Si può notare che l'angolo  $\theta$  diminuisce all'aumentare dello sforzo di aderenza ed assume un valore compreso tra i  $40^\circ$  ed i  $50^\circ$  in corrispondenza del carico di picco. Tale valore continua a diminuire oltre il carico di picco, a causa dell'aumento di volume del calcestruzzo disgregato tra le nervature ( $\theta'$ , Fig. 4.5). Si noti anche che la diminuzione di  $\theta$  è minore nei provini con debole armatura trasversale a causa della minor azione di contenimento. Si deve infine osservare che la notevole dispersione dei risultati sperimentali è principalmente dovuta alla dispersione dei risultati relativi alla tensione nell'armatura trasversale che, come precedentemente sottolineato, non è di semplice misurazione.

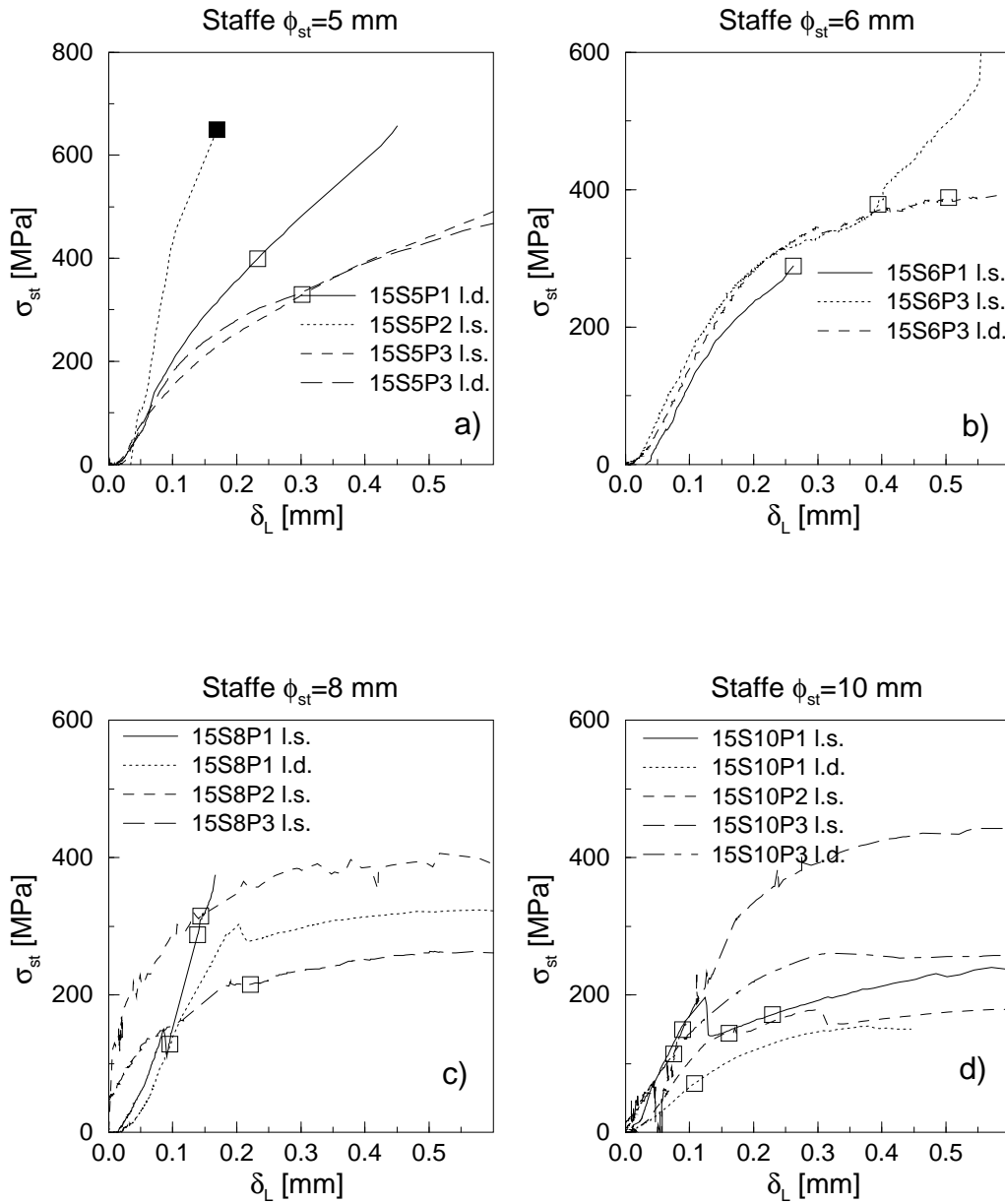


Figure 4.4: Diagrammi dello sforzo nell'armatura trasversale in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra fino al carico di picco.

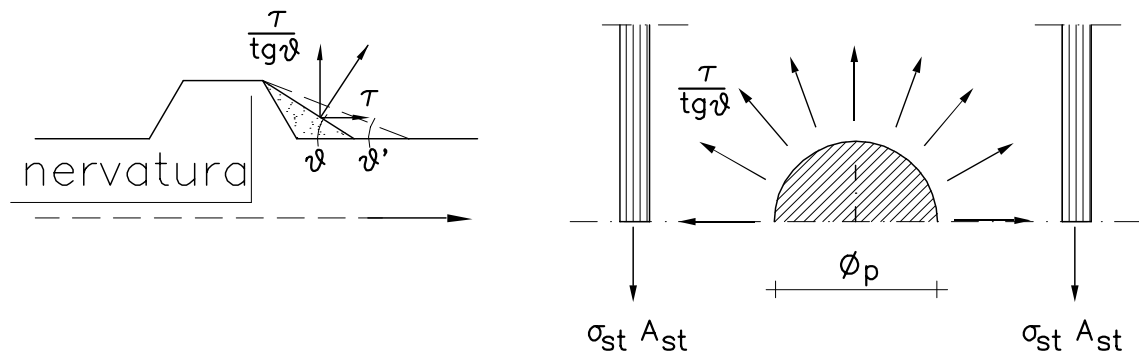


Figure 4.5: Sforzo di aderenza, pressione radiale e azione di contenimento dell'armatura trasversale.

## 4.4 Apertura della fessura da spacco

La Fig. 4.7 mostra, fino al carico di picco, l'apertura della fessura da spacco (misurata in corrispondenza dell'armatura trasversale) in funzione dello scorrimento di "testa" della barra ancorata; si può notare che tutte le curve mostrano una relazione quasi lineare tra le due grandezze, con pendenza che diminuisce all'aumentare del diametro della staffa. La dispersione dei risultati sperimentali è anche legata alla diversa resistenza del calcestruzzo al momento della prova; tale dispersione è particolarmente evidente nei provini senza staffe, in quanto l'assenza di armatura trasversale rende il processo di fessurazione molto dipendente dalla resistenza residua del calcestruzzo fessurato e quindi dal grado di maturazione dei provini. Queste curve sperimentali forniscono una indicazione sul legame esistente tra la fessura da spacco e la fessura flessionale che è proporzionale allo scorrimento della barra [23]. Prendendo in considerazione per esempio i provini con  $\phi_{st} = 5$  mm ( $\Omega \approx 0.005$ ), si può osservare che  $w_s \approx 0.1$  mm per  $\delta_L = 0.15$  mm, cioè l'apertura della fessura da spacco è sulle staffe quasi i due terzi dello scorrimento di "testa" della barra. Questo aspetto assume particolare importanza per la durabilità della struttura in ambienti aggressivi, in quanto la fessura da spacco, a differenza di quella trasversale che si propaga longitudinalmente e quindi interessa una estesa zona della barra ancorata [23].

## 4.5 Resistenza dell'aderenza

All'aumentare della percentuale di armatura trasversale, aumenta il suo all'azione di contenimento e di conseguenza aumenta la resistenza dell'aderenza. Tale effetto è evidenziato in Fig. 4.8a che mostra la relazione tra lo sforzo massimo di aderenza  $\tau_{max}$ , rapportato alla resistenza cubica a compressione del calcestruzzo al momento della prova, e l'indice di contenimento delle staffe  $\Omega$ . Nei provini senza armatura trasversale ( $\Omega = 0$ ), l'azione di contenimento è dovuta al solo calcestruzzo di ricoprimento.

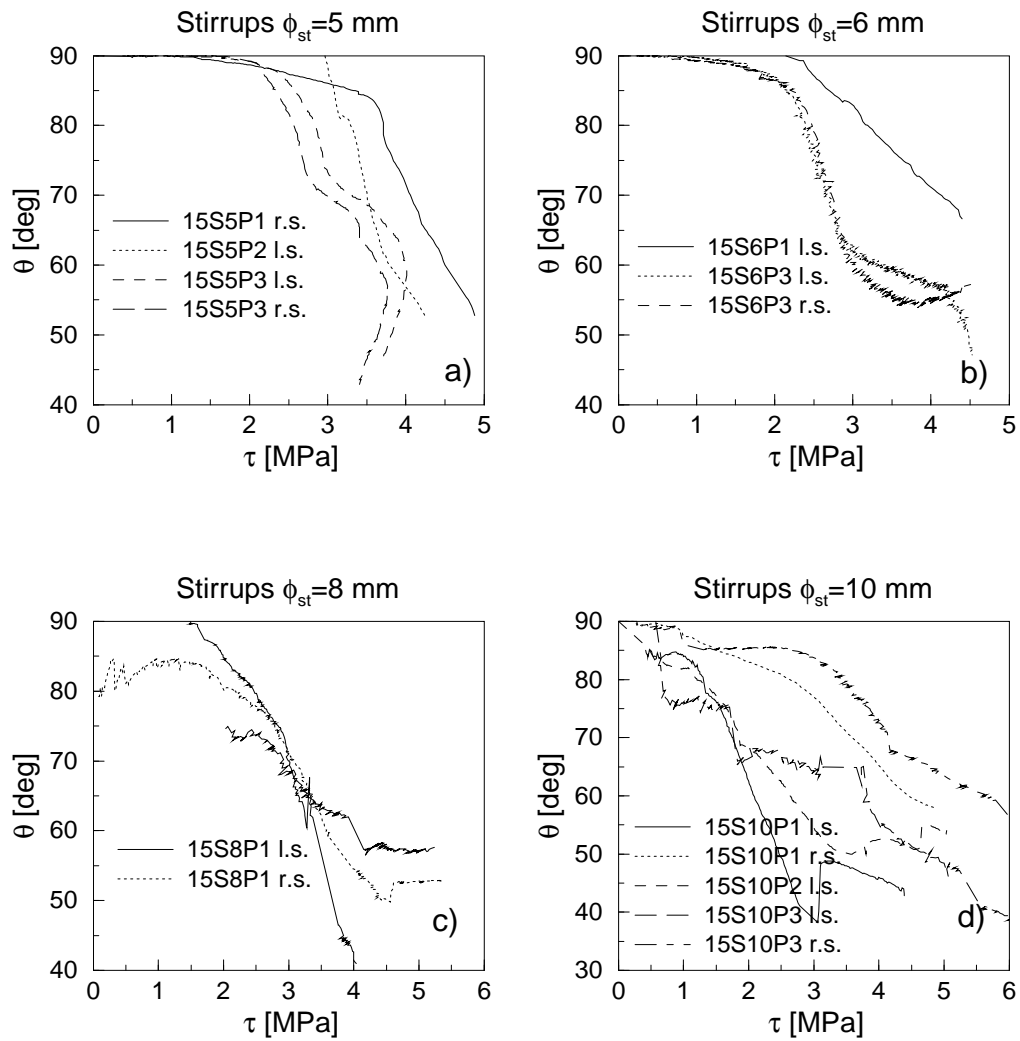


Figure 4.6: Diagrammi dell'angolo  $\theta$  che il cuneo di calcestruzzo a monte delle nervature in funzione dello sforzo di aderenza.

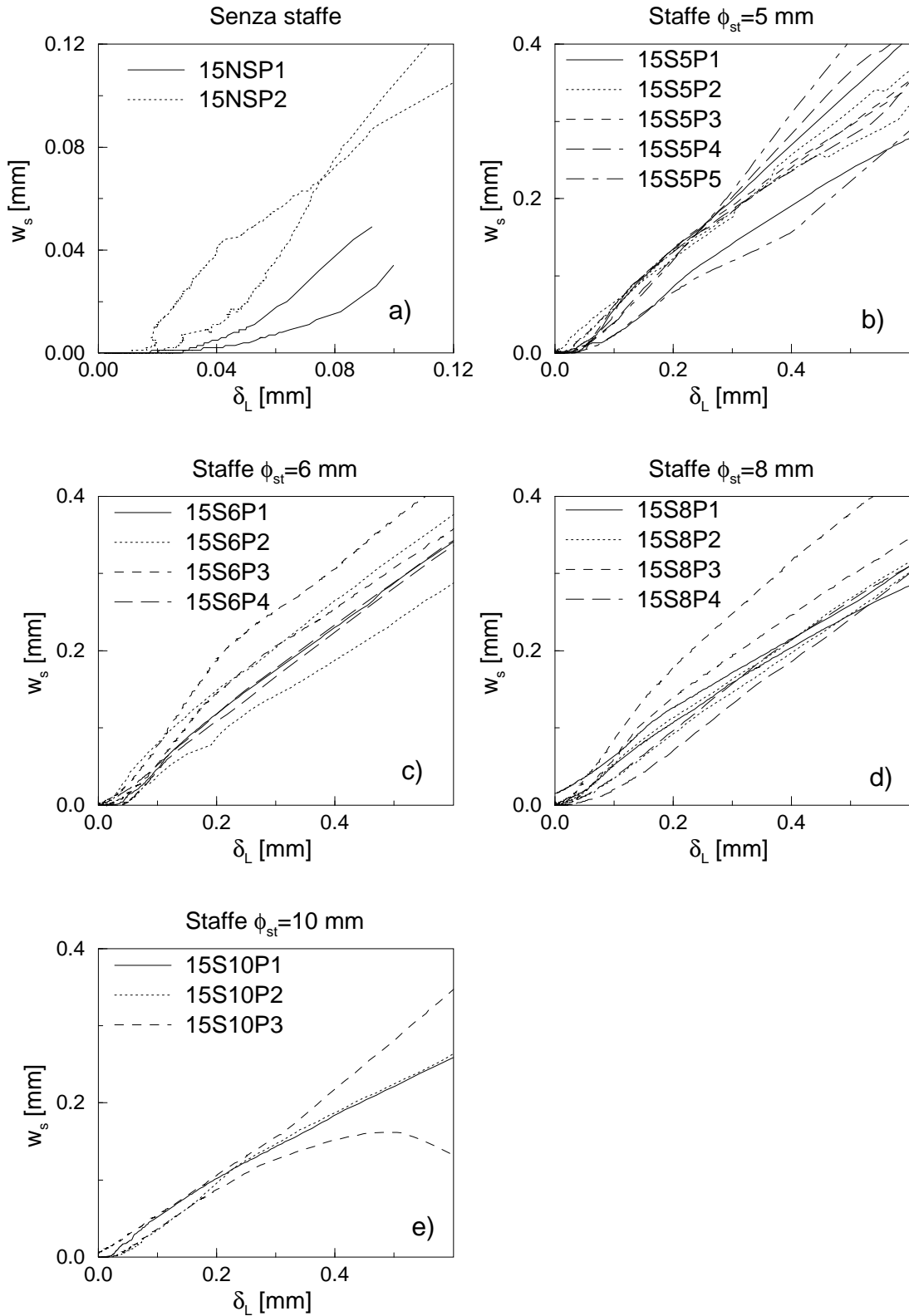


Figure 4.7: Diagrammi dell'apertura della fessura da spacco in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra fino al carico di picco.



Nonostante la sensibile dispersione dei risultati sperimentali, legata anche al diverso contributo del calcestruzzo fessurato, si può notare l'incremento della resistenza dell'aderenza all'aumentare dell'indice di contenimento dell'armatura trasversale. Questo incremento, osservato anche da altri ricercatori [19, 24, 25], si verifica fino a valori di  $\Omega$  pari a 0.03-0.04 ma non viene attualmente preso in considerazione né dalla normativa italiana [26] né dall'Eurocodice 2 [18]. La normativa italiana non fa nemmeno riferimento all'armatura trasversale lungo l'ancoraggio mentre l'Eurocodice 2 prescrive solamente un minimo quantitativo di armatura. Per esempio, l'armatura trasversale minima di una trave armata con 2 barre  $\phi$  24 mm con una lunghezza di ancoraggio pari alla minima prescritta per barre sottoposte alla massima trazione corrisponde ad un valore di  $\Omega$  pari a circa 0.0025. La resistenza caratteristica dell'aderenza  $f_{bk}$  prevista dall'EC2, che dipende dalla resistenza a compressione del calcestruzzo, è stata determinata a partire dalla resistenza cubica del calcestruzzo al momento della prova (Tab. 4.1). Poiché la resistenza del materiale non è risultata la stessa per tutti i provini, la resistenza caratteristica dell'aderenza è stata determinata sia per il valore massimo che per il valore minimo della resistenza a compressione del calcestruzzo misurata su tutti i provini. I due valori determinati, che come precedentemente sottolineato sono indipendenti dal quantitativo di armatura trasversale presente lungo l'ancoraggio, sono rappresentati in Fig. 4.8a da due rette orizzontali. Si può notare come la resistenza media dell'aderenza misurata sperimentalmente sia poco superiore al valore caratteristico previsto dall'EC2 solo quando l'indice di contenimento delle staffe è maggiore di 0.01. Per valori inferiori di  $\Omega$  la resistenza caratteristica dell'aderenza è addirittura molto vicina ai valori medi sperimentali. I valori caratteristici sperimentali, non determinati in questa ricerca a causa del numero limitato di provini, risultano certamente inferiori ai valori medi indicati in Fig. 4.8a, e quindi ai valori previsti dall'EC2.

La Fig. 4.8b mostra la tensione nelle staffe  $\sigma_{st,max}$  determinata sperimentalmente in corrispondenza del carico massimo in funzione di  $\Omega$ ; i simboli pieni indicano il raggiungimento della tensione di snervamento prima del carico di picco, come si è verificato in alcune staffe di piccolo diametro. Nonostante la notevole dispersione dei risultati sperimentali, si può comunque notare come  $\sigma_{st,max}$  diminuisca all'aumentare dell'indice di contenimento delle staffe e raggiunga valori prossimi allo snervamento per piccole percentuali di  $\Omega$ . Confrontando i risultati sperimentali con il minimo quantitativo di armatura trasversale previsto dall'EC2, si può notare che tale quantitativo non è risultato sufficiente per evitare lo snervamento dell'armatura trasversale costituita da acciaio comunemente impiegato in Europa.

Dal modello teorico proposto da Giuriani, Plizzari e Schumm [12] è possibile determinare la relazione tra lo sforzo massimo di aderenza  $\tau_{max}$  e la corrispondente apertura della fessura da spacco  $w_{s,max}$ :

$$\tau_{max} = \tau_{m,w} = \tau_{m,0} \left( 1 - \gamma_1 \frac{w_{s,max}}{\phi_p} \right) \quad (4.5)$$

Il massimo sforzo di aderenza provoca una pressione radiale che può essere espressa

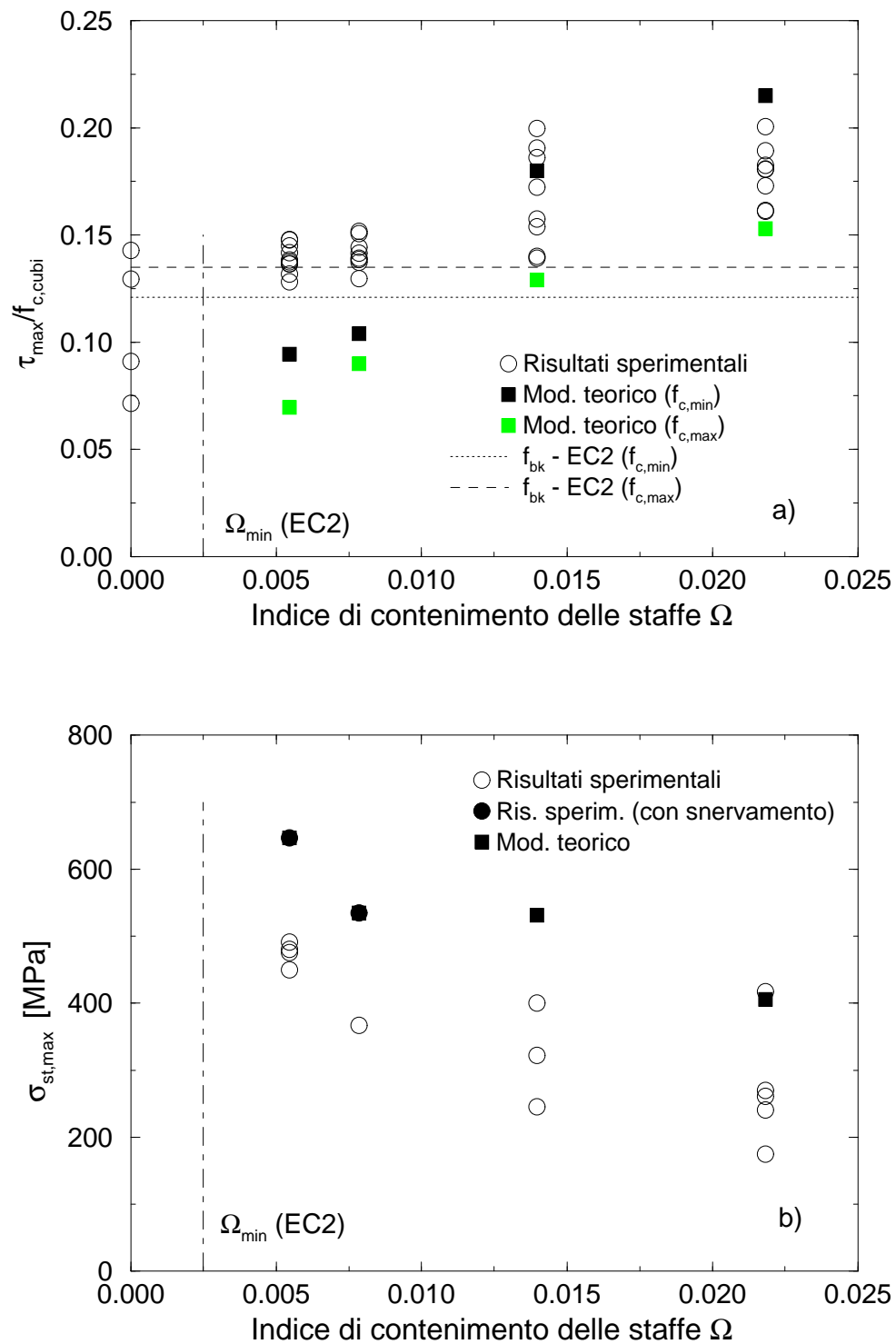


Figure 4.8: Diagramma dello sforzo di aderenza massimo (a) e della massima tensione nell'armatura trasversale (b), in funzione dell'indice di contenimento delle staffe.

come [12]:

$$\sigma_{n,max} = \frac{\tau_{max} - \frac{\tau_0}{1+K_1 \frac{w_{s,max}}{\phi_p}}}{\frac{\tau_1}{1+K_2 \frac{w_{s,max}}{\phi_p}}} \quad (4.6)$$

A sua volta, la pressione radiale provoca uno sforzo nelle staffe  $\sigma_{st,max}$  dato da [15]:

$$\sigma_{st,max} = E_s \sqrt{a_2 \left( \frac{\frac{w_{s,max}}{\phi_p}}{\frac{\alpha_s \phi_{st}}{\phi_p}} \right)^2 + a_1 \left( \frac{\frac{w_{s,max}}{\phi_p}}{\frac{\alpha_s \phi_{st}}{\phi_p}} \right) + a_0} \quad (4.7)$$

ed uno sforzo residuo nel calcestruzzo fessurato dato da [5]:

$$\sigma_{rc,max} = \frac{f_{ct0}}{\kappa \frac{w_{s,max}}{\phi_p} \frac{\phi_p}{\phi_a} + 1} \quad (4.8)$$

Per l'equilibrio alla traslazione nella zona di influenza  $\Delta z$  di una singola staffa risulta:

$$\sigma_{n,max} = \Omega \sigma_{st,max} + B \sigma_{rc,max} \quad (4.9)$$

Sostituendo i valori di  $\sigma_{n,max}$ ,  $\sigma_{st,max}$  e di  $\sigma_{rc,max}$  dati dalle Eqq. 4.6, 4.7 e 4.8 nell'Eq. 4.9 si ottiene una relazione tra  $\Omega$  e  $\tau_{max}$ :

$$\Omega = \frac{1}{\sigma_{st,max} \left( \frac{w_{s,max}}{\phi_p} \right)} \left[ \frac{1 + K_2 \frac{w_{s,max}}{\phi_p}}{\tau_1} \left( \tau_{max} \left( \frac{w_{s,max}}{\phi_p} \right) - \frac{\tau_0}{1 + K_1 \frac{w_{s,max}}{\phi_p}} \right) - B \sigma_{rc,max} \left( \frac{w_{s,max}}{\phi_p} \right) \right] \quad (4.10)$$

Si può notare che tale relazione dipende dall'apertura della fessura da spacco che a sua volta dipende dalle azioni di contenimento presenti lungo la barra. Nel caso di calcestruzzo ordinario, in corrispondenza del massimo sforzo di aderenza l'apertura di fessura da spacco è tale che lo sforzo  $\sigma_{rc,max}$  può essere trascurato ( $\sigma_{rc,max} \approx 0$ ); in tal caso l'Eq. 4.10 diventa:

$$\Omega = \frac{1 + K_2 \frac{w_{s,max}}{\phi_p}}{\sigma_{st,max} \left( \frac{w_{s,max}}{\phi_p} \right) \tau_1} \left( \tau_{max} \left( \frac{w_{s,max}}{\phi_p} \right) - \frac{\tau_0}{1 + K_1 \frac{w_{s,max}}{\phi_p}} \right) \quad (4.11)$$

L'Eq. 4.11 è valida fintanto che le armature trasversali rimangono in campo elastico; quando esse raggiungono la tensione di snervamento  $f_{sy}$ , ed ipotizzando un legame elastico-perfettamente plastico dell'acciaio, l'Eq. 4.11 diventa:

$$\Omega = \frac{1 + K_2 \frac{w_{s,max}}{\phi_p}}{f_{sy} \tau_1} \left( \tau_{max} \left( \frac{w_{s,max}}{\phi_p} \right) - \frac{\tau_0}{1 + K_1 \frac{w_{s,max}}{\phi_p}} \right) \quad (4.12)$$

Nelle equazioni precedenti,  $E_s$  è il modulo di Young dell'acciaio, i parametri  $\tau_{m,0}$ ,  $\gamma_1$ ,  $\tau_0$ ,  $\tau_1$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $a_2 = 4\tau_{12}\phi_{st}/E_s$ ,  $a_1 = 8\tau_{02}/E_s$  e  $a_0 = a_1^2\tau_{12}/\tau_{11}/(4a_2(\tau_{12}\tau_{11} - 1))$  governano il modello e dipendono dalla geometria delle nervature e dalla resistenza del calcestruzzo,

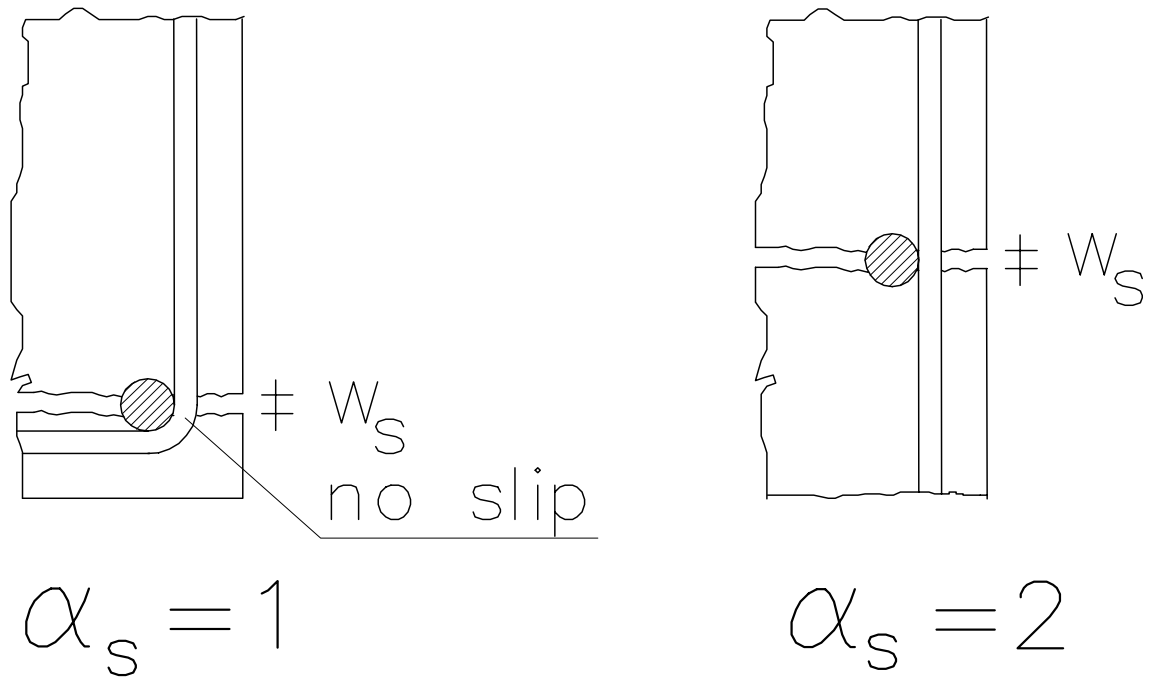


Figure 4.9: Posizione dell'armatura principale rispetto all'armatura trasversale.

i parametri  $f_{ct0}$  e  $\kappa$  caratterizzano la resistenza a trazione del calcestruzzo fessurato,  $\phi_a$  è il massimo diametro dell'aggregato,  $\alpha_s$  è un parametro legato alla posizione della staffa rispetto all'armatura trasversale Fig. 4.9 [10].

Il confronto tra i risultati del modello teorico e sperimentali è mostrato in Fig. 4.8. I risultati del modello teorico sono stati ottenuti adottando i seguenti valori dei parametri:  $\tau_{m,0}=18$  MPa,  $\gamma_1=55$ ,  $\tau_0=2.2$  MPa,  $\tau_1=0.8$ ,  $K_1=135$ ,  $K_2=35$ ,  $\tau_{02}=2.5$  MPa,  $\tau_{12}\phi_{st}=600$  MPa e  $\tau_{12}/\tau_{11}=0.3$ ; tali valori sono molto simili a quelli già impiegati per ottenere un buon accordo tra le curve teoriche ed i risultati sperimentali di altri ricercatori (Giuriani et al., 1991). I risultati relativi al massimo sforzo di aderenza sono stati adimensionalizzati sia per il massimo che per il minimo valore della resistenza cubica del calcestruzzo, ottenuta dai provini con staffe aventi lo stesso diametro (Tab. 4.1). Si può notare che i risultati del modello teorico sottostimano i risultati sperimentali dei provini con  $\phi_{st}=5$  e 6 mm ma sono molto vicini ai risultati dei provini con  $\phi_{st}=8$  e 10 mm (Fig. 4.8a). Occorre però osservare che nei provini con staffe di piccolo diametro è stato a volte raggiunto lo snervamento del materiale che è stato successivamente idealizzato dal modello teorico a comportamento perfettamente plastico (trascurando l'incrudimento); inoltre, i valori dei parametri  $\tau_{02}$ ,  $\tau_{12}\phi_{st}$  e  $\tau_{12}/\tau_{11}$ , caratterizzanti l'aderenza delle staffe, sono stati assunti per semplicità uguali per tutti i provini, anche se le caratteristiche geometriche delle armature di acciaio trafilato  $\phi_5$  erano molto diverse da quelle delle altre armature. Per quanto riguarda la massima tensione nelle staffe, i risultati teorici sembrano

sovrastimare i valori sperimentali (Fig. 4.8b) ma, come precedentemente sottolineato, non sempre le misure sperimentali hanno fornito la massima tensione effettivamente presente nell'armatura trasversale.

# Chapter 5

## 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, nella zona di influenza  $\Delta z$  di una staffa. In particolare lo studio è stato rivolto all'influenza dell'armatura trasversale sul comportamento locale dell'aderenza, sull'apertura della fessura da spacco e sulla resistenza dell'aderenza.

Le principali indicazioni fornite dalla sperimentazione sono riassunte nel seguito:

- la rigidità dell'aderenza aumenta all'aumentare del diametro dell'armatura trasversale (Fig. 4.3).
- L'apertura della fessura da spacco aumenta quasi linearmente con lo scorrimento dell'estremo caricato della barra e, per piccoli valori di  $\Omega$  ( $=0.005$ ), tale apertura può raggiungere i due terzi dello scorrimento della barra (Fig. 4.7).
- La resistenza dell'aderenza  $\tau_{max}$  aumenta con l'indice di contenimento delle staffe (Fig. 4.8a). Il valore caratteristico  $f_{bk}$  proposto dall'EC2, che non tiene conto del quantitativo di armatura trasversale presente lungo l'ancoraggio, è molto vicino ai risultati medi sperimentali.
- La tensione massima nell'armatura trasversale aumenta al diminuire dell'indice di contenimento delle staffe e, per piccoli valori di  $\Omega$ , potrebbe raggiungere la tensione di snervamento prima del raggiungimento della resistenza caratteristica dell'aderenza, causando una riduzione del carico ultimo applicabile alla struttura (Fig. 4.4). La percentuale minima di armatura trasversale prevista dall'EC2 non è risultata sufficiente per evitare lo snervamento dell'armatura trasversale (Fig. 4.8b).
- Il modello teorico proposto da Giuriani, Plizzari e Schumm [12] è risultato in buon accordo con i risultati sperimentali, sia per la resistenza ultima dell'aderenza che per la massima tensione nell'armatura trasversale (Fig. 4.8).

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'impiego di calcestruzzi speciali, ad esempio ad alta resistenza o fibrorinforzati;
- il degrado dell'ancoraggio in presenza di carichi ciclici.

# Bibliography

- [1] R. Tepfers. Cracking of Concrete Cover along Anchored Deformed Reinforcing Bars. *Magazine of Concrete Research*, 31(106):3–12, 1979.
- [2] P.G. Gambarova and C. Karakoç. In tema di aderenza fra barre nervate e calcestruzzo in presenza di fessure longitudinali da spacco. *Studi e Ricerche, School for the Design of R.C. Structures, Milan University of Technology*, 3:143–176, 1981. in Italian.
- [3] R. Tepfers. *A Theory of Bond applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars*. PhD thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, 1973.
- [4] A. Hillerborg, M. Mod er, and P.E. Petersson. Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements. *Cement and Concrete Research*, 6:773–782, (1976).
- [5] E. Giuriani and G. P. Rosati. Behaviour of Concrete Elements under Tension After Cracking. *Studi e Ricerche, Corso di Perfezionamento per le Costruzioni in Cemento Armato*, 8:65–82, (1986). (in Italian).
- [6] R.E. Untrauer and R.L. Henry. Influence of Normal Pressure on Bond Strength. *ACI Journal, Proceedings*, 62(5):577–586, 1965.
- [7] C. Modena, T. Coltro, and G.P. Rossaro. A study of Steel-to-Concrete Bond after Concrete Splitting: Experimental Results at Constant Confinement. *Studi e Ricerche, School for the Design of R.C. Structures, Milan University of Technology*, 10:179–218, 1988. in Italian.
- [8] R.J. Malvar. Bond of Reinforcement under Controlled Confinement. Technical Report N-1833, Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California, June 1991.
- [9] R. Eligehausen, V.V. Bertero, and E. P. Popov. Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars Under Generalized Excitations: Tests and Analytical Model. Technical Report UCB/EERC-83, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 1983.



- [10] E. Giuriani and G.A. Plizzari. Local Bond-Slip Law after Splitting of Concrete. *Studi e Ricerche, School for the Design of R.C. Structures, Milan University of Technology*, 7:57–118, 1985. in Italian.
- [11] S. Morita and T. Kaku. Splitting Bond Failures of Large Deformed Reinforcing Bars. *ACI Journal, Proceedings*, 76(1):93–110, 1979.
- [12] E. Giuriani, G.A. Plizzari, and C. Schumm. Role of Stirrups and Residual Tensile Strength of Cracked Concrete on Bond. *ASCE, Journal of Structural Engineering*, 117:1–18, 1991.
- [13] G.A. Plizzari and C. Schumm. Sul Collasso dell’Aderenza per Sfilamento della Barra e Spacco del Calcestruzzo. *Studi e Ricerche, School for the Design of R.C. Structures, Milan University of Technology*, 12:81–116, 1990. in Italian.
- [14] G.A. Plizzari, C. Schumm, and E. Giuriani. The Effect of Residual Tensile Strength of Cracked Concrete on the Local Bond-Slip Law after Splitting. *Studi e Ricerche, School for the Design of R.C. Structures, Milan University of Technology*, 9:129–155, 1987.
- [15] E. Giuriani. On the Effective Axial Stiffness of a Bar in Cracked Concrete. In P. Bartos, editor, *Bond in Concrete*, pages 107–126. Applied Science Publishers, London, England, 1982.
- [16] P. G. Gambarova and C. Karakoç. Shear-Confinement interaction at the Bar-to-Concrete Interface. In P. Bartos, editor, *Bond in Concrete*, pages 82–98. Applied Science Publishers, London, England, 1982.
- [17] P.G. Gambarova, G.P. Rosati, and B. Zasso. Steel-to-Concrete Bond after Splitting: Test results. *RILEM Materials and Structures*, 22:35–47, 1989.
- [18] European Committee for Standardization. *EUROCODE No.2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings-ENV 1992-1-1*. Brussel, 1991.
- [19] S. Morita and S. Fujii. Bond Capacity of Deformed Bars due to Splitting of Surrounding Concrete. In P. Bartos, editor, *Bond in Concrete*, pages 331–352. Applied Science Publishers, London, England, 1982.
- [20] G. Rehm. Ueber die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton. *Deutscher Ausschuß für Stahlbeton (D.A.f.St)*, 138, 1961. in German.
- [21] G.A. Plizzari, A.M. Deldossi, and S. Massimo. Influenza dell’armatura trasversale sul comportamento di ancoraggi lunghi: risultati sperimentali. Technical Report 5.5/96, Department of Civil Engineering, University of Brescia, Brescia, Italy, 1996. in Italian.

- [22] J. Cairns and K Jones. The Splitting Forces generated by Bond. *Magazine of Concrete Research*, 47(171):153–165, 1995.
- [23] E. Giuriani and G.A. Plizzari. Interrelation of Splitting and Flexural Cracks in Reinforced Concrete Beams. *ASCE, Journal of Structural Engineering*, 124(9), 1998.
- [24] M.A. Deldossi, S. Massimo, and G.A. Plizzari. In tema di ancoraggi e di fessurazione longitudinale in elementi di calcestruzzo provvisti di armatura trasversale. *Studi e Ricerche, School for the Design of R.C. Structures, Milan University of Technology*, 15:219–251, 1994.
- [25] G.A. Plizzari, A.M. Deldossi, and S. Massimo. Experimental Study on Anchored Bars in R.C. Elements with Transverse Reinforcement. *RILEM Materials and Structures*, 29:534–542, 1996.
- [26] Ministero dei Lavori Pubblici. *Norme Tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso, e per le strutture metalliche*, 1996.

# Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Dott. Ruggero Brunori ed il Sig. Fabrizio Oliva della Ferriera Valsabbia che hanno creduto in questa ricerca e l'hanno resa possibile.

Gli autori desiderano inoltre ringraziare tutti i tecnici del laboratorio Pietro Pisa dell'Università di Brescia, ed in particolare ai Sigg. Domenico Caravaggi, Alessandro Coffetti e Luca Martinelli, per l'assistenza offerta nella preparazione e nella conduzione delle prove sperimentali.

Un ringraziamento particolare è infine rivolto al Prof. Alberto Franchi ed al Prof. Ezio Giuriani per i preziosi suggerimenti ed il continuo interessamento mostrato durante lo svolgimento della ricerca.

# List of Figures

1.1	Cunei di conglomerato a monte della nervatura [1] e spinte radiali da essi esercitate (a); fessure trasversali e longitudinali da spacco [2] (b). . . . .	4
1.2	Fessura flessionale e fessura longitudinale da spacco. . . . .	5
1.3	Azioni di contenimento sulla barra ancorata [12]. . . . .	6
1.4	Collasso locale dell'aderenza per "splitting" (a) e per "pull-out" (b) [13].	6
2.1	Schema del provino sperimentale. . . . .	8
2.2	Caratteristiche geometriche dei provini (misure in millimetri). . . . .	9
2.3	Particolare delle armature impiegate. . . . .	10
2.4	Caratteristiche geometriche dell'armatura ancorata e dell'armatura trasversale. . . . .	11
2.5	Vista d'insieme del banco di prova. . . . .	15
2.6	Diagramma dello scorrimento all'estremo caricato della barra in funzione del tempo ottenuto dal provino 15NSP1. . . . .	16
3.1	Particolare delle barre d'armatura con indicate alcune caratteristiche geometriche. . . . .	20
4.1	Tipici risultati sperimentali ottenuti dal provino 15S5P3. . . . .	22
4.2	Forma dei "denti" di calcestruzzo tra le nervature rilevate su alcuni provini con diversa armatura trasversale al termine delle prove. . . . .	25
4.3	Diagrammi dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento dell'estremo caricato della barra fino al carico di picco ottenuti dai provini con staffe di diverso diametro. . . . .	26
4.4	Diagrammi dello sforzo nell'armatura trasversale in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra fino al carico di picco. . . . .	28
4.5	Sforzo di aderenza, pressione radiale e azione di contenimento dell'armatura trasversale. . . . .	29
4.6	Diagrammi dell'angolo $\theta$ che il cuneo di calcestruzzo a monte delle nervature in funzione dello sforzo di aderenza. . . . .	30
4.7	Diagrammi dell'apertura della fessura da spacco in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra fino al carico di picco. . . . .	31

4.8	Diagramma dello sforzo di aderenza massimo (a) e della massima tensione nell'armatura trasversale (b), in funzione dell'indice di contenimento delle staffe. . . . .	33
4.9	Posizione dell'armatura principale rispetto all'armatura trasversale. . .	35
A.1	Diagrammi sperimentali ottenuti dai provini 15NSP1 e 15NSP2. . . . .	48
A.2	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S5P1. . . . .	49
A.3	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S5P2. . . . .	50
A.4	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S5P3. . . . .	51
A.5	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S5P4. . . . .	52
A.6	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S5P5. . . . .	53
A.7	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S6P1. . . . .	54
A.8	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S6P2. . . . .	55
A.9	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S6P3. . . . .	56
A.10	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S6P4. . . . .	57
A.11	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S8P1. . . . .	58
A.12	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S8P2. . . . .	59
A.13	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S8P3. . . . .	60
A.14	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S8P4. . . . .	61
A.15	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S10P1. . . . .	62
A.16	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S10P2. . . . .	63
A.17	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S10P3. . . . .	64
A.18	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S10P4. . . . .	65

# List of Tables

2.1	Caratteristiche geometriche dell'armatura trasversale dei provini. . . . .	12
3.1	Composizione degli aggregati impiegati per il confezionamento del calcestruzzo. . . . .	17
3.2	Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo impiegato nelle prove dopo 28 giorni di maturazione. . . . .	18
3.3	Caratteristiche geometriche e meccaniche delle barre di armatura. . . . .	19
4.1	Valori del carico, dello scorrimento all'estremo caricato della barra, dello sforzo nominale massimo e dello sforzo di aderenza medio valutati in corrispondenza del carico di picco e valori della resistenza cubica a compressione misurata al momento della prova. . . . .	23



# Appendix A

## Diagrammi delle prove sperimentali

Nel seguito sono raccolte le curve sperimentali ottenute da tutti i provini. In particolare sono mostrati:

- (a) il diagramma del carico in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra per l'intera prova;
- (b) la parte iniziale del diagramma del carico in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra (fino al carico di picco);
- (c) il diagramma dell'apertura della fessura da spacco in corrispondenza dell'armatura trasversale, in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra per l'intera prova;
- (d) la parte iniziale del diagramma dell'apertura della fessura da spacco in corrispondenza dell'armatura trasversale, in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra (fino al carico di picco);
- (e) il diagramma dello scorrimento all'estremo libero della barra in funzione dello scorrimento all'estremo caricato per l'intera prova;
- (f) la parte iniziale del diagramma dello sforzo nell'armatura trasversale in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra (fino al carico di picco);

La Figura A.1 mostra il modesto valore del carico di picco e dello scorrimento massimo raggiunto nei provini 15NSP1 e 15NSP2 senza armatura trasversale; il collasso in tali provini è avvenuto in modo instabile (“collasso per splitting”) appena raggiunto il carico di picco in quanto, pur essendo la prova condotta a controllo di spostamento, la macchina ed il banco di prova non sono stati sufficientemente rigidi da cogliere il ramo discendente.

Purtroppo gli estensimetri elettrici a diretto contatto col calcestruzzo non hanno sempre fornito risultati significativi (in quanto era stata applicata solo una leggera protezione per non modificare sensibilmente l'aderenza della staffa), e quindi sono disponibili solamente un numero ridotto di curve sperimentali.



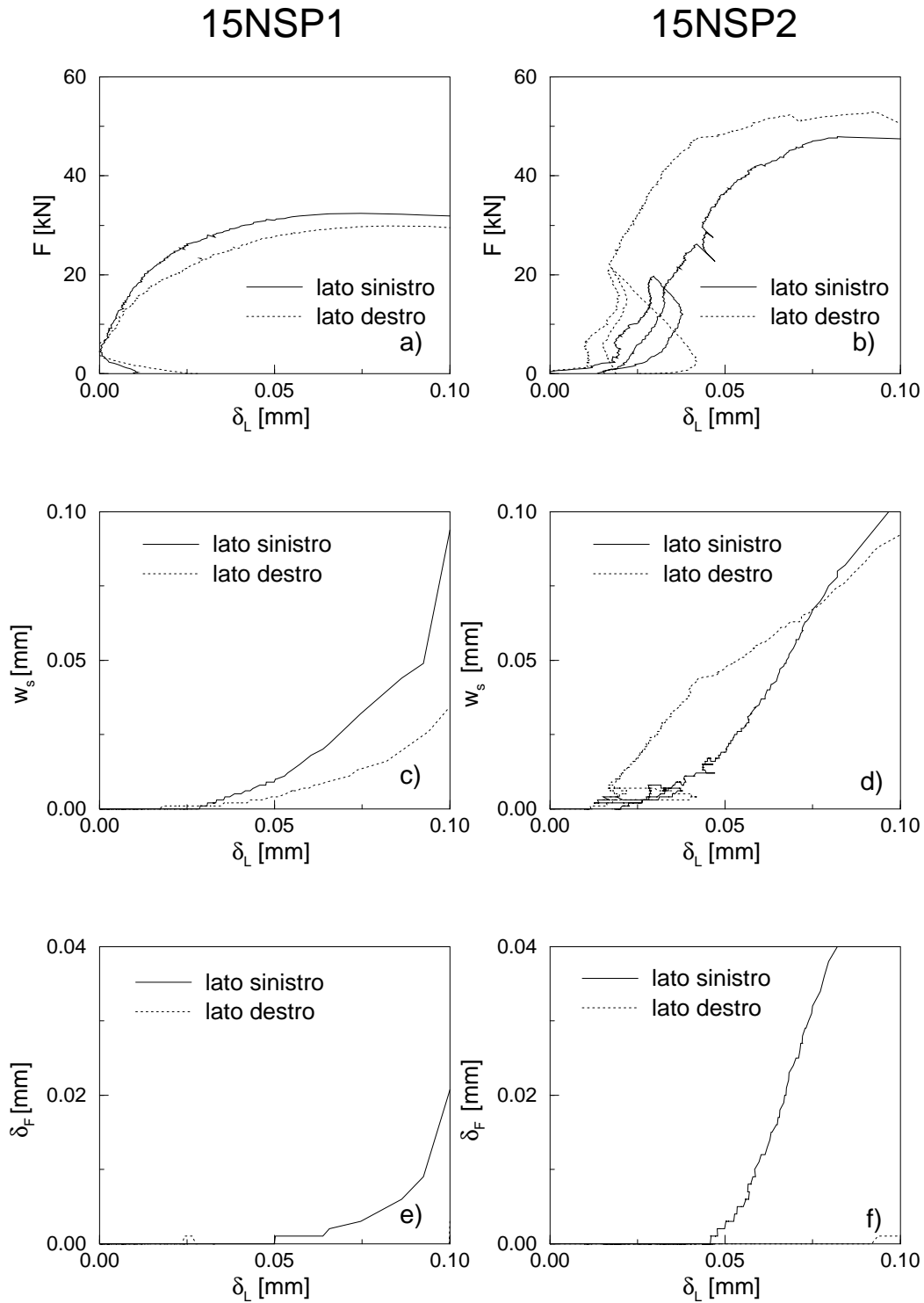


Figure A.1: Diagrammi sperimentali ottenuti dai provini 15NSP1 e 15NSP2.

## 15S5P1

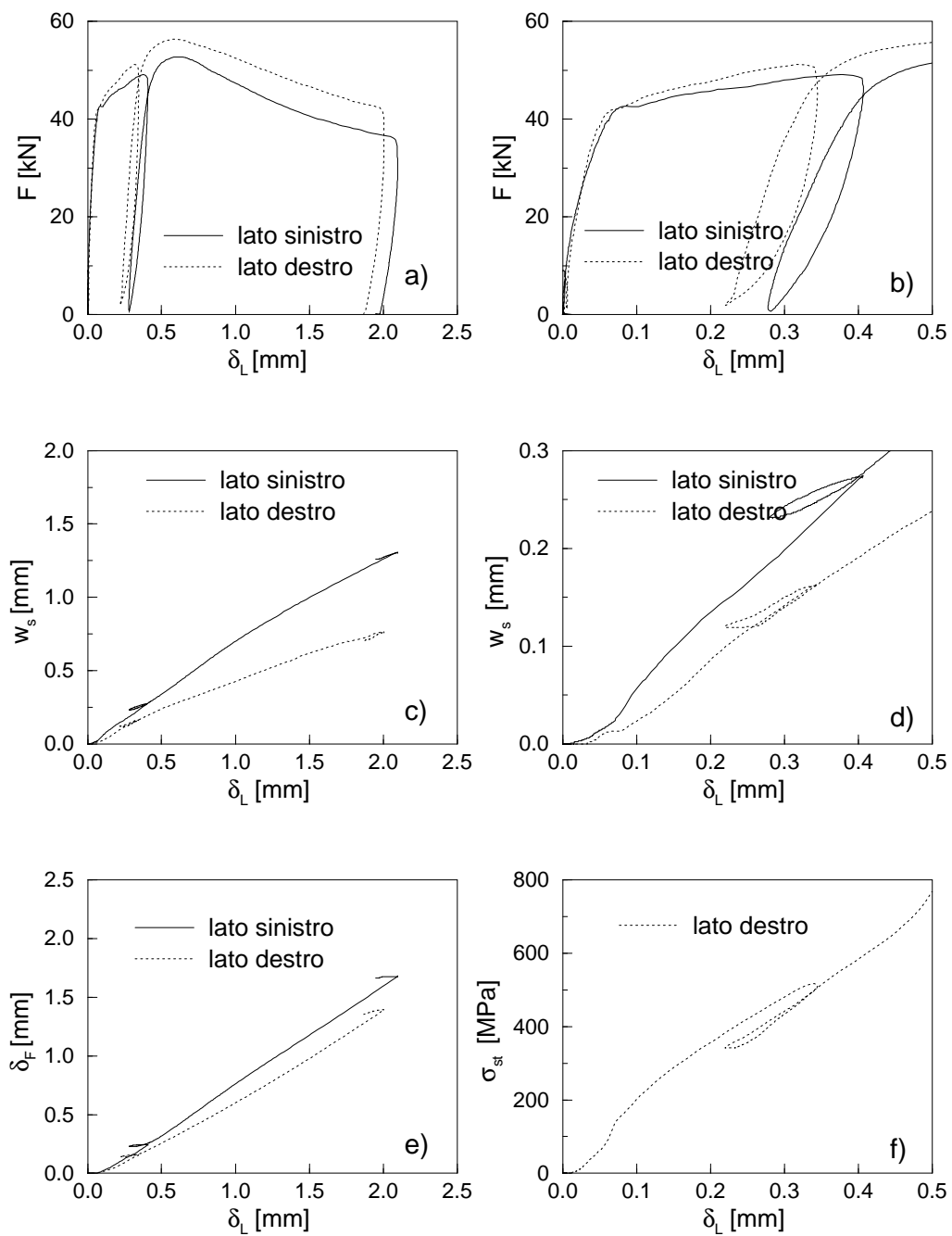


Figure A.2: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S5P1.

## 15S5P2

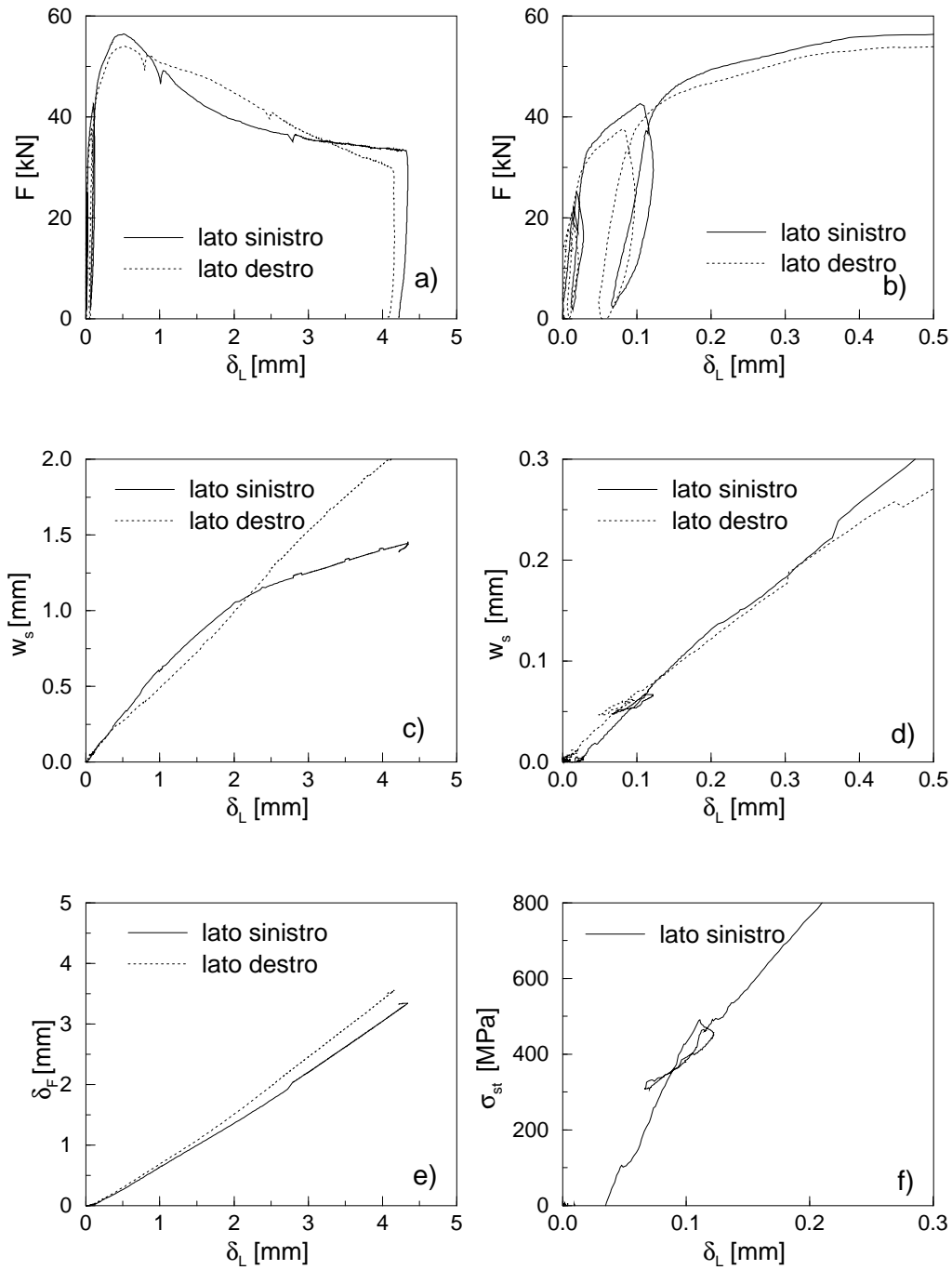


Figure A.3: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S5P2.

## 15S5P3

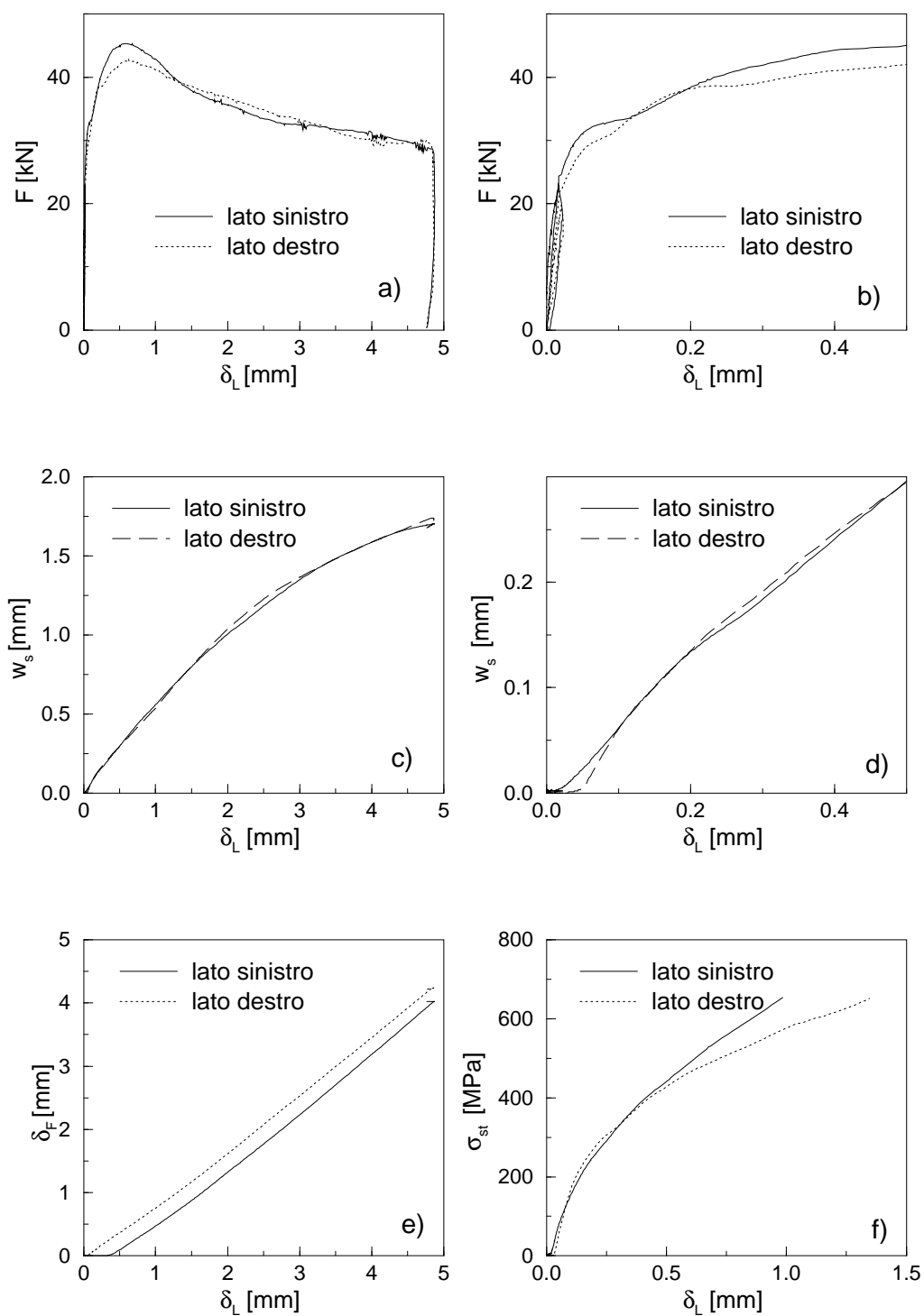


Figure A.4: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S5P3.

## 15S5P4

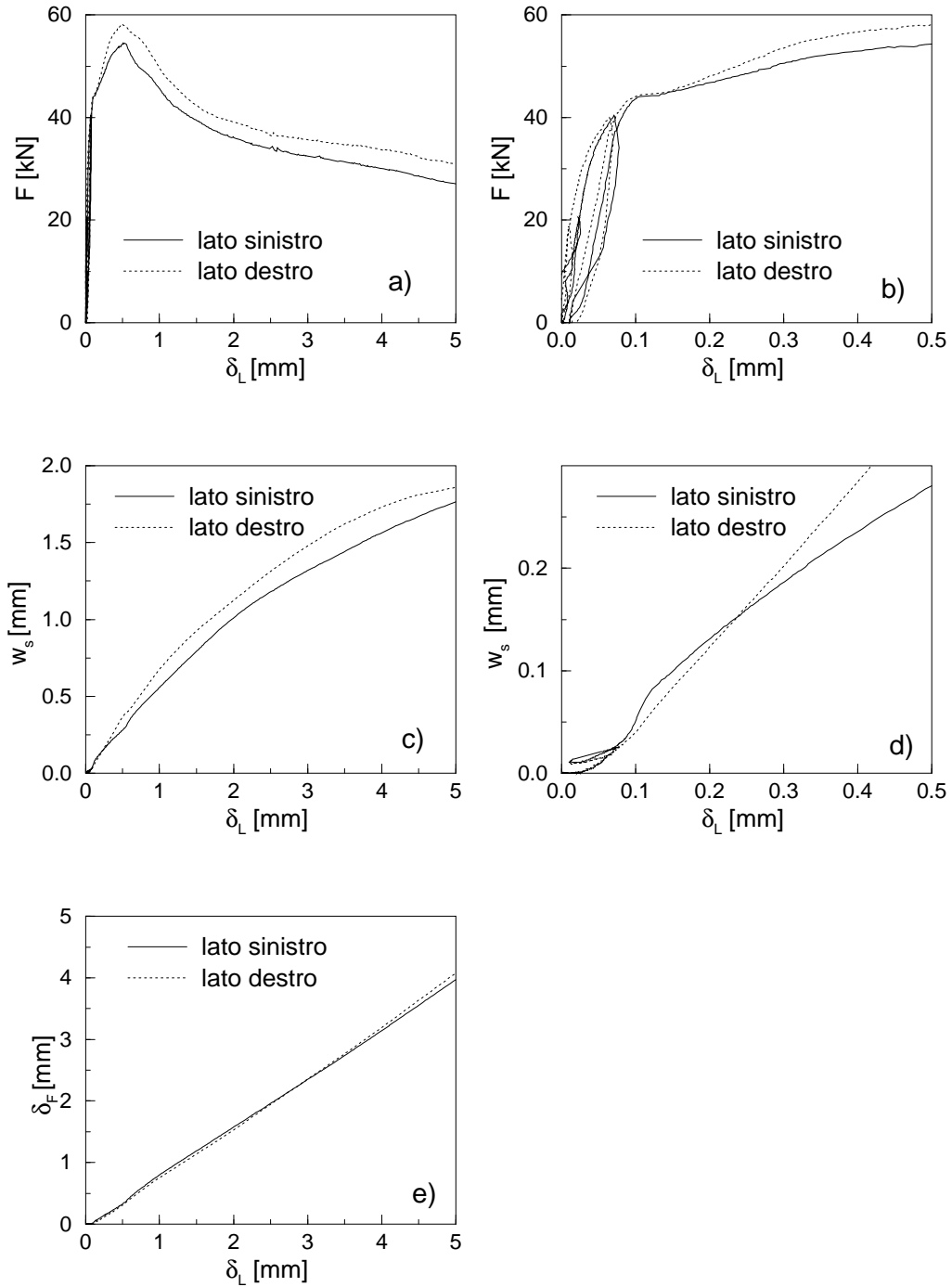


Figure A.5: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S5P4.

## 15S5P5

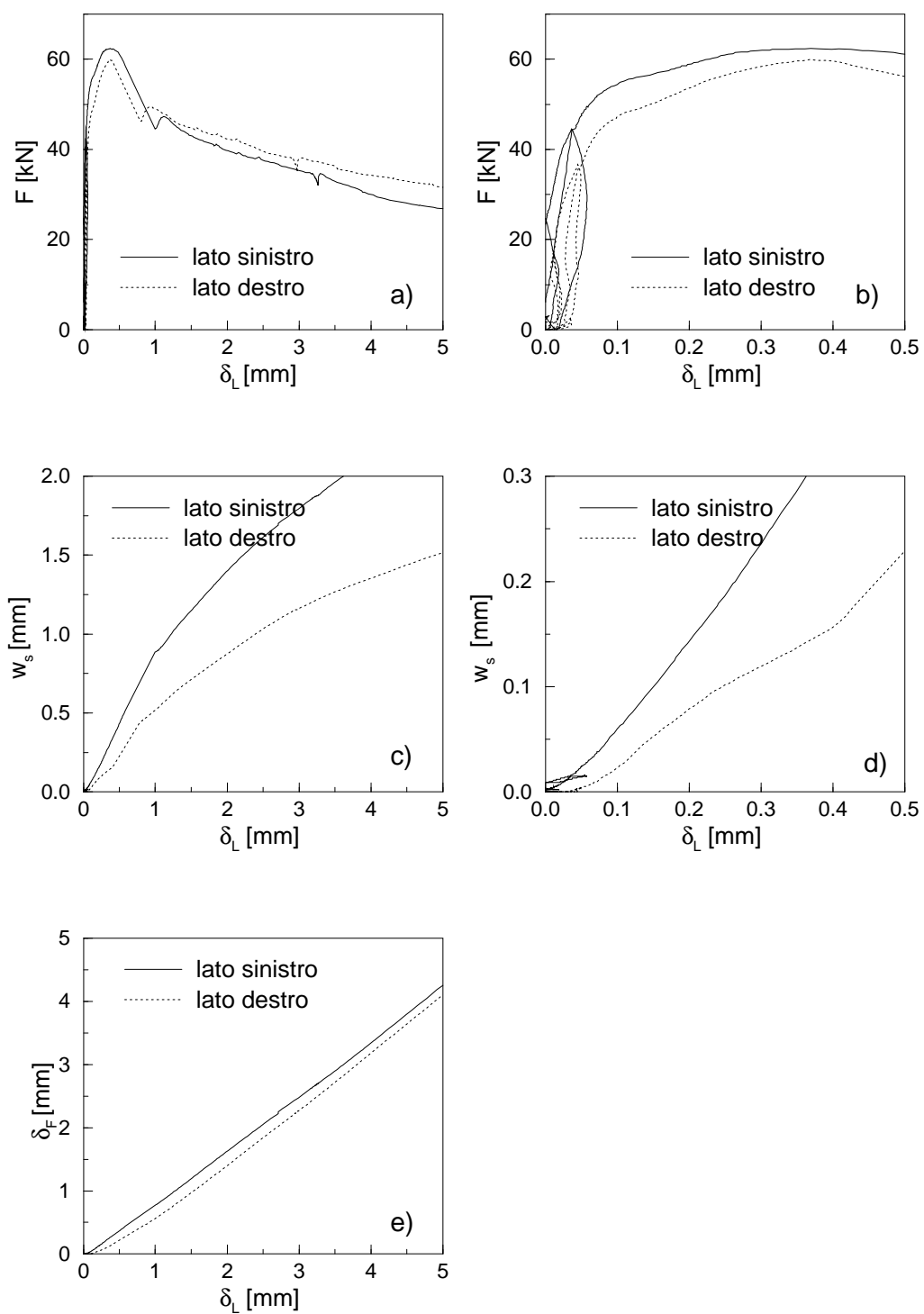


Figure A.6: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S5P5.

## 15S6P1

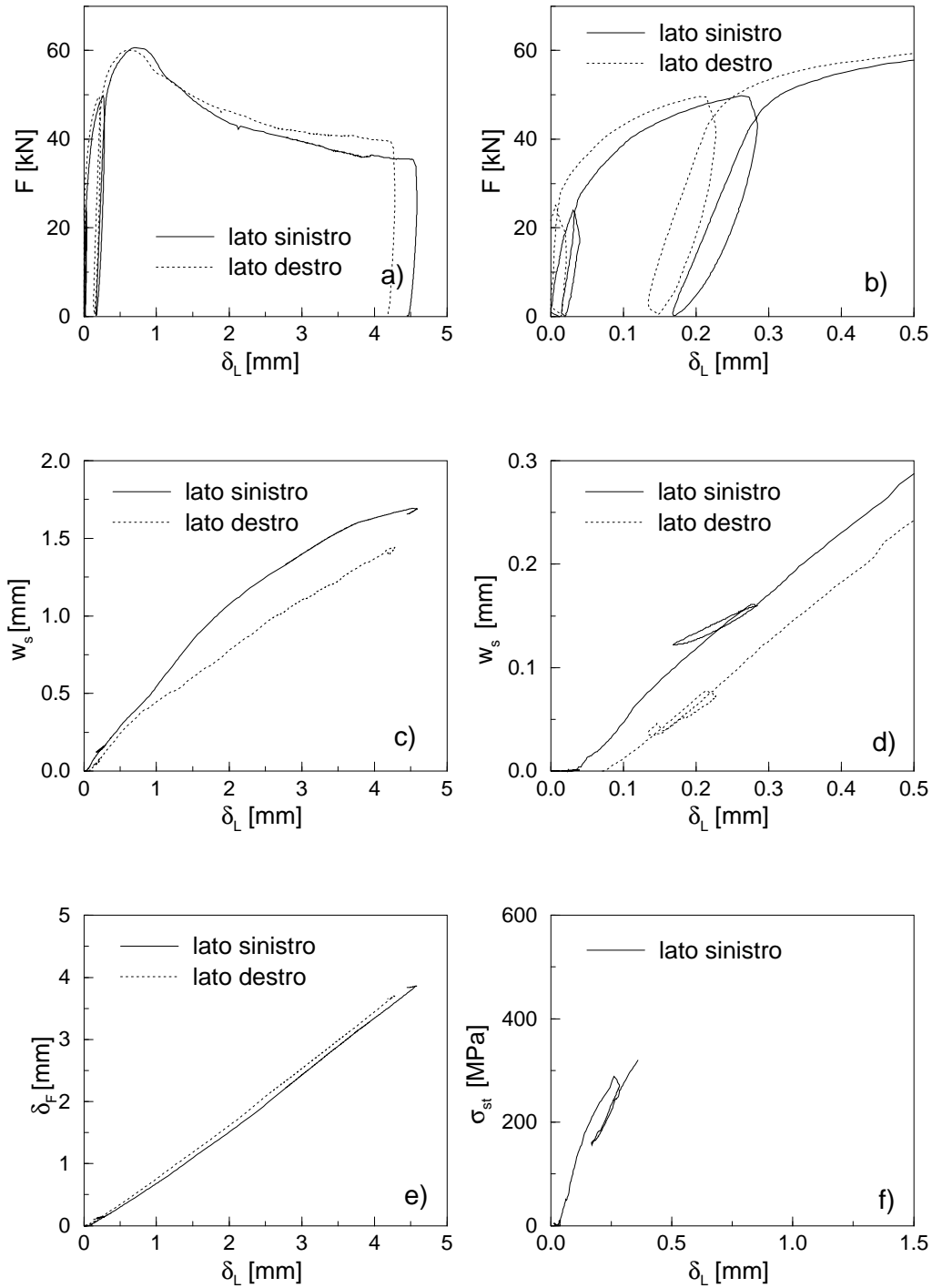


Figure A.7: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S6P1.

## 15S6P2

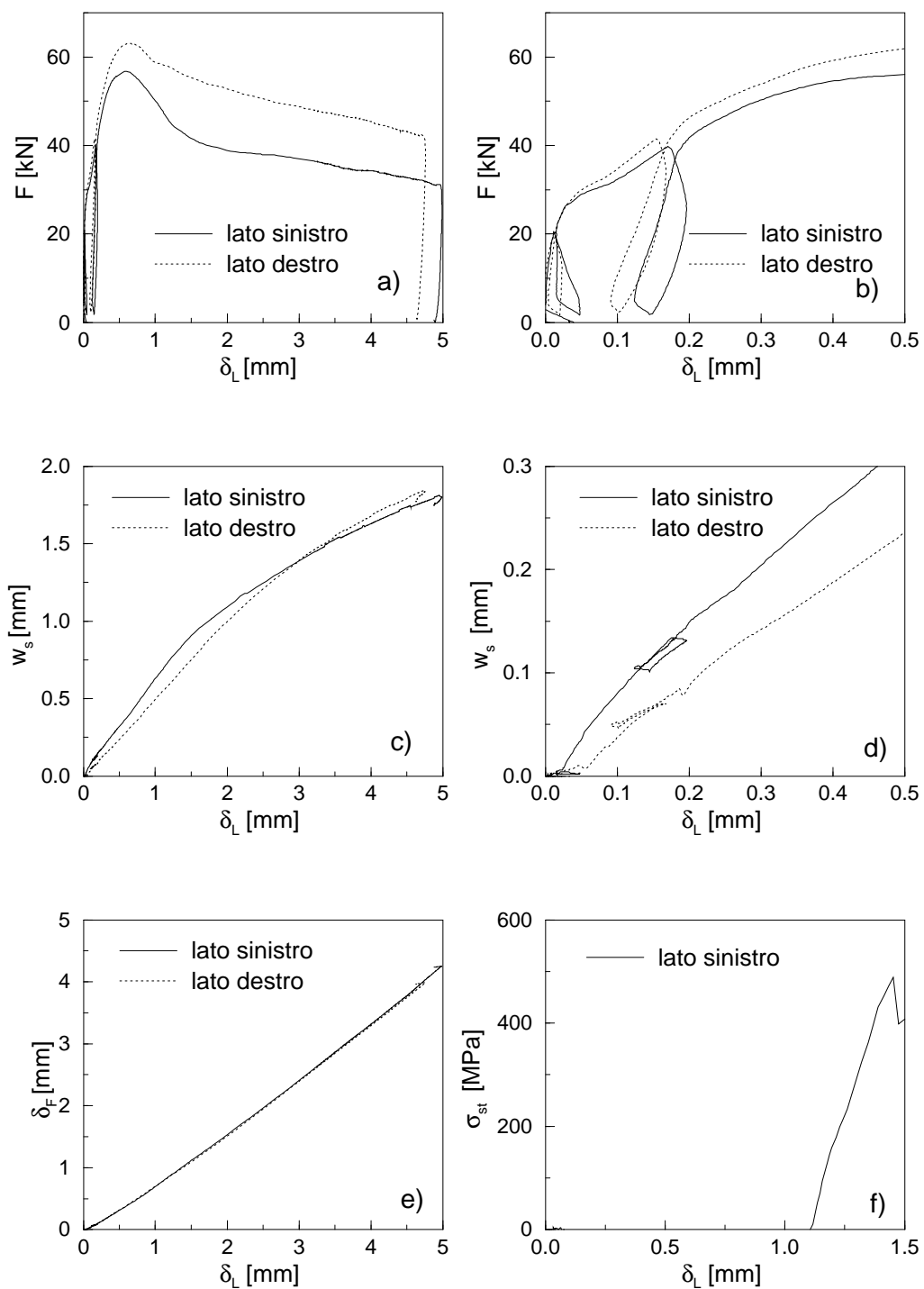


Figure A.8: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S6P2.



## 15S6P3

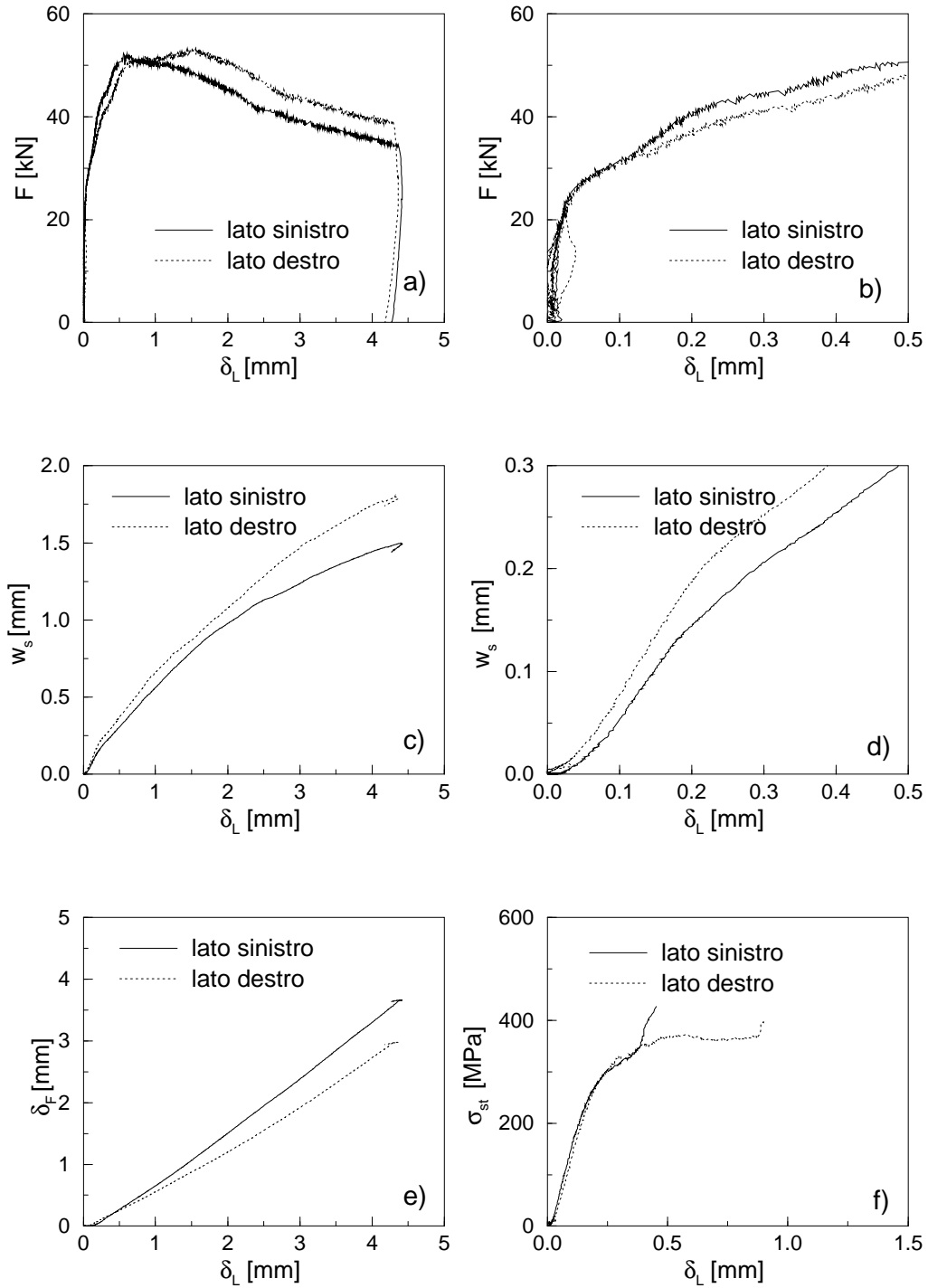


Figure A.9: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S6P3.

## 15S6P4

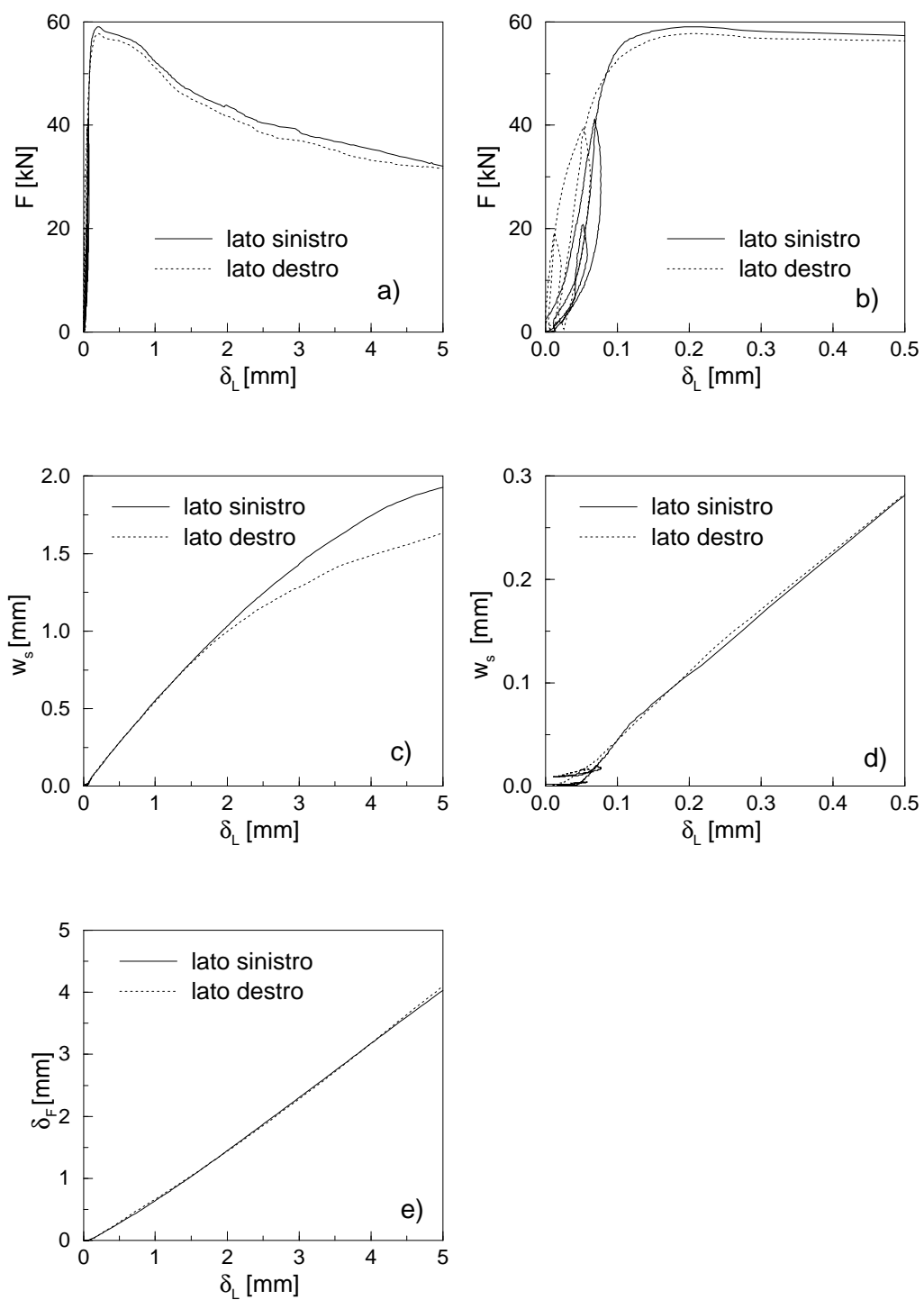


Figure A.10: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S6P4.

## 15S8P1

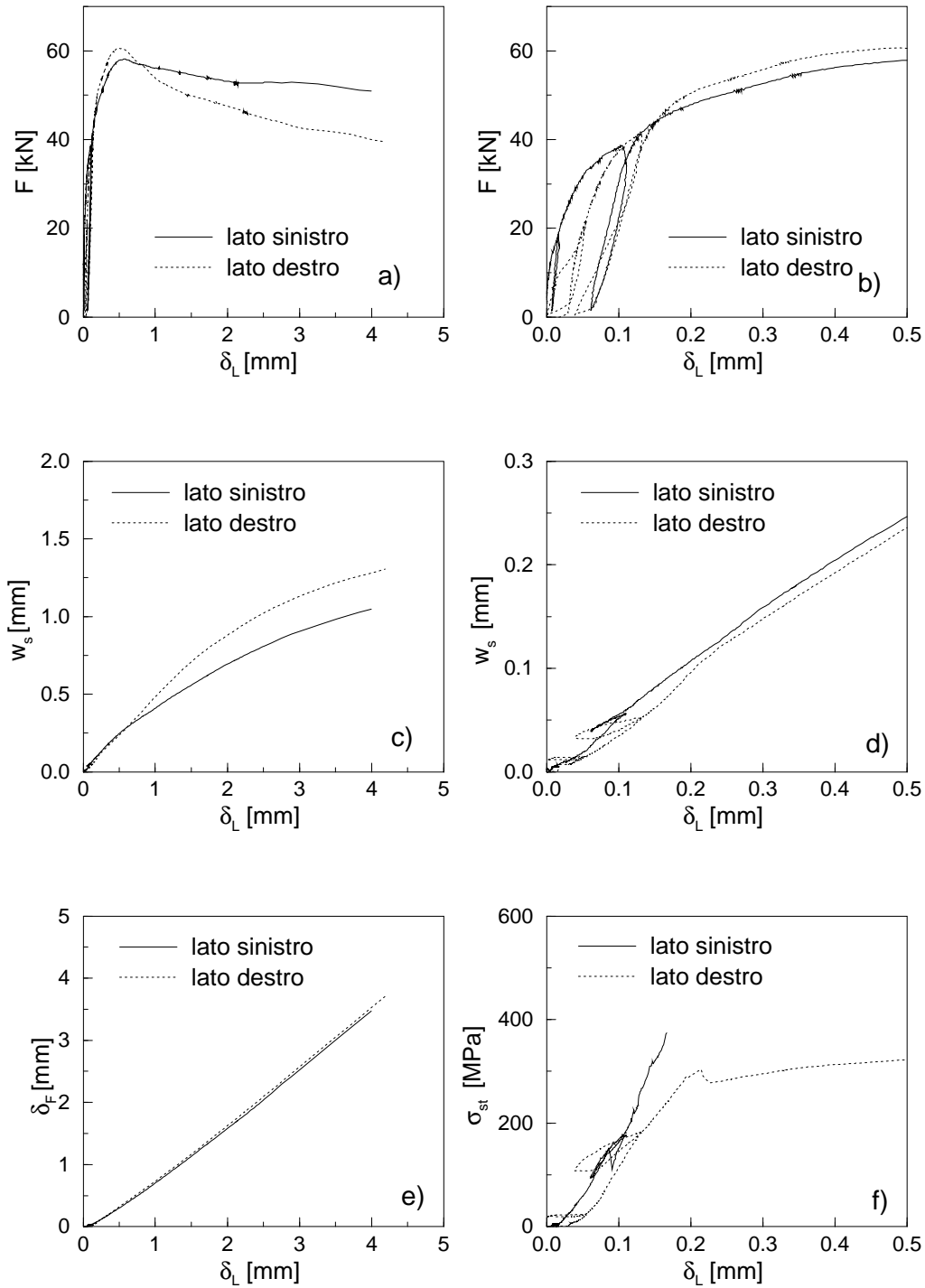


Figure A.11: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S8P1.

## 15S8P2

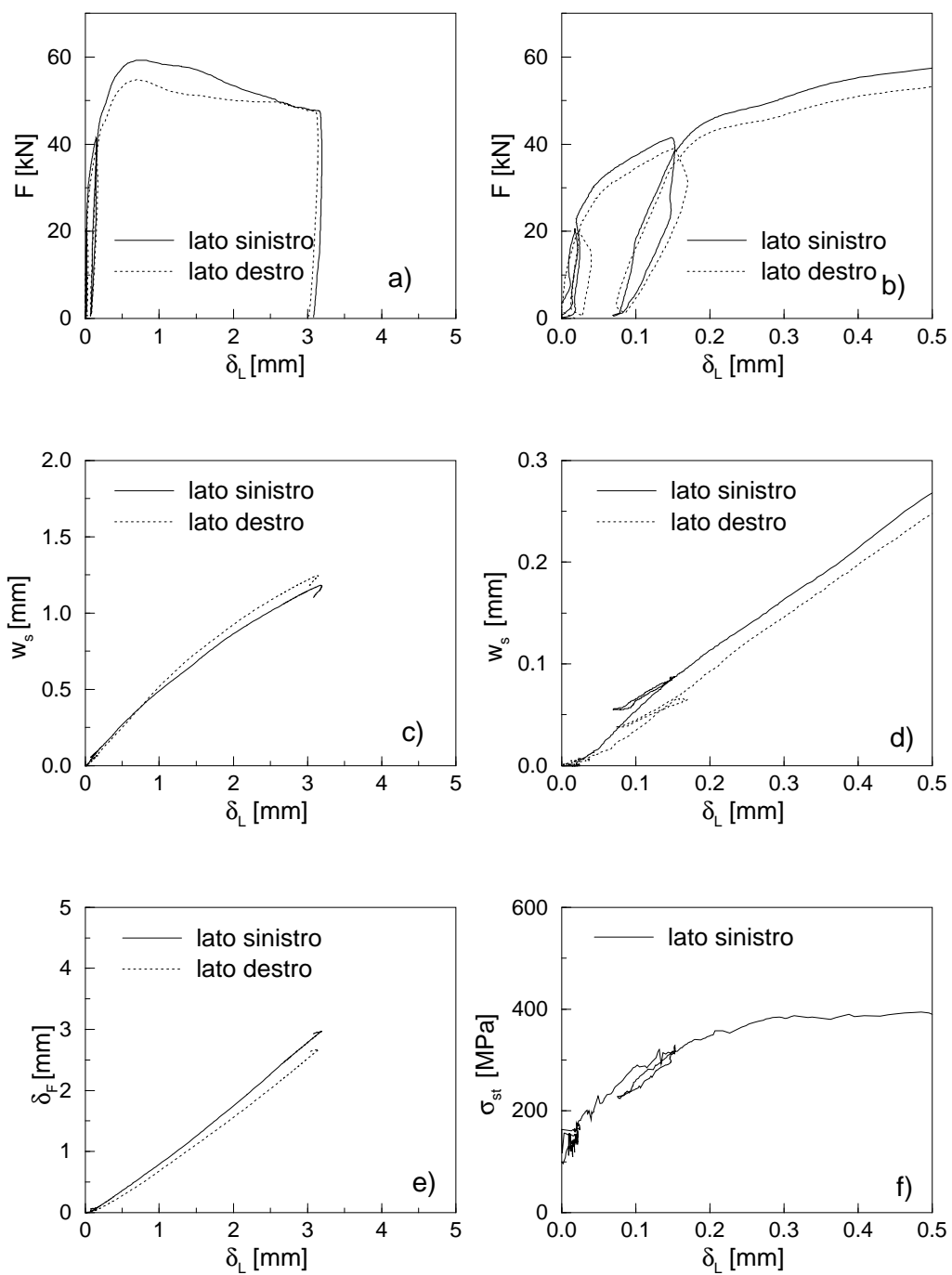


Figure A.12: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S8P2.

## 15S8P3

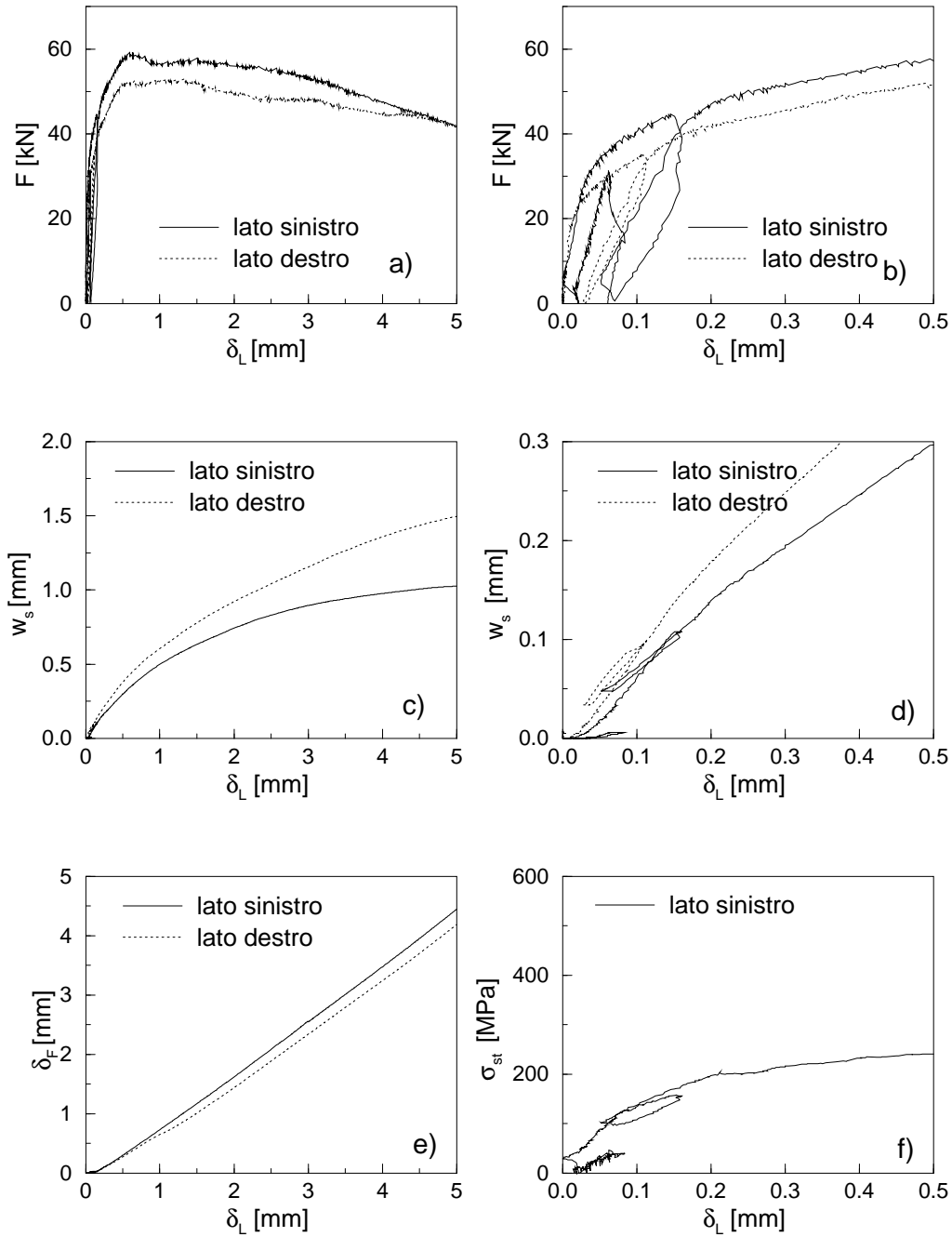


Figure A.13: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S8P3.

## 15S8P4

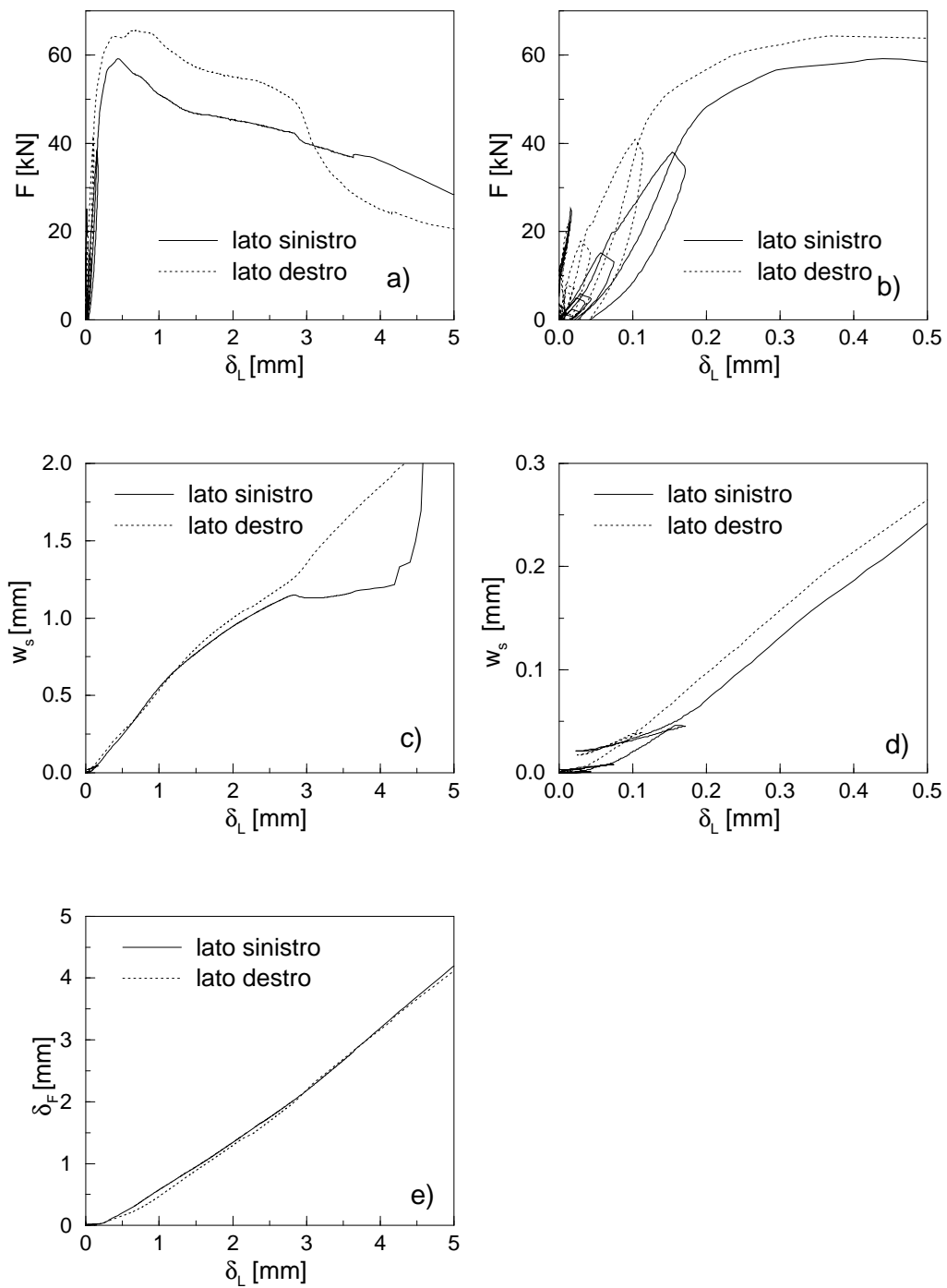


Figure A.14: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S8P4.

## 15S10P1

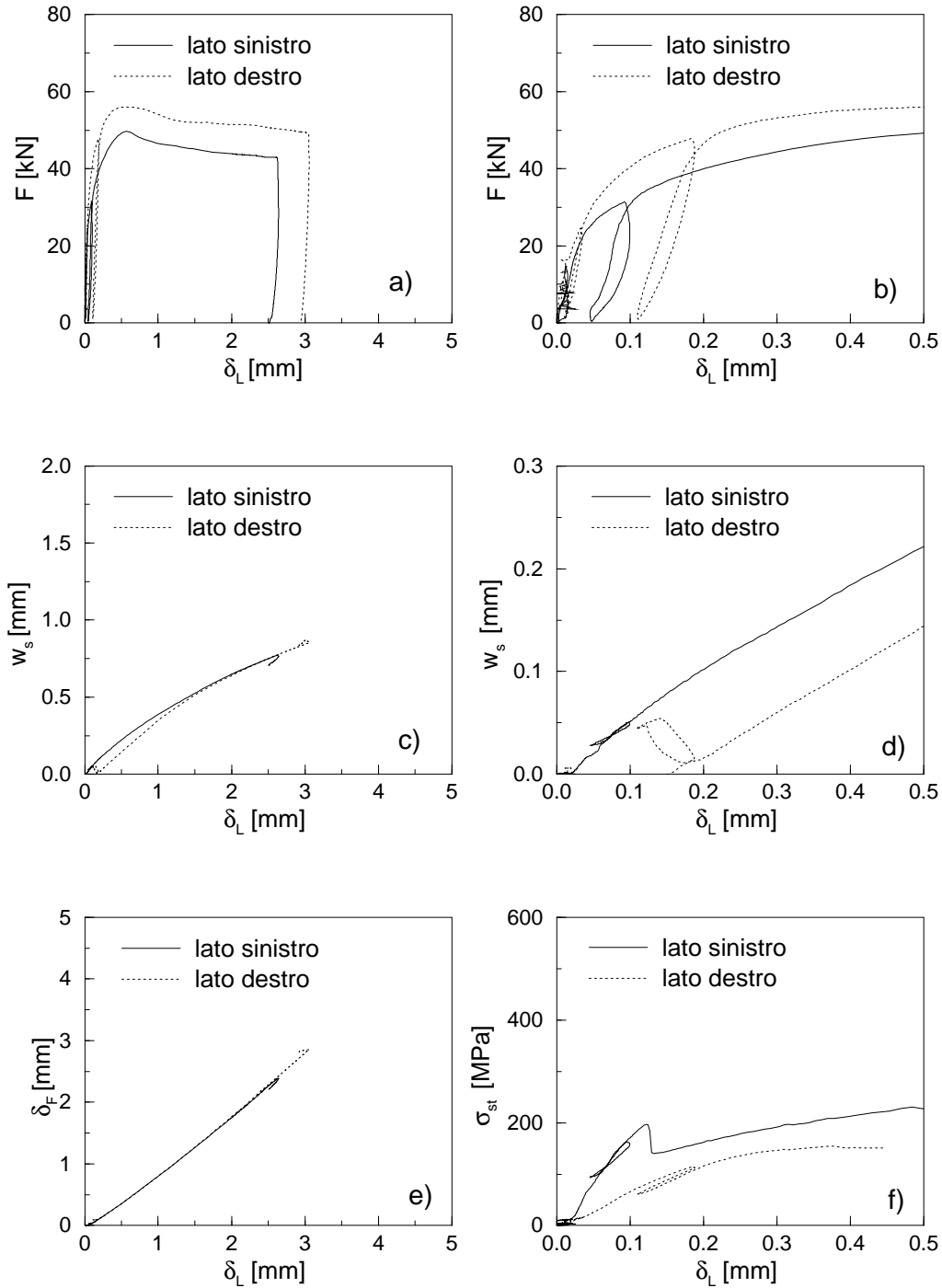


Figure A.15: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S10P1.

## 15S10P2

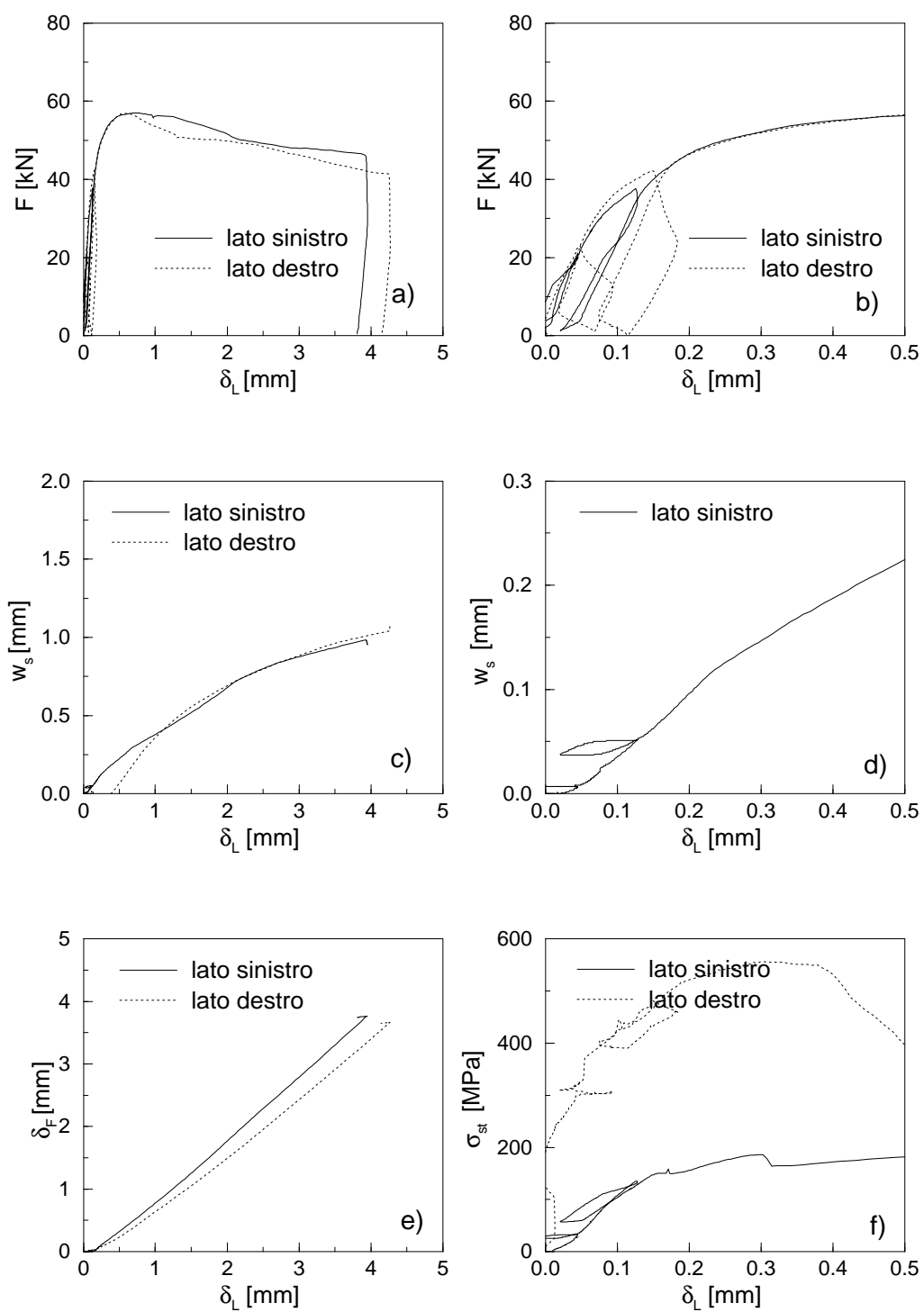


Figure A.16: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S10P2.



## 15S10P3

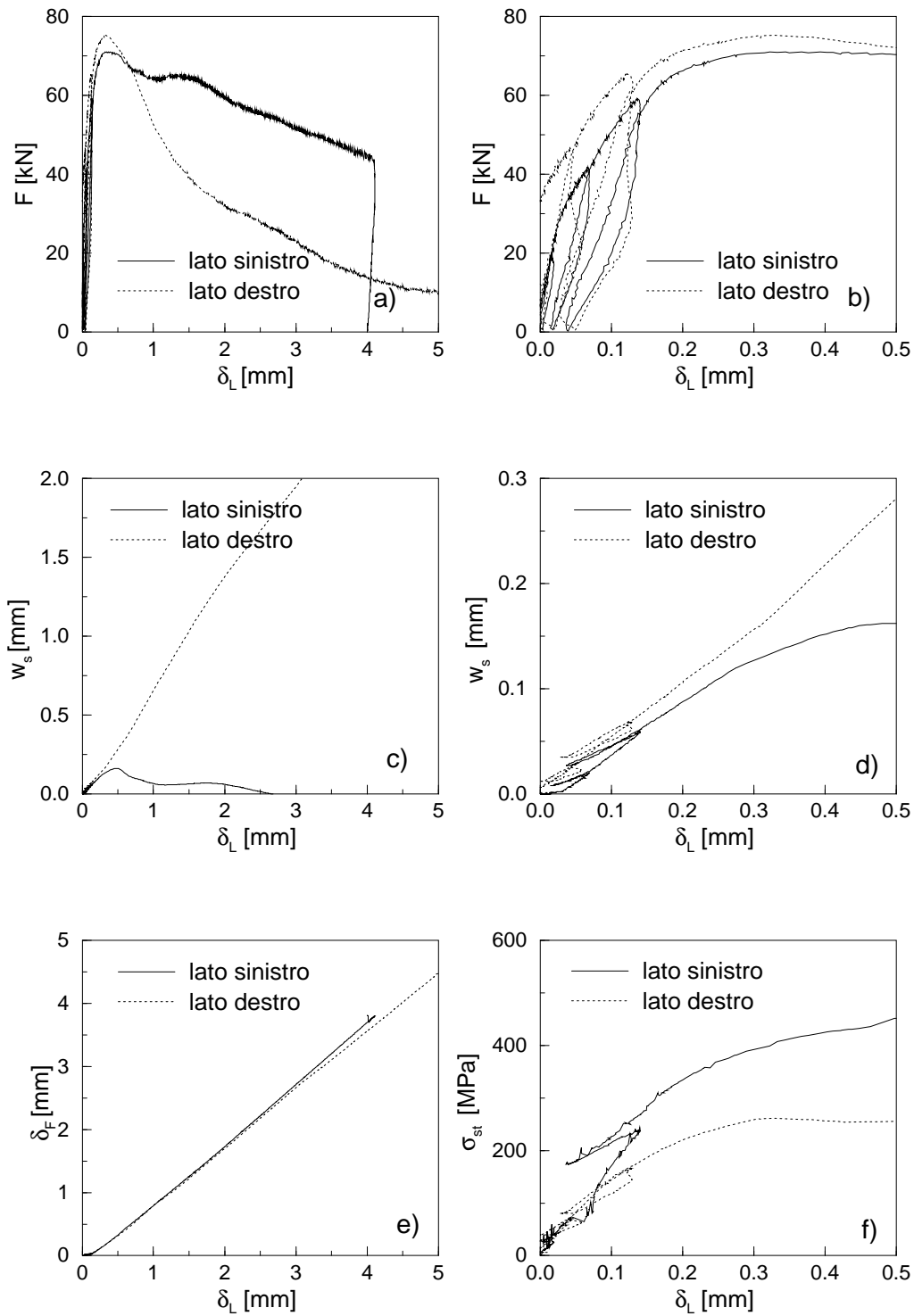


Figure A.17: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S10P3.

## 15S10P4

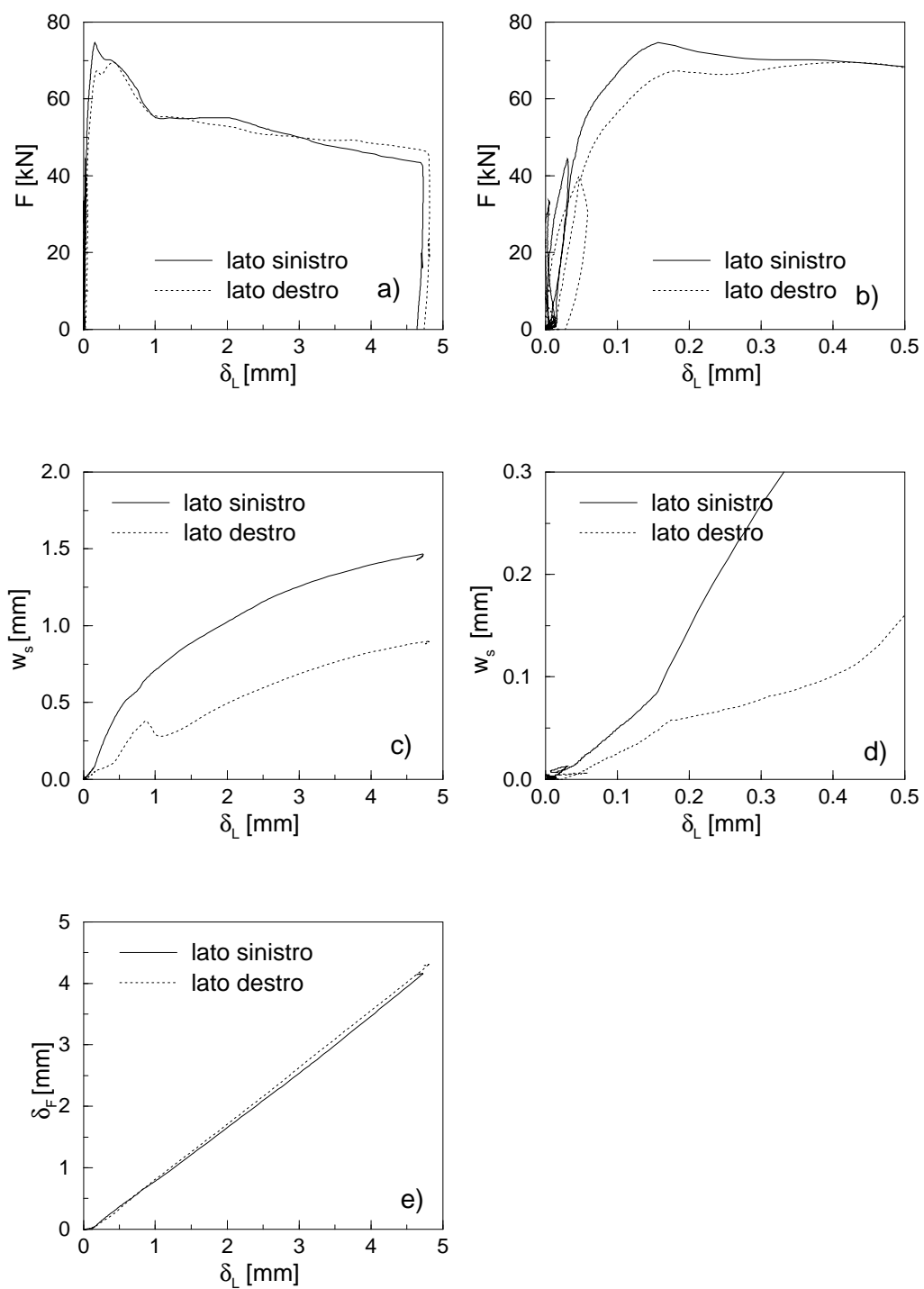


Figure A.18: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 15S10P4.