

Influenza dell'armatura trasversale  
sul comportamento  
di ancoraggi lunghi: risultati  
sperimentali

Giovanni A. PLIZZARI

Angelo M. DELDOSSI

Stefano MASSIMO

*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.5-5/96 del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Brescia.*



# Contents

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Descrizione delle prove</b>	<b>11</b>
2.1	Caratteristiche dei provini . . . . .	11
2.2	Strumentazione . . . . .	14
2.3	Descrizione del banco . . . . .	17
2.4	Modalità di prova . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Caratteristiche dei materiali</b>	<b>21</b>
3.1	Calcestruzzo . . . . .	21
3.2	Acciaio . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Risultati sperimentali</b>	<b>25</b>
4.1	Presentazione dei risultati sperimentali . . . . .	25
4.2	Legame sforzo di aderenza-scorrimento . . . . .	29
4.3	Apertura e propagazione della fessura da spacco . . . . .	29
4.4	Tensioni nell'armatura trasversale . . . . .	34
4.5	Resistenza dell'aderenza . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Confronti con le normative</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>Considerazioni conclusive</b>	<b>43</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>48</b>
<b>A</b>	<b>Diagrammi delle prove sperimentali</b>	<b>51</b>

# 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). . . . .	8
1.2	Azioni di contenimento sulla barra ancorata [3]. . . . .	9
1.3	Collasso locale dell'aderenza per "splitting" (a) e per "pull-out" (b) [4]. . . . .	9
2.1	Schema del provino sperimentale. . . . .	12
2.2	Caratteristiche geometriche dei provini (misure in millimetri). . . . .	13
2.3	Caratteristiche geometriche dell'armatura ancorata e dell'armatura trasversale. . . . .	15
2.4	Vista d'insieme del banco di prova. . . . .	18
3.1	Particolare delle barre d'armatura con indicate alcune caratteristiche geometriche. . . . .	23
4.1	Tipici risultati sperimentali ottenuti dal provino 45S5P4. . . . .	26
4.2	Tipica fessura da spacco, rilevata a fine prova dal provino 45S6P4. . . . .	27
4.3	Andamento dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento dell'estremo caricato della barra fino al carico di picco. . . . .	30
4.4	Diagrammi dell'apertura della fessura da spacco sulla prima staffa in funzione dello scorrimento dell'estremo caricato della barra fino al carico di picco. . . . .	32
4.5	Andamento dell'apertura della fessura da spacco in funzione della tensione nella barra ancorata. . . . .	33
4.6	Diagramma della lunghezza della fessura da spacco in funzione dello sforzo di aderenza medio applicato alla barra. . . . .	36
4.7	Andamento degli sforzi nella prima armatura trasversale in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra fino al carico di picco. . . . .	37
4.8	Diagramma dello sforzo di aderenza massimo in funzione dell'indice di contenimento delle staffe. . . . .	38
A.1	Diagrammi sperimentali ottenuti dai provini 45NSP1 e 45NSP2. . . . .	52
A.2	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S5P1. . . . .	53
A.3	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S5P3. . . . .	54
A.4	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S5P4. . . . .	55
A.5	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S6P1. . . . .	56

A.6	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S6P2. . . . .	57
A.7	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S6P3. . . . .	58
A.8	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S6P4. . . . .	59
A.9	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S8P1. . . . .	60
A.10	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S8P2. . . . .	61
A.11	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S8P3. . . . .	62
A.12	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S8P4. . . . .	63
A.13	Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S10P4. . . . .	64

# List of Tables

2.1	Caratteristiche geometriche delle armature dei provini. . . . .	15
3.1	Composizione degli aggregati impiegati per il confezionamento del calcestruzzo. . . . .	22
3.2	Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo impiegato nelle prove dopo 28 giorni di maturazione. . . . .	23
3.3	Caratteristiche geometriche e meccaniche delle barre di armatura. . . .	24
4.1	Valori del carico massimo, dello scorrimento all'estremo caricato della barra, dello sforzo nominale massimo e dello sforzo di aderenza medio in corrispondenza del carico di picco. . . . .	28

# Chapter 1

## Introduzione

L'aderenza tra una barra ad aderenza migliorata ed il calcestruzzo è prevalentemente dovuta all'interazione meccanica tra le nervature ed il calcestruzzo circostante la barra. Le nervature, incuneandosi nel calcestruzzo, esercitano anche 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 di 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 in calcestruzzo armato le fessure da spacco iniziano dalle fessure flessionali dove lo sforzo di aderenza è massimo e tendono a propagarsi lungo tutta la barra [5] (Fig. 2.1).

Le fessure da spacco influenzano l'aderenza tra la barra nervata ed il calcestruzzo. Le stesse fessure hanno anche una particolare importanza nei confronti della durabilità della struttura in quanto, sviluppandosi longitudinalmente alla barra, espongono una notevole zona della stessa agli agenti aggressivi; questa particolarità probabilmente comporta una riduzione della resistenza alla corrosione degli elementi con fessure longitudinali da spacco rispetto agli elementi con sole fessure flessionali [6].

Dopo la formazione delle fessure da spacco, il comportamento degli ancoraggi o sulle giunzioni per sovrapposizione viene a dipendere dalle azioni di contenimento lungo la barra [7]. Tale azione di contenimento può essere fornita dall'armatura trasversale [5, 8, 9] e dalla resistenza residua del calcestruzzo fessurato [5, 10, 11, 12] (Fig. 1.2a). A queste due azioni di contenimento, di tipo “passivo”, si può aggiungere l'azione di contenimento “attiva” dovuta ad una pressione trasversale esterna [7, 13, 14] (Fig. 1.2b).

Nelle travi di calcestruzzo ordinario con armature dotate di piccoli copriferri ed interferri, l'armatura trasversale fornisce l'azione di contenimento più significativa, soprattutto nelle zone lontane dagli appoggi dove non è presente alcuna pressione trasversale esterna. Se l'armatura trasversale non è presente, le fessure da spacco si propagano lungo la barra ancorata e si verifica un collasso di tipo fragile dell'ancoraggio [5, 8, 3] (“collasso per splitting”, Fig. 1.3a); al contrario, un numero adeguato di staffe lungo la barra limita l'apertura della fessura da spacco e consente agli sforzi di aderenza di



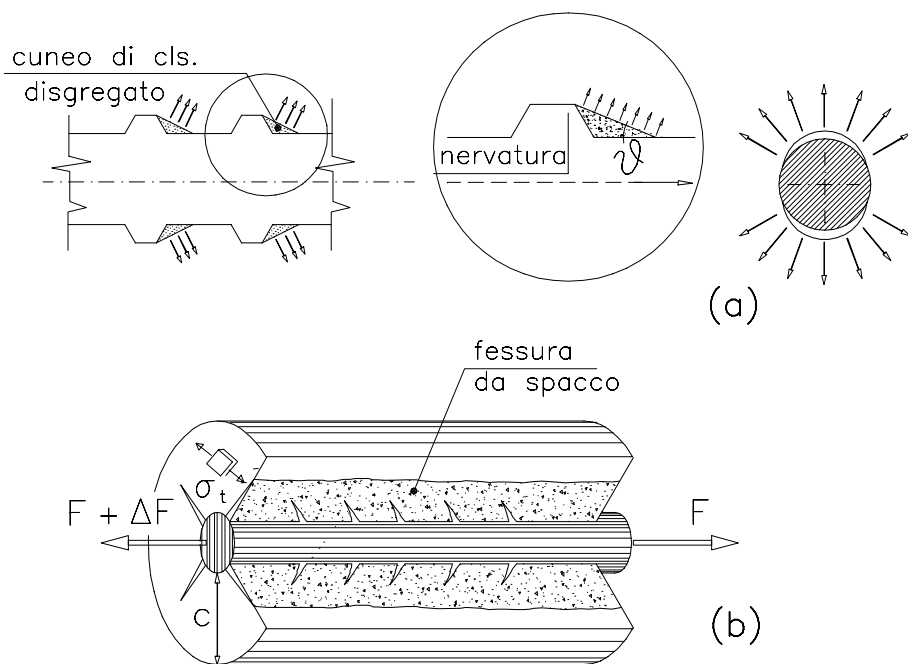


Figure 1.1: Cunei di conglomerato a monte della nervatura [1] e spinte radiali da essi esercitate (a); fessure trasversali e longitudinali da spacco [2] (b).

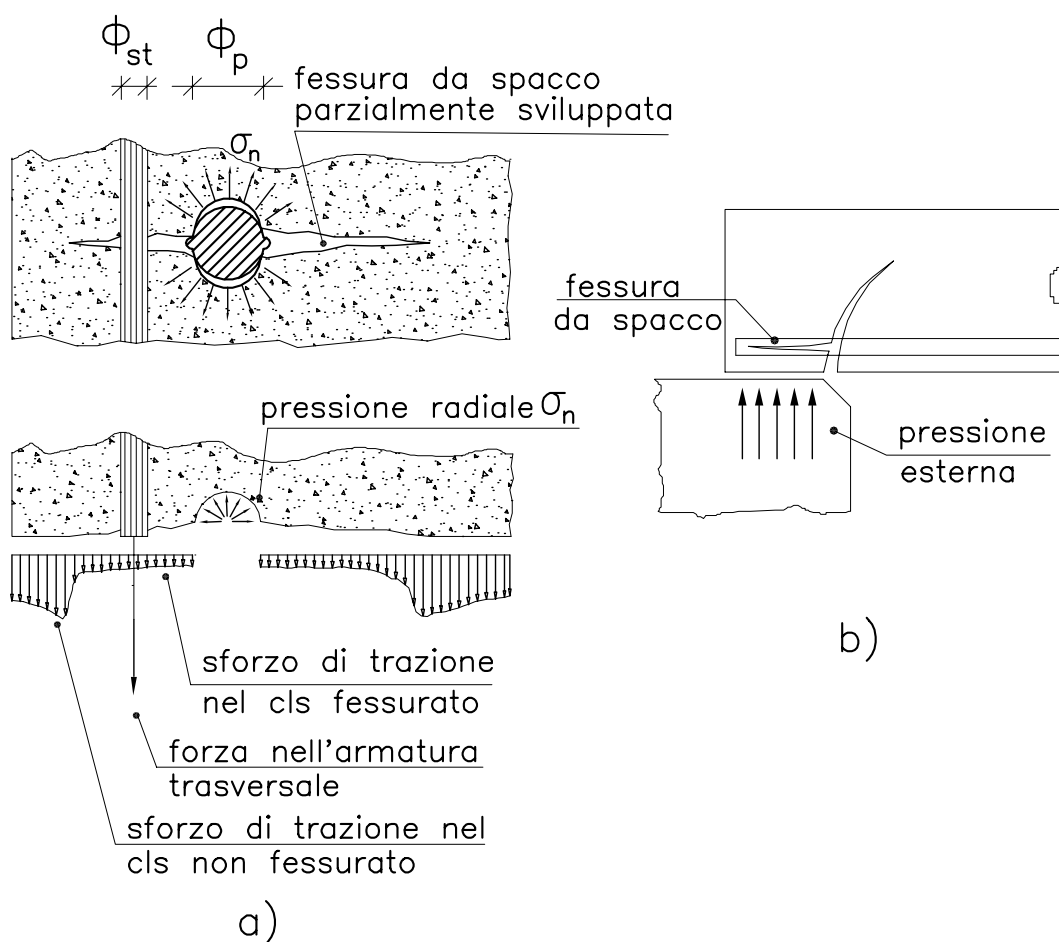


Figure 1.2: Azioni di contenimento sulla barra ancorata [3].

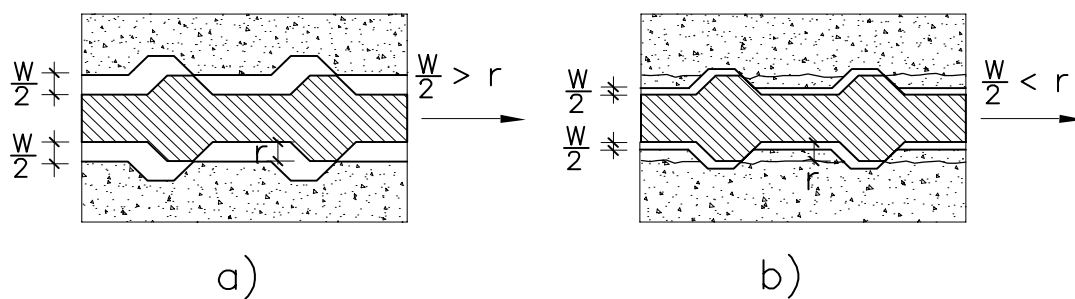


Figure 1.3: Collasso locale dell'aderenza per "splitting" (a) e per "pull-out" (b) [4].

aumentare fino al collasso per tranciamento dei denti di calcestruzzo tra le nervature (collasso per “pull-out”; Fig. 1.3b). In situazioni intermedie l’armatura trasversale potrebbe consentire di evitare il collasso per “splitting” ma, se fosse troppo debole, potrebbe snervarsi prima del raggiungimento della resistenza dell’aderenza.

Il comportamento degli ancoraggi può quindi essere correttamente studiato solo quando la fessurazione da spacco e le azioni di contenimento sono prese in considerazione [15]. Le ricerche sulla fessurazione da spacco disponibili in letteratura hanno principalmente riguardato il comportamento di ancoraggi corti [16, 9, 17]. Le prove sperimentali effettuate su ancoraggi lunghi hanno principalmente focalizzato l’attenzione sulla resistenza dell’ancoraggio e solo in pochi casi hanno fornito informazioni sull’apertura della fessura da spacco [18, 19]; di conseguenza, per conoscere più dettagliatamente il comportamento degli ancoraggi è ancora necessaria della ricerca. In un contesto di conoscenze piuttosto limitato, la fessurazione da spacco è finora stata vista dagli enti normatori come un fenomeno da minimizzare e la resistenza dell’aderenza dopo la fessurazione da spacco è stata fortemente sottovalutata [7].

Lo studio del comportamento di ancoraggi lunghi richiede ancora ricerca sperimentale per studiare la formazione e la propagazione della fessura da spacco lungo la barra ancorata. A tale scopo, nel presente lavoro viene studiata sperimentalmente l’influenza dell’armatura trasversale sul comportamento di ancoraggi lunghi; la sperimentazione ha lo scopo di fornire indicazioni riguardanti la resistenza dell’ancoraggio, la formazione ed la propagazione della fessura da spacco e la tensione nelle armature trasversali. Inoltre viene determinata la relazione sperimentale tra la resistenza dell’ancoraggio e la percentuale di armatura trasversale presente; tale relazione viene infine confrontata con i valori proposti dall’Eurocodice 2 [20] e dalla Normativa Americana ACI 318-95 [21].

La sperimentazione viene effettuata con semplici prove di estrazione; tali prove sono normalmente influenzate dagli effetti dell’attrito all’interfaccia tra il provino e la piastra di contrasto. L’attrito diventa ancora più importante nel caso di sperimentazione su ancoraggi lunghi a causa degli elevati valori della forza di estrazione. Allo scopo di eliminare tale azione di contenimento indesiderata è stato appositamente progettato e realizzato uno speciale banco di prova.

# Chapter 2

## Descrizione delle prove

### 2.1 Caratteristiche dei provini

I provini sperimentali hanno lo scopo di simulare il comportamento di due barre ancorate in prossimità di una fessura flessionale in una trave con tre staffe a due bracci (Fig. 2.1). A tale scopo sono state effettuate prove di estrazione su prismi di calcestruzzo con due barre ancorate e tre coppie di armature trasversali di contenimento (Fig. 2.2). Tutte le armature ancorate hanno un diametro di 20 mm ed una lunghezza di ancoraggio di 450 mm; di conseguenza la distanza tra le armature trasversali ( $\Delta z$ ) è di 150 mm (Fig. 2.2b). Nella sperimentazione sono state impiegate staffe aventi diverso diametro ( $\phi_{st}=5, 6, 8$  e 10 mm) allo scopo di studiare il comportamento dell'ancoraggio al variare della percentuale di armatura trasversale. Per poter studiare l'influenza dell'azione di contenimento del solo calcestruzzo sono state anche effettuate prove su elementi sprovvisti di armatura trasversale.

Il blocco di calcestruzzo è stato semplificato posizionando le barre ancorate nel piano di simmetria AA del provino (Fig. 2.2b); il piano BB corrisponde ad una faccia della fessura flessionale (Fig. 2.1).

La massima sollecitazione nell'armatura trasversale si verifica quando le barre ancorate sono molto vicine tra di loro, in presenza cioè di piccoli ricoprimenti delle armature (copriferro ed interferro); in questo caso la fessura da spacco tende a propagarsi nel piano contenente le barre (Fig. 2.1). Per poter simulare sperimentalmente questa situazione e per rendere massima la spinta nelle staffe, 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 per lo 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).

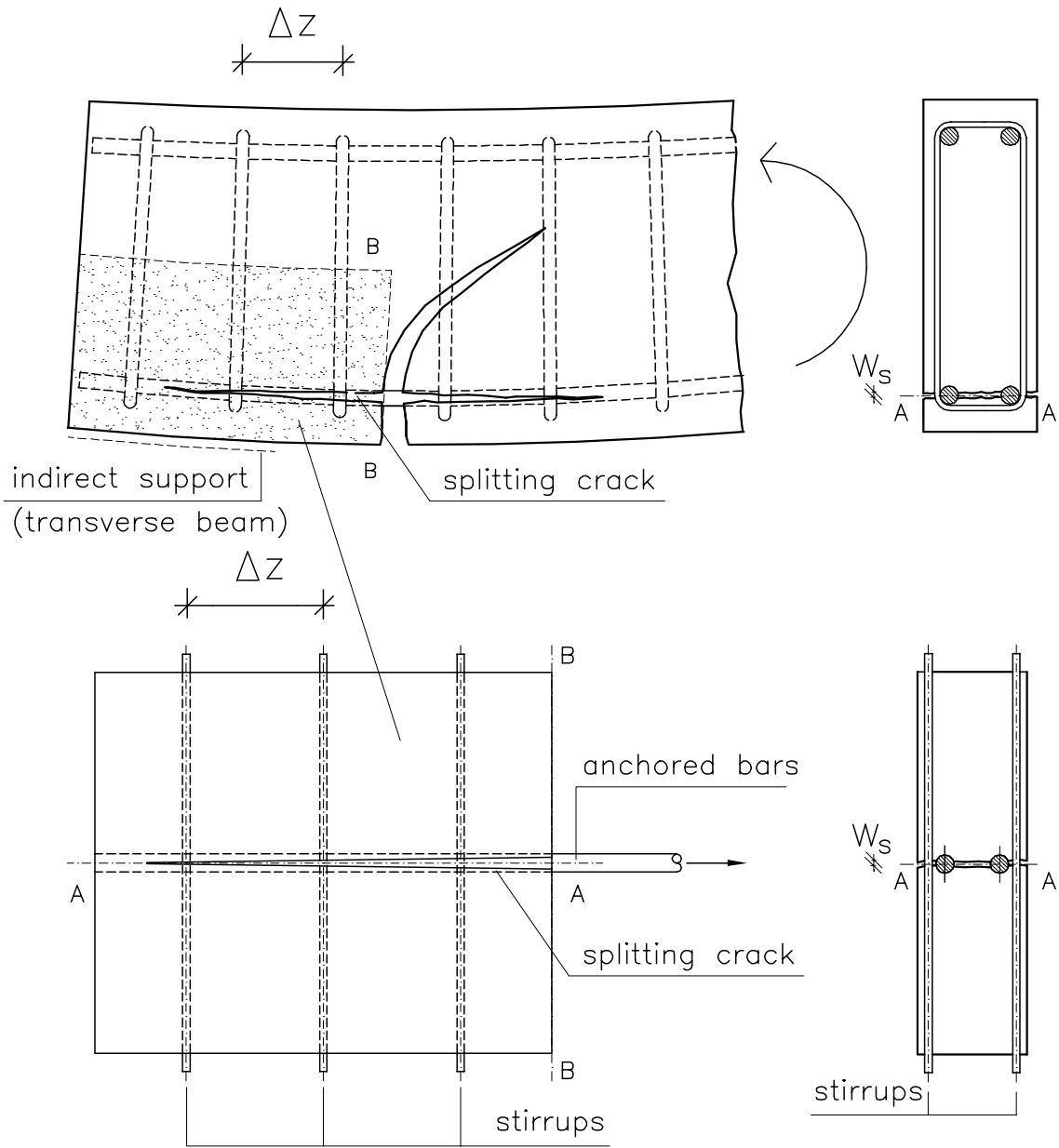


Figure 2.1: Schema del provino sperimentale.

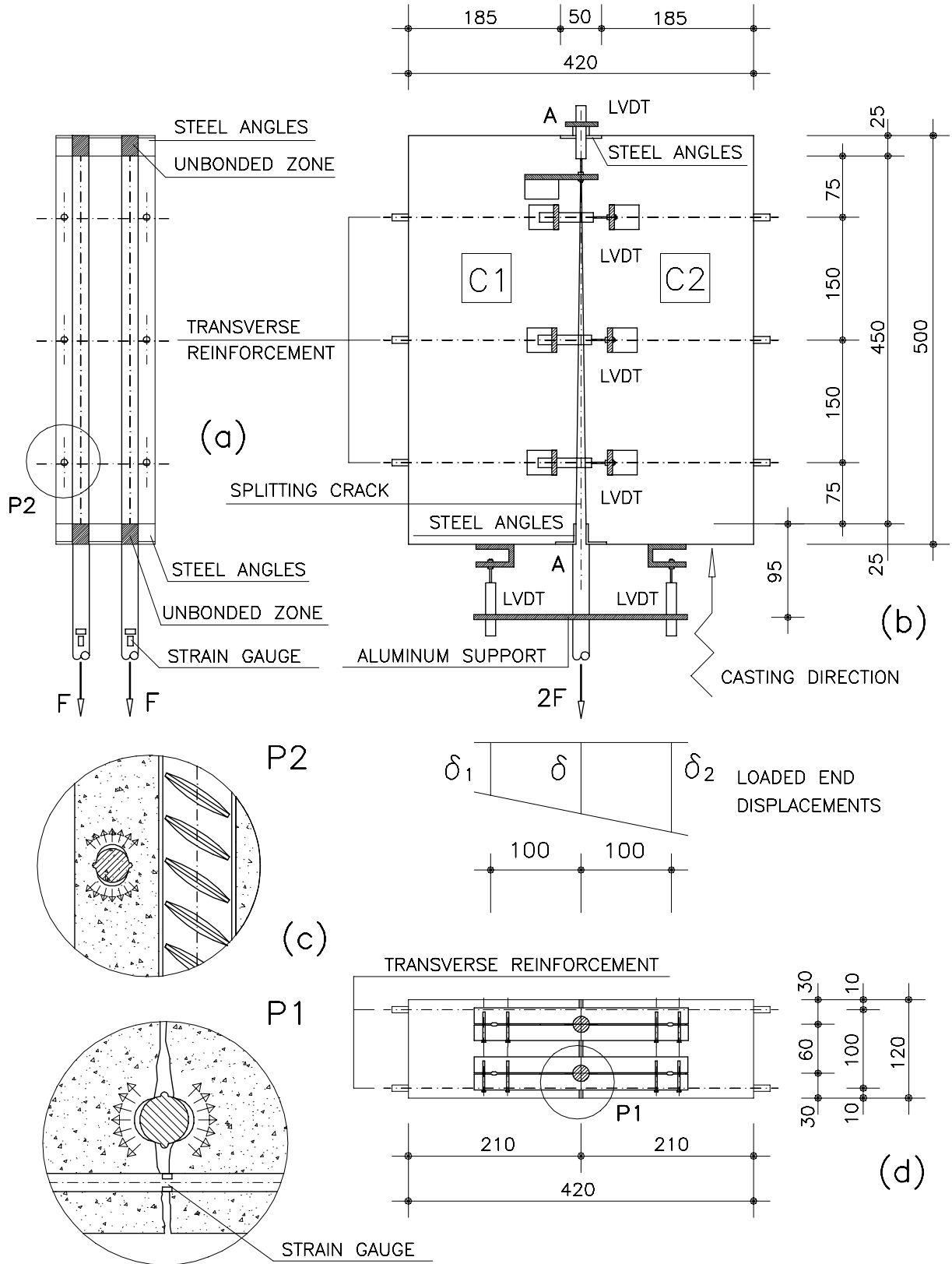


Figure 2.2: Caratteristiche geometriche dei provini (misure in millimetri).

La lunghezza totale dei provini è di 500 mm ma le armature sono lavorate al tornio in modo da togliere le nervature in due zone lunghe 25 mm alle estremità dell'ancoraggio, disattivando in questo modo l'aderenza in tali zone ed avendo una lunghezza di ancoraggio netta, come precedentemente evidenziato, di 450 mm.

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

- 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. 2.3). Tale indice, caratterizzante il modello di comportamento locale proposto da Giuriani e Plizzari [9], era già stato impiegato da Morita e Fujii [22] per rappresentare la resistenza ultima di ancoraggi con armatura trasversale.

- Il secondo è l'*Indice di contenimento del calcestruzzo* [3], definito come

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

dove  $b$  è la larghezza della trave.

Nella Tabella 2.1 sono riportati, per tutti i provini, i diametri delle staffe ed i corrispondenti valori di  $\Omega$ . La larghezza dei provini ( $b$ ), pari a 120 mm, è stata scelta in modo da avere un piccolo spessore del calcestruzzo di ricoprimento, vicino al minimo previsto dalle normative; a tale spessore corrisponde un valore di  $B$  pari a 2.0, costante per tutti i provini.

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 [23] (Fig. 2.2).

## 2.2 Strumentazione

La strumentazione impiegata ha permesso di misurare la forza di estrazione applicata alla barra, gli scorrimenti tra la barra ed il calcestruzzo 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 delle tre armature trasversali) e la tensione nelle armature trasversali (Fig. 2.2).

Per la misura dello scorrimento all'estremo caricato della barra ancorata sono stati impiegati due trasduttori di spostamento induttivi (*Linear Variable Differential Transducer*) per ogni barra, 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

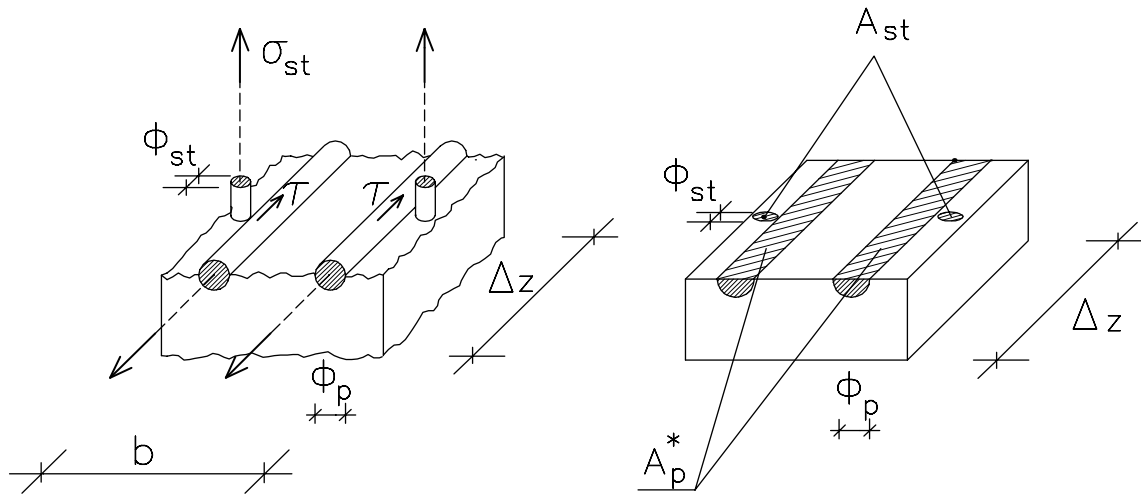


Figure 2.3: Caratteristiche geometriche dell'armatura ancorata e dell'armatura trasversale.

Table 2.1: Caratteristiche geometriche delle armature dei provini.

Provino	$\phi_{st}$ [mm]	$\Omega$	$\phi_p$ [mm]	$A_{st1L}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{st1R}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{st2L}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{st2R}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{st3L}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{st3R}$ [mm <sup>2</sup> ]
45NSP1	-	0	20	-	-	-	-	-	-
45NSP2	-	0	20	-	-	-	-	-	-
45S5P1	5*	0.00654	20	17.60	19.29	19.29	19.29	19.29	19.29
45S5P3	5*	0.00654	20**	18.50	19.29	19.29	19.29	19.29	19.29
45S5P4	5*	0.00654	20**	18.40	18.60	18.00	19.29	18.20	19.29
45S6P1	6	0.00942	20	28.39	28.39	28.39	28.39	28.39	28.39
45S6P2	6	0.00942	20	26.90	28.39	28.39	28.39	28.39	28.39
45S6P3	6	0.00942	20**	28.39	26.50	28.39	28.39	28.39	28.39
45S6P4	6	0.00942	20**	26.20	26.00	28.39	26.10	28.39	26.50
45S8P1	8	0.01675	20	42.50	48.77	48.77	48.77	48.77	48.77
45S8P2	8	0.01675	20	40.50	42.50	43.10	48.77	42.90	48.77
45S8P3	8	0.01675	20**	49.60	48.77	48.77	48.77	48.77	48.77
45S8P4	8	0.01675	20**	48.50	48.77	48.77	47.90	48.77	48.70
45S10P4	10	0.02618	20**	73.70	75.71	75.71	72.30	75.71	74.70

\* = acciaio trafilato a freddo; \*\* = barre trattate termicamente.



la piastra di contrasto. La misura dello scorrimento di testa  $\delta_L$  è stata determinata depurando dallo spostamento misurato  $\delta$  ( $=(\delta_1 + \delta_2)/2$ ), la deformazione elastica della barra nella zona tra il punto di applicazione degli LVDT e l'inizio del tratto ancorato, pari a circa 95 mm (Fig. 2.2b).

$$\delta_L = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} - \frac{F}{EA} 95 [mm] \quad (2.3)$$

La misura dello scorrimento dell'estremo libero viene effettuata impiegando un trasduttore di spostamento per ogni barra, posizionato nelle immediate vicinanze della barra.

L'apertura delle fessure da spacco in corrispondenza dell'armatura trasversale è stata rilevata sempre per mezzo di sei LVDT (tre per ogni lato del provino). La distanza tra i supporti di alluminio è di circa 60 mm; le modeste deformazioni del calcestruzzo nella zona compresa tra tali supporti fa sì che la misura del trasduttore praticamente coincida con l'apertura della fessura da spacco in quanto le deformazioni del calcestruzzo in tale zona possono essere ritenute trascurabili.

Gli LVDT per la misura dello scorrimento all'estremo libero della barra hanno una corsa di  $\pm 5$  mm ed una sensibilità di  $0.5 \mu\text{m}/\text{mV}$  mentre i trasduttori per la misura dello scorrimento di coda hanno una corsa di  $\pm 2$  mm ed una sensibilità di  $0.2 \mu\text{m}/\text{m}$ ; infine, gli LVDT per la misura dell'apertura della fessura da spacco hanno una corsa di  $\pm 10$  mm ed una sensibilità di  $1.0 \mu\text{m}/\text{m}$ .

La forza di estrazione applicata alla singola barra ancorata viene misurata per mezzo della deformazione fornita da estensimetri elettrici posizionati vicino all'estremità caricata della barra (Fig. 2.2a). Il carico totale applicato al provino è stato misurato anche dalla cella di carico da 250 kN della macchina di prova Instron 1274/8500, con una sensibilità di  $0.025 \text{ kN}/\text{mV}$ ; tale misura ha consentito di effettuare un controllo sui valori della forza di estrazione fornita dagli estensimetri elettrici.

Come le barre ancorate, anche alcune staffe sono state strumentate con estensimetri elettrici, in corrispondenza della sezione di mezzera AA (Fig. 2.2c); ciò ha consentito di misurare la loro deformazione e, limitatamente al campo elastico, lo sforzo presente in esse. L'applicazione degli estensimetri ha richiesto la regolarizzazione della superficie 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 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 viene evidenziata applicando sulla faccia del provino, in corrispondenza della zona della fessura, un sottile strato di gesso (Fig. 4.2). L'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 per l'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 effettivo 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 un banco, appositamente progettato per questa serie di prove sperimentali sulla base di un banco precedentemente utilizzato da Giuriani e Plizzari [9]. Il banco impiegato in questa ricerca è di più semplice realizzazione ed ha anch'esso la particolarità di consentire 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. 2.4). Queste sono collegate alle piastre superiori per mezzo di barre filettate che, comportandosi come bielle, non esercitano alcuna azione di contenimento trasversale sul provino. In questo modo i blocchi C1 e C2 di calcestruzzo separati dalla fessura principale da spacco possono quindi spostarsi orizzontalmente senza alcuna influenza dell'attrito sulla superficie di contatto con la piastra di contrasto. L'azione di contenimento sulle barre ancorate dopo la formazione della fessura principale da spacco è esercitata solamente dal calcestruzzo di ricoprimento e dall'armatura trasversale, come si verifica in una trave reale.

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; la minor eccentricità limita l'influenza degli effetti flessionali sul provino [9]. Oltre a favorire l'innescò della fessura principale da spacco nel piano di simmetria AA del provino, la presenza degli angolari di acciaio consente di limitare le deformazioni di compressione nel calcestruzzo causate dalla localizzazione della reazione sulla piastra di contrasto; tale reazione diventa significativa quando sono applicati al provino elevate forze di estrazione, come tipicamente accade nel caso di ancoraggi lunghi.

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

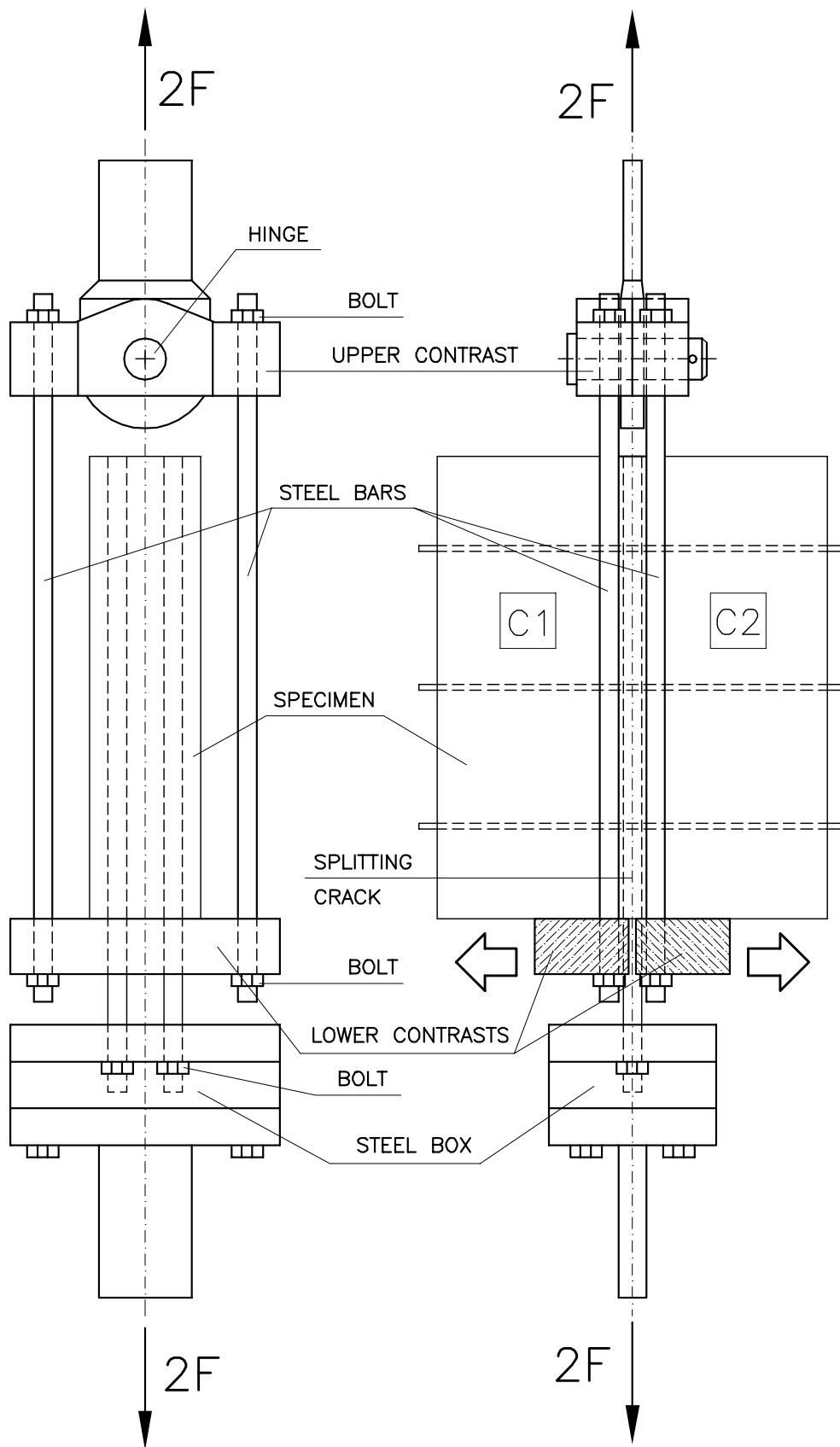


Figure 2.4: Vista d'insieme del banco di prova.

caricato della barra. La velocità di spostamento imposta alla macchina di prova è pari a 0.002 mm/min fino al raggiungimento del carico di picco, oltre il quale la velocità di slittamento viene aumentata gradualmente. In realtà la velocità di spostamento effettiva sull'armatura risulta ben inferiore a quella imposta dalla macchina di prova a causa dei giochi presenti nelle unioni bullonate e della deformabilità del banco. La velocità di spostamento imposta consente di 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 la metà della distanza fra le nervature.



# 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>.

La granulometria degli aggregati è riportata nella Tabella 3.1.

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.

Lo “slump” del calcestruzzo è risultato variabile tra i 100 ed i 140 mm.

La scasseratura è stata eseguita 72 ore dopo il 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, durante le quali i provini hanno proseguito la maturazione in laboratorio, con temperatura di 15-25°C ed 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  $E_{cs,28}$  (secondo UNI-6556), della resistenza a compressione  $f_{c,28}$  (UNI-6132) e della resistenza a trazione diretta  $f_{ct,28}$  (UNI-6135; Tab. 3.2). I provini cubici sono stati impiegati per la determinazione della resistenza a compressione  $f_{c,cube}$  al momento della prova (determinata su due cubetti per ogni provino); i risultati ottenuti sono raccolti in Tabella 4.1.

Table 3.1: Composizione degli aggregati impiegati per il confezionamento del calcestruzzo.

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

## 3.2 Acciaio

L'acciaio delle barre utilizzate nelle prove è di tipo *Tempcore*<sup>©</sup> Fe B 44 K ad aderenza migliorata.

Le barre utilizzate nelle prove sono tutte di acciaio saldabile, tranne le barre con diametro di 5 mm che sono di acciaio trafilato a freddo.

L'applicazione degli strain gauges alle armature principali ha richiesto la tornitura delle stesse per la realizzazione di una superficie liscia; questa lavorazione ha provocato la riduzione della sezione resistente della barra. Nelle barre *Tempcore*<sup>©</sup>, caratterizzate da una superficie esterna più resistente del nucleo interno, la rimozione di superficie resistente esterna per le barre provoca una notevole riduzione di resistenza. Questo aspetto può risultare poco significativo negli ancoraggi corti a causa dei modesti valori delle forze di estrazione, ma diventa importante negli ancoraggi lunghi dove le forze di estrazione in gioco spesso provocano lo snervamento della barra, come si è verificato nelle prime prove della presente sperimentazione. Per evitare il problema, la Ferriera Valsabbia ha effettuato un particolare trattamento termico sulle barre che ha innalzato la tensione di snervamento a circa 1200 MPa, senza influenzare le altre caratteristiche (meccaniche e geometriche) dell'armatura.

Nella Tabella 3.2 sono riportati i valori dei parametri geometrici e meccanici delle barre impiegate, descritti anche in Fig. 3.1

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

Specimen	$f_{c,28}$ [MPa]	$f_{ct,28}$ [MPa]	$E_{c,28}$ [MPa]
45S6P1	41.50	2.60	31100
45S6P2			
45S5P1	24.25	2.80	27263
45S8P1			
45S8P2	33.95	2.50	29938
45S6P3			
45S6P4			
45S8P3			
45S8P4			
45S10P4	24.90	2.84	29455
45NSP1			
45NSP2	31.49	2.45	28845
45S5P3			
45S5P4			

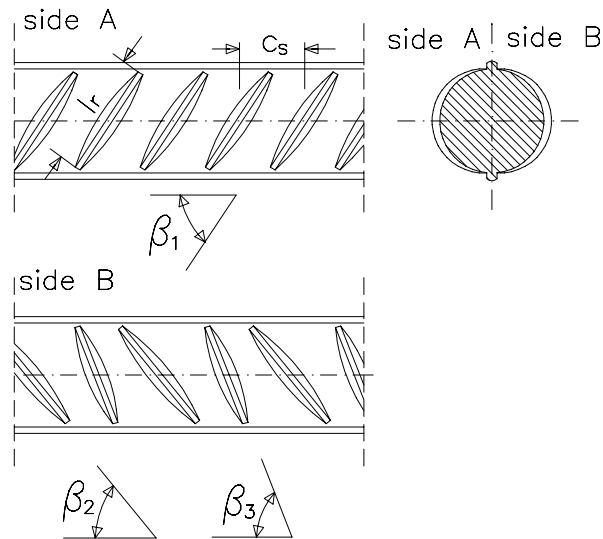


Figure 3.1: Particolare delle barre d'armatura con indicate alcune caratteristiche geometriche.



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

Diametro nominale $\phi$ [mm]	5*	6	8	10	20	20 h.t.
Diametro del nocciolo $D$ [mm]	4.87	5.47	7.33	9.18	19.0	19.0
Altezza media $a_{m,1}$ [mm]	0.27	0.366	0.468	0.505	0.939	1.101
delle nervature $a_{m,2}$ [mm]		0.376	0.424	0.495	0.996	1.098
$a_{m,3}$ [mm]		0.357	0.447	0.548	0.999	1.098
Inclinazione $\beta_1$	60°	51°	53°	56°	59°	59°
delle nervature $\beta_2$		45°	43°	48°	67°	53°
$\beta_3$		63°	63°	67°	52°	69°
Interasse $c_{s,1}$ [mm]	3.5	5.4	6.2	6.55	12	11.6
delle nervature $c_{s,2}$ [mm]		5.3	6.1	6.65	12.5	11.7
$c_{s,3}$ [mm]		5.3	6.1	6.75	13	11.7
Lunghezza $l_{r,1}$ [mm]	4.55	11	15	16	35	32.5
delle nervature $l_{r,2}$ [mm]		12	17	18	33	36
$l_{r,3}$ [mm]		9	13	16	39	30
Indice di aderenza $f_R$	0.058	0.0615	0.069	0.067	0.0747	0.0733
Tensione di snervamento $f_{sy}$ [MPa]	647	535	607	564	536.5	/
Tensione di rottura $f_{st}$ [MPa]	682	595	677	664	621.5	1265

\* = acciaio trafilato a freddo - h.t. = barre trattate termicamente.

# Chapter 4

## Risultati sperimentali

### 4.1 Presentazione dei risultati sperimentali

I risultati sperimentali riguardano la forza di estrazione applicata alla barra ancorata, il suo slittamento di “testa” e di “coda”, l’apertura e la propagazione della fessura da spacco. In tutti i provini, grazie anche alla presenza degli angolari di acciaio che ne hanno favorito l’innesco, la fessura principale da spacco si è formata lungo il piano di simmetria AA del provino (Figg. 2.2, 4.2). In altri provini si sono formate anche altre fessura da spacco, sempre in piani longitudinali, solitamente dopo il raggiungimento del carico di picco. La fessura principale da spacco ha permesso all’armatura trasversale di lavorare in modo ottimale poichè agisce perpendicolarmente alla fessura.

La Fig. 4.1 mostra i risultati tipici delle prove sperimentali, ottenuti dal provino 45S5P4 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 delle tre armature trasversali ( $w_{s1}$ ,  $w_{s2}$  e  $w_{s3}$ ), la tensione nelle staffe ( $\sigma_{st1}$ ,  $\sigma_{st2}$  e  $\sigma_{st3}$ ) 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 sia limitatamente al tratto iniziale (fino al carico di picco), per entrambe le armature ancorate. Le curve relative alla tensione nell’armatura trasversale sono state interrotte in corrispondenza del valore di snervamento dell’acciaio, riportato in Tab. 3.2. Si possono notare i due cicli di scarico e ricarica, applicati al provino quando la tensione nell’armatura ancorata era pari a circa 150 e 240 MPa rispettivamente. Nella stessa figura si può notare che la relazione tra lo scorrimento all’estremo libero e lo scorrimento all’estremo caricato della barra tendono, alla fine della prova, ad una linea inclinata di circa  $45^\circ$ , indicando il quasi libero scorrimento della barra.

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

Solo uno dei quattro provini preparati con staffe con diametro di 10 mm ha fornito

CHAPTER 4. RISULTATI SPERIMENTALI  
45S5P4

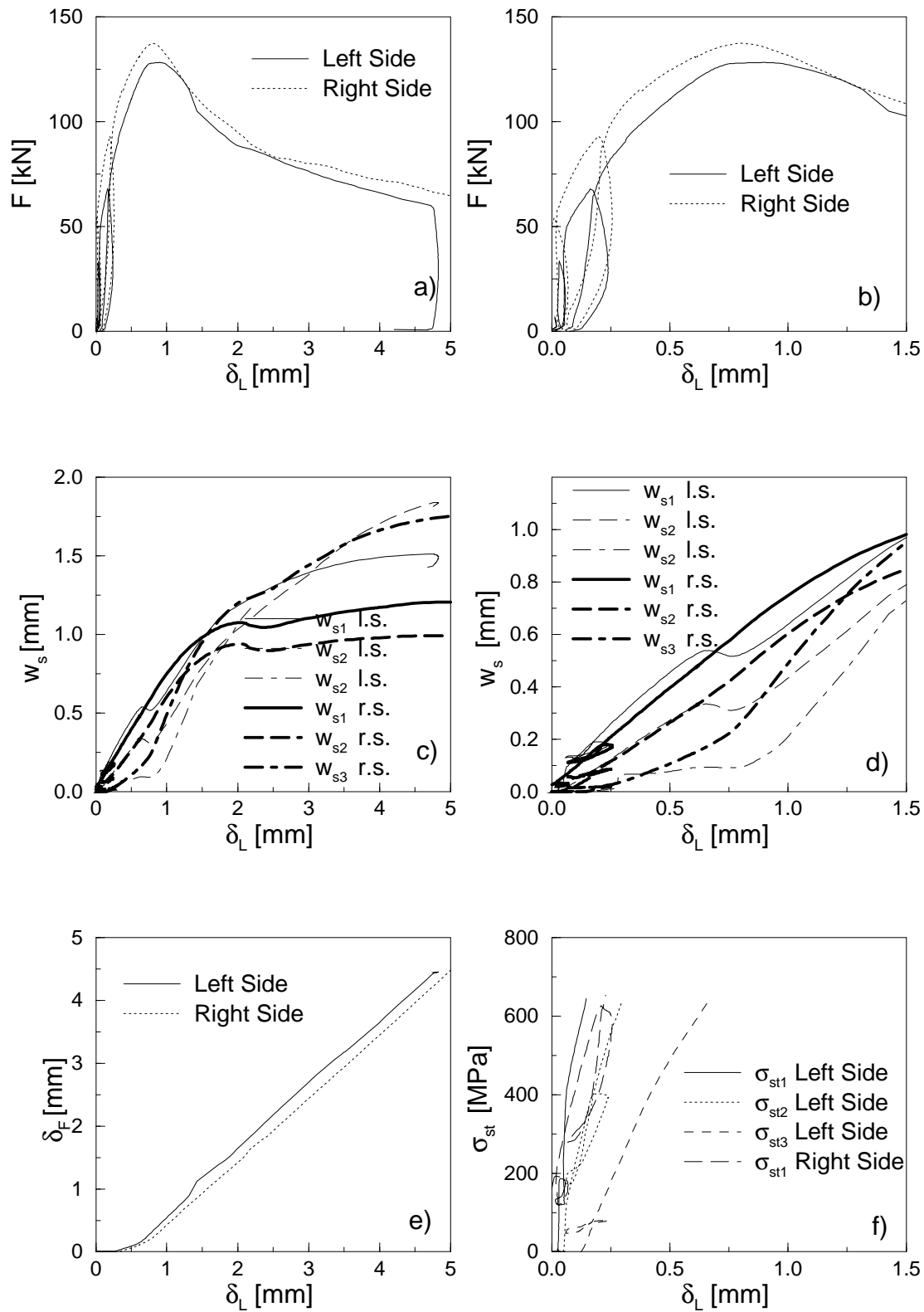


Figure 4.1: Tipici risultati sperimentali ottenuti dal provino 45S5P4.

Figure 4.2: Tipica fessura da spacco, rilevata a fine prova dal provino 45S6P4.

Table 4.1: Valori del carico massimo, dello scorrimento all'estremo caricato della barra, dello sforzo nominale massimo e dello sforzo di aderenza medio in corrispondenza del carico di picco.

Provino		Maturaz. [giorni]	$F_{max}$ [kN]	$\delta_{L,max}$ [mm]	$\sigma_{p,max}$ [MPa]	$\tau_{max}$ [MPa]	$f_{c,cube}$ [MPa]
45NSP1	lato destro	29	53.84	0.121	171.4	1.90	28.2
	lato sinistro		43.21	0.179	137.5	1.52	
45NSP2	lato destro	38	46.15	0.243	146.9	1.63	30.6
	lato sinistro		53.75	0.146	171.0	1.90	
45S5P1	lato destro	32	118.92	1.089	378.5	4.20	31.8
	lato sinistro		141.83	2.130	451.4	5.01	
45S5P3	lato destro	48	132.95*	1.128*	423.2	4.70	31.4
	lato sinistro		118.50*	0.722*	377.1	4.19	
45S5P4	lato destro	62	137.51	0.790	437.7	4.86	33.0
	lato sinistro		128.38	0.898	408.6	4.54	
45S6P1	lato destro	22	139.70	1.125	444.6	4.94	29.7
	lato sinistro		139.70	0.963	444.6	4.94	
45S6P2	lato destro	82	118.53*	0.427*	377.3	4.19	36.6
	lato sinistro		122.20*	0.430*	389.0	4.32	
45S6P3	lato destro	27	138.62	1.062	441.2	4.90	29.5
	lato sinistro		119.29	0.812	379.7	4.21	
45S6P4	lato destro	47	125.44	0.848	399.3	4.43	30.3
	lato sinistro		139.38	0.882	443.6	4.92	
45S8P1	lato destro	65	154.95*	1.026*	493.2	5.48	32.8
	lato sinistro		136.37*	0.712*	434.0	4.82	
45S8P2	lato destro	60	144.79*	0.669*	460.9	5.12	32.2
	lato sinistro		121.67*	0.684*	387.3	4.30	
45S8P3	lato destro	40	205.77	1.238	655.0	7.27	28.2
	lato sinistro		184.82	1.095	588.3	6.53	
45S8P4	lato destro	50	~199.35	~1.101	~634.55	~7.05	33.1
	lato sinistro		~193.66	~1.180	~616.43	~6.84	
45S10P4	lato destro	93	261.54	1.500	832.5	9.25	29.1
	lato sinistro		183.33	1.187	583.6	6.48	

\* = snervamento delle sezioni con applicati gli strain gauges.

risultati significativi; gli altri tre provini non hanno fornito risultati attendibili a causa di inaspettate rotazioni che si sono verificate nel provino durante la prova.

È stato evidenziato in precedenza che le armature principali impiegate hanno subito un trattamento termico per innalzare la tensione di snervamento; ciò ha consentito di raggiungere nella barra, nonostante la sezione indebolita per l'applicazione degli strain gauges, una tensione massima ( $\sigma_{p,max}$ ) di 550-600 MPa, corrispondente ai valori delle tensioni di snervamento dell'acciaio frequentemente utilizzato in Europa (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 al momento della prova, mentre lo scorrimento di testa è rapportato al diametro della barra principale ( $\phi_p$ ). La tensione di aderenza massima ( $\tau_{max}$ ), supposta uniformemente distribuita lungo l'intero ancoraggio di lunghezza  $\Delta z$  ( $=150\text{mm}$ ), è stata così ricavata:

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

Si noti come le curve relative ai provini 45NSP1 e 45NSP2, senza armature trasversali, siano meno rigida ed evidenzino un carico massimo inferiore a quello degli altri provini a causa de “collasso per splitting” dell'ancoraggio (Fig. 1.3a), di tipo fragile, quando la fessura da spacco ha raggiunto l'estremo non caricato della barra. Le curve relative a questi provini si interrompono in corrispondenza del carico di picco in quanto il banco di prova non era sufficientemente rigido per rilevare la fase discendente, molto ripida, che si verifica dopo il collasso del provino. In questi provini i denti di calcestruzzo compresi tra le nervature, dopo il collasso dell'ancoraggio erano ancora praticamente intatti, mentre in tutti gli altri provini erano tanto più danneggiati quanto maggiore era il quantitativo di armatura trasversale presente lungo la barra [24].

La linea di maggior spessore rappresenta l'andamento medio delle curve sperimentali ottenute dai provini con la stessa armatura trasversale. Tutte le curve medie sono confrontate nella Fig. 4.3f; Si può inoltre osservare che, all'aumentare del diametro delle staffe, la rigidezza e la resistenza dell'aderenza aumenta, evidenziando l'importanza dell'armatura trasversale.

La relazione tra la resistenza dell'aderenza e la percentuale di armatura trasversale verrà ripresa e discussa dettagliatamente nel Paragrafo 4.5.

## 4.3 Apertura e propagazione della fessura da spacco

La Fig. 4.4 mostra l'apertura della fessura da spacco in corrispondenza dell'armatura trasversale più vicina all'estremo caricato in funzione dello scorrimento di testa della barra ancorata; tutte le curve sono mostrate fino al carico di picco. Si può notare che

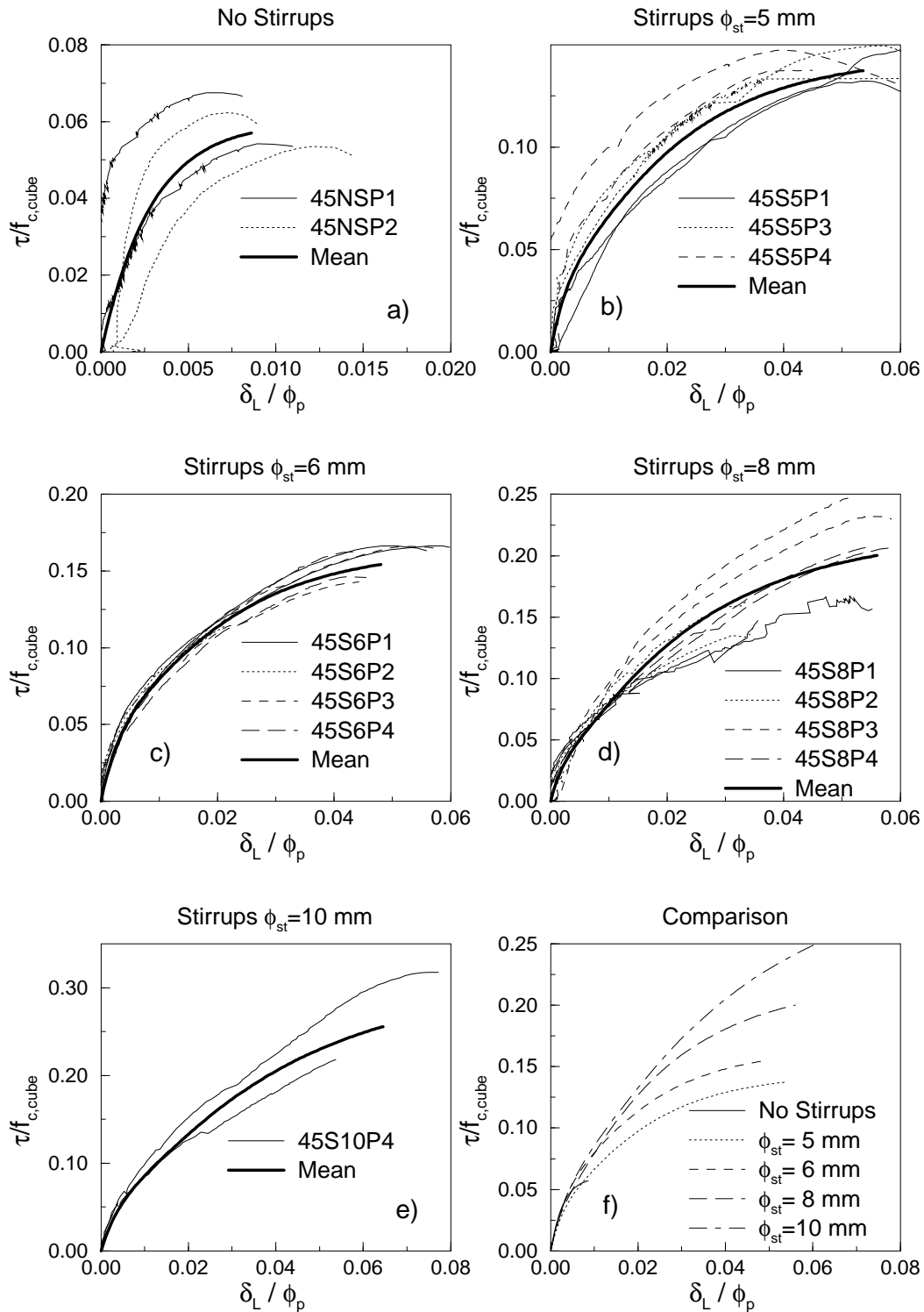


Figure 4.3: Andamento dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento dell'estremo caricato della barra fino al carico di picco.

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 con staffe di piccolo diametro in quanto l'azione di contenimento del calcestruzzo è più rilevante. Le curve medie relative ai provini con staffe aventi diametro di 8 e 10 mm sono molto vicine tra di loro (Fig. 4.4f), evidenziando che, oltre una certa percentuale, l'armatura trasversale non influenza l'apertura della fessura da spacco; comunque, il limitato numero di risultati sperimentali ottenuti dai provini con staffe  $\phi_{st}=10$  mm rende questo confronto meno significativo.

Queste curve sperimentali forniscono una indicazione sul legame esistente tra la massima apertura della fessura da spacco e la fessura flessionale che è proporzionale allo scorrimento della barra [6]. Prendendo in considerazione, per esempio, i provini con  $\phi_{st} = 5$  mm ( $\Omega \approx 0.0065$ ), si può osservare che  $w_{s1} \approx 0.2$  mm per  $\delta_L=0.3$  mm, cioè l'apertura della fessura da spacco è sulle staffe circa i due terzi dello scorrimento della barra. Si può infine osservare che, con un passo delle staffe ( $\Delta z$ ) di 150 mm, l'apertura della fessura da spacco raggiunge la prima armatura trasversale quando lo slittamento all'estremo caricato della barra è pari a circa 0.05 mm. Tale valore sembra costante per tutti i provini con diverso diametro dell'armatura trasversale, in quanto tale armatura si attiva solo dopo che la fessura da spacco si è formata; esso dipende quindi solamente dalla distanza  $\Delta z$ .

La Figura 4.5 mostra ancora l'apertura della fessura da spacco  $w_{s1}$ , questa volta in funzione dello sforzo nell'armatura principale. Si può notare che l'apertura della fessura da spacco assume dimensioni significative già in condizioni di esercizio. Per esempio, facendo riferimento ancora ai provini con  $\phi_{st}=5$  mm, in corrispondenza di una tensione nell'armatura ancorata pari a 260 MPa, l'apertura della fessura da spacco è risultata pari a circa 0.2 mm; tale valore, già particolarmente impegnativo per le fessure trasversali [20], mette ancora più a rischio la durabilità della struttura nel caso di fessure longitudinali che espongono un lungo tratto di barra agli agenti aggressivi [6] (Fig. 2.1).

La lunghezza  $Y$  della fessura principale da spacco, misurata a partire dall'estremo caricato della barra ancorata è plottata in funzione dello sforzo di aderenza medio nella Figura 4.6; in tale figura  $Y$  è in realtà rapportata alla lunghezza di ancoraggio ( $l_b=450$  mm), e quindi varia tra zero (fessura da spacco assente) e uno (fessura da spacco completamente propagata), mentre lo sforzo di aderenza ( $\tau$ ) è rapportato alla resistenza cubica del calcestruzzo al momento della prova ( $f_{c,cube}$ ). Dai diagrammi sperimentali si può notare che la lunghezza della fessura da spacco sembra aumentare quasi linearmente con lo sforzo di aderenza, e che la velocità di propagazione aumenta al diminuire del diametro delle staffe. Inoltre, in tutti i provini con armatura trasversale, la massima forza di estrazione si verifica quando la fessura da spacco è completamente propagata lungo l'ancoraggio; questo evidenzia gli effetti favorevoli dell'azione di contenimento delle staffe. Alcuni precedenti risultati ottenuti dagli stessi autori avevano mostrato un andamento bilineare delle curve  $Y-\tau$  [19].



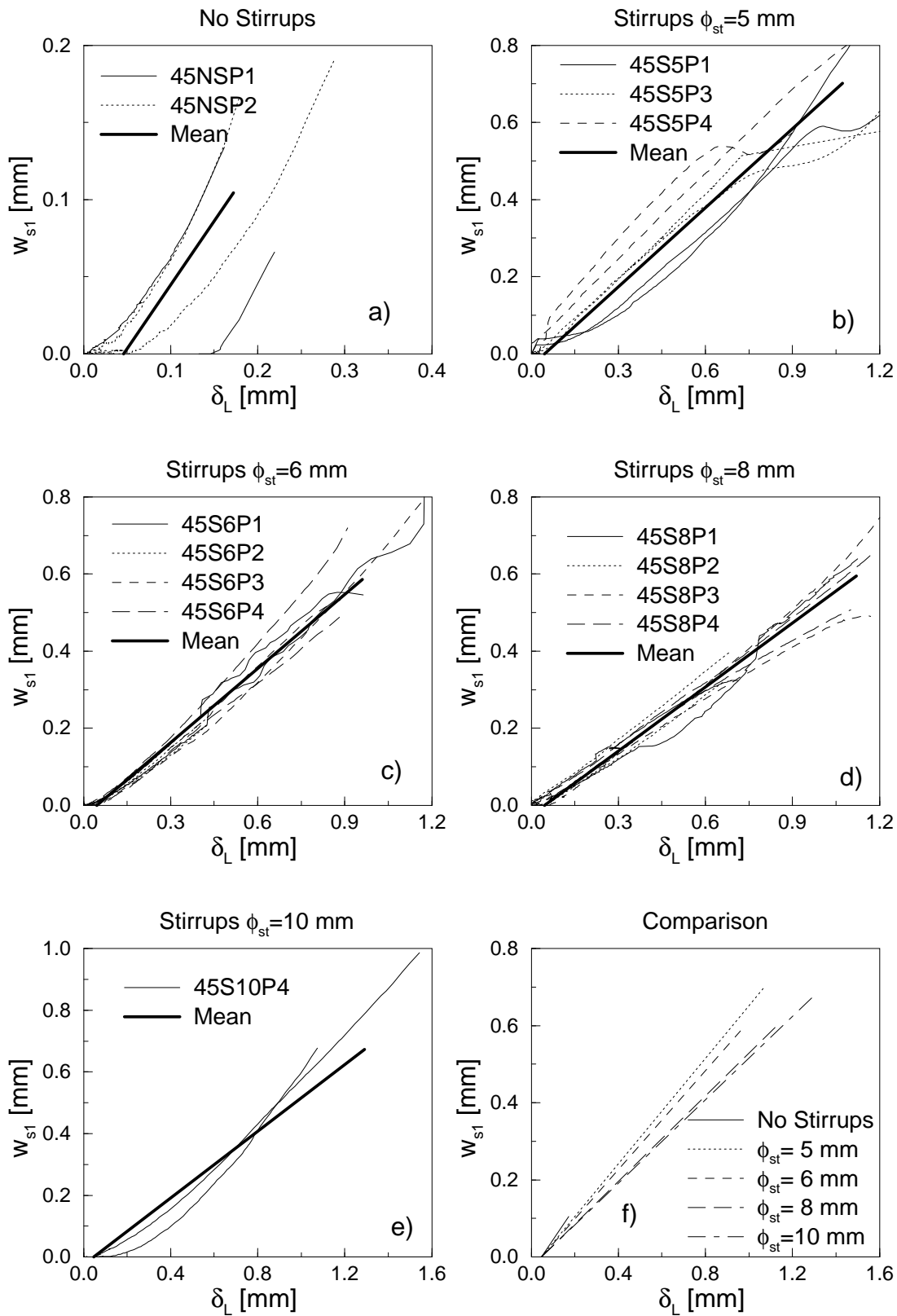


Figure 4.4: Diagrammi dell'apertura della fessura da spacco sulla prima staffa in funzione dello scorrimento dell'estremo caricato della barra fino al carico di picco.

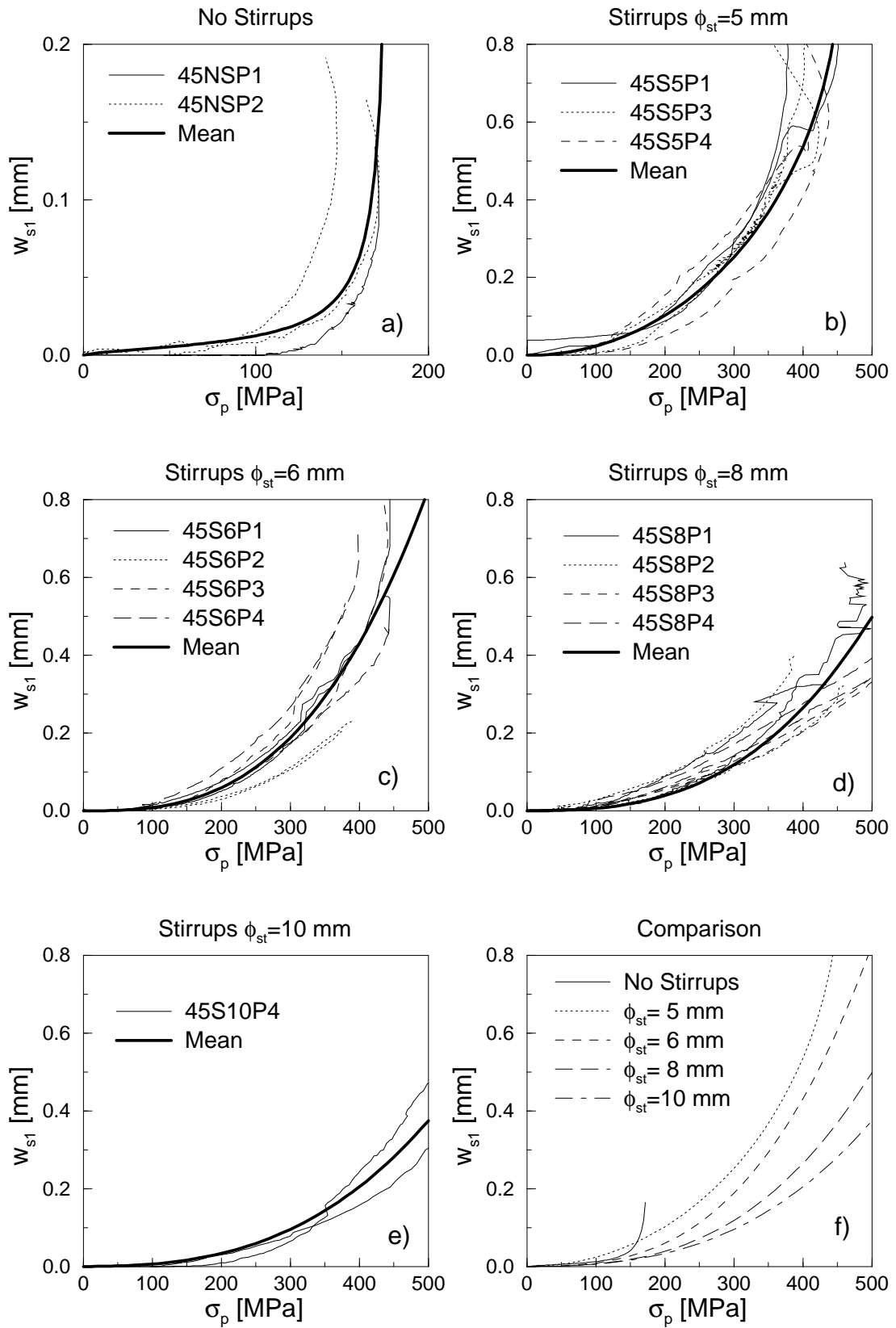


Figure 4.5: Andamento dell'apertura della fessura da spacco in funzione della tensione nella barra ancorata.

## 4.4 Tensioni nell'armatura trasversale

La Fig. 4.7 mostra il legame tra la tensione nelle staffe più vicine all'estremo caricato della barra ( $\sigma_{st1}$ ), determinata sulla base della loro area effettiva (Tab. 2.1), e lo scorrimento di testa ( $\delta_L$ ) della barra; le curve sono riportate fino al carico di picco e sono state interrotte in corrispondenza della tensione di snervamento delle staffe (Tab. 3.2). 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. Tra questi non è disponibile alcun risultato dai provini con staffe aventi diametro di 10 mm. Queste curve mostrano una notevole dispersione dei risultati, causata anche dal fatto che, a causa della sua naturale irregolarità, non sempre la fessura da spacco ha attraversato l'armatura trasversale in corrispondenza dell'estensimetro (Fig. 4.2); cioè i valori sperimentali ottenuti non rappresentano la massima tensione effettivamente presente nelle staffe che si verifica nella sezione di barra attraversata dalla fessura da spacco.

I risultati ottenuti mostrano che, al diminuire del diametro, le armature trasversali raggiungono più velocemente lo snervamento e che le staffe di piccolo diametro ( $\phi_{st}=5-6$  mm) si sono snervate prima del raggiungimento del massimo valore dello sforzo di aderenza. I quadrati riportati sulle curve corrispondono al raggiungimento, nella barra ancorata, della tensione caratteristica dell'aderenza prevista dall'Eurocodice 2 [20] ( $f_{bk,EC2}$ ) e valutata in base alla resistenza a compressione del calcestruzzo al momento della prova. I quadrati neri indicano che le staffe si sono snervate prima che lo sforzo di aderenza raggiungesse il valore  $f_{bk,EC2}$ ; si può notare che ciò si è sempre verificato, con l'eccezione di due provini con staffe aventi diametro di 8 mm, dove lo sforzo nelle staffe ha comunque superato i 400 MPa. Tale aspetto diventa ancora più significativo se si tiene conto che l'armatura trasversale presente era sempre maggiore del minimo richiesto dall'Eurocodice2 che, per una trave con due barre ancorate aventi diametro di 20 mm ed una lunghezza di ancoraggio di 450 mm, richiede un quantitativo di armatura trasversale corrispondente a  $\Omega_{min,EC2} \approx 0.0044$ . Inoltre, come precedentemente sottolineato, le curve sperimentali non sempre rappresentano la massima tensione effettivamente presente nelle staffe. Infine si deve osservare 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 negli ancoraggi, in quanto potrebbe verificarsi 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. A tal proposito si deve notare che nei provini con staffe di 5 mm, queste si sono snervate quando lo scorrimento all'estremo caricato della barra era pari a 0.3 mm, e con una tensione nell'armatura principale di circa 260 MPa, tipica delle condizioni di esercizio.

## 4.5 Resistenza dell'aderenza

La Figura 4.8a mostra la relazione tra lo sforzo massimo di aderenza ( $\tau_{max}$ ) rapportato alla resistenza cubica a compressione del calcestruzzo ( $f_{c,cube}$ ) al momento della prova (Tab. 4.1), e l'indice di contenimento delle staffe ( $\Omega$ ; Eq. 2.1). Nei provini senza armatura trasversale ( $\Omega = 0$ ), l'azione di contenimento è dovuta al solo calcestruzzo di ricoprimento. Nella stessa figura sono plottati i risultati ottenuti dagli autori in un precedente programma sperimentale eseguendo prove di estrazione su ancoraggi più corti ( $l_b=180$  mm), dotati sempre di tre armature trasversali di contenimento (Serie 1 [19]). Si può notare che la resistenza dell'aderenza aumenta con l'indice di contenimento delle staffe e tende ad una soglia superiore che viene raggiunta quando lo sforzo di aderenza è pari a  $\Omega \approx 0.03 - 0.04$ ; oltre tale valore l'incremento della resistenza dell'aderenza non è più significativo [22, 25]. In realtà i provini dei due programmi sperimentali erano caratterizzati da un diverso valore dell'indice di contenimento del calcestruzzo  $B$  (Eq. 2.2); essendo i valori di tale indice comunque piccoli e trattandosi di calcestruzzo di normale resistenza, il diverso valore di  $B$  non dovrebbe influenzare la resistenza dell'aderenza [19, 26] e quindi i risultati dovrebbero essere confrontabili.

L'incremento della resistenza di ancoraggi con armatura trasversale di contenimento è stato osservato da Morita e Fujii [22], da Kaku e collaboratori [27, 28] e da Maeda e collaboratori [26] eseguendo prove sperimentali su ancoraggi di barre con diametro di 19 mm in travi di calcestruzzo ordinario. Le travi sperimentali utilizzate da questi ricercatori avevano a volte un numero di barre ancorate superiore al numero di bracci delle staffe; come conseguenza, a differenza dei provini utilizzati nella presente sperimentazione, non tutte le barre ancorate avevano vicino una armatura trasversale. La Figura 4.8b mostra alcuni di questi risultati facendo riferimento ai valori medi ottenuti dalle armature posizionate in prossimità delle armature trasversali e dalle altre armature ancorate; queste ultime sono caratterizzate da una minore resistenza dell'aderenza a causa della maggior apertura della fessura da spacco che si verifica localmente per la mancanza di armatura trasversale [22, 18]. Le diverse condizioni di vincolo potrebbero spiegare i valori minori della resistenza dell'aderenza mostrati in Fig. 4.8b rispetto a quelli mostrati in Fig. 4.8a dove, come già sottolineato, le due armature ancorate erano poste entrambe in prossimità di una armatura trasversale (Fig. 2.2). La minor efficienza degli ancoraggi di barre "interne", cioè lontane dalle armature trasversali, era già stato osservato da Warren [29], eseguendo prove su elementi contenenti barre ancorate in numero variabile da due a sette sempre con staffe a due bracci [30]. Questi risultati sottolineano ulteriormente la necessità di posizionare correttamente l'armatura trasversale per aumentare la resistenza degli ancoraggi, magari usando staffe a più bracci in modo da limitare l'apertura della fessura da spacco lungo tutta la larghezza della trave [18]. Si deve notare infine che i risultati sperimentali mostrati in Fig. 4.8 non evidenziano alcuna soglia superiore di resistenza, probabilmente perchè tutti i provini erano caratterizzati da valori non elevati dell'indice di contenimento delle staffe ( $\Omega \leq 0.035$ ).

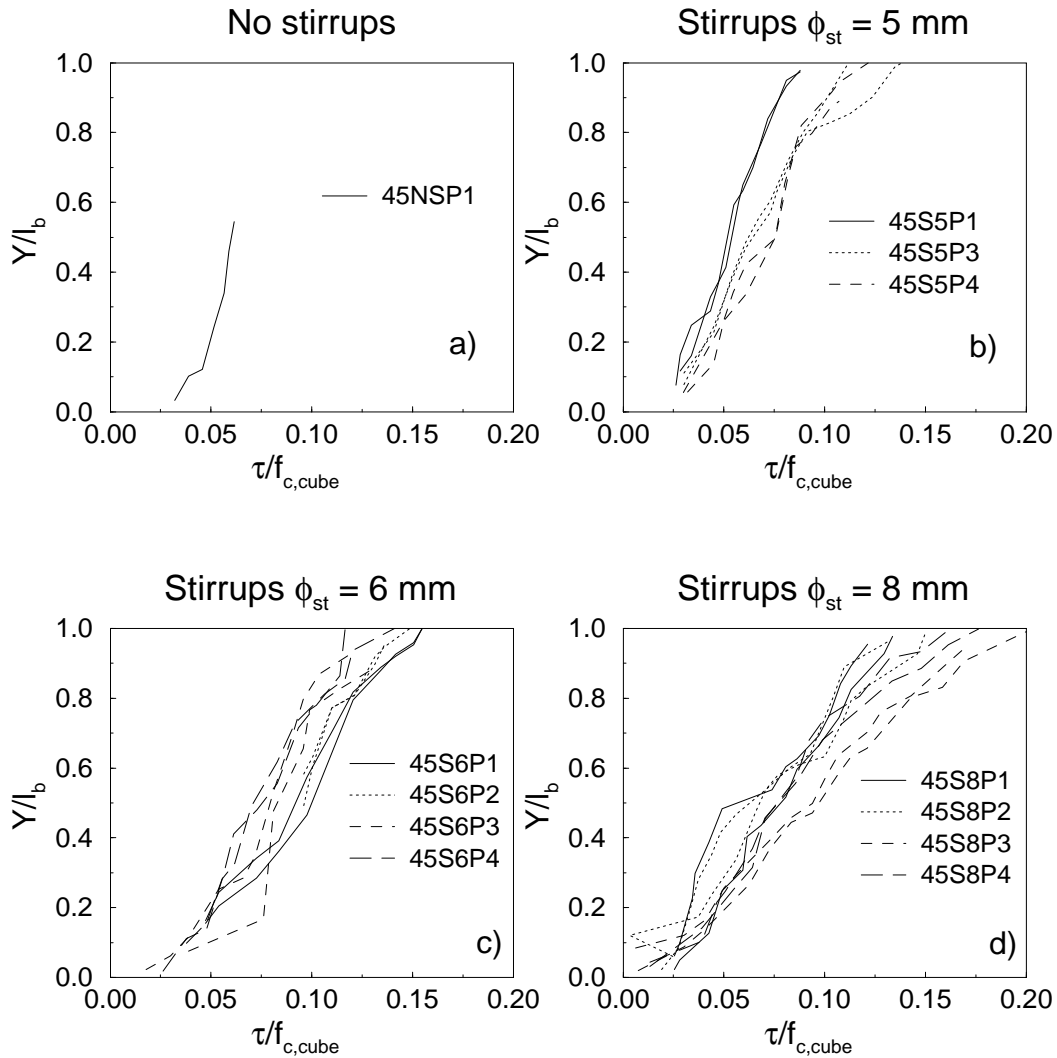


Figure 4.6: Diagramma della lunghezza della fessura da spacco in funzione dello sforzo di aderenza medio applicato alla barra.

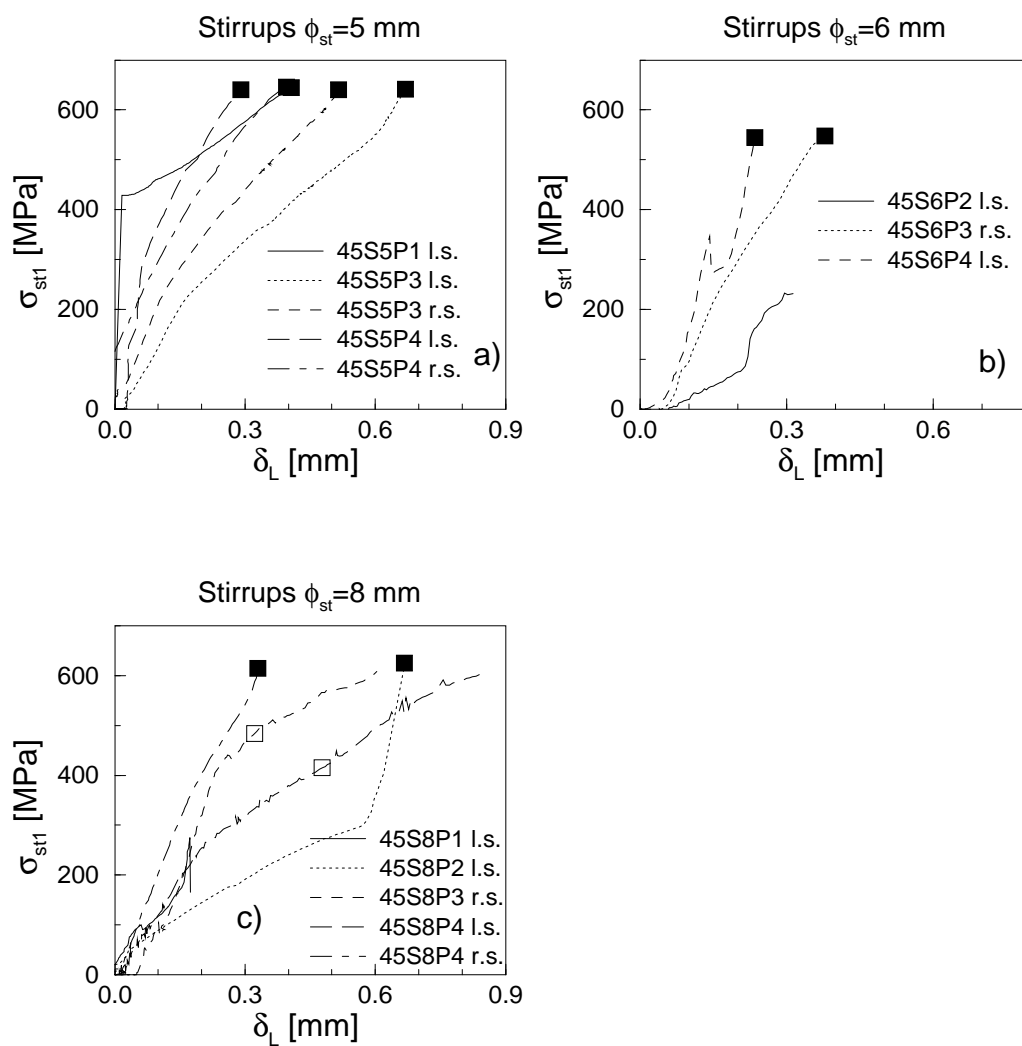


Figure 4.7: Andamento degli sforzi nella prima armatura trasversale in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra fino al carico di picco.

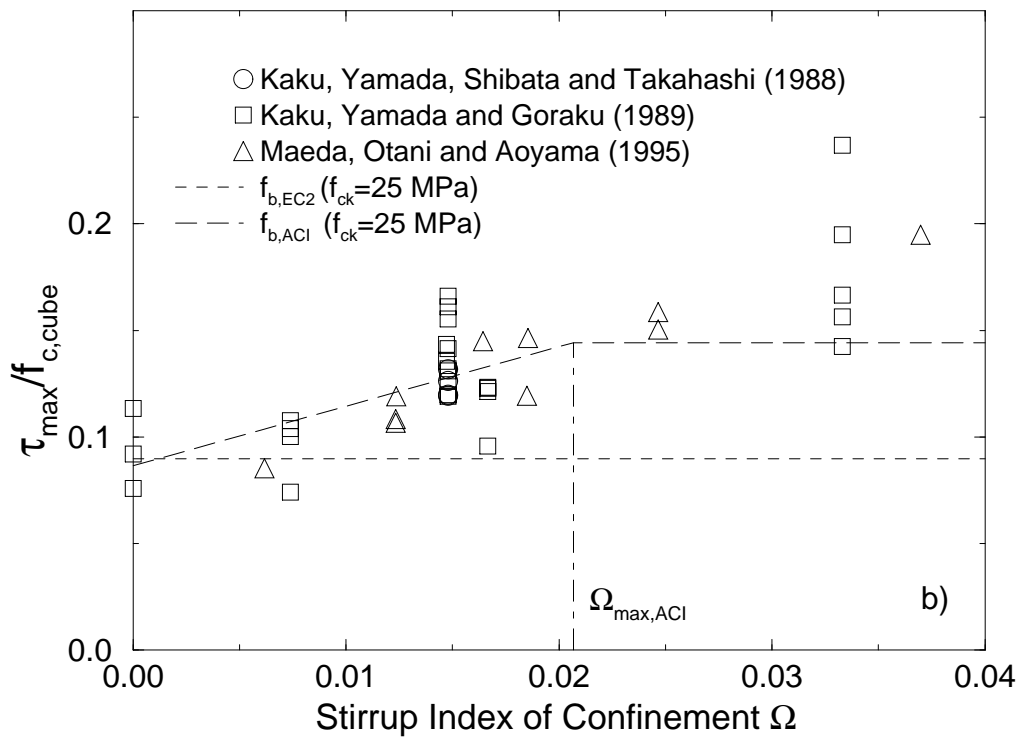
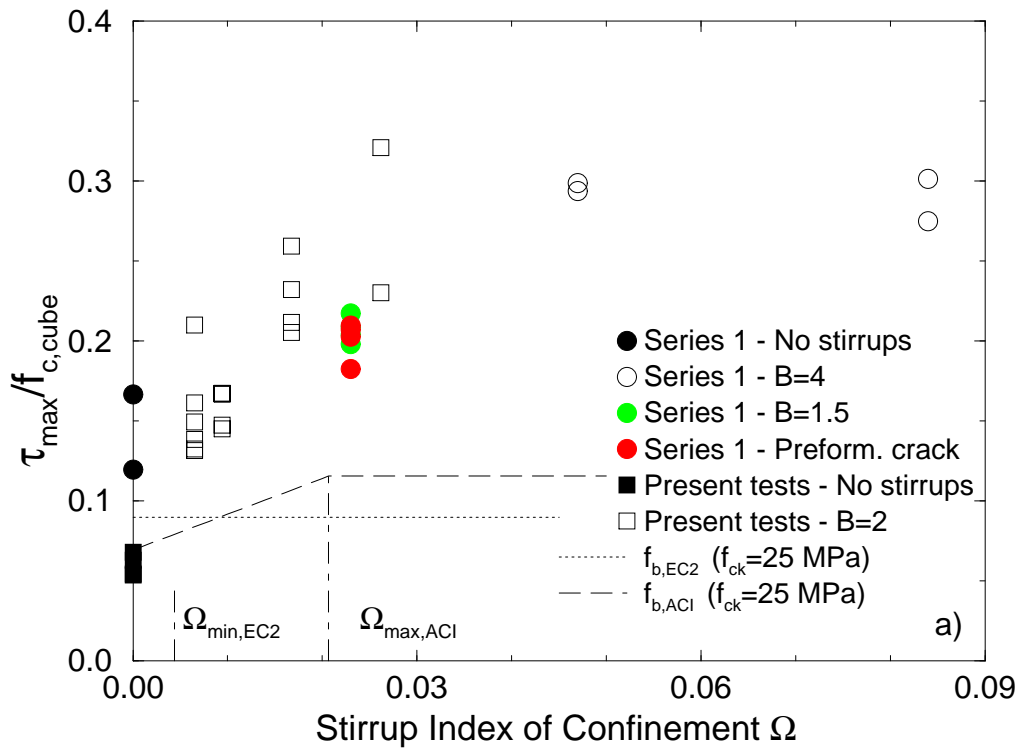


Figure 4.8: Diagramma dello sforzo di aderenza massimo in funzione dell'indice di contenimento delle staffe.

# Chapter 5

## Confronti con le normative

In questo capitolo le prescrizioni dell'Eurocodice 2 [20] e dalla normativa americana ACI 318-95 [21] relative agli ancoraggi sono confrontate con i risultati sperimentali. Le prescrizioni di queste normative riguardano solamente la resistenza dell'ancoraggio e non considerano i problemi di durabilità legati alla formazione ed alla propagazione della fessura da spacco [6].

L'Eurocodice 2 prescrive di calcolare la lunghezza di ancoraggio ipotizzando una distribuzione uniforme degli sforzi di aderenza che non possono superare il valore di progetto ( $f_{b,EC2}$ ) dato da:

$$f_{b,EC2} = \frac{f_{bk,EC2}}{\gamma_c} = \frac{0.4275 f_{ck}^{2/3}}{\gamma_c} \quad (5.1)$$

dove  $\gamma_c$  ( $=1.5$ ) è il coefficiente parziale di sicurezza per il materiale calcestruzzo ( $f_{b,EC2}$ ,  $f_{bk,EC2}$  e  $f_{ck}$  sono espressi in MPa). Si può subito notare che  $f_{b,EC2}$  è indipendente dal quantitativo di armatura trasversale presente lungo la barra; infatti l'Eurocodice 2 richiede solamente la presenza un quantitativo minimo di armatura trasversale che, nel caso di ancoraggi simili a quelli provati sperimentalmente (Figg. 2.1 e 2.2), corrisponde ad un valore di  $\Omega_{min,EC2} \approx 0.0044$ .

La normativa americana ACI 318-95 prescrive una lunghezza di ancoraggio minima che, per una barra in condizioni di buon ancoraggio in calcestruzzo ordinario, è data da:

$$\frac{l_b}{\phi_p} = \frac{3}{40} \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \frac{\gamma}{\left(\frac{c}{\phi_p} + \frac{K_{tr}}{\phi_p}\right)} \quad (5.2)$$

dove  $\gamma = 0.8$  per barre fino al N. 6 ( $\phi_p \leq 19$  mm) e  $\gamma = 1.0$  per tutte le altre barre di maggior diametro,  $f_y$  è la tensione di snervamento caratteristica dell'armatura ancorata,  $f'_c$  è la resistenza cilindrica caratteristica a compressione del calcestruzzo,  $c$  è il più piccolo tra gli interassi tra le armature ancorate e la distanza tra il baricentro della barra e la superficie esterna di calcestruzzo.  $K_{tr}$  è l'indice dell'armatura trasversale ed è definito come:

$$\frac{K_{tr}}{\phi_p} = \frac{n_{st} A_{st} f_{yt}}{1500 \phi_p \Delta z n_p} \quad (5.3)$$



dove  $f_{yt}$  è la tensione di snervamento caratteristica dell'armatura trasversale. Il termine al denominatore dell'Eq. 5.2, che tiene in considerazione l'azione di contenimento dell'armatura trasversale e del calcestruzzo di ricoprimento, deve soddisfare la limitazione

$$\left(\frac{c}{\phi_p} + \frac{K_{tr}}{\phi_p}\right) \leq 2.5 \quad (5.4)$$

Le Equazioni 5.2 e 5.3 sono valide quando gli sforzi sono espressi in psi.  $K_{tr}$  è un coefficiente molto simile all'indice di contenimento delle staffe  $\Omega$  (Eq. 2.1); infatti, esso può essere scritto come:

$$\frac{K_{tr}}{\phi_p} = \Omega \frac{f_{yt}}{1500} \quad (5.5)$$

Assumendo anche in questo caso una distribuzione di sforzi di aderenza uniforme lungo l'ancoraggio ed esprimendo gli sforzi in MPa, si può determinare la resistenza  $f_{b,ACI}$  dell'aderenza prevista dalla normativa ACI 318-95:

$$f_{b,ACI} = \frac{f_y \phi_p}{4l_b} = \frac{0.277 \sqrt{f'_c}}{\gamma} \left(\frac{c}{\phi_p} + 0.0967 \Omega f_{yt}\right) \quad (5.6)$$

e la limitazione data dall'Eq. 5.4 può essere scritta come:

$$\Omega \leq \Omega_{max,ACI} = \left(2.5 - \frac{c}{\phi_p}\right) \frac{10.34}{f_{yt}} \quad (5.7)$$

Si può notare che la resistenza dell'aderenza prevista dalla ACI 318-95 dipende linearmente sia dal copriferro (o dall'interferro, entrambi proporzionali all'indice di contenimento del calcestruzzo  $B$ ) [30, 31] che dall'indice di contenimento delle staffe, fino al raggiungimento di un valore limite  $\Omega_{max,ACI}$  oltre il quale deve essere adottata una resistenza dell'aderenza costante.

La dipendenza lineare della resistenza dell'aderenza dal copriferro era già stata osservata sperimentalmente da Darwin e collaboratori [31], mentre la dipendenza lineare della resistenza dell'aderenza dalla percentuale di armatura trasversale era invece stata osservata da Orangun e collaboratori [30], che proposero di assumere una relazione bilineare per tenere conto della soglia superiore nella resistenza dell'aderenza, da Morita e Fujii [22] ed ancora da Darwin e collaboratori [32]. La relazione lineare tra la resistenza dell'ancoraggio e l'azione di contenimento trasversale era stata osservata anche da Gambarova e Rosati [33] e da Modena e collaboratori che effettuarono prove di estrazione su ancoraggi [34] in presenza di una pressione trasversale esterna, mantenuta costante durante la prova.

La resistenza dell'aderenza prescritta dall'Eurocodice 2 e dalla ACI 318-95 sono rappresentate in funzione di  $\Omega$  sempre in Fig. 4.8, per favorire il confronto con i risultati sperimentali. I valori di progetto  $f_{b,EC2}$  e  $f_{b,ACI}$  sono stati determinati assumendo le proprietà meccaniche dei materiali e le caratteristiche geometriche dell'ancoraggio simili a quelle dei provini utilizzati per la sperimentazione:  $f_{yt} = 500$  MPa,  $f_{ck} = f'_c = 25$  MPa (a cui, secondo le prescrizioni dell'EC2, corrisponde il valore  $f_{ck,cube} = 30$  MPa),  $\gamma = 1.0$

per i risultati mostrati in Fig. 4.8a ( $\phi_p = 20$  mm) e  $\gamma = 0.8$  per i risultati mostrati in Fig. 4.8b ( $\phi_p = 19$  mm), e  $c/\phi_p = 1.5$ . Quest'ultimo parametro è stato valutato sulla base delle caratteristiche dei provini utilizzati nella presente sperimentazione, ma media i valori relativi ai provini utilizzati in [19, 26, 27, 28] che variano tra 1.25 e 2.5. Sulla base delle proprietà meccaniche dei materiali e del parametro  $c/\phi_p$ , si può determinare il valore  $\Omega_{max,ACI} = 0.0208$ . Si deve notare che i risultati sperimentali sono vicini al valore di  $f_{b,EC2}$  per piccoli valori di  $\Omega$  (prossimi al minimo richiesto dalla normativa), e superano tale valore all'aumentare della percentuale di armatura trasversale, senza quindi garantire un coefficiente di sicurezza uniforme (Fig. 4.8a). La resistenza dell'aderenza prevista dalla ACI 318-95 si avvicina maggiormente ai risultati sperimentali per effetto dell'incremento lineare della resistenza dell'aderenza con  $\Omega$ , ed anch'essa tende a sottostimare notevolmente i risultati sperimentali all'aumentare dell'indice di contenimento delle staffe (soprattutto quando  $\Omega > 0.03$ ). Si deve comunque osservare che quando non tutte le barre ancorate hanno vicino alle armature trasversali, e quindi si verifica localmente una maggior apertura della fessura da spacco che comporta una riduzione della resistenza dell'aderenza, sia la  $f_{b,EC2}$  che la  $f_{b,ACI}$  sovrastimano alcuni dei risultati sperimentali presentati in [26, 27, 28] (Fig. 4.8b). Ciò evidenzia come la resistenza dell'ancoraggio prevista dalle due normative possa sovrastimare la resistenza ultima dell'aderenza misurata sperimentalmente e quindi non garantisca un adeguato grado di sicurezza nei confronti del collasso dell'ancoraggio.



# Chapter 6

## 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 all'influenza dell'armatura trasversale sullo sviluppo della fessurazione da spacco e sulla resistenza dell'ancoraggio. La sperimentazione è stata effettuata su elementi di calcestruzzo contenenti due barre  $\phi 20$ , ancorate per una lunghezza di 450 mm, e tre coppie di armature trasversali di contenimento aventi diverso diametro ( $\phi_{st}=5, 6, 8$  e 10 mm); per poter verificare l'azione di contenimento del solo calcestruzzo, due provini erano sprovvisti di armature trasversali.

La sperimentazione è stata effettuata impiegando un particolare banco di prova che consente di eliminare l'azione di contenimento dovuta all'attrito che normalmente si verifica nelle prove di estrazione.

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 in corrispondenza della staffa più vicina all'estremo caricato della barra aumenta quasi linearmente con lo scorrimento armatura-calcestruzzo a tale estremo. Per piccoli valori di  $\Omega$  ( $=0.0065$ ), l'apertura della fessura da spacco raggiunge i due terzi dello scorrimento della barra all'estremo caricato (Fig. 4.4) ed assume valori significativi (0.2 mm) già in condizioni di esercizio ( $\sigma_p=250-300$  MPa, Fig. 4.5).
- Nei provini con armatura trasversale la forza massima sull'ancoraggio è raggiunta dopo la completa propagazione della fessura da spacco principale lungo la barra, evidenziando gli effetti favorevoli del contenimento dell'armatura trasversale (Fig. 4.6). Nei provini senza armatura trasversale si verifica un collasso di tipo fragile dell'ancoraggio (collasso per "splitting") nel momento in cui la fessura da spacco principale raggiunge l'estremo non caricato della barra.
- La resistenza dell'aderenza ( $\tau_{max}$ ) aumenta con l'indice di contenimento delle staffe fino ad una soglia superiore che si raggiunge quando  $\Omega \approx 0.03-0.04$ ; oltre

tale valore dell'indice di contenimento delle staffe non si verificano incrementi significativi della resistenza dell'aderenza (Fig. 4.8a). La resistenza dell'ancoraggio dipende anche dalla distribuzione dell'armatura trasversale lungo la sezione della trave (numero di bracci delle staffe) in quanto la presenza di armature trasversali in prossimità delle barre ancorate limita localmente l'apertura della fessura da spacco ed aumenta la resistenza dell'aderenza.

- La normativa americana ACI 318-95 ha recentemente introdotto dei coefficienti che tengono conto del contributo dell'azione di contenimento del calcestruzzo e dell'armatura trasversale nella determinazione della resistenza dell'ancoraggio. Al contrario, l'Eurocodice 2 non tiene conto di tali contributi. Poichè il benefico effetto delle azioni di contenimento è stato sperimentalmente verificato, è auspicabile un miglioramento della Normativa Europea.
- La resistenza dell'aderenza determinata sperimentalmente, per piccoli valori di  $\Omega$  risulta molto vicina ai valori di progetto previsti dalle normative che quindi non garantiscono un adeguato coefficiente di sicurezza (Fig. 4.8a). Quando non tutte le armature trasversali hanno vicino una staffa che limita localmente l'apertura della fessura da spacco, la resistenza dell'aderenza sperimentale risulta inferiore ai valori prescritti dalle normative (Fig. 4.8b).
- Benchè la percentuale di armatura trasversale dei provini fosse sempre maggiore del limite minimo richiesto dall'Eurocodice 2, le armature trasversali più sollecitate si sono snervate prima del raggiungimento della tensione caratteristica dell'aderenza nella barra principale  $f_{bk,EC2}$  prevista dalla stessa normativa (Fig. 4.7). Inoltre, le armature trasversali con diametro di 5 mm si sono snervate quando la barra ancorata era sottoposta a tensioni di trazione tipiche delle condizioni di esercizio ( $\sigma_p=250-300$  MPa).

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;
- l'impiego di barre ricoperte di resina epossidica o di altri materiali che, essendo caratterizzate da una minor adesione chimica tra l'armatura ed il calcestruzzo e da una diversa geometria delle armature (ricoperte), provocano maggiori spinte radiali e quindi favoriscono la fessurazione da spacco;
- 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] 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.
- [4] 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.
- [5] R. Tepfers. *A Theory of Bond applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars*. PhD thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, 1973.
- [6] E. Giuriani and G.A. Plizzari. Interrelation of Splitting and Flexural Cracks in Reinforced Concrete Beams. *ASCE, Journal of Structural Engineering*, 124(9), 1998.
- [7] P.G. Gambarova and G.P. Rosati. Bond and Splitting in bar Pull-out: Behavioral Laws and Concrete Cover Role. *Magazine of Concrete Research*, 49(179):99–110, 1997.
- [8] 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.
- [9] 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.

- [10] 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.
- [11] H.W. Reinhardt and C. Van der Veen. Splitting Failure of a Strain-Softening material due to Bond Stresses. In Alberto Carpinteri, editor, *Applications of Fracture Mechanics to Reinforced Concrete*, pages 333–346, Turin, October 6 1990. Elsevier Applied Science.
- [12] P. Balaguru, P.G. Gambarova, G.P. Rosati, and Schumm C.E. Bond of Reinforcing Bars and Prestressing Tendons in HPFRCC Matrices. In A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, editors, *Second International Workshop: High-Performance Fiber Reinforced Composites - Volume 2*, pages 325–363, AnnArbor, Michigan, June 11-14 1995. University of Michigan - Dept. of Civil and Environmental Engineering.
- [13] R.E. Untrauer and R.L. Henry. Influence of Normal Pressure on Bond Strength. *ACI Journal, Proceedings*, 62(5):577–586, 1965.
- [14] R.J. Malvar. Bond of Reinforcement under Controlled Confinement. Technical Report N-1833, Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California, June 1991.
- [15] G.P. Gambarova and E. Giuriani. Discussion of ‘Study of the transfer of Tensile Forces by Bond.’ by D. H. Jiang, S. P. Shah, and A. T. Andonian. *Proceedings, American Concrete Institute Journal*, 82(3):381–383, 1985.
- [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] G.A. Plizzari, E. Marchina, and E. Giuriani. Experimental Study of Splitting and Flexural Cracks in a RC Beam with Overlapped Splices. *RILEM Materials and Structures*, 29:19–27, 1996.
- [19] 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.
- [20] 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.

- [21] ACI Committee 318. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, (ACI 318-95). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI (USA), 1995.
- [22] 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.
- [23] G. Rehm. Ueber die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (D.A.f.St)*, 138, 1961. in German.
- [24] G.A. Plizzari and E. Marchina. Studio del collasso dell'aderenza in presenza di armatura trasversale. Technical Report 5.8/96, Department of Civil Engineering, University of Brescia, Brescia, Italy, 1996. in Italian.
- [25] 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.
- [26] M. Maeda, S. Otani, and H. Aoyama. Effect of Confinement on Bond Splitting Behavior in Reinforced Concrete Beams. *IABSE, Structural Engineering International*, 5(3):166–171, 1995.
- [27] T. Kaku, M. Yamada, M. Shibata, and H. Takahashi. Bond Splitting Strength of Simply Supported Reinforced Concrete Beams. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 10:171–176, 1988.
- [28] T. Kaku, M. Yamada, and M. Gouraku. Effect of Transverse Reinforcement on Bond Splitting Strength of Reinforced Concrete Beams. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 11:371–378, 1989.
- [29] G.E. Warren. *Anchorage Strength of Tensile Steel in Reinforced Concrete Beams*. PhD thesis, Iowa State University, Ames, 1969.
- [30] C.O. Orangun, J.O. Jirsa, and J.E. Breen. A reevaluation of Test Data on Development Length and Splices. *ACI Journal*, 74(11):114–122, 1977.
- [31] D. Darwin, S.L. McCabe, E.K. Idun, and S.P. Schoenekase. Development Length Criteria: Bars Not Confined by Transverse Reinforcement. *ACI Structural Journal*, 89(6):709–720, 1992.
- [32] D. Darwin, Z. Zuo, M.L. Tholen, and E.K. Idun. Development Length Criteria for Conventional and High Relative Rib Area Reinforcing Bars. *ACI Structural Journal*, 93(3):347–359, 1996.
- [33] P.G. Gambarova and G.P. Rosati. Bond and Splitting in Reinforced Concrete: Test Results on Bar Pull-out. *RILEM Materials and Structures*, 29:267–276, 1996.



- [34] 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.

## Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Dott. Ruggero Brunori ed il Sig. Fabrizio Oliva della Ferriera Valsabbia di Odolo (BS) 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 il loro prezioso aiuto 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.



# 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, misurata in corrispondenza delle tre coppie di armature trasversali, 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 delle tre coppie di armature trasversali, 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 45NSP1 e 45NSP2 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.

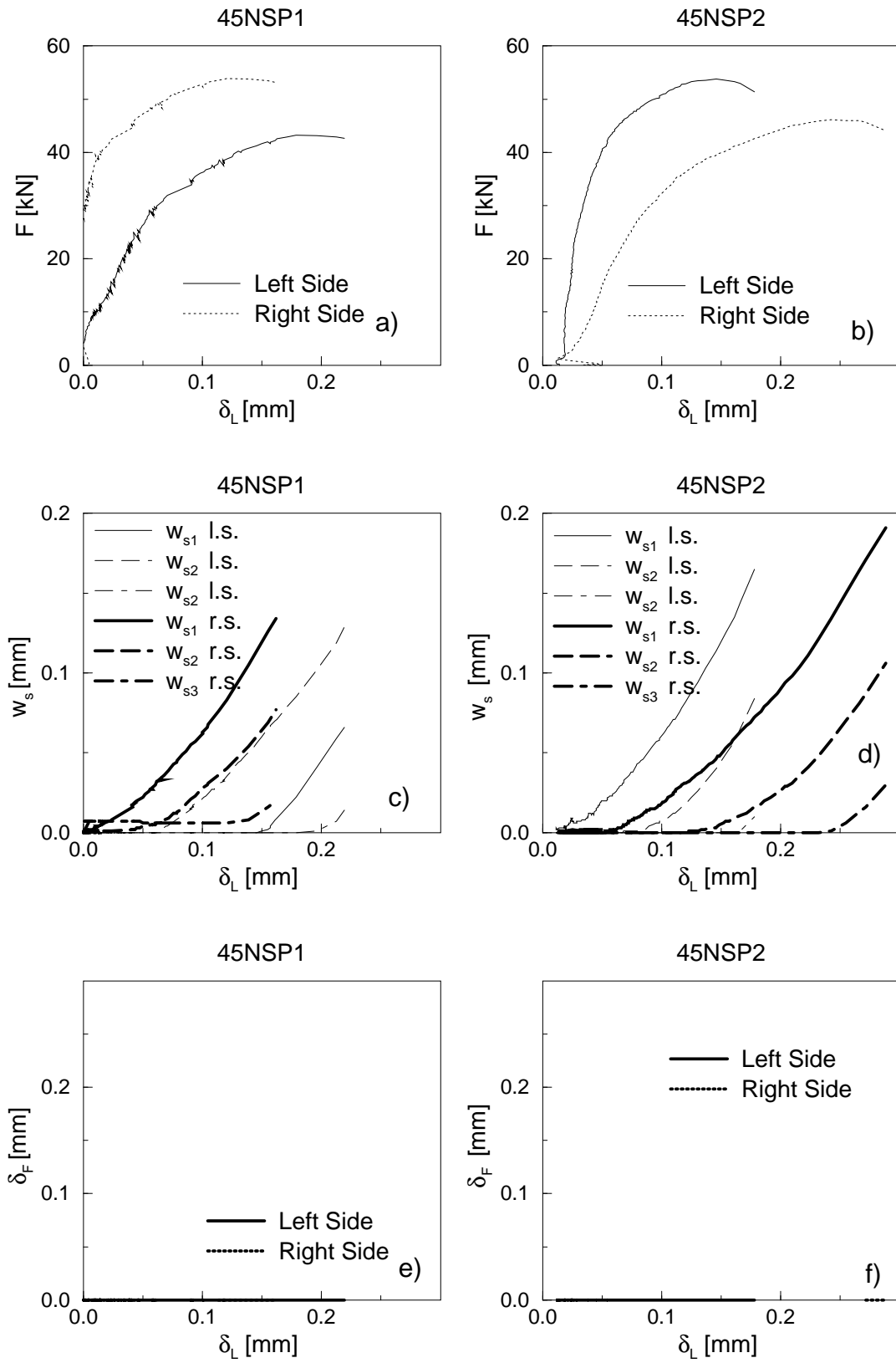


Figure A.1: Diagrammi sperimentali ottenuti dai provini 45NSP1 e 45NSP2.

## 45S5P1

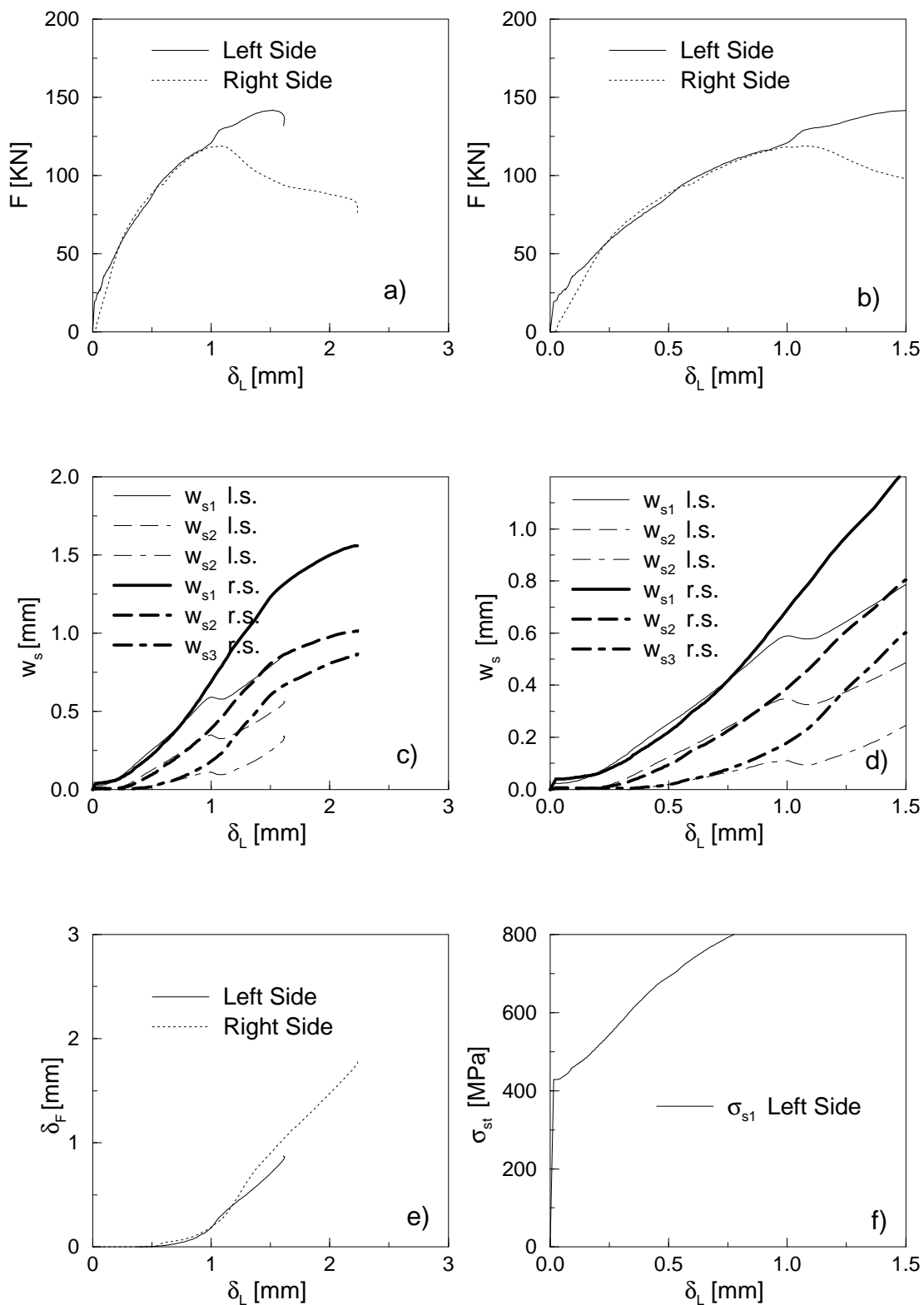


Figure A.2: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S5P1.

## 45S5P3

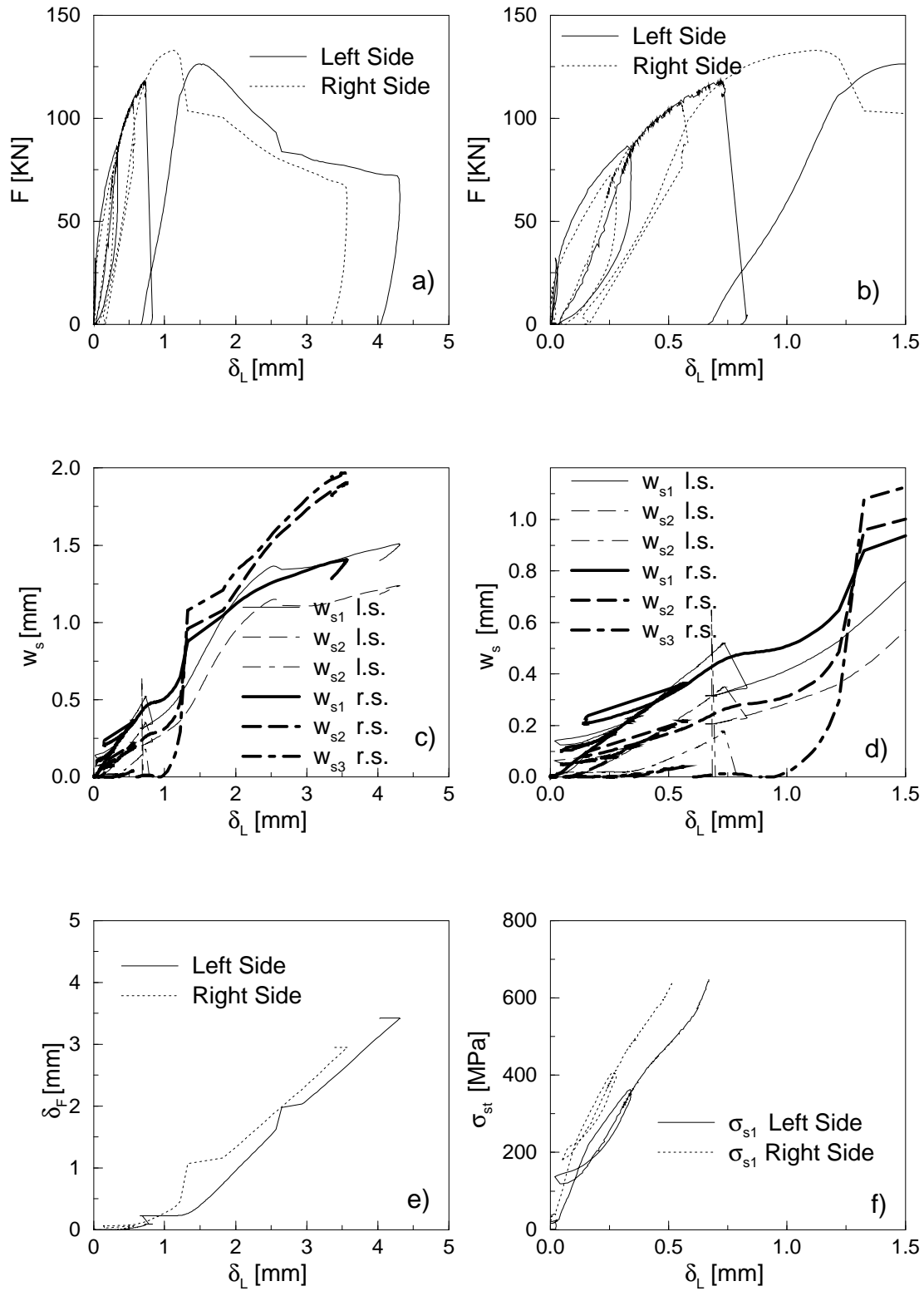


Figure A.3: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S5P3.

## 45S5P4

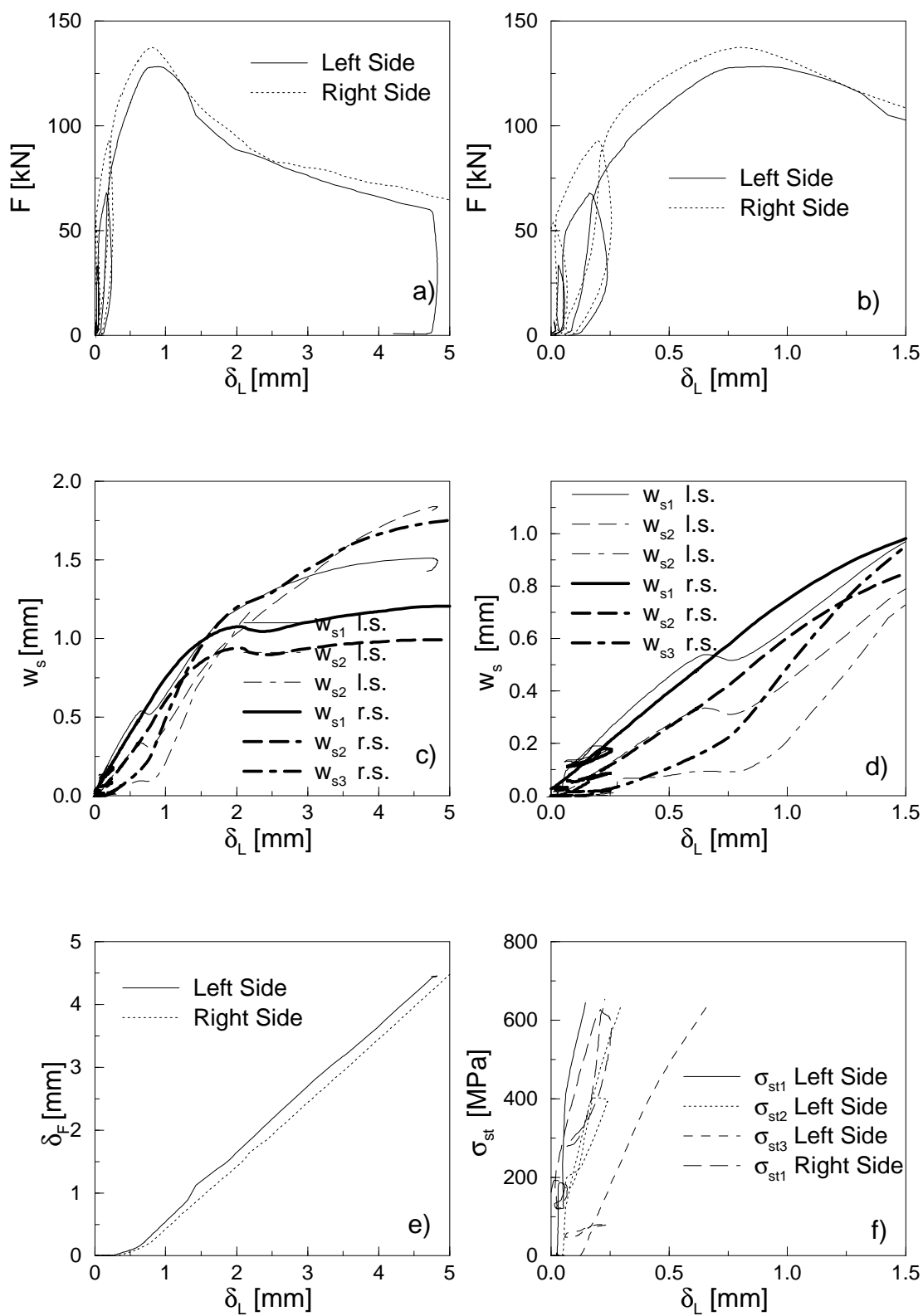


Figure A.4: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S5P4.



## 45S6P1

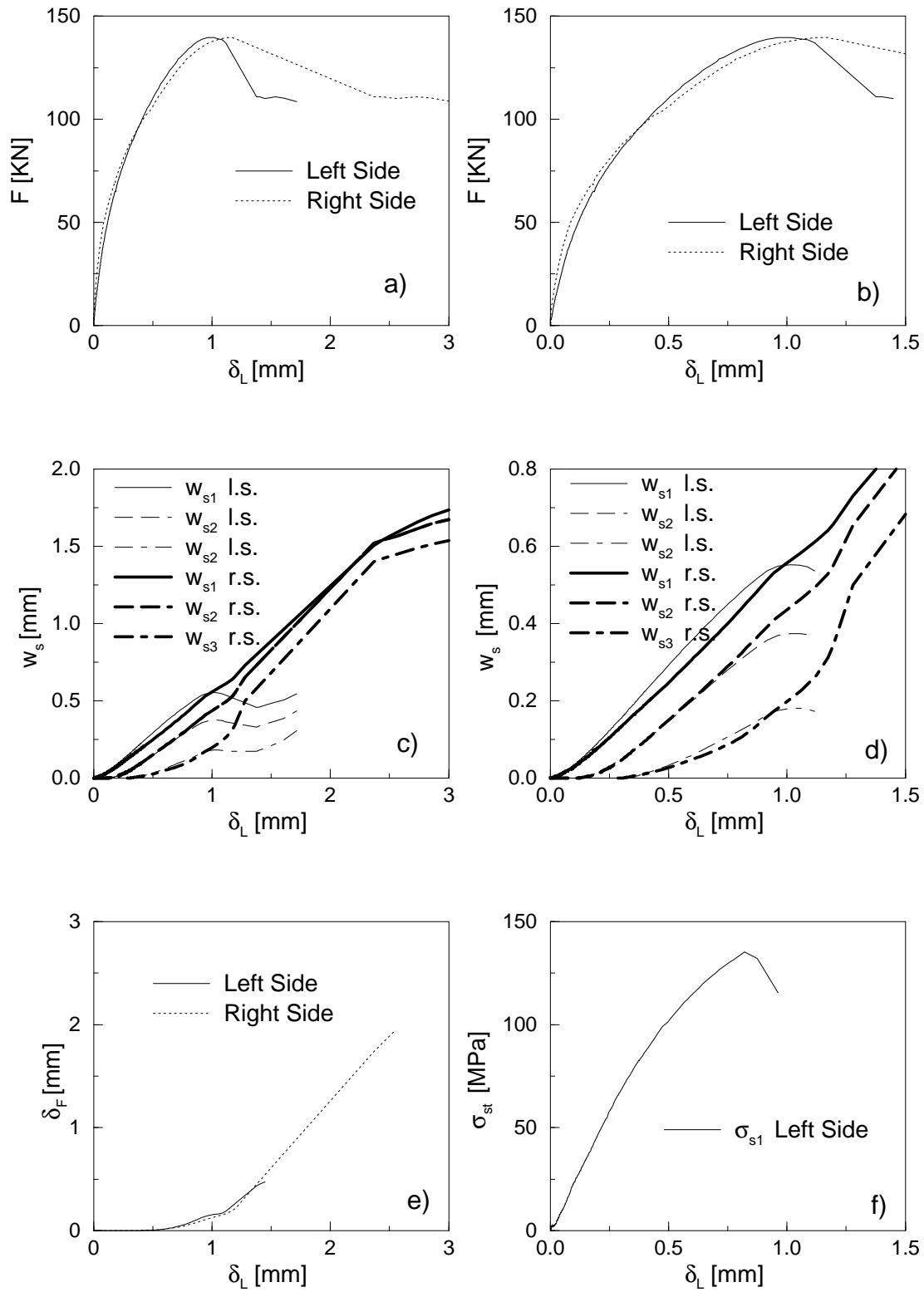


Figure A.5: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S6P1.

## 45S6P2

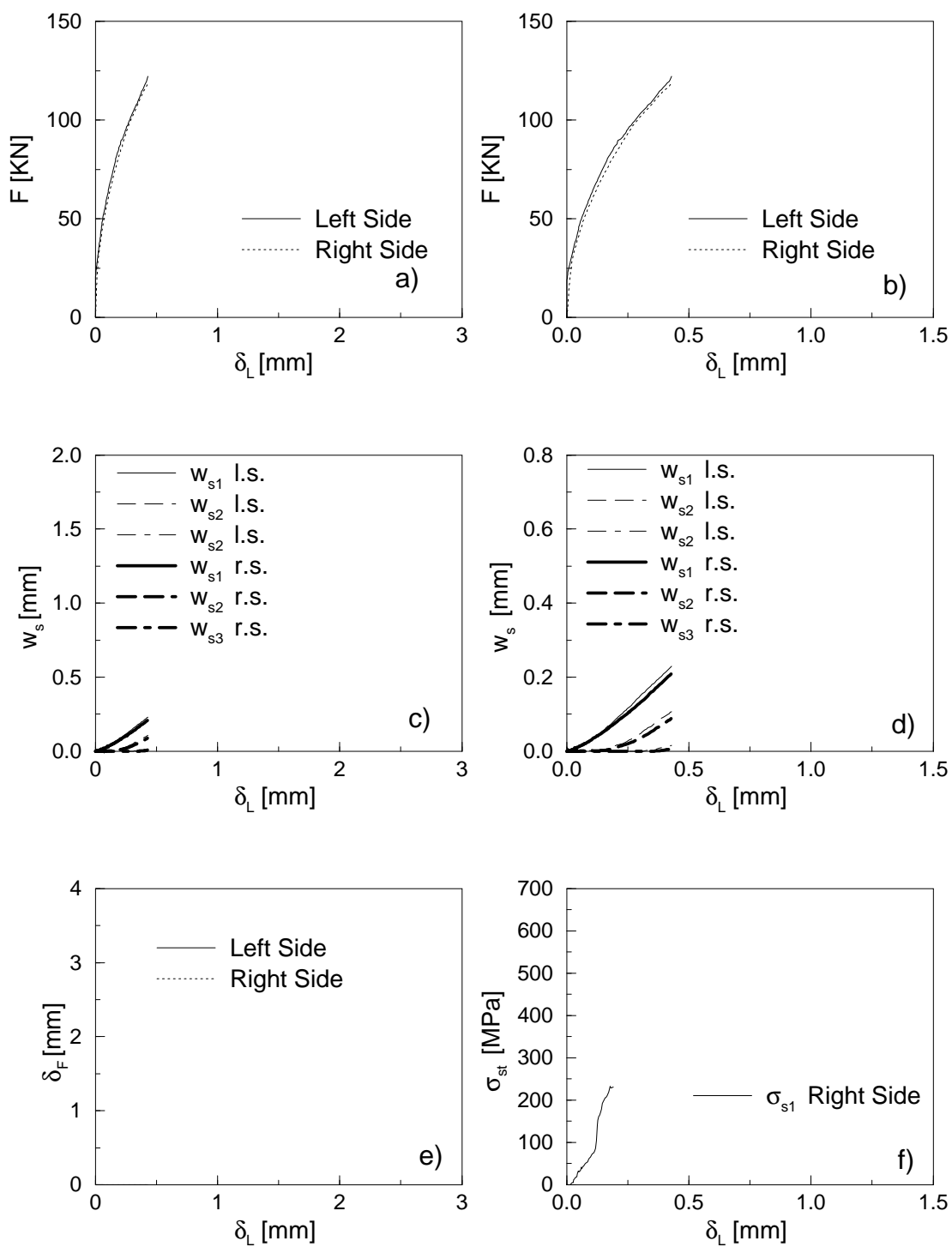


Figure A.6: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S6P2.

## 45S6P3

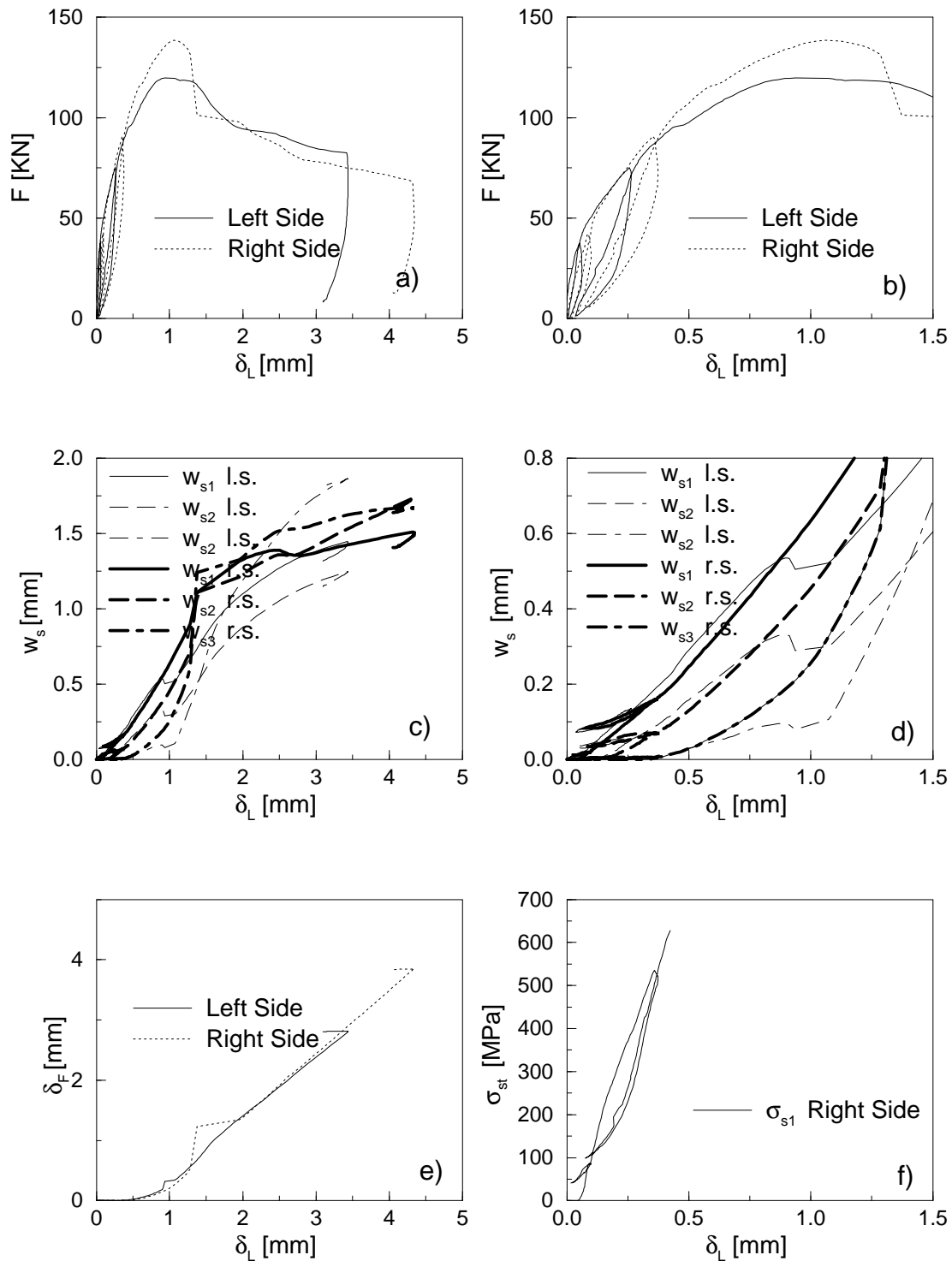


Figure A.7: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S6P3.

## 45S6P4

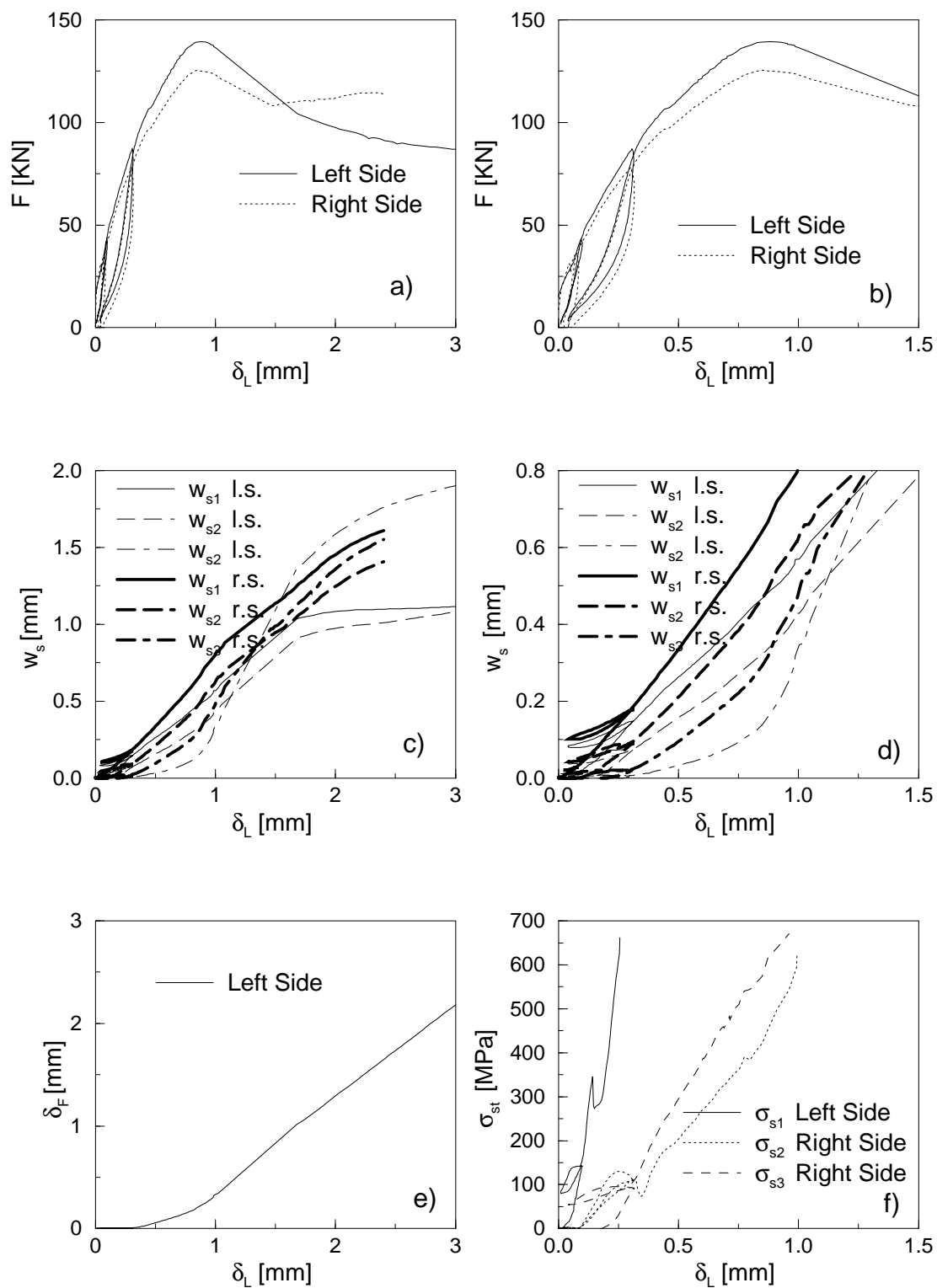


Figure A.8: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S6P4.

## 45S8P1

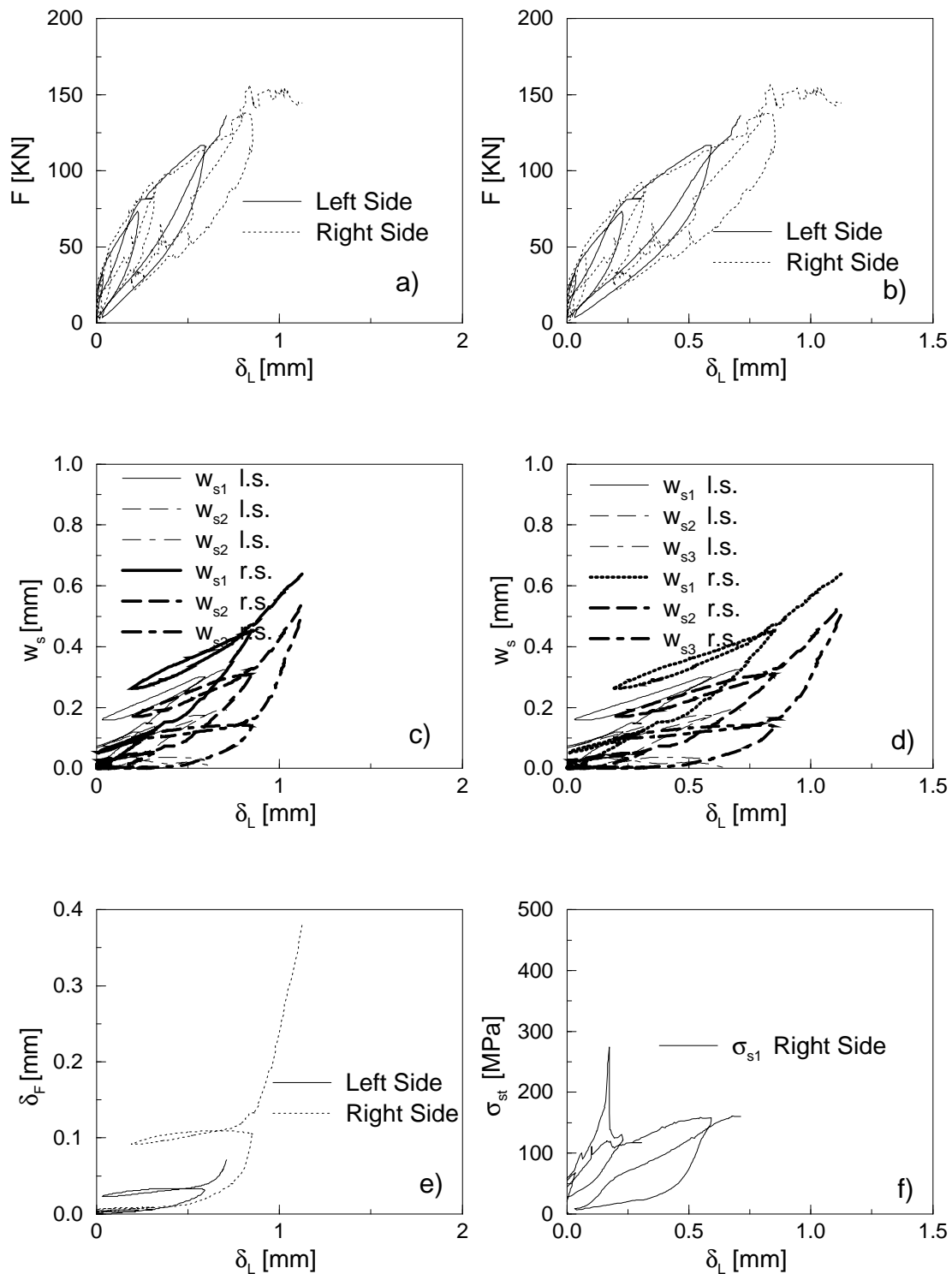


Figure A.9: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S8P1.

## 45S8P2

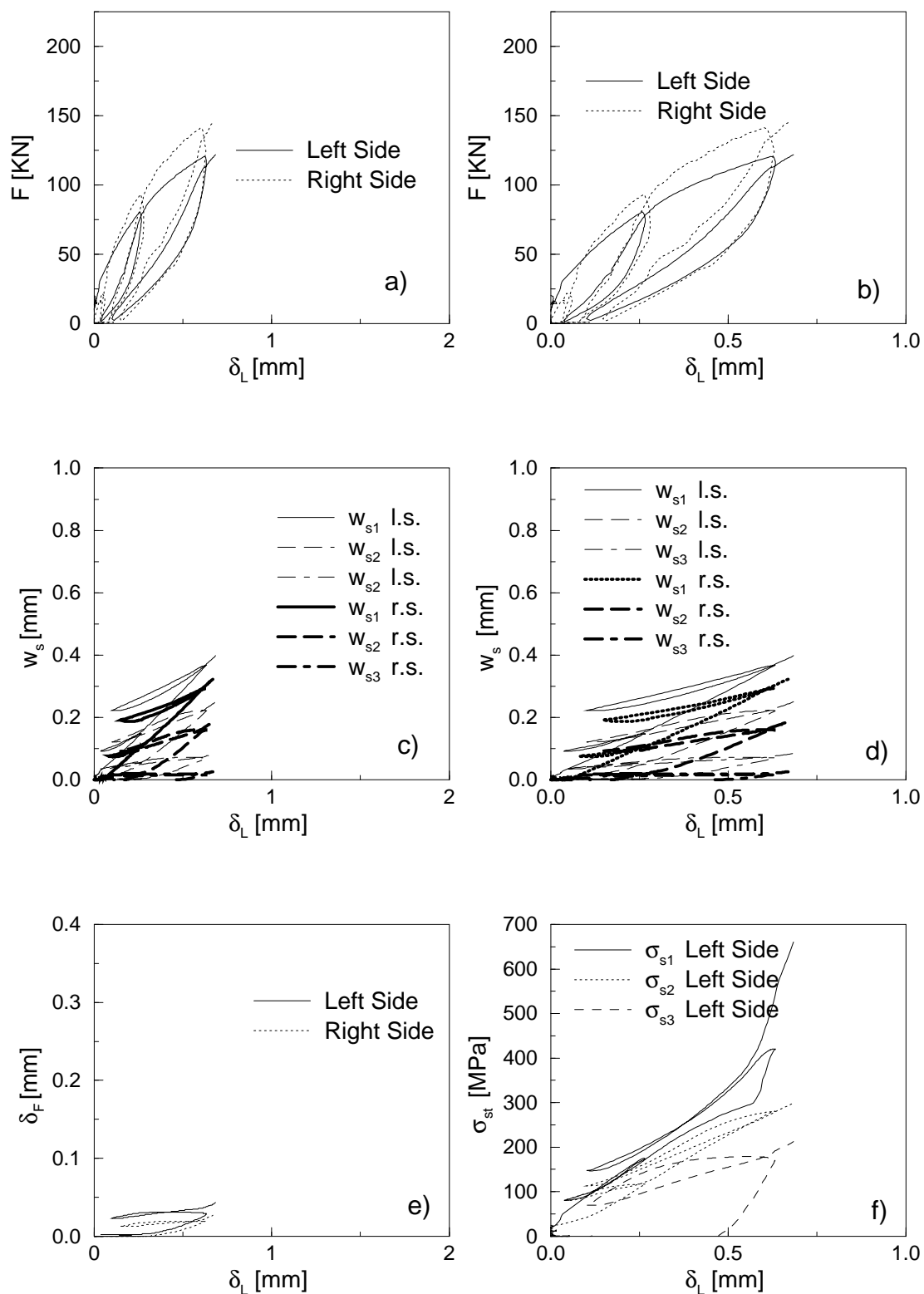


Figure A.10: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S8P2.

## 45S8P3

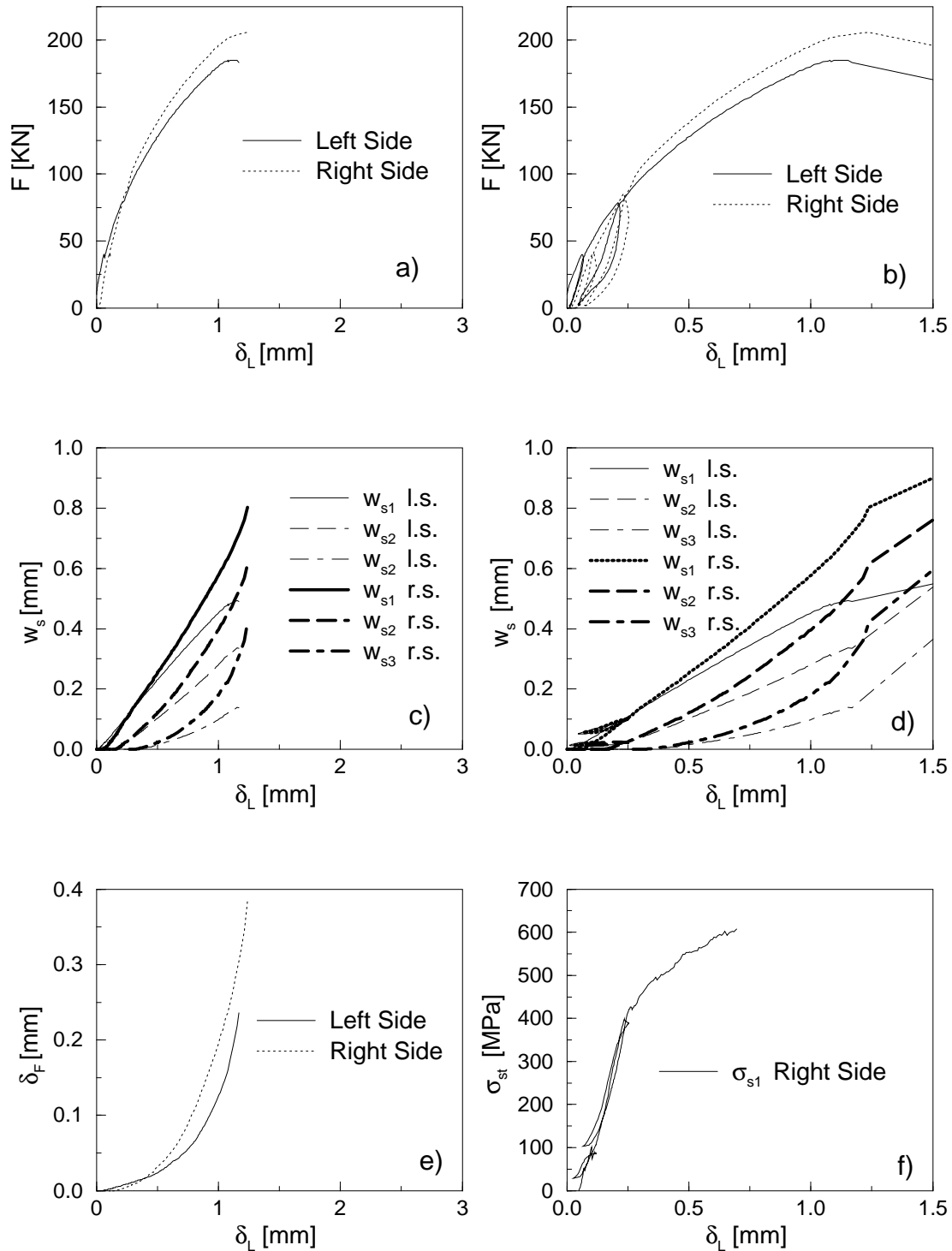


Figure A.11: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S8P3.

## 45S8P4

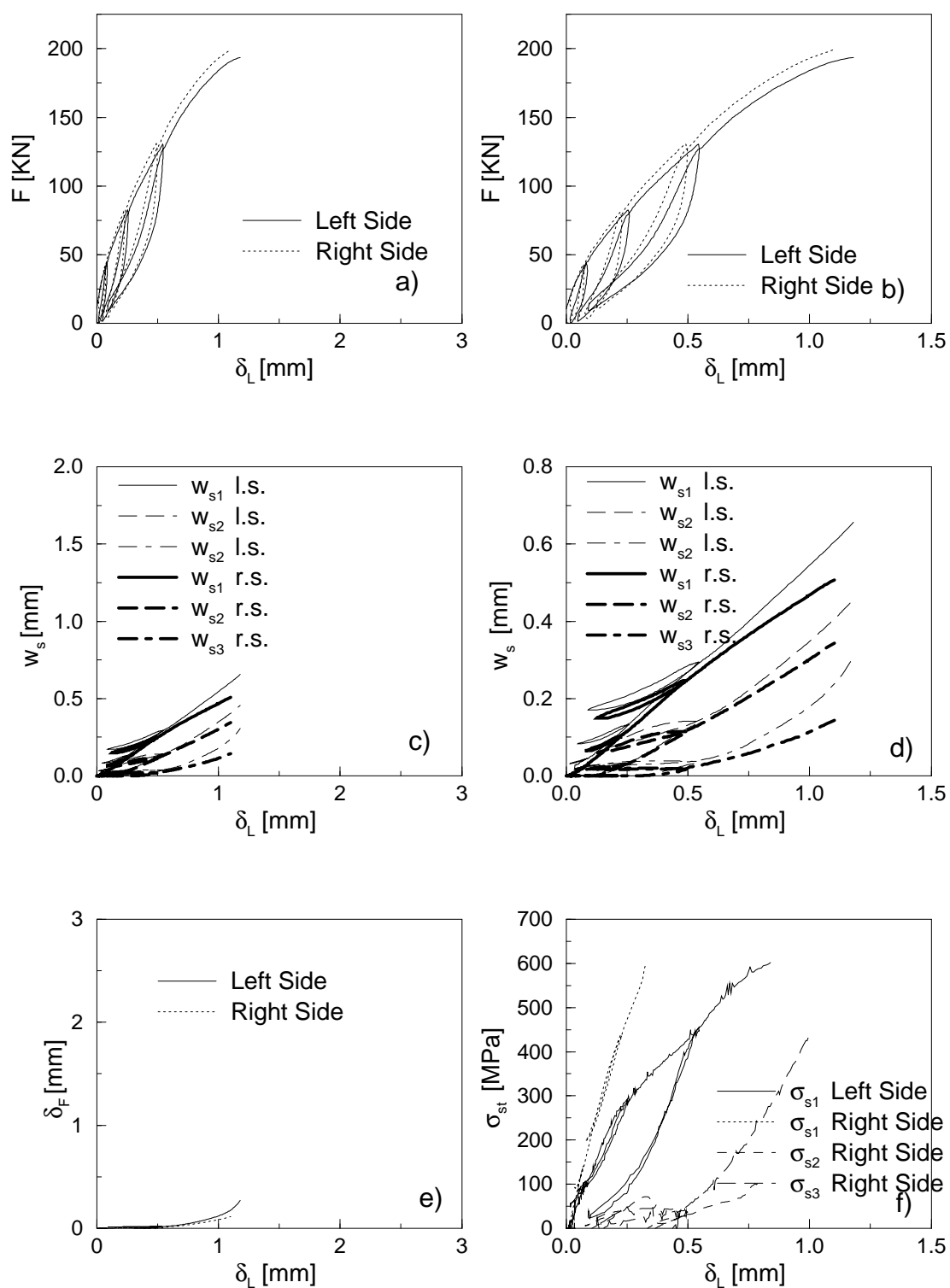


Figure A.12: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S8P4.



## 45S10P4

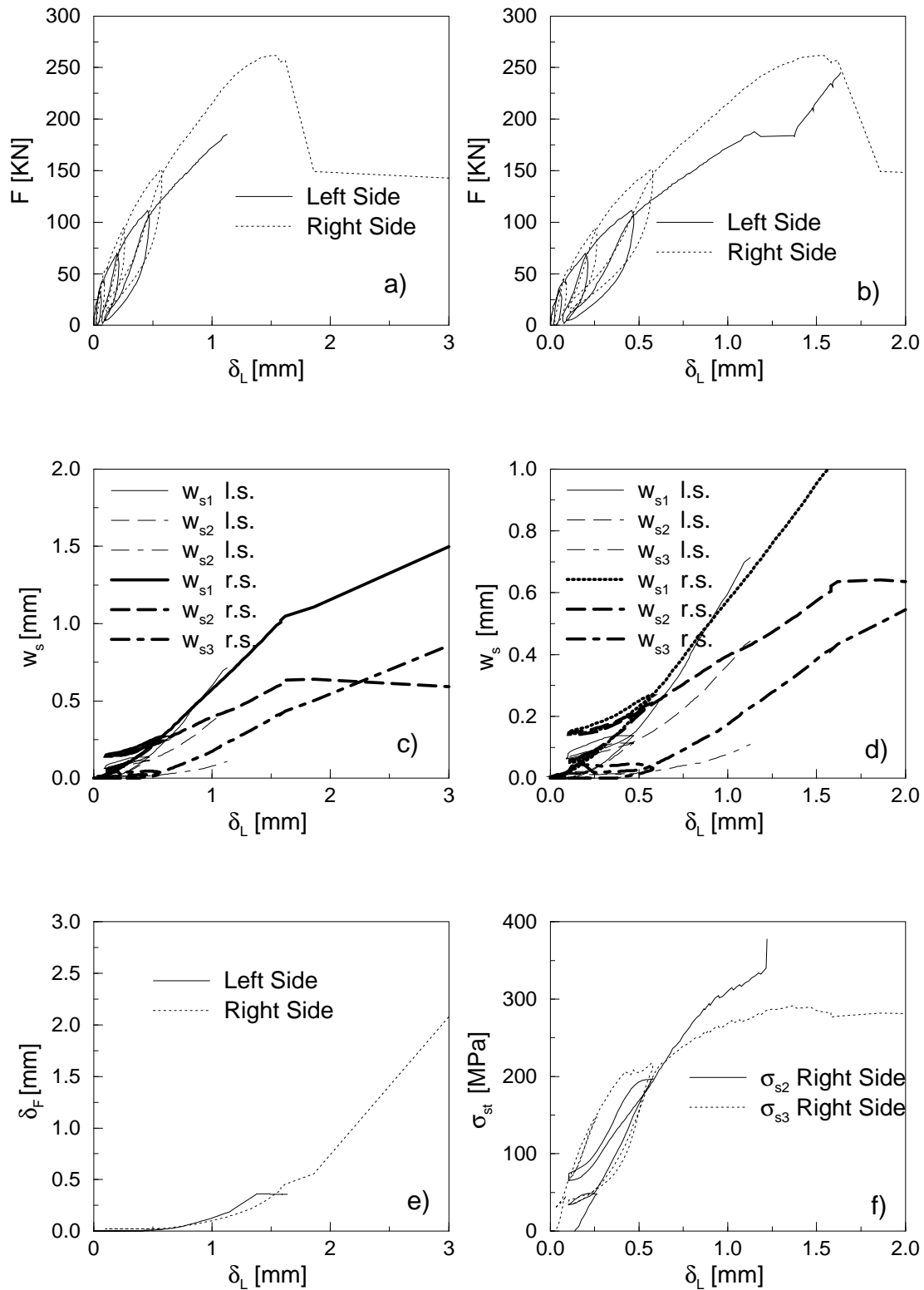


Figure A.13: Diagrammi sperimentali ottenuti dal provino 45S10P4.