

**Studio sperimentale su  
barre ancorate in elementi di  
calcestruzzo armato con armatura  
trasversale di contenimento**

**Angelo M. DELDOSSI**

**Stefano MASSIMO**

**Giovanni A. PLIZZARI**

**Dipartimento di Ingegneria Civile  
Università di Brescia  
Via Valotti, 9  
Brescia, 25060**

Novembre 1993

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Modello sperimentale</b>	<b>16</b>
2.1	Caratteristiche provini . . . . .	16
2.2	Sistemi di misurazione . . . . .	19
2.2.1	Apertura della fessura di splitting . . . . .	20
2.2.2	Slittamenti di testa e di coda . . . . .	20
2.2.3	Carico applicato alle armature ancorate . . . . .	20
2.2.4	Quadro fessurativo . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Descrizione del banco</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>Modalità di prova</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>Caratteristiche dei materiali</b>	<b>33</b>
5.1	Calcestruzzo . . . . .	33
5.2	Acciaio . . . . .	34
<b>6</b>	<b>Risultati sperimentali</b>	<b>37</b>
6.1	Presentazione dei risultati sperimentali . . . . .	37
6.2	Discussione dei risultati sperimentali . . . . .	48
<b>7</b>	<b>Considerazioni conclusive</b>	<b>66</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>71</b>

# List of Figures

1.1	Microfessure trasversali (a); Tensioni longitudinali di trazione all'apice della nervatura [1] (b). . . . .	8
1.2	Cunei di conglomerato a monte della nervatura [2] (a), spinte radiali da essi esercitate (b) e fessure trasversali e longitudinali da spacco [3] (c). . . . .	8
1.3	Superficie conica di propagazione delle fessure trasversali [2] . . . . .	9
1.4	Schema illustrativo del collasso locale dell'aderenza: collasso per tranciamento dei denti di calcestruzzo (pull-out) (a); collasso per incontrollata apertura di fessure di spacco (splitting) (b) [4]. . . . .	10
1.5	Azioni di contenimento sulla barra ancorata: azione dell'armatura trasversale e del calcestruzzo [5] (a); azione della pressione esterna (b). . . . .	11
1.6	Problemi tipici dell'aderenza: ancoraggio (a); giunzione per sovrapposizione (b). . . . .	12
1.7	Risposta delle barre trasversali all'aumentare dell'apertura della fessura di splitting [5]. . . . .	13
1.8	Resistenza a trazione del calcestruzzo sia in fase non fessurata, in funzione della deformazione, che in fase fessurata, in funzione dell'apertura di fessura [5].	14
2.1	Caratteristiche geometriche dei provini impiegati nella prima serie di prove. .	17
2.2	Caratteristiche geometriche dei provini impiegati nella seconda serie di prove.	18
2.3	Particolare con orientamento delle nervature. . . . .	19
2.4	Disposizione delle nervature delle armature trasversali. . . . .	20
2.5	Schema della strumentazione applicata ai provini della seconda serie. . . . .	21
2.6	Sistema per la misura dello slittamento di testa e di coda nei provini della prima serie di prove. . . . .	22
2.7	Particolare dei "clip gauges". . . . .	23
3.1	Schematizzazione delle forze agenti sull'armatura principale e sui contrasti (a); Forze presenti sulla barra ancorata (b); Schema statico delle forze causate dall'eccentricità (c). . . . .	26
3.2	Banco di prova (a); Particolare delle cerniere (b). . . . .	27
3.3	Collegamento superiore (a) ed inferiore (b) del banco alla macchina di prova.	29
4.1	Curva degli slittamenti di testa in funzione del tempo, riportati fino al carico di picco. . . . .	31
4.2	Vista d'insieme dell'intera strumentazione usata durante la prova. . . . .	32
5.1	Particolare delle barre d'armatura. . . . .	36

6.1	Diagramma completo del carico $F$ e dell'apertura delle fessure di splitting $w_{s1}$ , $w_{s2}$ , $w_{s3}$ in funzione dello slittamento di testa della barra ancorata, relativo al provino 1NSP2. . . . .	38
6.2	Diagramma del carico $F$ e dell'apertura delle fessure di splitting $w_{s1}$ , $w_{s2}$ , $w_{s3}$ in funzione dello slittamento di testa della barra ancorata, relativo al provino 1S6P2 riportato integralmente e fino al valore di picco del carico. . . . .	39
6.3	Diagramma completo del carico $F$ e dell'apertura delle fessure di splitting $w_{s1}$ , $w_{s2}$ , $w_{s3}$ in funzione dello slittamento di testa della barra ancorata, relativo al provino 1S8P1. . . . .	40
6.4	Diagramma del carico $F$ e dell'apertura delle fessure di splitting $w_{s1}$ , $w_{s2}$ , $w_{s3}$ in funzione dello slittamento di testa della barra ancorata, relativo al provino 1S8P2 riportato integralmente e fino al valore di picco del carico. . . . .	41
6.5	Diagramma del carico $F$ in funzione dello slittamento di testa e di coda della barra ancorata, comprensivo della fase di push-in, relativo al provino 1S8P2. . . . .	42
6.6	Diagramma dell'apertura delle fessure di splitting $w_{s1}$ , $w_{s2}$ , $w_{s3}$ , in funzione dello slittamento di testa della barra ancorata, e comprensivo della fase di push-in, relativo al provino 1S8P2. . . . .	42
6.7	Diagramma del carico $F$ e dell'apertura delle fessure di splitting $w_{s1}$ , $w_{s2}$ , $w_{s3}$ in funzione dello slittamento di testa delle due barre ancorate, relativo al provino 2S6P1 riportato integralmente e fino al valore di picco del carico. . . . .	43
6.8	Diagramma del carico $F$ e dell'apertura delle fessure di splitting $w_{s1}$ , $w_{s2}$ , $w_{s3}$ in funzione dello slittamento di testa delle due barre ancorate, relativo al provino 2S6P2 riportato integralmente e fino al valore di picco del carico. . . . .	44
6.9	Diagramma del carico $F$ e dell'apertura delle fessure di splitting $w_{s1}$ , $w_{s2}$ , $w_{s3}$ in funzione dello slittamento di testa delle due barre ancorate, relativo al provino 2S6NTP1 riportato integralmente e fino al valore di picco del carico. . . . .	45
6.10	Diagramma del carico $F$ e dell'apertura delle fessure di splitting $w_{s1}$ , $w_{s2}$ , $w_{s3}$ in funzione dello slittamento di testa delle due barre ancorate, relativo al provino 2S6NTP2 riportato integralmente e fino al valore di picco del carico. . . . .	46
6.11	Confronto tra le curve forza di estrazione - slittamento di testa della prima serie di prove. . . . .	49
6.12	Confronto tra le curve forza di estrazione - slittamento di testa della prima serie di prove riportate fino al carico di picco. . . . .	49
6.13	Particolare dell'impronta lasciata nel calcestruzzo dalla barra ancorata al termine della prova nei provini senza armatura trasversale di contenimento in cui si è avuto collasso per splitting. . . . .	50
6.14	Particolare dell'impronta lasciata nel calcestruzzo dalle barre ancorate al termine della prova nei provini con armatura trasversale di contenimento in cui si è avuto collasso per pull-out. . . . .	51
6.15	Particolare dell'impronta di una nervatura della barra ancorata al termine di una prova in cui il collasso è avvenuto per pull-out. . . . .	52
6.16	Confronto tra le curve forza di estrazione - slittamento di coda della prima serie di prove riportate fino al carico di picco. . . . .	53
6.17	Rappresentazione della differenza tra gli slittamenti di testa e di coda in funzione degli slittamenti di testa, relativa alla prima serie di prove. . . . .	53

6.18	Confronto tra le curve forza di estrazione - slittamento di testa della seconda serie di prove. . . . .	54
6.19	Confronto tra le curve forza di estrazione - slittamento di testa della seconda serie di prove riportate fino al carico di picco. . . . .	55
6.20	Confronto tra le curve medie forza di estrazione - slittamento di testa dei provini con e senza fessura di splitting preformata. . . . .	55
6.21	Confronto tra le curve forza di estrazione - slittamento di coda della seconda serie di prove riportate fino al carico di picco. . . . .	56
6.22	Rappresentazione della differenza tra gli slittamenti di testa e di coda in funzione degli slittamenti di testa. . . . .	56
6.23	Apertura della fessura di splitting $w_{s1}$ in funzione dello slittamento di testa, per la prima serie di prove. . . . .	57
6.24	Apertura della fessura di splitting $w_{s2}$ in funzione dello slittamento di testa, per la prima serie di prove. . . . .	58
6.25	Apertura della fessura di splitting $w_{s3}$ in funzione dello slittamento di testa, per la prima serie di prove. . . . .	58
6.26	Apertura della fessura di splitting $w_{s1}$ in funzione dello slittamento di testa, per la seconda serie di prove. . . . .	59
6.27	Apertura della fessura di splitting $w_{s2}$ in funzione dello slittamento di testa, per la seconda serie di prove. . . . .	60
6.28	Apertura della fessura di splitting $w_{s3}$ in funzione dello slittamento di testa, per la seconda serie di prove. . . . .	60
6.29	Confronto tra le curve sforzo di aderenza medio - slittamento di testa al variare della percentuale di armatura trasversale rispetto a quella principale ancorata. . . . .	61
6.30	Lunghezza della fessura di splitting misurata a partire dal punto superiore dell'ancoraggio in funzione della forza d'estrazione $F$ , riferita alla prima serie di prove. . . . .	62
6.31	Lunghezza della fessura di splitting misurata a partire dal punto superiore dell'ancoraggio in funzione della forza d'estrazione $F$ , riferita alla seconda serie di prove. . . . .	62
6.32	Quadro fessurativo finale rilevato su i due lati dei provini relativi alla seconda serie di prove. . . . .	63
6.33	Rilevazione dei coni di calcestruzzo concentrici con vertice sulla barra ancorata. . . . .	64
6.34	Fasi di propagazione della fessura di splitting sul lato destro dei provini "2S6P2" e "2S6NTP2", ottenute per mezzo dell'elaborazione delle frange Moirè. . . . .	65

# List of Tables

2.1	Caratteristiche geometriche dei provini. . . . .	17
5.1	Componenti della miscela di calcestruzzo impiegata per la prima serie di prove.	33
5.2	Componenti della miscela di calcestruzzo impiegata per la seconda serie di prove. . . . .	33
5.3	Composizione degli inerti per 1 $m^3$ di calcestruzzo. . . . .	34
5.4	Resistenza cubica del calcestruzzo al momento delle prove . . . . .	35
5.5	Caratteristiche geometriche e meccaniche delle barre di armatura . . . . .	35
6.1	Valori del carico massimo, dello slittamento di testa in corrispondenza del picco e dello sforzo di aderenza medio $\tau$ ottenuti dalle prove sperimentali. . .	47



# Chapter 1

## Introduzione

L'ancoraggio di una barra ad aderenza migliorata è governato dal comportamento locale dell'aderenza. Sulla base dei risultati di prove sperimentali, alcuni ricercatori hanno verificato che il legame locale dell'aderenza varia lungo l'ancoraggio [6, 7], mettendo così in discussione la possibilità di una sua formulazione univoca per tutti i punti della barra ancorata. Altri ricercatori hanno invece attribuito la variabilità del legame alla presenza di fessure da spacco che si sviluppano longitudinalmente alla barra e ne influenzano il comportamento poichè la loro apertura varia da punto a punto [8]. Questi ultimi ricercatori hanno quindi sostenuto la possibilità di formulazione di un unico legame locale dell'aderenza, valido per tutti i punti della barra, pur che esso tenesse conto di un'ulteriore variabile rappresentata dall'apertura della fessura di splitting locale. Nell'ambito di questa ipotesi il problema dell'ancoraggio può quindi essere risolto correttamente una volta conosciuto il corretto legame locale dell'aderenza che deve necessariamente tener conto della presenza di tutti i fenomeni che lo governano, tra i quali particolare importanza assume la fessurazione di splitting [9]. I principali fenomeni che si verificano nel calcestruzzo circostante la barra, già studiati separatamente da diversi ricercatori, sia sperimentalmente che attraverso modellazioni teoriche, possono essere così riassunti:

1. Per valori iniziali del carico l'aderenza è prevalentemente governata dall'adesione chimica tra la barra ed il calcestruzzo di ricoprimento che non consente lo scorrimento relativo tra i due materiali [1, 10]. L'ordine di grandezza del massimo sforzo di aderenza in questa fase è di  $2 \div 3$  MPa.
2. All'aumentare dello sforzo di aderenza, aumenta la pressione radiale prodotta dalle nervature sul calcestruzzo con conseguente formazione di microfessure ("microcracking") in corrispondenza delle nervature stesse [11, 10] (Fig. 1.1). In questa fase la pressione radiale prodotta dalle nervature tende a staccare il calcestruzzo a valle delle nervature dell'armatura e provoca la rottura dell'adesione chimica [1] (Fig. 1.1). Con la microfessurazione del calcestruzzo e la rottura dell'adesione chimica ha inizio lo scorrimento relativo tra l'armatura ed il calcestruzzo circostante.
3. Per valori ancora crescenti dello sforzo di aderenza, l'elevata pressione a valle delle nervature provoca lo schiacciamento locale del calcestruzzo poroso ("crushing") e la formazione di un cuneo di calcestruzzo disgregato che risulta meno inclinato rispetto alla superficie frontale della nervatura [1, 2] (Fig. 1.2a).



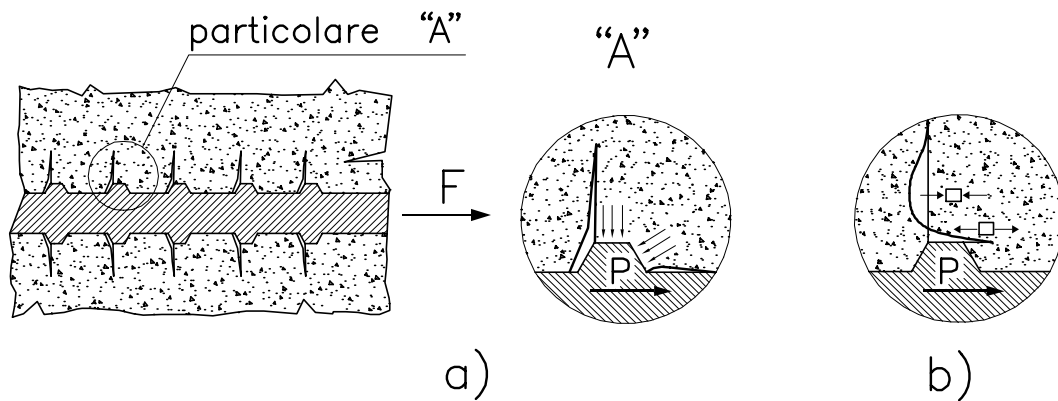


Figure 1.1: Microfessure trasversali (a); Tensioni longitudinali di trazione all'apice della nervatura [1] (b).

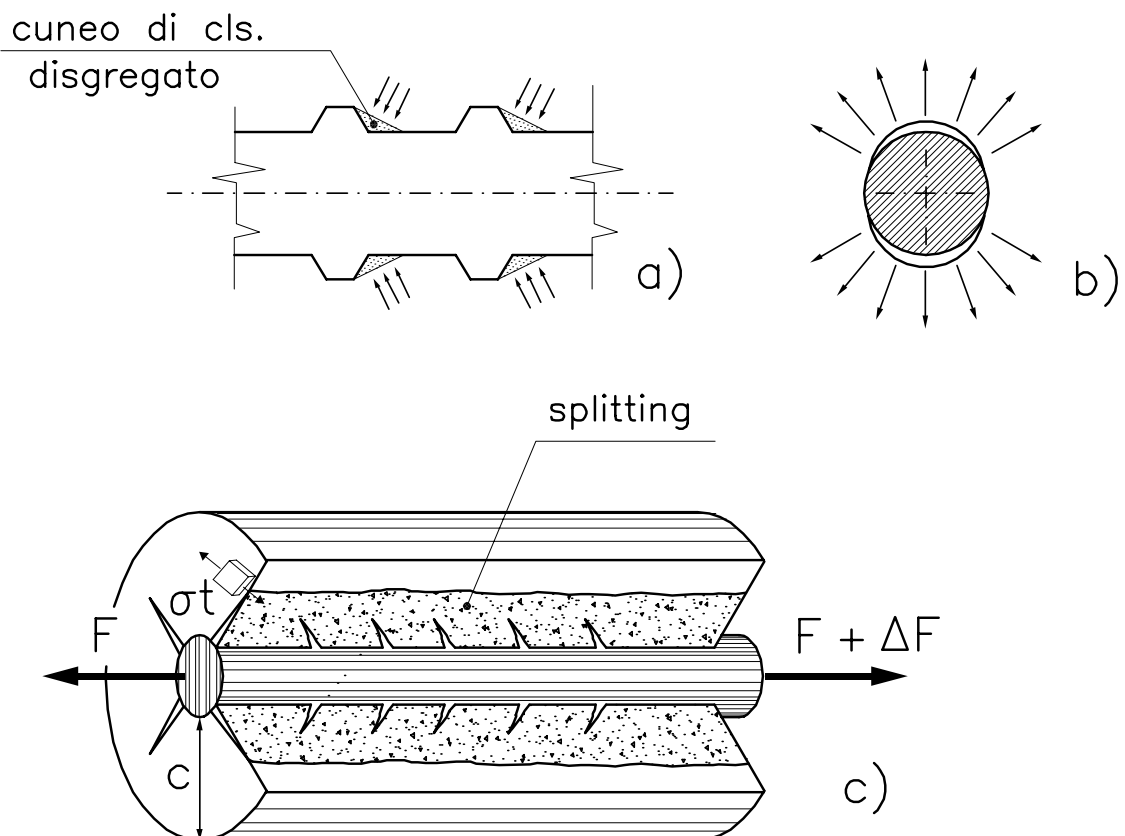


Figure 1.2: Cunei di conglomerato a monte della nervatura [2] (a), spinte radiali da essi esercitate (b) e fessure trasversali e longitudinali da spacco [3] (c).

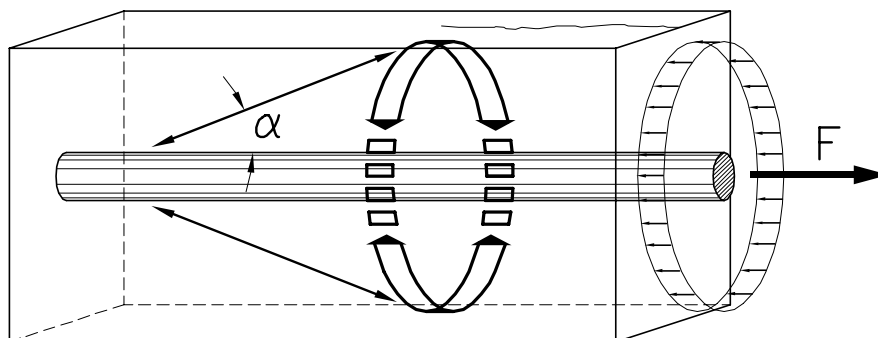


Figure 1.3: Superficie conica di propagazione delle fessure trasversali [2]

La riduzione di pendenza del cuneo provoca un aumento della componente radiale della pressione con conseguente incremento delle tensioni di trazione circonferenziali nel calcestruzzo circostante la barra (Fig. 1.2b). La spinta radiale è legata alla forma delle nervature ed alla loro dimensione [12]. Con riferimento alle caratteristiche delle barre di armatura attualmente disponibili, all'aumentare del diametro della barra aumenta la spinta radiale esercitata dalle nervature. Quando le tensioni circonferenziali superano la resistenza a trazione del calcestruzzo, ha inizio la formazione delle fessure longitudinali che, partendo dalla barra, si sviluppano lungo piani che la contengono (Fig. 1.2c); tali fessure sono comunemente denominate “fessure di splitting” [2].

Per crescenti valori dello sforzo di aderenza, sia le fessure trasversali che quelle longitudinali si propagano. In particolare, le fessure trasversali tendono ad orientarsi secondo un angolo di circa  $45^\circ$  rispetto alla direzione della forza di estrazione, formando così dei coni di calcestruzzo concentrici con vertice sulla barra ancorata [2] (Fig. 1.3); i puntoni di calcestruzzo compresi tra le fessure tendono allo stesso tempo a far aumentare le tensioni circonferenziali di trazione con conseguente propagazione delle fessure longitudinali.

Come descritto precedentemente, il comportamento locale dell'aderenza di una barra ad aderenza migliorata sottoposta ad elevati valori di carico è governato prevalentemente dalla fessurazione da spacco longitudinale. In mancanza di una adeguata azione di contenimento esterna, le fessure di splitting tendono a propagarsi velocemente ed a portare ad un collasso improvviso dell'aderenza (“collasso per splitting”) [5, 13, 4, 14, 15] (Fig. 1.4a). Viceversa, in presenza di una adeguata azione di contenimento esterna, lo sforzo locale di aderenza può ancora aumentare fino a raggiungere la rottura per schiacciamento dei puntoni di calcestruzzo tra le fessure trasversali, in corrispondenza del quale si verifica il collasso locale dell'aderenza per danneggiamento del calcestruzzo circostante la barra (collasso per pull-out) [5, 4] (Fig. 1.4b).

L'azione di contenimento sul calcestruzzo circostante la barra può essere fornita da un'armatura trasversale (od eventualmente a forma di spirale) e dal calcestruzzo circostante la barra attraverso la sua resistenza a trazione, sia in fase non fessurata che in fase fessurata [16, 17] (Fig. 1.5a). Un ulteriore contributo al contenimento è fornito da un'eventuale pressione esterna, come si verifica per esempio in corrispondenza degli appoggi delle travi (Fig. 1.5b).

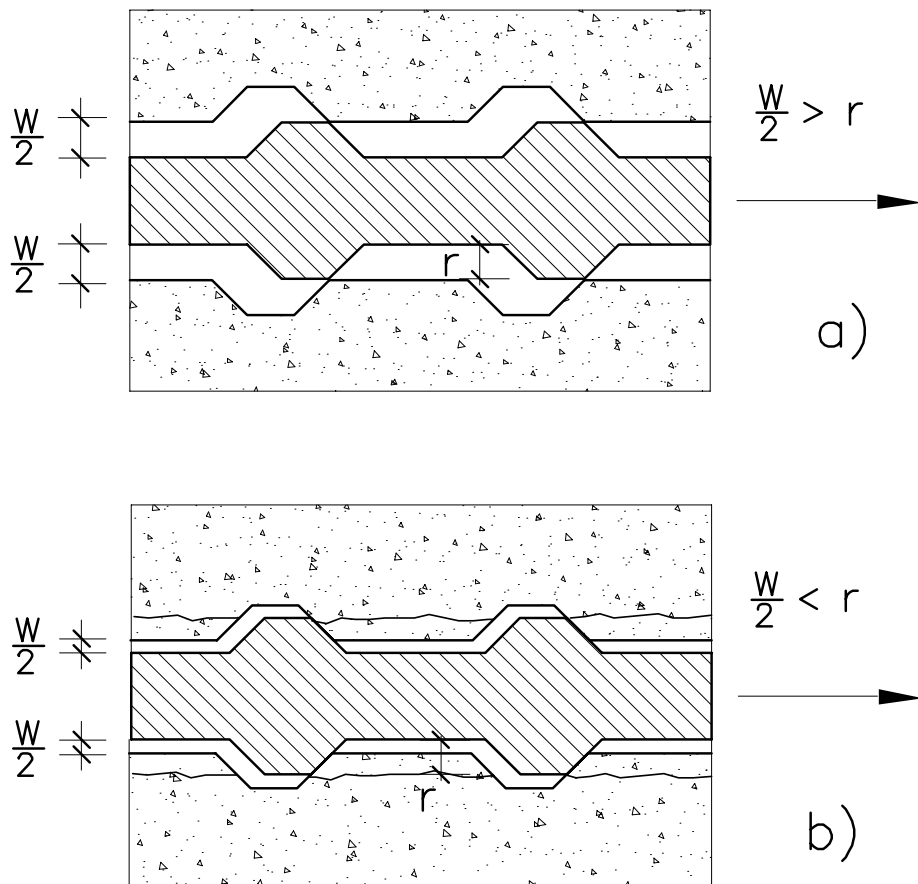


Figure 1.4: Schema illustrativo del collasso locale dell'aderenza: collasso per tranciamento dei denti di calcestruzzo (pull-out) (a); collasso per incontrollata apertura di fessure di spacco (splitting) (b) [4].

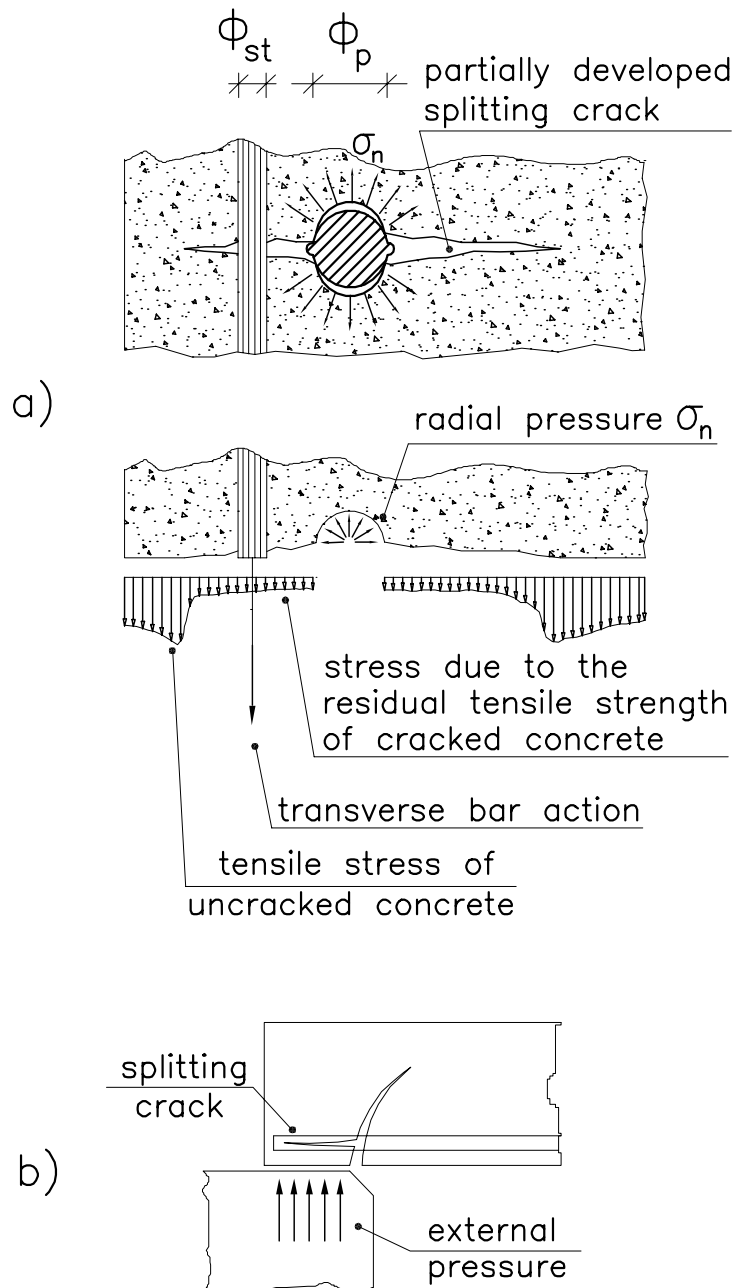


Figure 1.5: Azioni di contenimento sulla barra ancorata: azione dell'armatura trasversale e del calcestruzzo [5] (a); azione della pressione esterna (b).

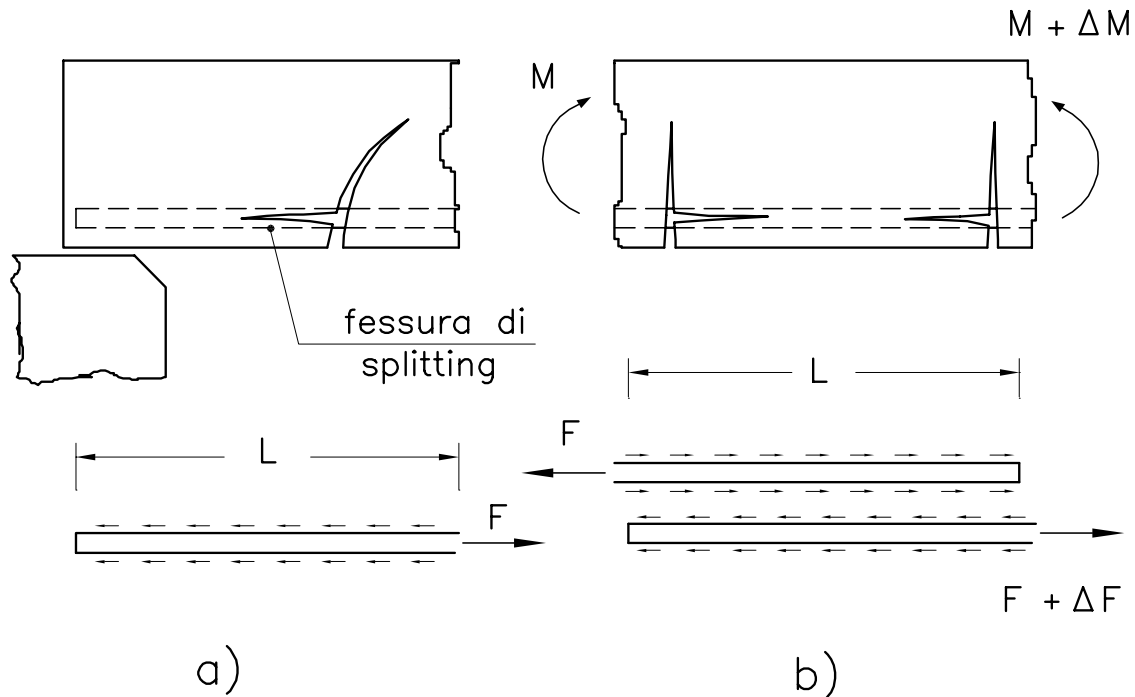


Figure 1.6: Problemi tipici dell'aderenza: ancoraggio (a); giunzione per sovrapposizione (b).

Negli ancoraggi o nelle giunzioni per sovrapposizione di barre ad aderenza migliorata aventi diametro superiore ai  $12 \div 14$  mm, a causa degli elevati tassi di lavoro raggiunti per l'acciaio, la fessurazione di splitting si manifesta frequentemente; tale fessurazione, iniziando dalle fessure flessionali dove lo sforzo di aderenza è massimo, tende a propagarsi lungo tutta la barra (Fig. 1.6). Assume quindi particolare importanza prevedere una adeguata azione di confinamento lungo la barra ancorata allo scopo di evitare il collasso di tipo fragile causato dall'improvviso sviluppo della fessura di splitting. Tale azione di confinamento potrebbe essere garantita da elevati copriferri o pressioni esterne ma soprattutto da una opportuna armatura trasversale.

Poichè il legame locale dell'aderenza è influenzato dalla fessurazione di splitting, 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 di splitting. Sulla base di relazioni teoriche e/o empiriche, fornite dai risultati di studi sui singoli fenomeni che governano l'aderenza, nel lavoro [9] è stato proposto un modello teorico per il legame locale sforzo di aderenza-slittamento in presenza di fessure di splitting. A tale modello è stato successivamente aggiunto il contributo al contenimento fornito dalla resistenza a trazione del calcestruzzo fessurato per splitting lungo il piano contenente le barre ancorate [5, 16]. I risultati del modello teorico sono stati confrontati con alcuni risultati sperimentali ottenuti sia dagli autori [9] che da altri ricercatori [18], mostrando un ottimo accordo. Un secondo modello teorico del legame locale dell'aderenza che tiene conto della fessura di splitting che si sviluppa lungo piani generici che contengono la barra è stato proposto in [19]; tale modello considera però solamente l'azione di contenimento esercitata dal calcestruzzo circostante la barra.

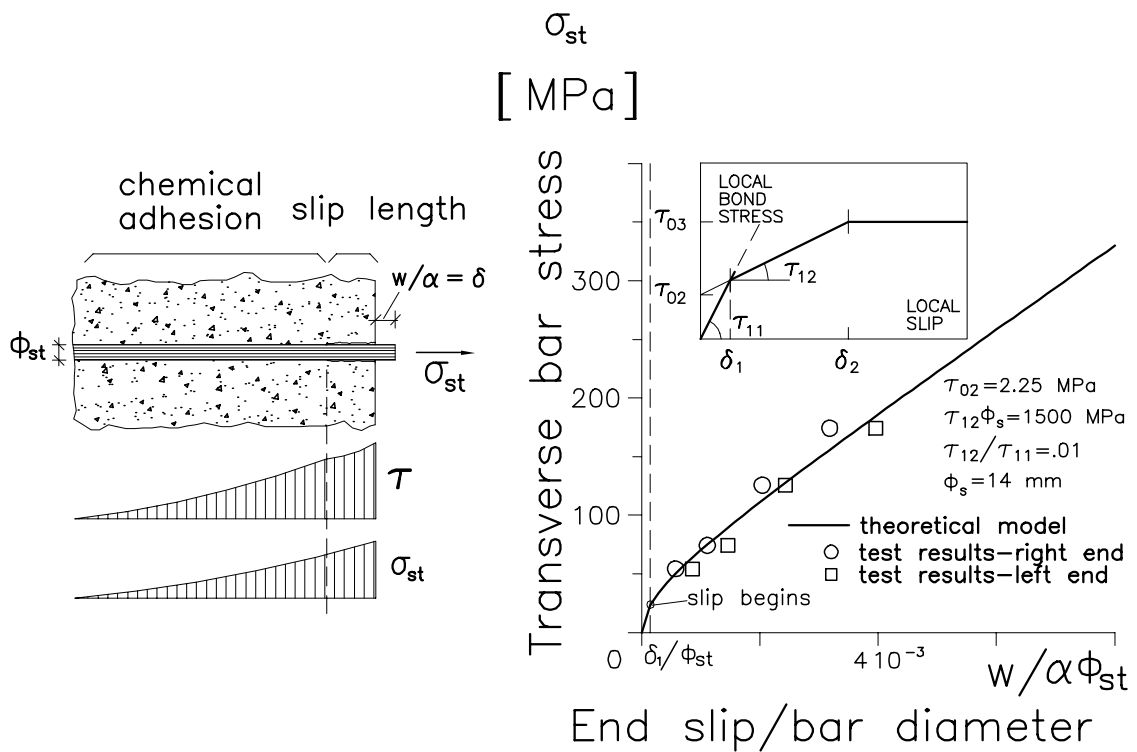


Figure 1.7: Risposta delle barre trasversali all'aumentare dell'apertura della fessura di splitting [5].

Come precedentemente sottolineato, la formulazione dei modelli di comportamento locale si è basata sui risultati degli studi dei singoli fenomeni che intervengono. In particolare, i risultati sperimentali ottenuti dal Prof. Gambarova e collaboratori [20, 21, 22] hanno mostrato il legame tra lo sforzo di aderenza e lo slittamento per diversi valori di apertura della fessura di splitting preformata, mantenuta costante durante la prova. Prove analoghe sono state condotte dal Prof. Modena e collaboratori [23]; tali prove, relative sempre a provini con fessura di splitting preformata, sono state effettuate mantenendo costante sia l'apertura della fessura di splitting che l'azione di confinamento. Sulla base dei risultati ottenuti è stato possibile formulare delle relazioni empiriche tra lo sforzo di aderenza, lo slittamento della barra e lo sforzo radiale esercitato dalle nervature sul calcestruzzo per diversi valori dell'apertura della fessura di splitting [24, 9].

Per quanto riguarda l'azione di contenimento esercitata dall'armatura trasversale, particolarmente significativi sono i risultati proposti in [25] relativi ad una formulazione teorica in forma chiusa del legame tra lo sforzo di una barra ancorata e lo slittamento massimo che si verifica in corrispondenza del punto di applicazione del carico. Tale legame governa la risposta dell'armatura trasversale di confinamento che, per effetto dell'azione radiale, si sfilava dal calcestruzzo consentendo l'apertura della fessura di splitting [26] (Fig. 1.7).

Un terzo aspetto riguarda il contenimento esercitato dal calcestruzzo, relativo sia alla sua resistenza nei confronti delle azioni circolari di trazione nella zona non fessurata che agli sforzi residui che è comunque in grado di trasmettere tra i lati della fessura di splitting per effetto degli attriti nella enucleazione degli inerti [27, 28] (Fig. 1.8).

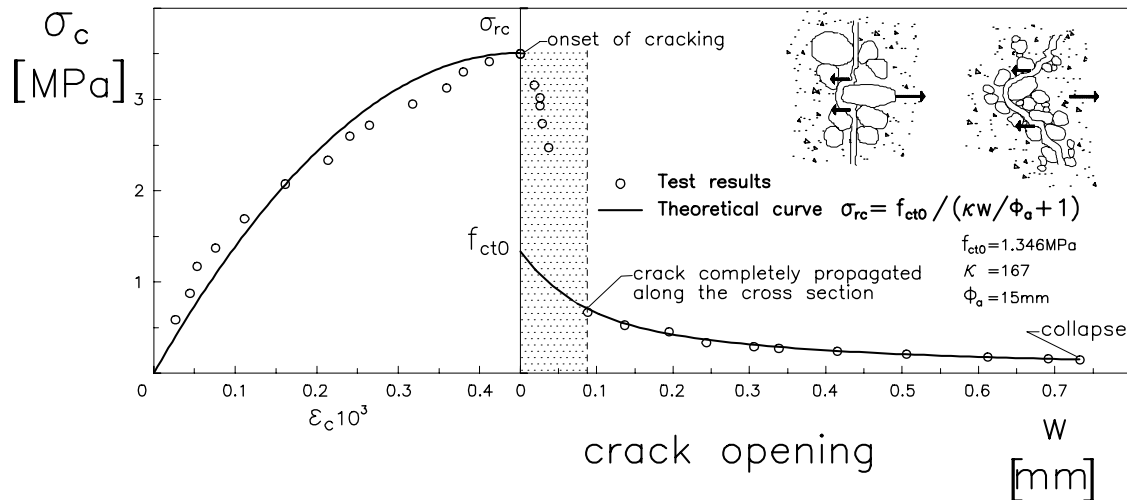


Figure 1.8: Resistenza a trazione del calcestruzzo sia in fase non fessurata, in funzione della deformazione, che in fase fessurata, in funzione dell'apertura di fessura [5].

Infine, un ultimo aspetto riguarda l'azione della pressione esterna. Gli effetti di questa azione di contenimento sono stati studiati sia sperimentalmente che teoricamente da diversi ricercatori [29, 30, 31, 32].

Allo scopo di studiare il comportamento dell'ancoraggio, i legami locali devono essere integrati lungo la barra. A causa dei numerosi parametri presenti nei modelli locali proposti, molti dei quali legati a relazioni di tipo empirico, i modelli teorici di comportamento dell'ancoraggio dovrebbero essere confrontati con i risultati di prove sperimentali. Allo scopo di facilitare la messa a punto dei parametri in gioco, le prove sperimentali dovrebbero fornire informazioni legate allo slittamento della barra ancorata, all'apertura della fessura di splitting ed alla tensione nelle armature trasversali di confinamento. Tali informazioni dovrebbero essere relative a diversi punti dell'ancoraggio per verificare l'attendibilità dell'integrazione del legame locale lungo la barra ancorata.

Scopo del presente lavoro è studiare sperimentalmente il comportamento degli ancoraggi di armature ad aderenza migliorata in presenza di armatura trasversale di confinamento, fornendo i risultati relativi sia agli slittamenti nei punti di estremità dell'ancoraggio che all'apertura della fessura di splitting, valutata in corrispondenza di ogni armatura trasversale presente. L'attenzione è rivolta al diverso comportamento dell'aderenza al variare dell'azione di contenimento dell'armatura trasversale e del calcestruzzo. A tal fine, sono state condotte due serie di prove. La prima serie si propone di studiare l'influenza dell'armatura trasversale di confinamento; a tale scopo sono stati testati tre tipi di provini, dei quali il primo senza staffe, il secondo con staffe  $\phi$  6 ed il terzo con staffe  $\phi$  8. La seconda serie si propone di studiare l'influenza del contributo del calcestruzzo di ricoprimento; a tal fine sono stati testati due tipi di provini dei quali il primo con fessura di splitting preformata ed il secondo con calcestruzzo integro lungo la barra ancorata (nel piano di sviluppo della fessura di splitting). Allo scopo di valutare l'intero quadro fessurativo che si manifesta sulla superficie del provino, in termini sia di fessure da spacco principale lungo la barra che di fessure secondarie, legate alla formazione dei coni di calcestruzzo, in due prove è stata utilizzata la tecnica del Moirè

per sovrapposizione [33, 7].



# Chapter 2

## Modello sperimentale

### 2.1 Caratteristiche provini

Allo scopo di studiare l'ancoraggio di una barra ad aderenza migliorata in presenza di armature trasversali di contenimento, sono state condotte due serie di prove sperimentali. Con la prima serie si è voluto studiare il comportamento dell'ancoraggio per diverse percentuali di armatura trasversale di contenimento, con la seconda, si è voluto studiare il contributo dovuto al solo calcestruzzo.

I provini della prima serie erano costituiti da una barra ancorata in un prisma di calcestruzzo; l'armatura di contenimento era costituita da tre barre, trasversali a quella ancorata, per ogni lato del provino (Fig. 2.1). Allo scopo di studiare l'influenza dell'armatura trasversale sono stati testati provini caratterizzati da un diverso diametro di tale armatura trasversale. In particolare, è stata impiegata armatura trasversale avente diametro  $\phi_{st} = 8$  mm nei provini 1S8P1 e 1S8P2, avente diametro  $\phi_{st} = 6$  mm nei provini 1S6P1 e 1S6P2, mentre nei provini 1NSP1 e 1NSP2 non era presente alcuna armatura trasversale.

I provini della seconda serie di prove erano caratterizzati da due barre principali ancorate con tre armature trasversali di contenimento per lato (Fig. 2.2). Allo scopo di studiare l'influenza dell'azione di contenimento del solo calcestruzzo, i provini 2S6NTP1 e 2S6NTP2 erano caratterizzati da una fessura di splitting preformata, attraverso la quale il calcestruzzo non esercitava contenimento, mentre nei provini 2S6P1 e 2S6P2 il calcestruzzo era integro e quindi in grado di esercitare azioni di contenimento con la sua resistenza a trazione, sia prima della fessurazione che a fessurazione avvenuta. Nella seconda serie di prove sono state impiegate armature trasversali aventi lo stesso diametro ( $\phi_{st} = 6$  mm) in tutti i provini. Nei provini 2S6NTP1 e 2S6NTP2, la fessura di splitting è stata preformata interrompendo la continuità del calcestruzzo lungo il piano A-A delle armature principali per mezzo di un lamierino in alluminio. (Fig. 2.2).

Le caratteristiche geometriche dei provini testati sono riportate in Tabella 2.1.

Tutte le armature sono disposte simmetricamente rispetto al piano B-B in modo che le sollecitazioni sui due blocchi di calcestruzzo  $C_1$  e  $C_2$ , che si formano con l'aprirsi della fessura di splitting (piano A-A), siano simmetriche (Figg. 2.1, 2.2).

Le barre principali, aventi diametro  $\phi_p = 20$  mm, sono state lavorate al tornio in modo da ottenere un tratto aderente lungo 18 cm con un totale di 14 nervature. La lunghezza del tratto ancorato è stata limitata dalle dimensioni della INSTRON 2714 impiegata per le prove; tale lunghezza di ancoraggio, pari a 18 cm, ed il passo delle armature trasversali, pari

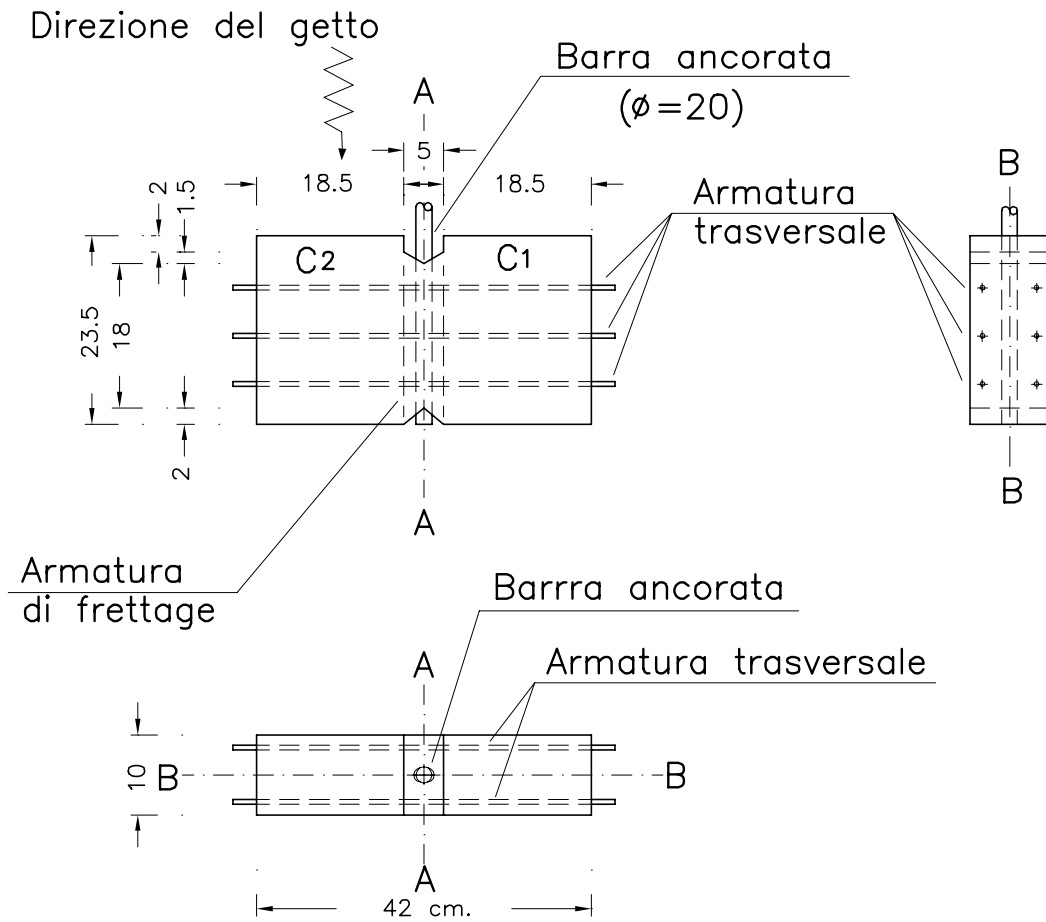


Figure 2.1: Caratteristiche geometriche dei provini impiegati nella prima serie di prove.

Provino	Armatura principale	Armatura trasversale	Fessura preformata
1NSP1	1 $\phi$ 20	assente	no
1NSP2	1 $\phi$ 20	assente	no
1S6P1	1 $\phi$ 20	6 $\phi$ 6	no
1S6P2	1 $\phi$ 20	6 $\phi$ 6	no
1S8P1	1 $\phi$ 20	6 $\phi$ 8	no
1S8P2	1 $\phi$ 20	6 $\phi$ 8	no
2S6P1	2 $\phi$ 20	6 $\phi$ 6	no
2S6P2	2 $\phi$ 20	6 $\phi$ 6	no
2S6NTP1	2 $\phi$ 20	6 $\phi$ 6	sì
2S6NTP2	2 $\phi$ 20	6 $\phi$ 6	sì

Table 2.1: Caratteristiche geometriche dei provini.

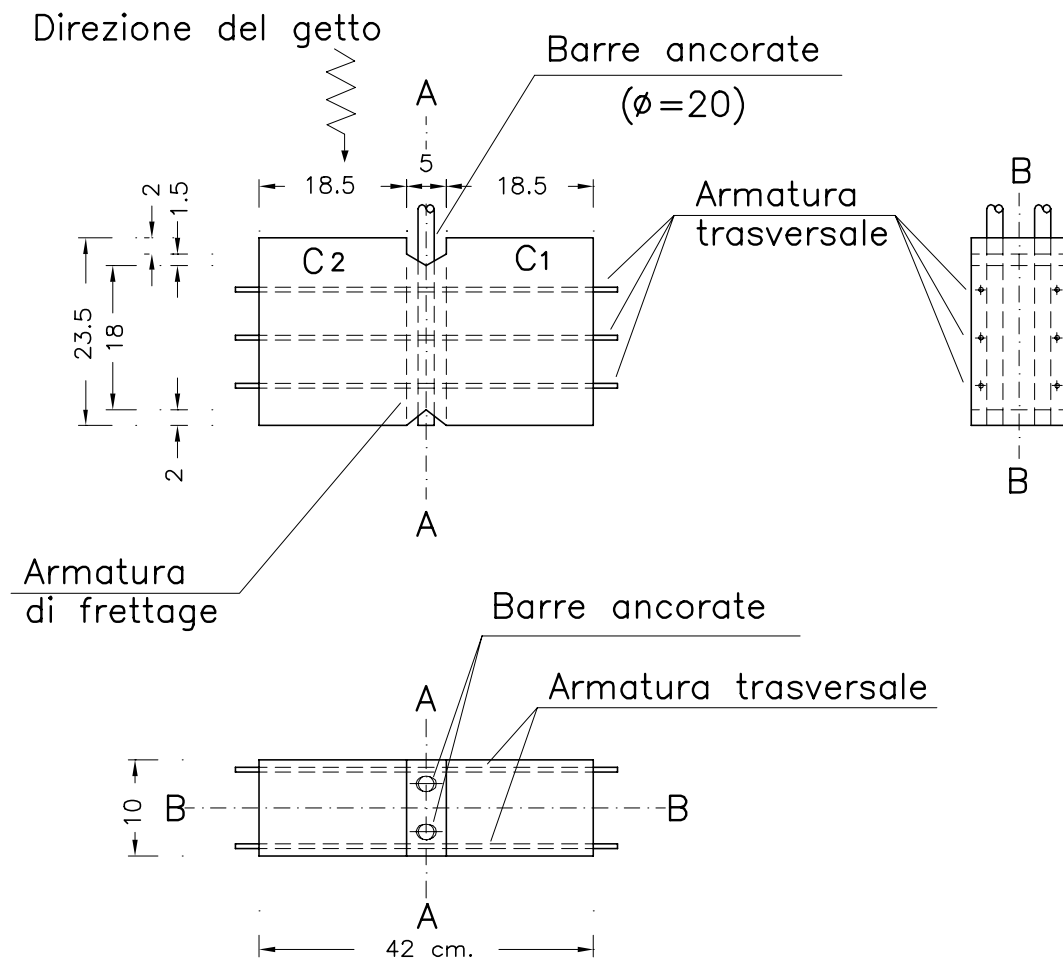


Figure 2.2: Caratteristiche geometriche dei provini impiegati nella seconda serie di prove.

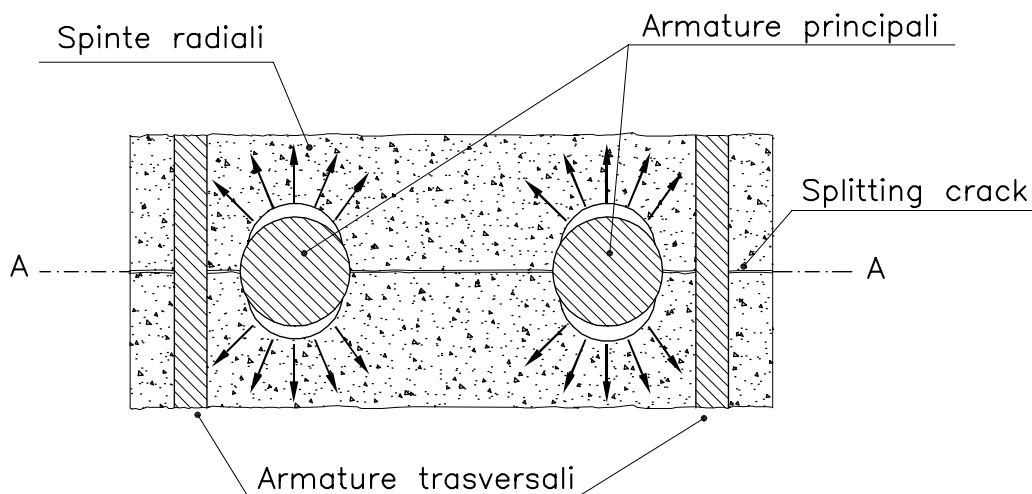


Figure 2.3: Particolare con orientamento delle nervature.

a 6 cm, risultano comunque significativi per lo studio del comportamento dell'ancoraggio. Per limitare la possibile fessurazione secondaria in piani diversi da quello principale della fessura di splitting (piano A-A di Figg. 2.1 e 2.2), soprattutto per grandi valori del carico, è stata predisposta una armatura di "frettage" costituita da due reti elettrosaldate accoppiate disposte su entrambi i lati dell'armatura principale (Figg. 2.1, 2.2). Nella preparazione del cassero si è fatto in modo che l'armatura di "frettage" non venisse in contatto con le barre trasversali e longitudinali perchè questo avrebbe comportato un notevole irrigidimento dell'ancoraggio.

Le armature trasversali di contenimento sono disposte ortogonalmente alla fessura di splitting in modo da creare una situazione simmetrica anche rispetto al piano della fessura (A-A) (Fig. 2.3); la loro lunghezza, pari alla lunghezza del provino, fa sì che il loro comportamento sia molto simile a quello di barre infinitamente lunghe.

Le nervature delle armature principali ancorate sono disposte in modo da creare spinte radiali prevalenti nella direzione delle armature di contenimento (Fig. 2.3). Le nervature delle armature secondarie sono state orientate in modo tale da evitare spinte radiali verso l'esterno (Fig. 2.4).

Il prisma di calcestruzzo presenta una gola per permettere la misurazione dello slittamento in testa (Figg. 2.1, 2.2). Per facilitare la formazione della fessura di splitting nel piano A-A, sono stati creati opportuni inviti inserendo nel cassero due cunei di legno.

Il getto è stato effettuato nella stessa direzione delle armature principali in modo da garantire un migliore comportamento del calcestruzzo nella fase di estrazione, come mostrato nelle prove di Rehm [10] (Figg. 2.1, 2.2).

## 2.2 Sistemi di misurazione

La strumentazione impiegata ha avuto lo scopo di misurare il legame sperimentale tra la forza di estrazione applicata alla barra, gli slittamenti di testa e di coda della barra e l'apertura della fessura di splitting misurata in corrispondenza dell'armatura trasversale.

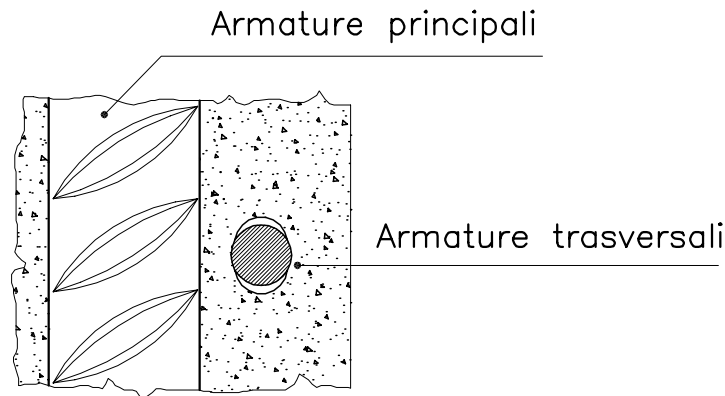


Figure 2.4: Disposizione delle nervature delle armature trasversali.

La Figura 2.5 mostra uno schema della strumentazione applicata ad un provino della seconda serie di prove.

### 2.2.1 Apertura della fessura di splitting

L'apertura delle fessure di splitting è stata rilevata in corrispondenza delle sei armature trasversali per mezzo di trasduttori di spostamento induttivi che misurano l'allontanamento dei due blocchi di calcestruzzo separati dalla fessura di splitting (Fig. 2.5).

### 2.2.2 Slittamenti di testa e di coda

Per la prima serie di prove, al fine di evitare imprecisioni nelle letture causate da eventuali rotazioni della barra, per la misura degli slittamenti sono stati posizionati due strumenti, uno per ogni lato [34] (Fig. 2.6).

Le misure relative allo spostamento di coda sono risultate molto simili tra loro in quanto l'effetto delle rotazioni in coda è attenuato dall'irrigidimento opposto dal provino stesso.

Per la seconda serie di prove (con due barre d'armatura ancorate), non essendo possibile effettuare la misurazione da entrambe le parti del provino per entrambe le barre, lo slittamento di testa e di coda è stato misurato tramite "clip gauges" (Fig. 2.7) [34]. In questo modo è stato possibile misurare lo spostamento in prossimità della barra rendendo così trascurabile l'effetto di eventuali rotazioni (Fig. 2.7).

Come mostrato nelle Figg. 2.6 e 2.7, il riferimento per la misura dello slittamento di testa e di coda delle barre è stato posizionato sulla faccia esterna del provino e non nelle immediate vicinanze della barra. Si ritiene comunque che questo non influenzi la precisione delle letture in quanto le deformazioni del calcestruzzo possono essere ritenute trascurabili.

### 2.2.3 Carico applicato alle armature ancorate

Allo scopo di misurare direttamente la forza di pull-out, sulle barre principali ancorate sono stati applicati "strain-gauges" [34]; le misure ottenute sono state comunque confrontate con

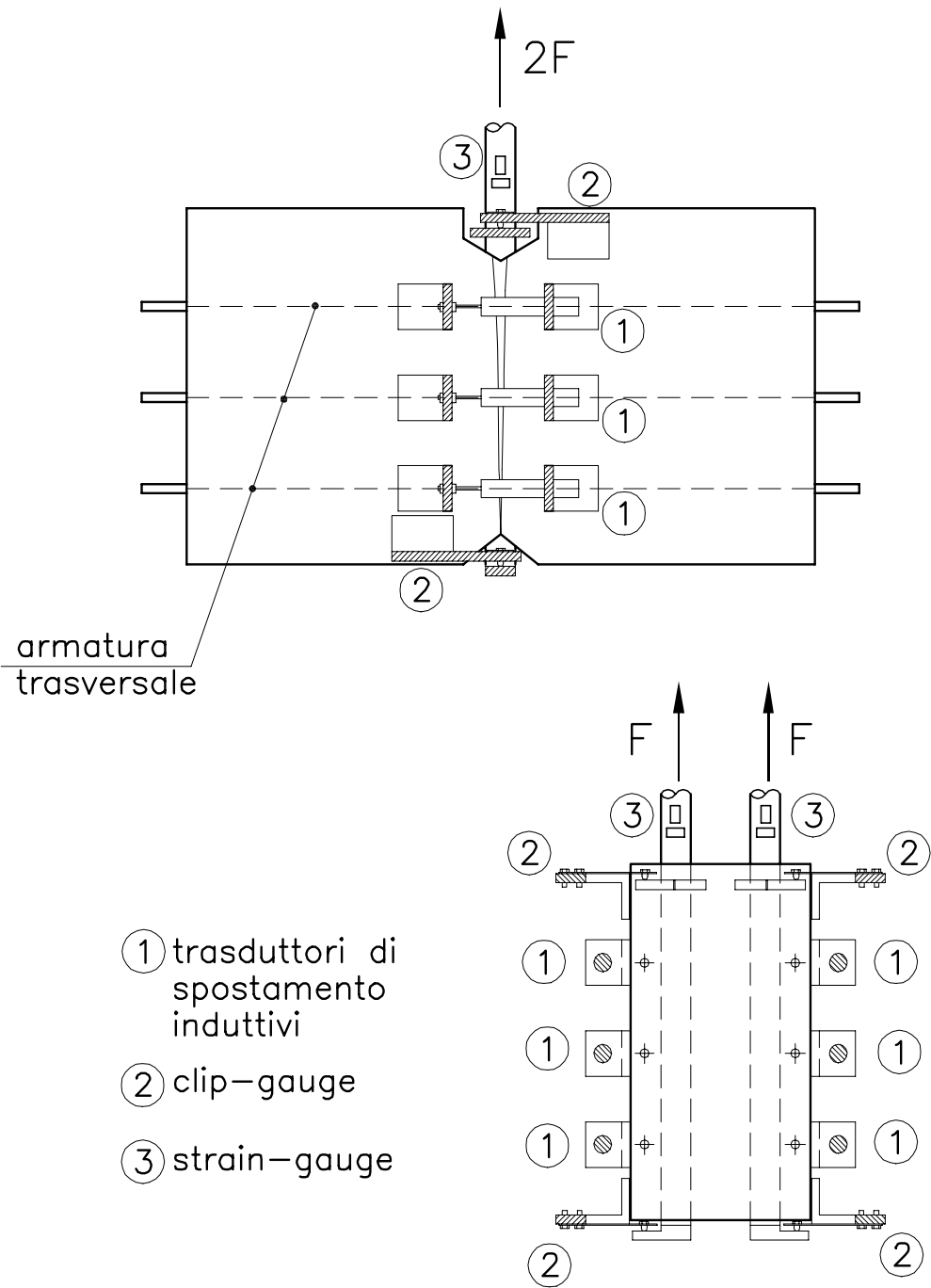


Figure 2.5: Schema della strumentazione applicata ai provini della seconda serie.

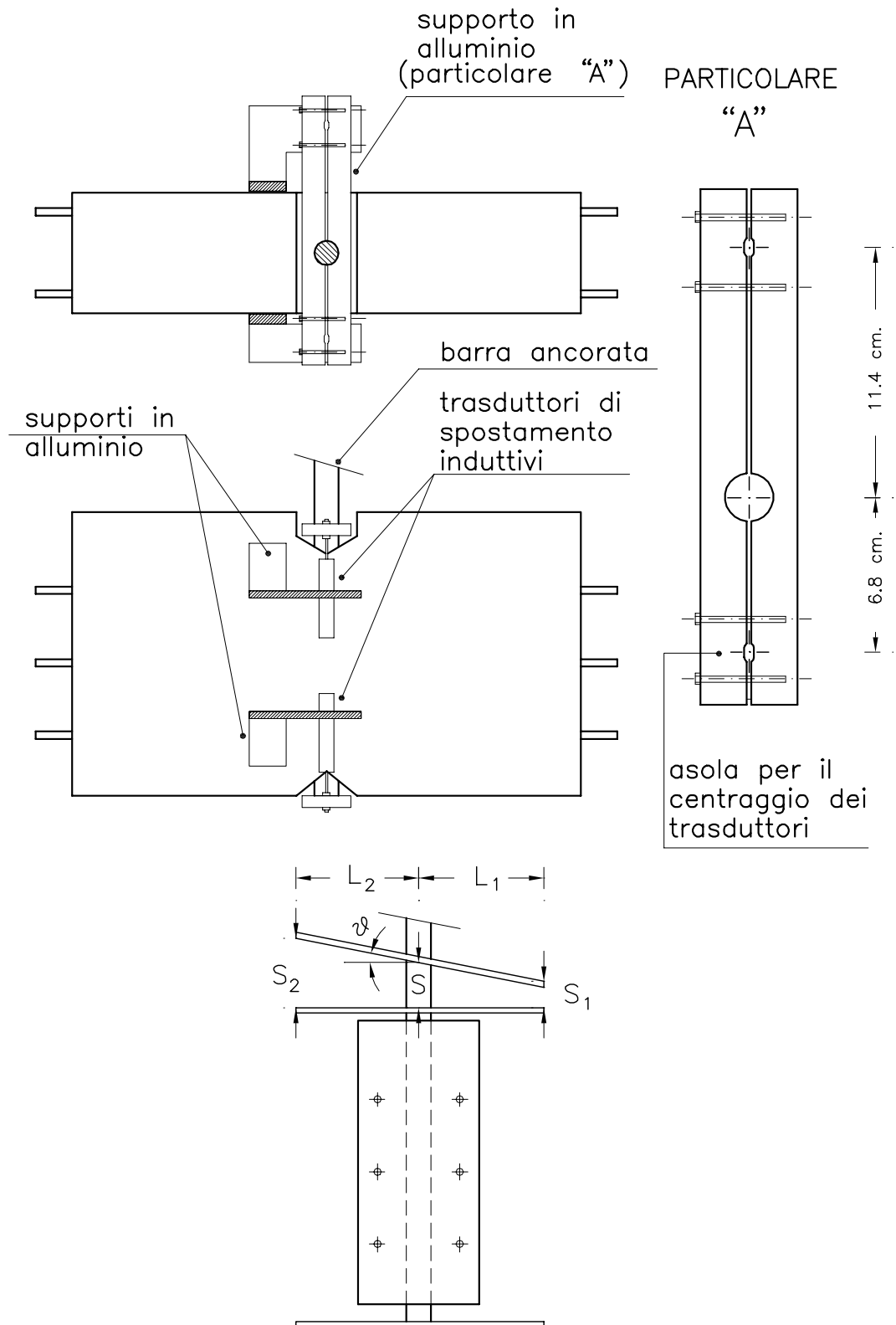


Figure 2.6: Sistema per la misura dello slittamento di testa e di coda nei provini della prima serie di prove.

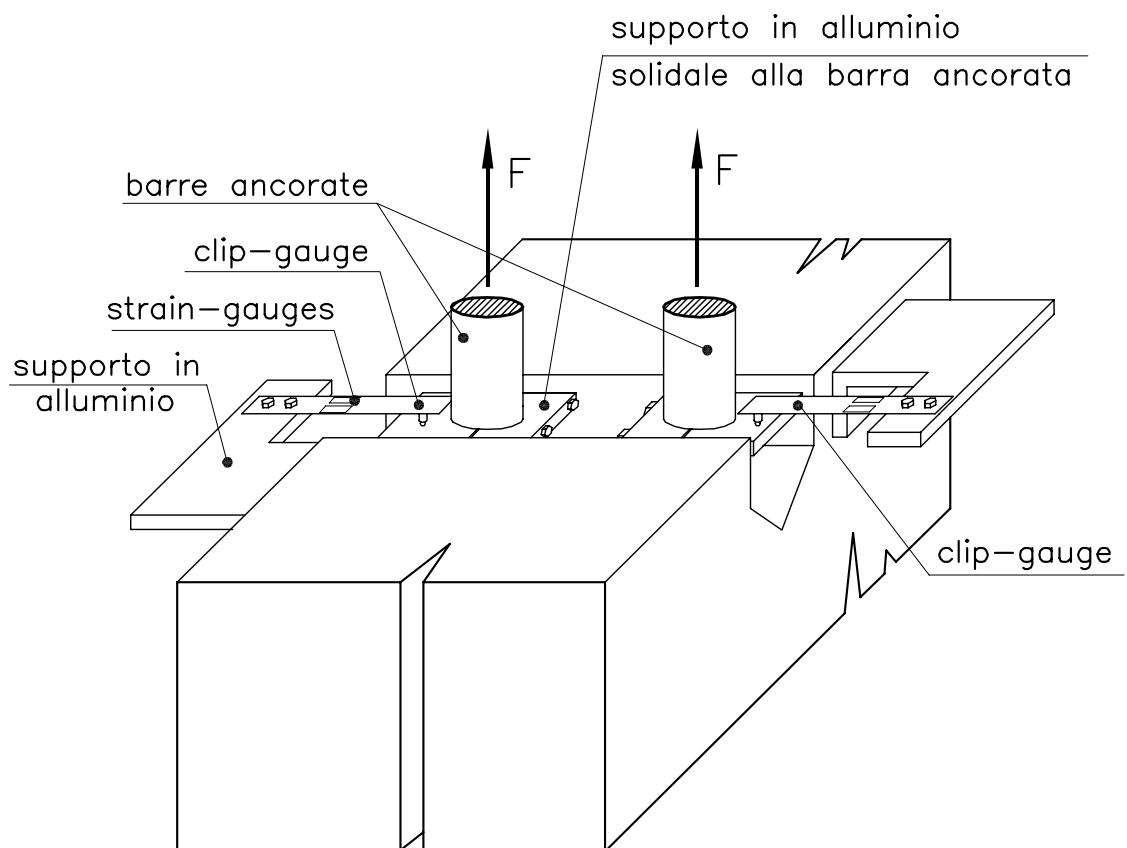


Figure 2.7: Particolare dei “clip gauges”.



quelle fornite direttamente dalla centralina elettronica della INSTRON 2714. Il confronto ha sempre mostrato un ottimo accordo tra le misure ottenute dai due sistemi.

#### **2.2.4 Quadro fessurativo**

Allo scopo di valutare l'intero quadro fessurativo che si manifesta sulla superficie del provino, in termini sia di fessura principale da spacco che di fessure secondarie legate alla formazione dei coni di calcestruzzo, nelle prove 2S6P2 e 2S6NTP2 è stata utilizzata la tecnica del Moirè per sovrapposizione di retini [34, 33, 7]. Negli altri provini la misura della lunghezza della fessura di splitting è stata effettuata con l'ausilio di una lente d'ingrandimento; per facilitare le letture, sulla superficie del provino era stata preventivamente eseguita una rasatura in gesso in corrispondenza della zona di formazione della fessura di splitting.

# Chapter 3

## Descrizione del banco

Il banco di prova, riportato in Fig 3.2, è stato appositamente progettato per soddisfare le seguenti esigenze:

- Avere piccola eccentricità tra il carico di estrazione  $F/2$  e la reazione di contrasto  $R/2$ , in modo da limitare le flessioni che interferirebbero sulla formazione e sulla propagazione della fessura di splitting nel provino a causa delle compressioni (Figura 3.1).
- Consentire ai blocchi di calcestruzzo  $C_1$  e  $C_2$  di allontanarsi tra di loro così da permettere la libera apertura della fessura (Figura 3.1a). La distanza tra le cerniere “H” ed il provino è tale da rendere molto piccola la rotazione relativa tra i due blocchi di calcestruzzo  $C_1$  e  $C_2$  così da poter considerare, nell’ambito dei valori di apertura di fessura di splitting previsti, il movimento tra i blocchi stessi come una traslazione.
- Avere la possibilità di effettuare sia prove di pull-out che di push-in per poter cogliere l’andamento della curva sforzo di aderenza-slittamento anche nella fase di rientro dell’armatura.

A tale scopo è stato realizzato un banco composto da due profilati in acciaio che costituiscono i contrasti del banco, collegati tra loro da 8 piatti d’acciaio (Figura 3.2a).

Due squadre di acciaio sono collegate al contrasto superiore per mezzo di cerniere (H) realizzate mediante una riduzione dello spessore delle squadre stesse (Fig. 3.2b); tali cerniere oppongono poca resistenza alla libera apertura della fessura di splitting tra i due blocchi di calcestruzzo  $C_1$  e  $C_2$ , che risultano così collegati tra loro tramite il calcestruzzo e l’armatura trasversale. La resistenza opposta dalle cerniere all’apertura della fessura di splitting è stata determinata misurando la forza necessaria per avere un certo spostamento tra le basi inferiori delle squadre d’acciaio (Fig. 3.2a). La curva di taratura, riportata in [34], mostra come l’azione di contenimento esercitata dalle cerniere sia trascurabile rispetto alle forze in gioco. Le squadre in acciaio sono state dimensionate in modo da essere sufficientemente rigide da garantire che i due blocchi di calcestruzzo possano avere solamente rotazione rigida attorno alle cerniere “H” minimizzando così le eventuali deformazioni flessionali parassite che influenzerebbero la formazione della fessura.

Il banco è collegato alla macchina di prova superiormente tramite una scatola d’acciaio alla quale erano vincolate le armature longitudinali del provino ed inferiormente tramite un tirante collegato al contrasto inferiore del banco per mezzo di uno snodo sferico (Fig. 3.3). Il collegamento superiore è stato studiato per poter effettuare anche prove di push-in, tramite

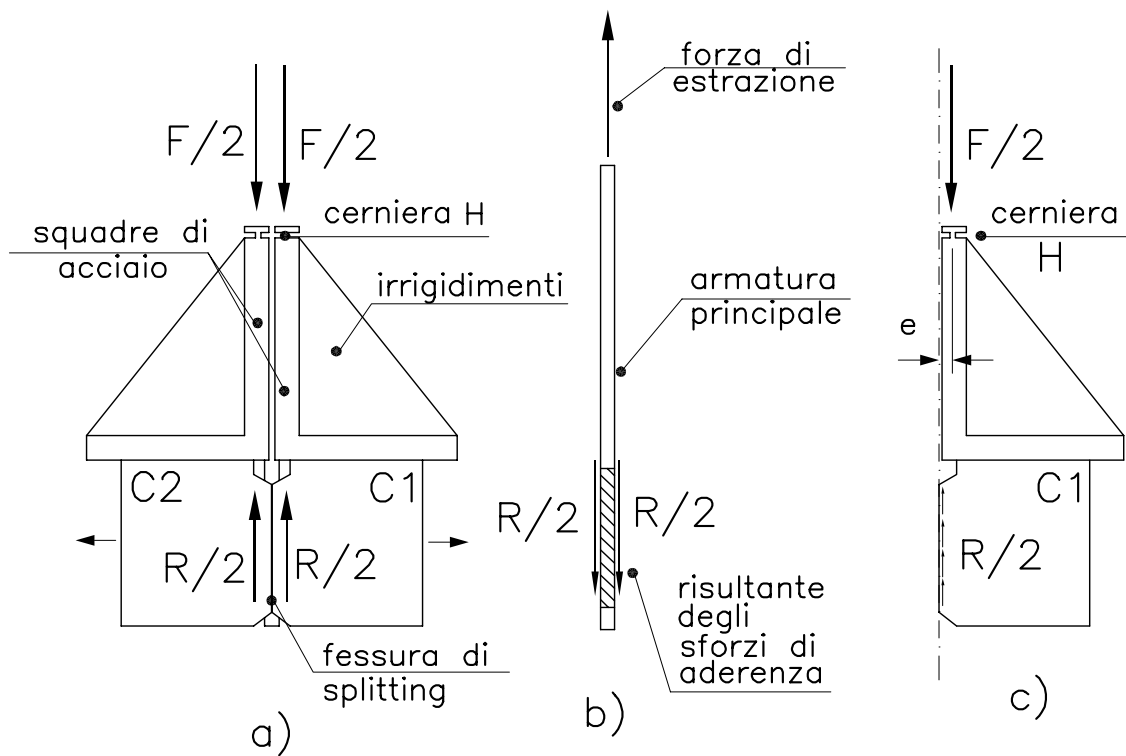


Figure 3.1: Schematizzazione delle forze agenti sull'armatura principale e sui contrasti (a); Forze presenti sulla barra ancorata (b); Schema statico delle forze causate dall'eccentricità (c).

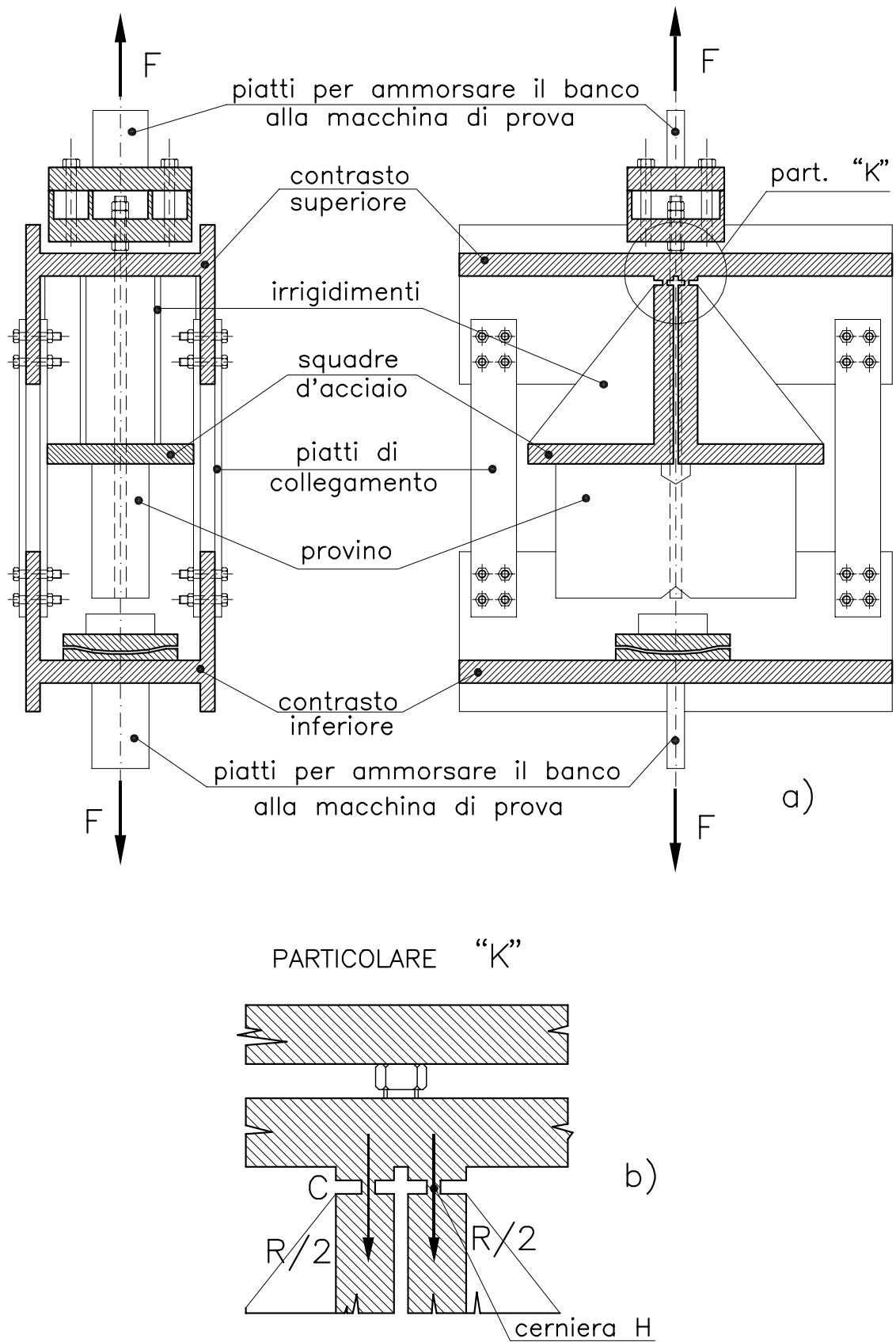
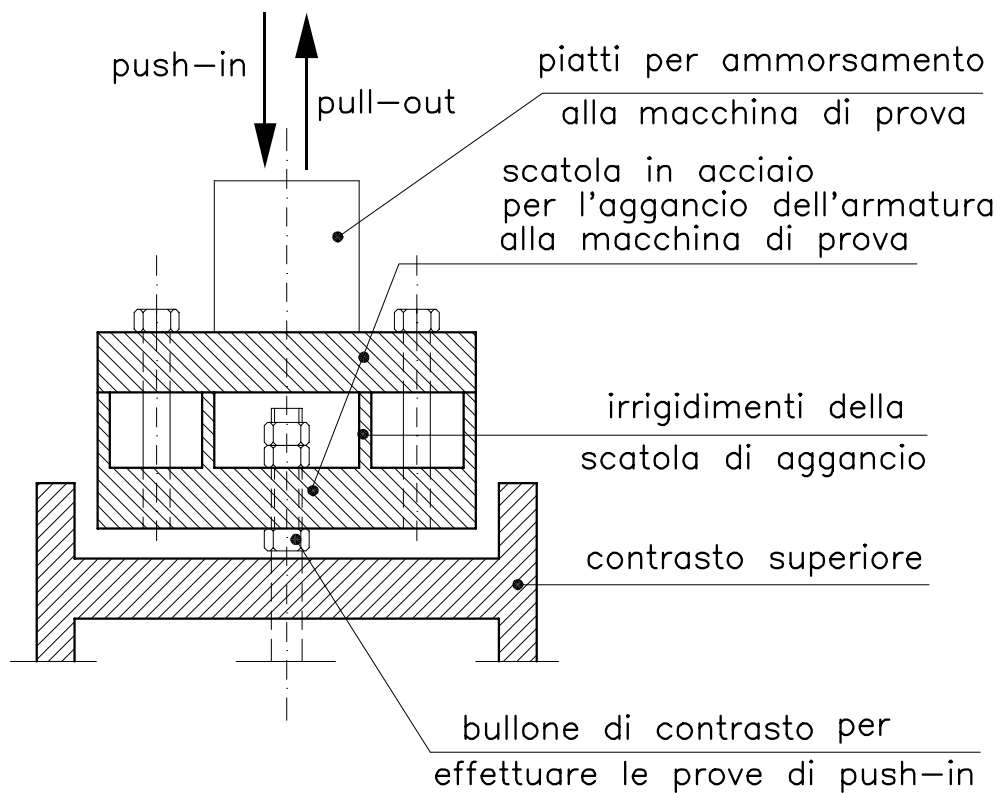


Figure 3.2: Banco di prova (a); Particolare delle cerniere (b).

l'inserimento di un dado posto sulla barra sotto la piastra di ancoraggio alla macchina di prova (Figura 3.3a).

Il banco nel suo complesso si può ritenere sufficientemente rigido per poter condurre prove a controllo di spostamento.

### aggancio superiore



### aggancio inferiore

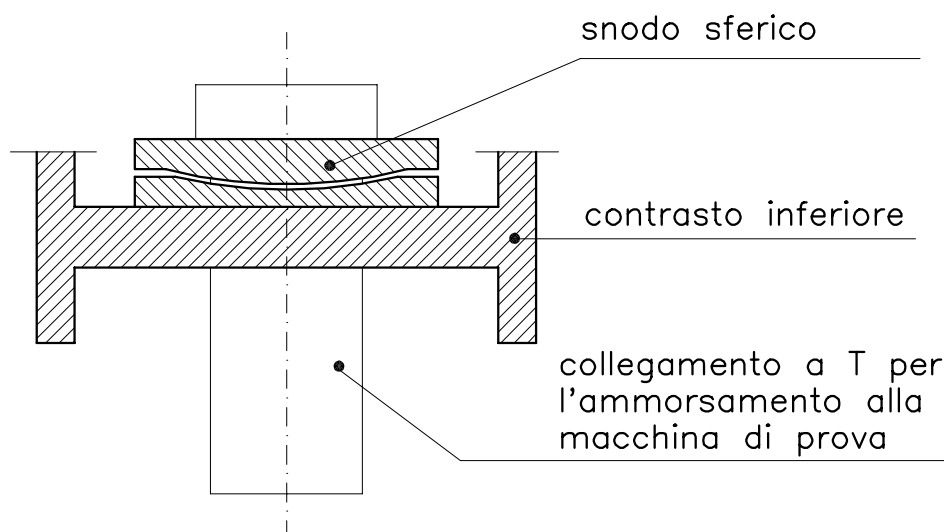


Figure 3.3: Collegamento superiore (a) ed inferiore (b) del banco alla macchina di prova.

# Chapter 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. Tali prove sono state condotte in controllo di spostamento imponendo uno spostamento della macchina di prova pari a 0.003 mm/min fino al raggiungimento del carico di picco oltre il quale la velocità di slittamento veniva aumentata gradualmente fino a 0.006 mm/min. In realtà la velocità di spostamento effettiva sull'armatura è risultata ben inferiore a quella imposta dalla macchina di prova a causa dei giochi presenti nelle unioni bullonate del banco e delle deformazioni elastiche della barra sul tratto non ancorato. La Figura 4.1 mostra l'andamento tipico dello slittamento di testa dell'armatura longitudinale in funzione del tempo fino al raggiungimento del carico di picco. La velocità media nell'intervallo compreso tra l'inizio della prova ed il raggiungimento del carico di picco è di 0.0006 mm/min; tale velocità di spostamento consente di considerare la prova di tipo quasi statico.

Le prove sono state condotte fino al raggiungimento di un valore dello slittamento di testa pari a 4÷5 mm. Durante le prove sono stati previsti alcuni cicli di scarico e ricarica.

I dati provenienti dagli strain-gauges e dai trasduttori di spostamento induttivi (2.2) sono stati registrati da una centralina elettronica UPM-100 della HBM ogni 4 secondi, in modo da cogliere dettagliatamente l'andamento della prova, e quindi memorizzati su un personal computer collegato alla centralina stessa (Fig. 4.2).

Nei provini con i retini Moirè sono state fotografate le frange d'interferenza con un passo di carico di  $\simeq 2.0$  kN.

Nei provini 1S8P1, 1S6P2 e 1S8P2, una volta raggiunto lo slittamento massimo della barra, si è proceduto allo scarico del provino e alla successiva applicazione di un carico di segno opposto ("push-in") fino al rientro dell'armatura.

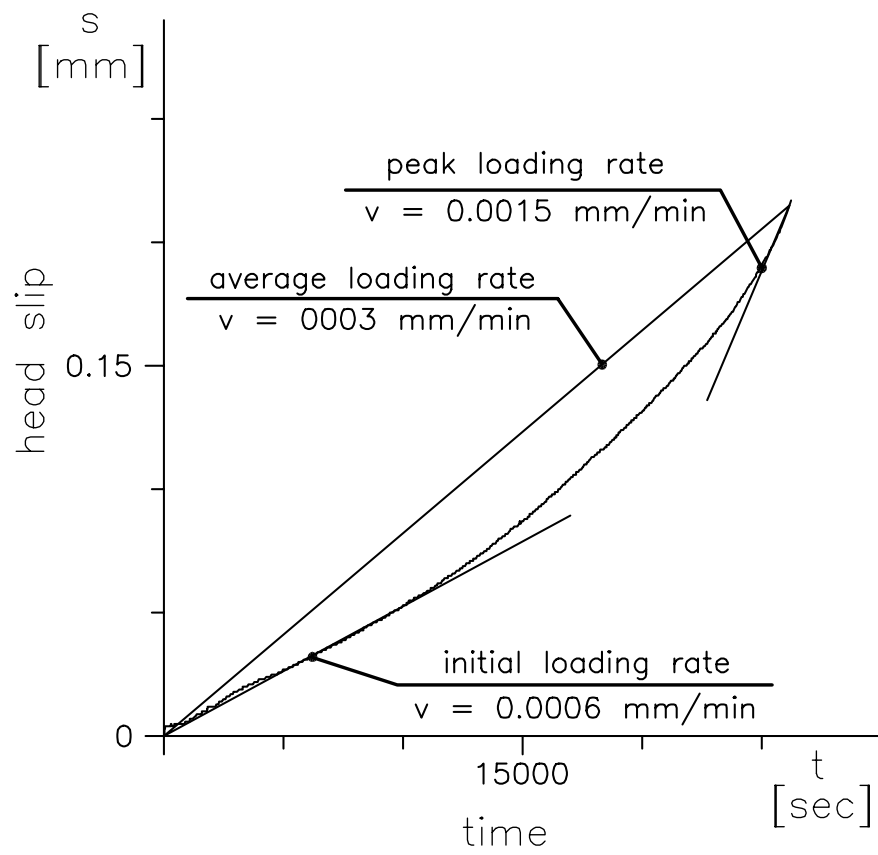


Figure 4.1: Curva degli slittamenti di testa in funzione del tempo, riportati fino al carico di picco.



Figure 4.2: Vista d'insieme dell'intera strumentazione usata durante la prova.

# Chapter 5

## Caratteristiche dei materiali

### 5.1 Calcestruzzo

Per entrambe le prove è stato impiegato un calcestruzzo di classe  $R_{ck} \cong 30$  MPa. La composizione del calcestruzzo impiegato per la prima serie di prove è mostrata in Tabella 5.1, mentre quella impiegata per la seconda serie di prove è mostrata in Tabella 5.2.

Cemento (R325) [kg/m <sup>3</sup> ]	Acqua [l/m <sup>3</sup> ]	rapp. A/C	Inerti [kg/m <sup>3</sup> ]	Add. Superfluid. [l/m <sup>3</sup> ]
325	175	0.54	1853	3.3

Table 5.1: Componenti della miscela di calcestruzzo impiegata per la prima serie di prove.

Cemento (R325) [kg/m <sup>3</sup> ]	Acqua [l/m <sup>3</sup> ]	rapp. A/C	Inerti [kg/m <sup>3</sup> ]	Add. Superfluid. [l/m <sup>3</sup> ]
325	194	0.597	1853	3.3

Table 5.2: Componenti della miscela di calcestruzzo impiegata per la seconda serie di prove.

Per entrambi i calcestruzzi gli inerti sono stati proporzionati in peso secondo le percentuali mostrate in Tabella 5.3.

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.

La scasseratura è stata eseguita dopo 72 ore dal getto.

Lo “slump” dei calcestruzzi della prima e seconda serie di prove è risultato di 11 cm e 7 cm rispettivamente.

Per valutare le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo sono stati confezionati sei cilindri, aventi un diametro di 10 cm e una lunghezza di 30 cm, e cubetti di calcestruzzo, aventi lato di 15 cm, in numero pari al doppio dei provini confezionati. I provini, i cubetti ed i cilindri

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 5.3: Composizione degli inerti per 1 m<sup>3</sup> di calcestruzzo.

di calcestruzzo hanno avuto maturazione in laboratorio, con umidità relativa pari a circa il 70 %. Sui cilindri di calcestruzzo, dopo 28 gg. di maturazione, sono state effettuate prove per la determinazione del modulo elastico e della resistenza, sia a compressione che a trazione con prove di trazione diretta. I risultati ottenuti sono descritti nel seguito.

- Per la prima serie di prove:

Resistenza cilindrica media a compressione	$f_{cm}$	=	34.5	MPa
Resistenza cilindrica media a trazione	$f_{ctm}$	=	2.75	MPa
Modulo elastico tangente (UNI – 6556)	$E_t$	=	306000	MPa
Modulo elastico secante (UNI – 6556)	$E_s$	=	262000	MPa
Velocità di carico per la misura di E	$v_c$	=	0.015	MPa/sec

- per la seconda serie di prove:

Resistenza cilindrica media a compressione	$f_{cm}$	=	28.3	MPa
Resistenza cilindrica media a trazione	$f_{ctm}$	=	2.61	MPa
Modulo elastico tangente (UNI – 6556)	$E_t$	=	290000	MPa
Modulo elastico secante (UNI – 6556)	$E_s$	=	260000	MPa
Velocità di carico per la misura di E	$v_c$	=	0.015	MPa/sec

I provini cubici sono stati impiegati per la determinazione della resistenza a compressione al momento della prova (determinata su due cubetti). I risultati ottenuti sono raccolti in Tabella 5.4.

## 5.2 Acciaio

L'acciaio delle barre utilizzate nelle prove è di tipo Fe B 44K ad aderenza migliorata. Per le barre principali è stato impiegato acciaio non saldabile, nel quale le nervature si presentano

Provino	Maturazione [giorni]	Resistenza cubica $f_c$ [MPa]
1S6P1	39	38.1
1NSP1	52	39.4
1NSP2	60	37.3
1S8P1	68	40.0
1S6P2	75	39.4
1S8P2	81	39.7
2S6P1	38	31.9
2S6NTP1	42	33.0
2S6P2	49	32.1
2S6NTP2	54	33.6

Table 5.4: Resistenza cubica del calcestruzzo al momento delle prove

parallele su entrambi i lati della barra (Fig. 5.1) cioè dello stesso tipo di quello impiegato in precedenti prove sperimentali sull'aderenza [21, 9].

Nella Tabella 5.5 sono riportati i valori dei parametri geometrici e meccanici relativi alle barre longitudinali impiegate. I dati in essa elencati soddisfano le limitazioni ammesse dalla Normativa Italiana.

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

Table 5.5: Caratteristiche geometriche e meccaniche delle barre di armatura

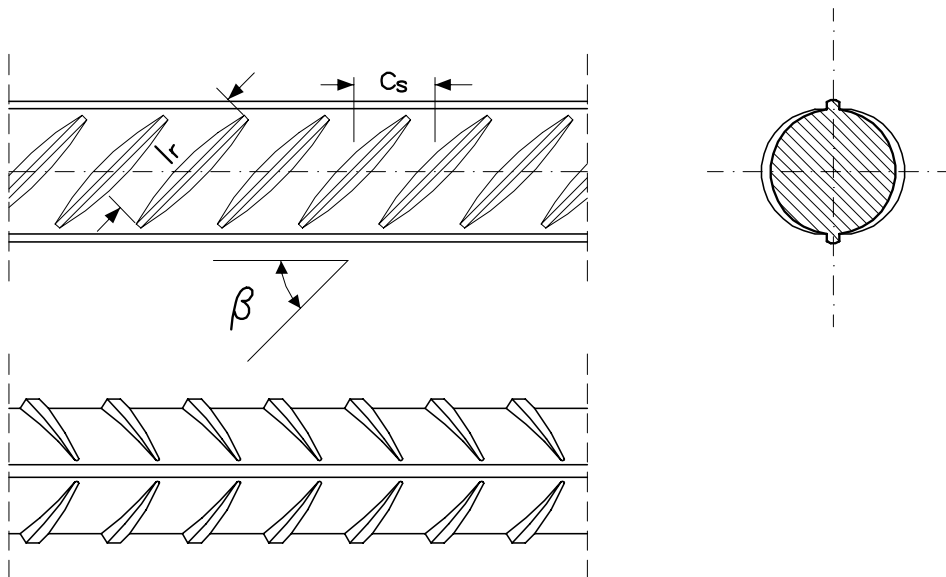


Figure 5.1: Particolare delle barre d'armatura.

# Chapter 6

## Risultati sperimentali

### 6.1 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 di splitting in corrispondenza delle armature trasversali di confinamento. Nella Tabella 6.1 sono indicati, per ciascuna prova, i valori della forza massima di estrazione  $F_{max}$  applicata all'armatura principale di diametro  $\phi_p$ , dello slittamento di testa in corrispondenza del carico di picco e della tensione di aderenza massima, supposta uniformemente distribuita lungo l'intero ancoraggio di lunghezza  $3 \Delta z$ , così ricavata:

$$\tau_{media} = \frac{F_{max}}{3\pi\phi_p\Delta z}$$

dove  $\Delta z$  è il passo dell'armatura trasversale ( $\Delta z = 60$  mm).

Le Figg. 6.1 ÷ 6.10 mostrano, nel quadrante superiore, il diagramma della forza di estrazione in funzione degli slittamenti di testa e di coda; in quello inferiore sono riportate le aperture  $w_{s1}$ ,  $w_{s2}$ ,  $w_{s3}$ , della fessura da spacco longitudinale, misurate in corrispondenza delle armature trasversali di confinamento. Le curve delle fessure di splitting sono relative ad entrambi i lati del provino e sono riportate in funzione dello slittamento di testa della barra ancorata. Per ogni prova vengono riportate sia le curve complete, cioè fino ad un valore di slittamento pari a 4 mm, che le curve relative alla fase iniziale della prova fino al raggiungimento del picco.

Nelle prime due prove della prima serie (1S6P1, 1NTP1), servite anche per la messa a punto della strumentazione e della tecnica di sperimentazione, è stato possibile rilevare solamente la forza massima di estrazione, riportata in Tabella 6.1.

La Figura 6.1, relativa al provino 1NSP1 senza armatura trasversale, mostra che il collasso 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.

Per il provino "1S8P1" non è riportata la curva completa poichè la prova è stata interrotta prima del raggiungimento del carico massimo.

La Figura 6.5, relativa al provino "1S8P2", mostra le stesse curve della Fig. 6.4, includendo però anche il tratto finale della prova relativo all'inversione del carico (push-in) sulla barra nel provino.

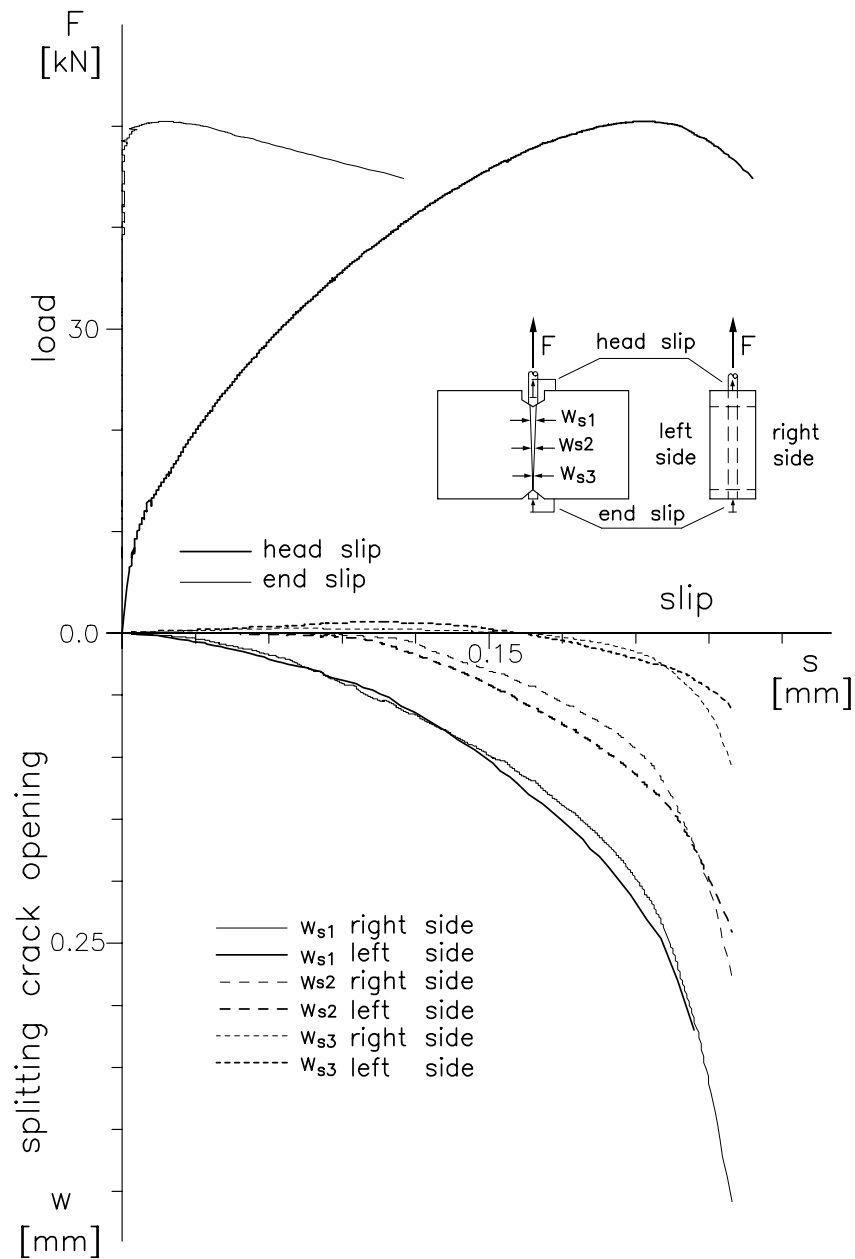


Figure 6.1: Diagramma completo del carico  $F$  e dell'apertura delle fessure di splitting  $w_{s1}$ ,  $w_{s2}$ ,  $w_{s3}$  in funzione dello slittamento di testa della barra ancorata, relativo al provino 1NSP2.

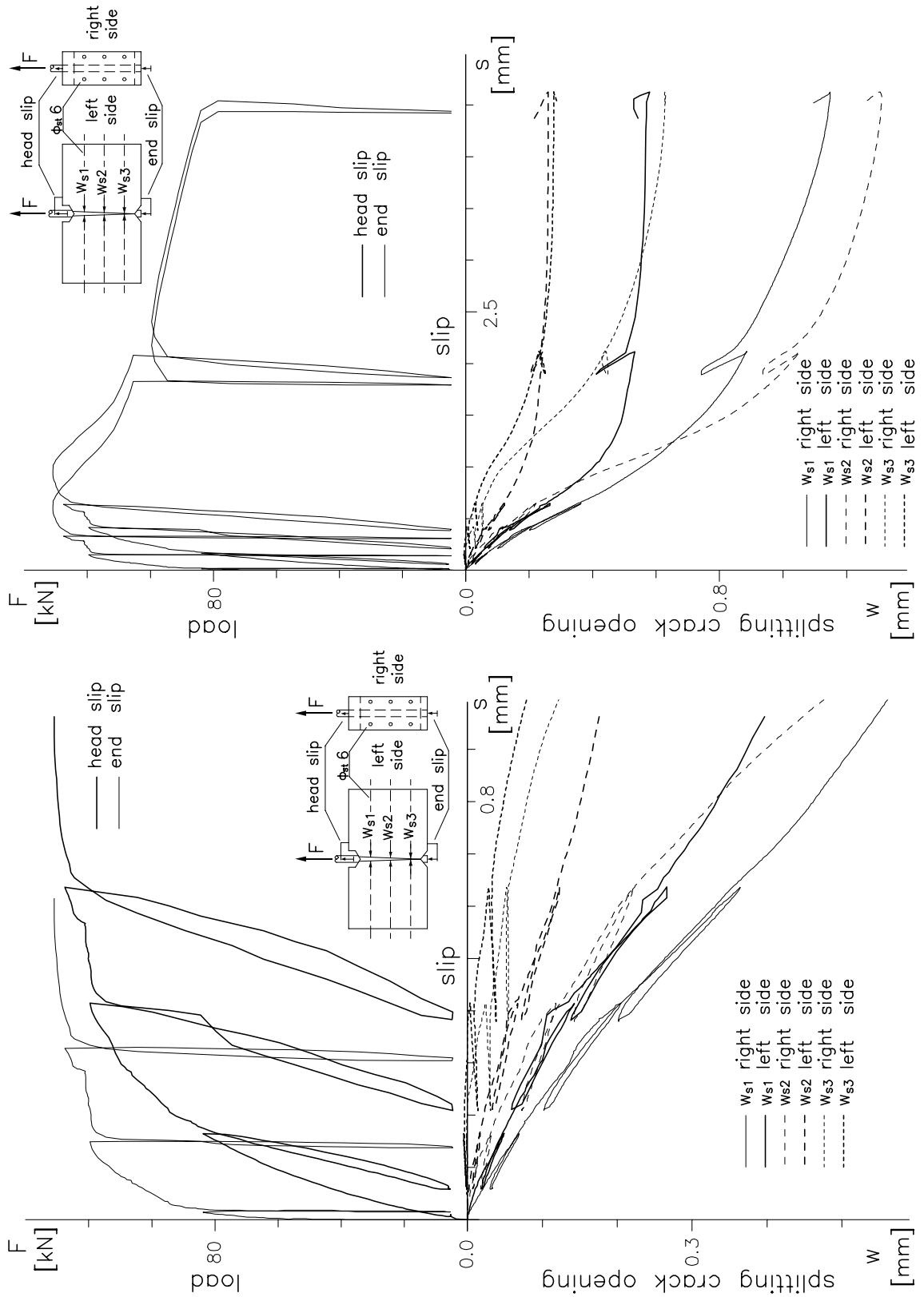


Figure 6.2: Diagramma del carico  $F$  e dell'apertura delle fessure di splitting  $w_{s1}$ ,  $w_{s2}$ ,  $w_{s3}$  in funzione dello slittamento di testa della barra ancorata, relativo al provino 1S6P2 riportato integralmente e fino al valore di picco del carico.



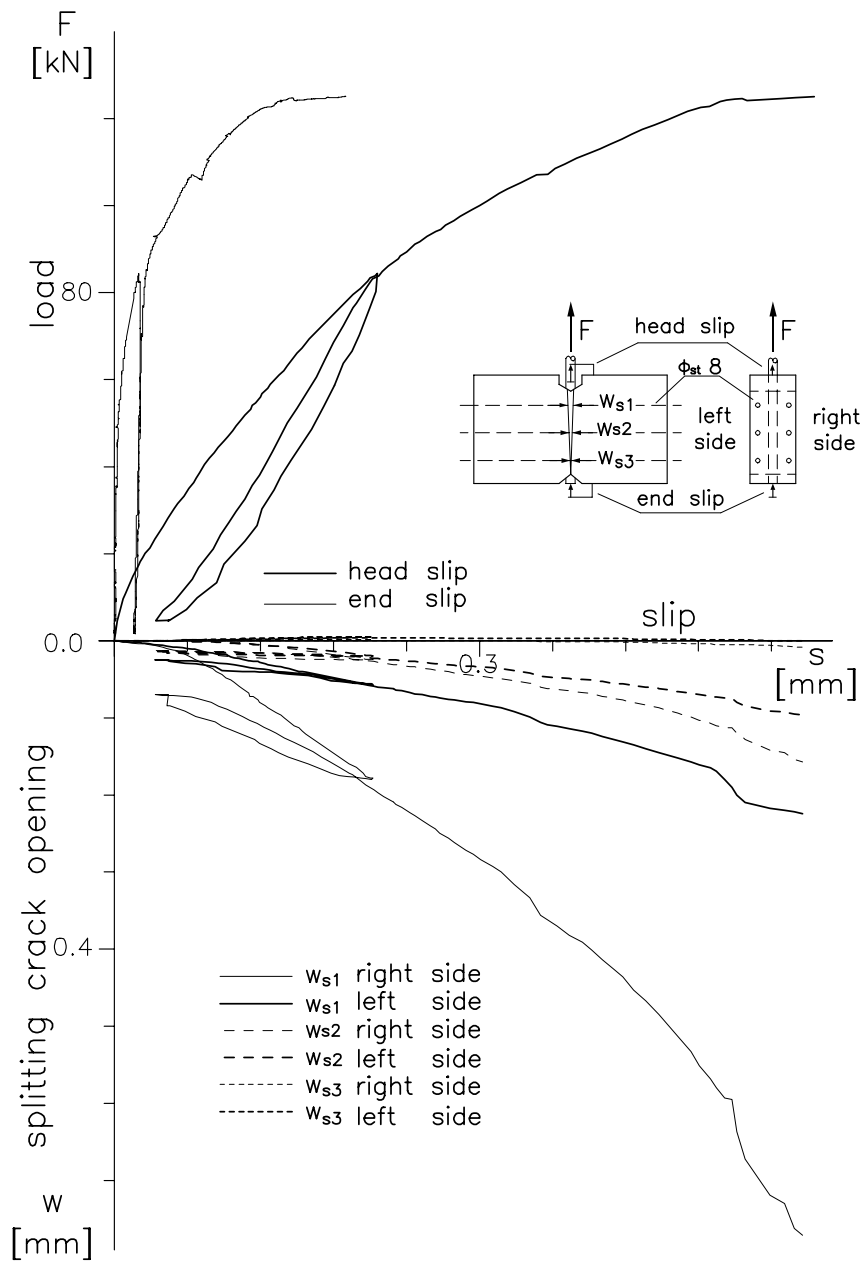


Figure 6.3: Diagramma completo del carico  $F$  e dell'apertura delle fessure di splitting  $w_{s1}$ ,  $w_{s2}$ ,  $w_{s3}$  in funzione dello slittamento di testa della barra ancorata, relativo al provino 1S8P1.

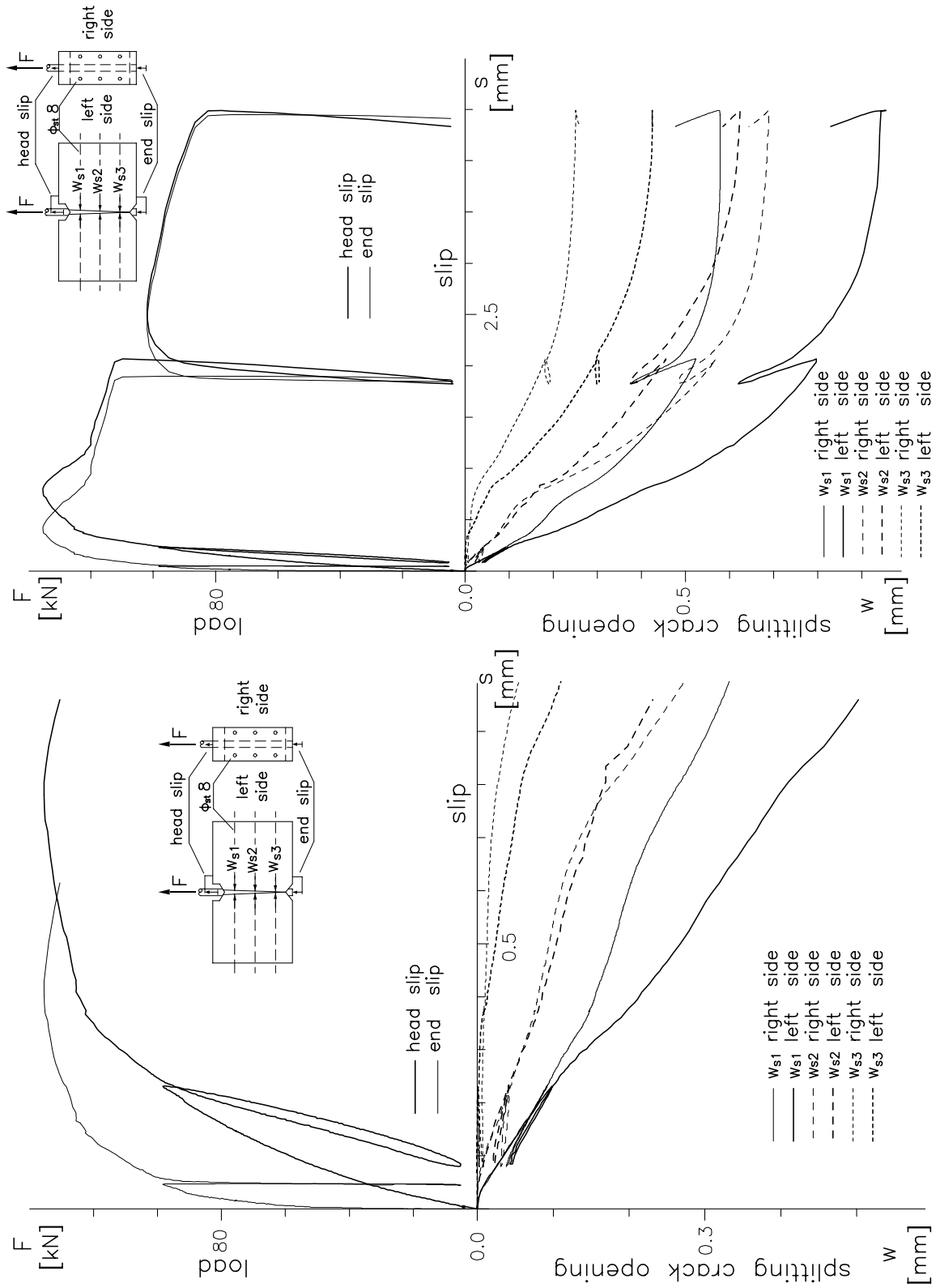


Figure 6.4: Diagramma del carico  $F$  e dell'apertura delle fessure di splitting  $w_{s1}$ ,  $w_{s2}$ ,  $w_{s3}$  in funzione dello slittamento di testa della barra ancorata, relativo al provino 1S8P2 riportato integralmente e fino al valore di picco del carico.

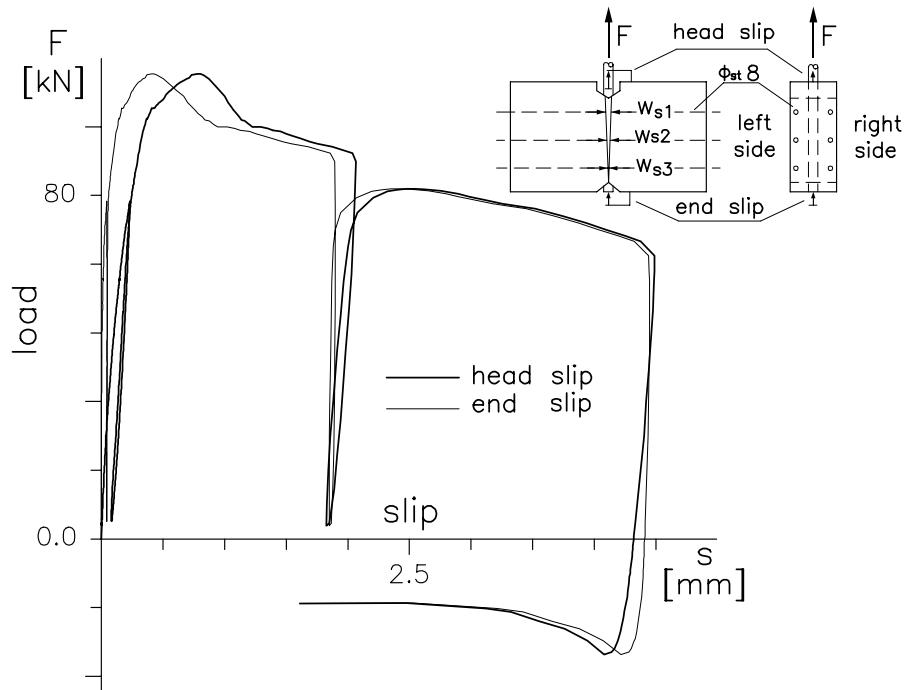


Figure 6.5: Diagramma del carico  $F$  in funzione dello slittamento di testa e di coda della barra ancorata, comprensivo della fase di push-in, relativo al provino 1S8P2.

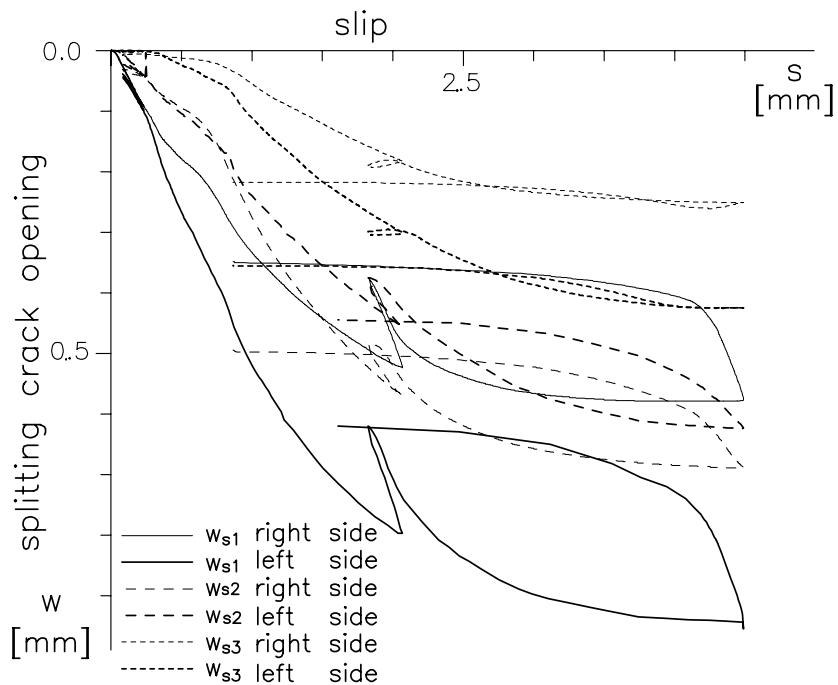


Figure 6.6: Diagramma dell'apertura delle fessure di splitting  $w_{s1}$ ,  $w_{s2}$ ,  $w_{s3}$ , in funzione dello slittamento di testa della barra ancorata, e comprensivo della fase di push-in, relativo al provino 1S8P2.

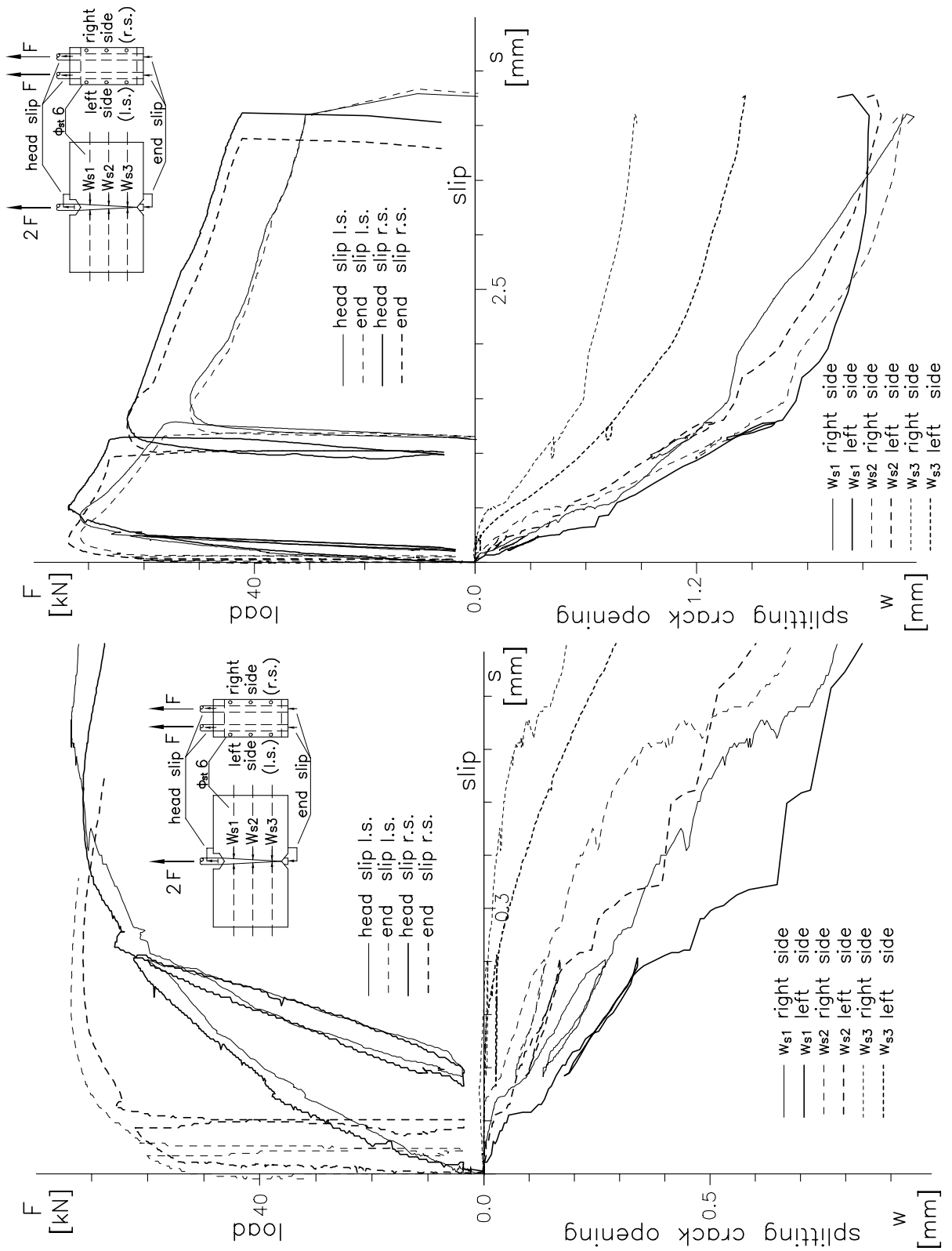


Figure 6.7: Diagramma del carico  $F$  e dell'apertura delle fessure di splitting  $w_{s1}$ ,  $w_{s2}$ ,  $w_{s3}$  in funzione dello slittamento di testa delle due barre ancorate, relativo al provino 2S6P1 riportato integralmente e fino al valore di picco del carico.

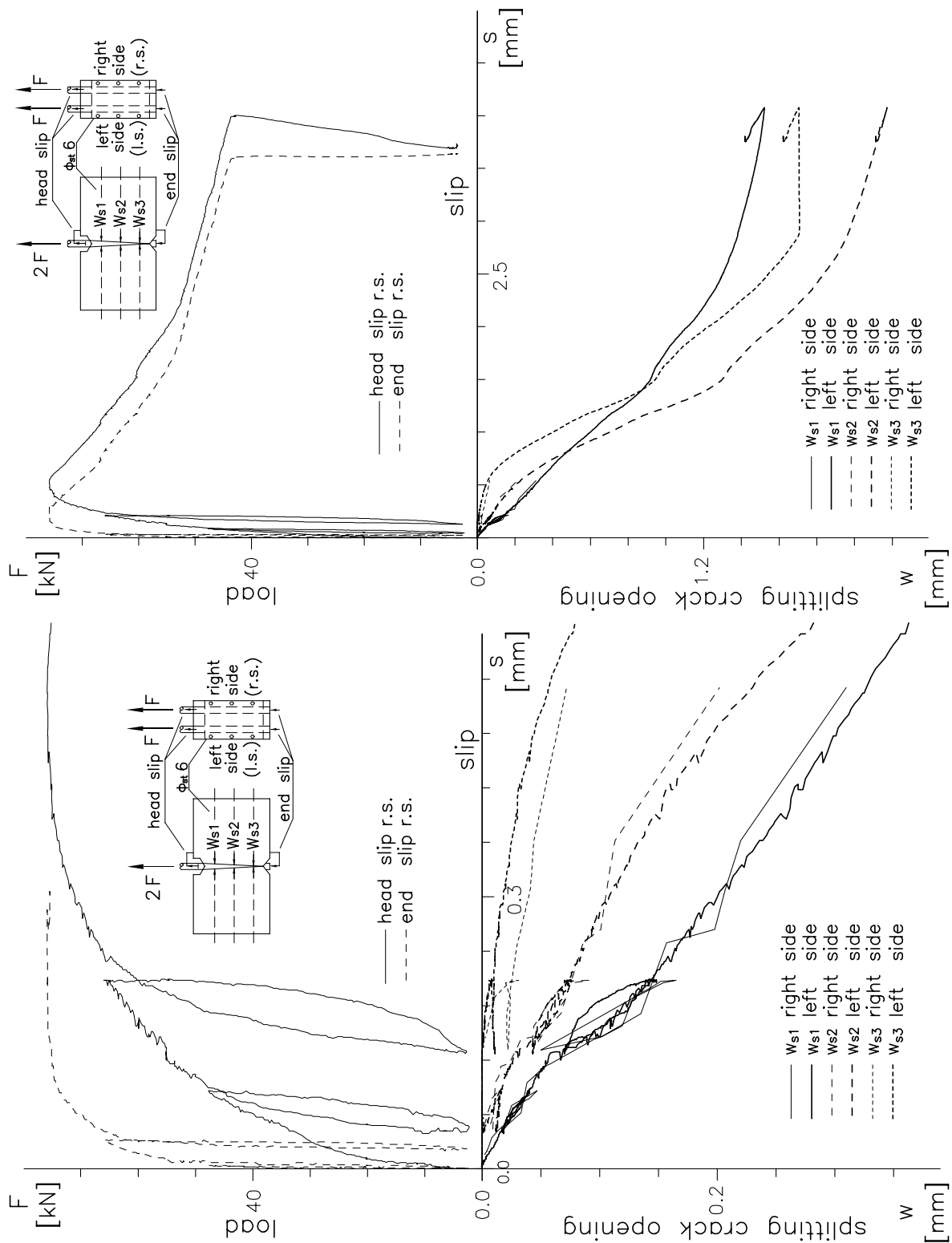


Figure 6.8: Diagramma del carico  $F$  e dell'apertura delle fessure di splitting  $w_{s1}$ ,  $w_{s2}$ ,  $w_{s3}$  in funzione dello slittamento di testa delle due barre ancorate, relativo al provino 2S6P2 riportato integralmente e fino al valore di picco del carico.

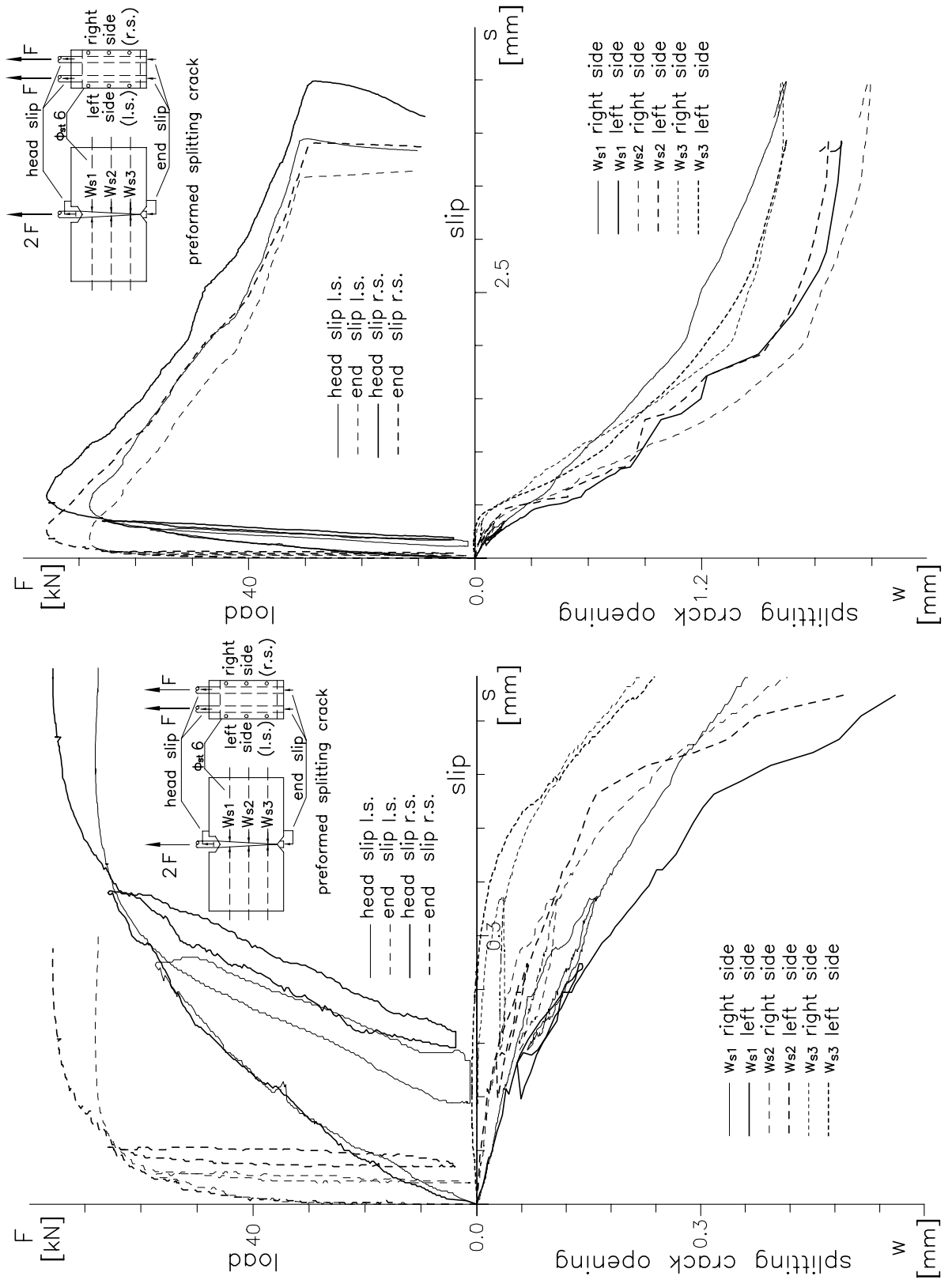


Figure 6.9: Diagramma del carico  $F$  e dell'apertura delle fessure di splitting  $w_{s1}$ ,  $w_{s2}$ ,  $w_{s3}$  in funzione dello slittamento di testa delle due barre ancorate, relativo al provino 2S6NTP1 riportato integralmente e fino al valore di picco del carico.

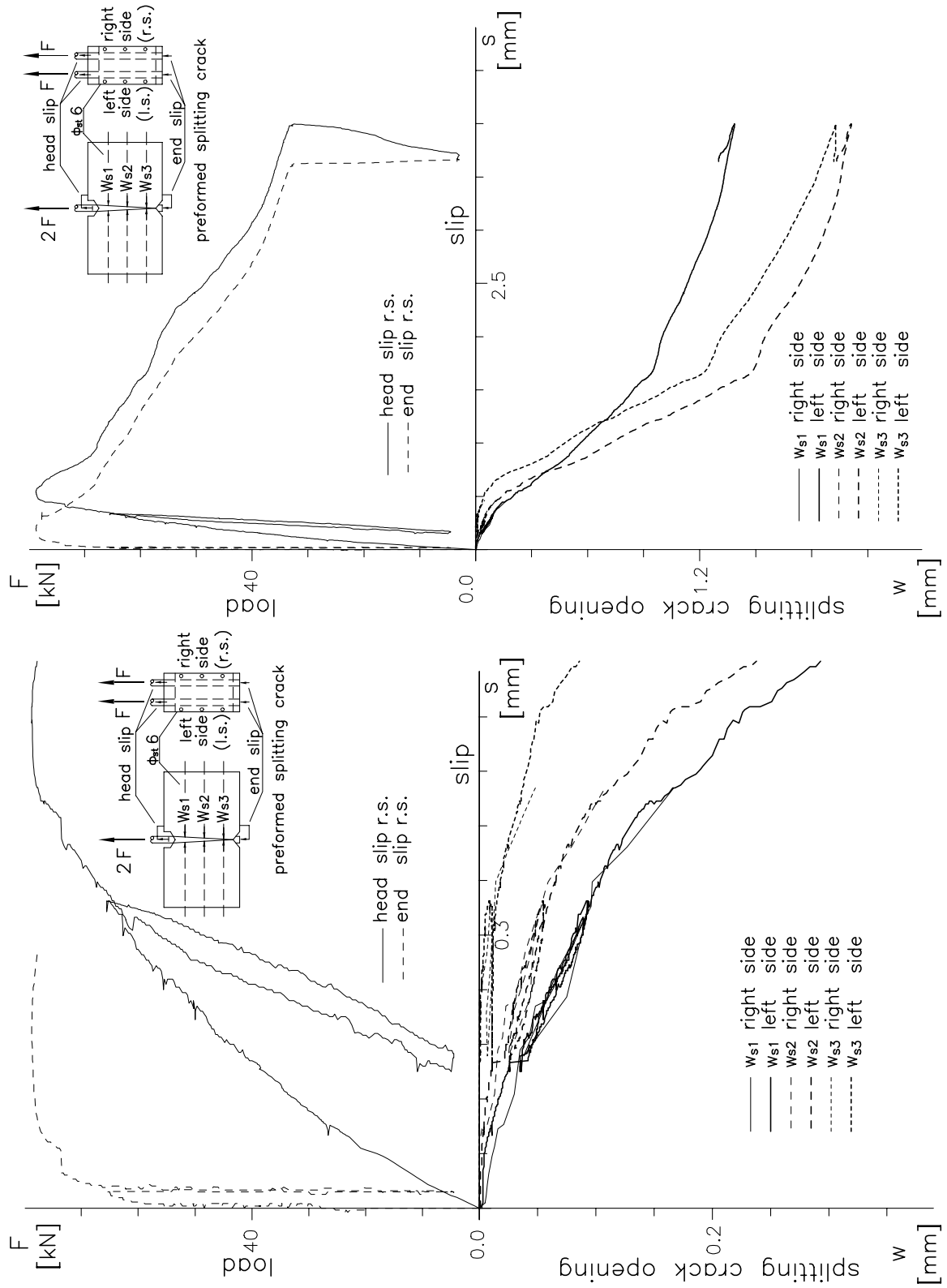


Figure 6.10: Diagramma del carico  $F$  e dell'apertura delle fessure di splitting  $w_{s1}$ ,  $w_{s2}$ ,  $w_{s3}$  in funzione dello slittamento di testa delle due barre ancorate, relativo al provino 2S6NTP2 riportato integralmente e fino al valore di picco del carico.

Provino		Carico di picco [kN]	Slittamento al picco [mm]	$\tau_{media}$ [MPa]
1NSP1		74.84	/	6.61
1NSP2		50.45	0.209	4.46
1S6P1		128.90	/	11.39
1S6P2		131.00	0.923	11.58
1S8P1		~125.00	0.6÷0.75	~11.05
1S8P2		135.40	0.781	11.97
2S6P1	right side	73.65	0.490	6.51
	left side	71.57	0.413	6.32
2S6P2	right side	75.85	0.513	6.70
	left side	78.88	/	6.97
2S6NTP1	right side	75.68	0.588	6.69
	left side	68.13	0.481	6.02
2S6NTP1	right side	78.73	0.533	6.96
	left side	79.68	/	7.04

Table 6.1: Valori del carico massimo, dello slittamento di testa in corrispondenza del picco e dello sforzo di aderenza medio  $\tau$  ottenuti dalle prove sperimentali.

Nelle prove “2S6P2”, “2S6NTP2” non è stato possibile rilevare lo slittamento di testa della barra ancorata di sinistra a causa del cattivo funzionamento dello strumento di misura; le aperture delle fessure di splitting su questo lato sono state pertanto diagrammate in funzione dello slittamento di testa della barra di destra (Figg. 6.8 e 6.10).



## 6.2 Discussione dei risultati sperimentali

Nelle Figure 6.11 e 6.12 vengono riportate tutte le curve, forza di estrazione - slittamento di testa, relative alla prima serie di prove. Si noti come la curva relativa al provino "1NSP2" sia meno rigida rispetto a quelle degli altri provini a causa della mancanza di armature trasversali di contenimento; il carico ultimo risulta inoltre notevolmente inferiore in quanto si è verificato il collasso per splitting dell'ancoraggio, con sfilamento dell'armatura a causa del distacco dei due blocchi di calcestruzzo separati dalla fessura di splitting. (Fig. 6.13). Nei provini con armatura trasversale di contenimento il collasso è avvenuto invece per pull-out, con schiacciamento dei puntoni di calcestruzzo circostanti la barra (Fig. 1.2), come mostrato dall'impronta lasciata dalle nervature dell'armatura nel calcestruzzo (Figg. 6.14 e 6.15).

Sia dalle Figure 6.11 e 6.12 che dalla Tabella 6.1 si può osservare come il carico ultimo dei provini senza armature trasversali sia circa la metà di quello relativo ai provini con armature di contenimento. La differenza di comportamento tra i provini con armature trasversali di diametro  $\phi_{st} = 6$  mm e  $\phi_{st} = 8$  mm è minima, probabilmente perchè la percentuale di armatura delle staffe con diametro di 6 mm è già in grado di esercitare una notevole azione di contenimento. La minore rigidità del provino "1S8P1" rispetto a quella degli altri provini è da considerarsi all'interno delle normali tolleranze sperimentali. Sempre dalla Figura 6.12 si può osservare come i provini con armatura trasversale di contenimento abbiano un comportamento che si scosta poco dal lineare fino ad un carico di circa 80 kN cui corrisponde uno slittamento di 0.15 mm; oltre tale valore del carico lo slittamento aumenta molto più velocemente raggiungendo al carico massimo ( $\simeq 130$  kN) un valore di circa 0.85 mm.

La Figura 6.16 mostra il confronto tra le curve forza di estrazione - slittamento di coda relative alla prima serie di prove. Da queste ultime si può osservare che, per tutti i provini, non si ha slittamento di coda fino ad un valore del carico pari a circa 50 kN; raggiunto tale valore del carico, nel provino "1NSP2" ha avuto inizio il ramo discendente mentre negli altri provini il carico è aumentato fino al raggiungimento del valore massimo in corrispondenza del quale lo spostamento di coda è risultato di 0.5 mm.

Nella Figura 6.17 è diagrammata la differenza tra lo slittamento di testa e di coda della barra in funzione dello slittamento di testa e la retta relativa ad una situazione di slittamento di coda nullo. Durante la prima fase della prova le curve non si discostano molto dalla retta, in quanto gli sforzi di aderenza assumono valori elevati nella parte iniziale dell'ancoraggio e trascurabili nella parte finale, pertanto lo slittamento di coda in questa fase è nullo. La differenza tra gli slittamenti tende ad un valore massimo quando si raggiunge il carico di picco per poi decrescere nel successivo ramo discendente, in cui i decrescenti valori dello sforzo di aderenza lungo tutto l'ancoraggio ed il danneggiamento del calcestruzzo fan sì che la barra tenda a sfilarsi in modo quasi uniforme dal calcestruzzo.

Nelle Figure 6.18, 6.19 vengono riportate le curve forza di estrazione - slittamento di testa per la seconda serie di prove. Si nota che le curve relative ai due provini con fessura preformata mostrano una minor rigidità fino al valore di picco del carico; tale valore di picco è però simile per tutti i provini in quanto dipende prevalentemente dalla resistenza delle armature trasversali; infatti, a causa del modesto ricoprimento di calcestruzzo, in corrispondenza del carico massimo il contributo al contenimento del calcestruzzo fessurato è trascurabile. Si può osservare inoltre come i provini abbiano un comportamento quasi lineare fino ad un carico di circa 40 kN cui corrisponde uno slittamento di 0.09 mm per i provini con calcestruzzo integro e 0.15 mm per i provini con fessura di splitting preformata rispettivamente, oltre tale valore

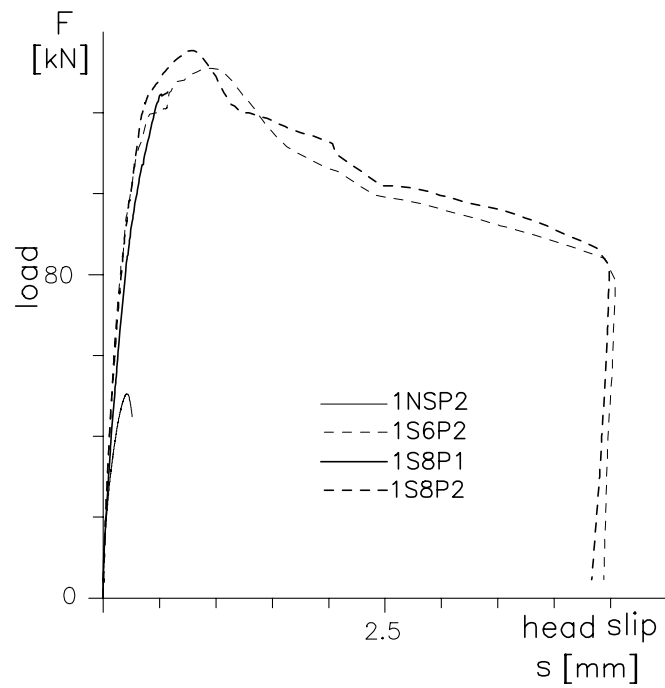


Figure 6.11: Confronto tra le curve forza di estrazione - slittamento di testa della prima serie di prove.

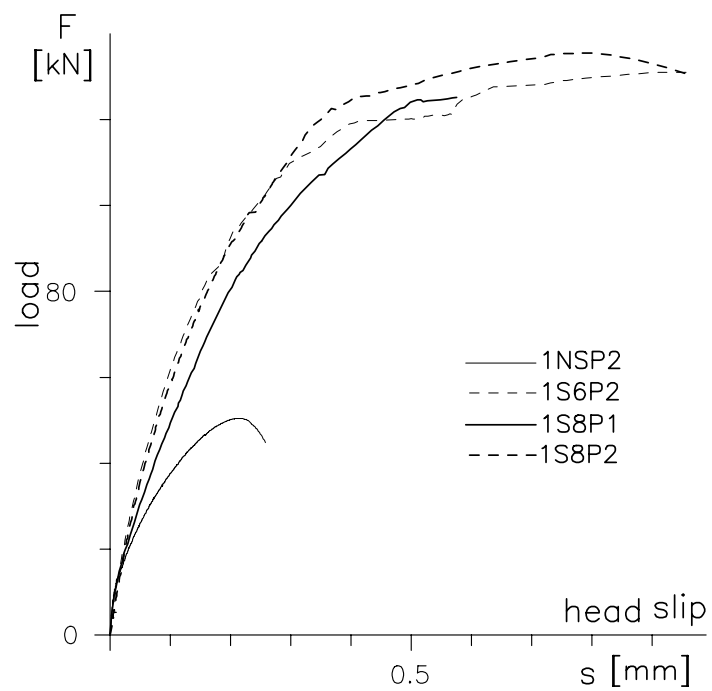


Figure 6.12: Confronto tra le curve forza di estrazione - slittamento di testa della prima serie di prove riportate fino al carico di picco.

Figure 6.13: Particolare dell'impronta lasciata nel calcestruzzo dalla barra ancorata al termine della prova nei provini senza armatura trasversale di contenimento in cui si è avuto collasso per splitting.

Figure 6.14: Particolare dell'impronta lasciata nel calcestruzzo dalle barre ancorate al termine della prova nei provini con armatura trasversale di contenimento in cui si è avuto collasso per pull-out.

Figure 6.15: Particolare dell'impronta di una nervatura della barra ancorata al termine di una prova in cui il collasso è avvenuto per pull-out.

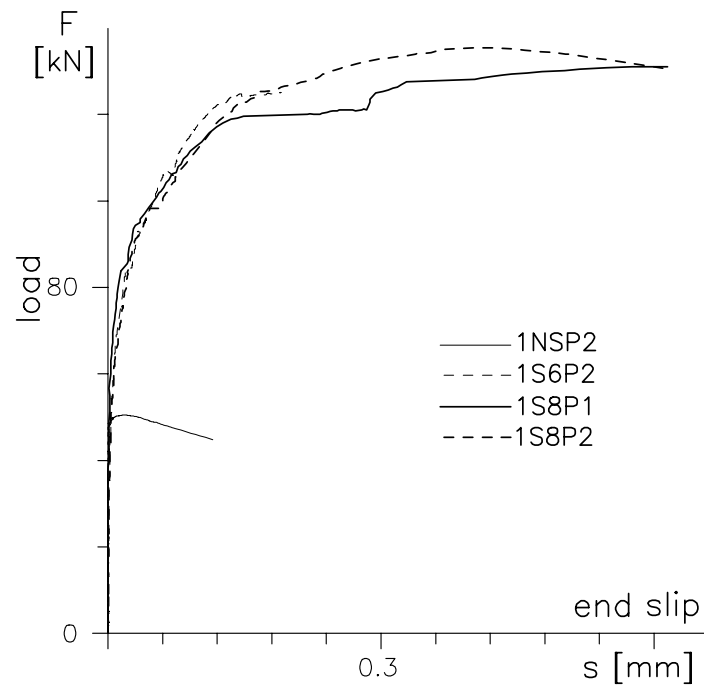


Figure 6.16: Confronto tra le curve forza di estrazione - slittamento di coda della prima serie di prove riportate fino al carico di picco.

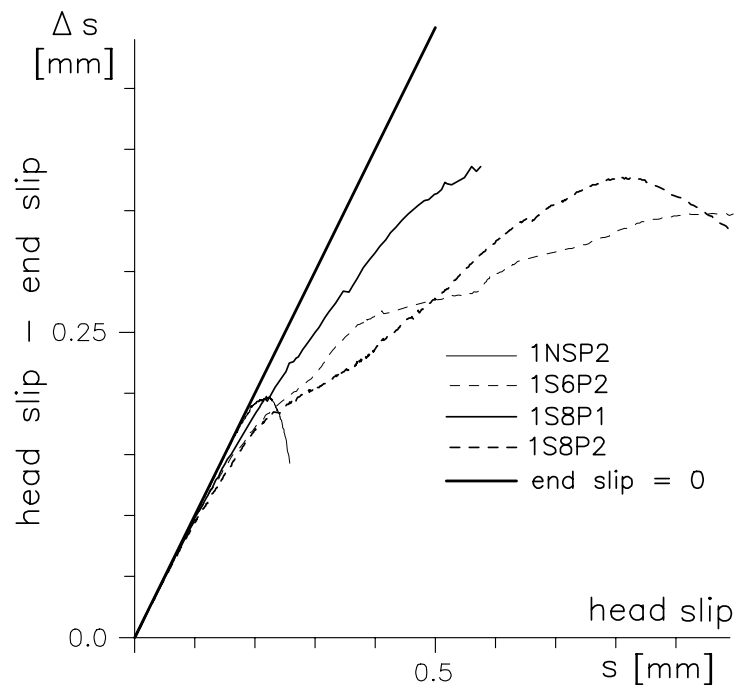


Figure 6.17: Rappresentazione della differenza tra gli slittamenti di testa e di coda in funzione degli slittamenti di testa, relativa alla prima serie di prove.

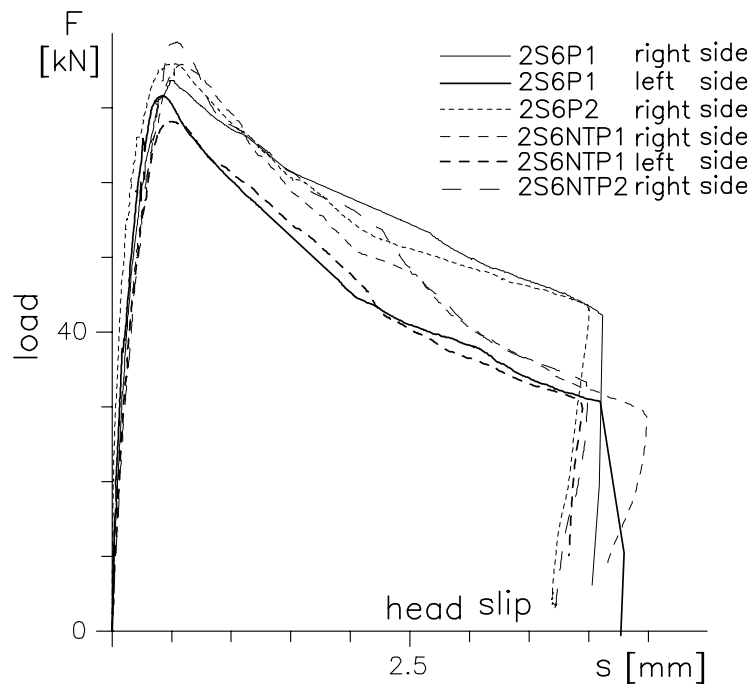


Figure 6.18: Confronto tra le curve forza di estrazione - slittamento di testa della seconda serie di prove.

del carico lo slittamento aumenta molto più velocemente raggiungendo al carico massimo ( $\simeq 75$  kN) un valore di circa  $0.40 \div 0.50$  mm. Dalla Figura 6.18 si può osservare una maggior dispersione dei risultati nel ramo discendente delle curve forza di estrazione - slittamento di testa complete.

La Figura 6.20 mostra le curve forza di estrazione - slittamento di testa ottenute mediando in una i risultati ottenuti dai provini senza fessura di splitting preformata e nell'altra quelli ottenuti dai provini con fessura preformata. Nella stessa Figura viene riportata la differenza, a parità di slittamento, tra queste due curve, perchè essa rappresenta il contributo dovuto al contenimento del calcestruzzo. Come si può osservare tale contributo si annulla in corrispondenza del valore di picco del carico quando l'apertura media della fessura di splitting è pari a 0.70 mm nel provino 2S6P1 e pari a 0.25 mm nel provino 2S6P2.

Nella Figura 6.21 sono rappresentate, per gli stessi provini, le curve forza di estrazione - slittamento di coda; si può osservare che, per tutti i provini, non si verifica slittamento di coda fino ad un valore del carico di circa 40 kN; oltre tale valore gli slittamenti di coda hanno inizio ed in corrispondenza del carico massimo raggiungono un valore di circa 0.25 mm.

La Figura 6.22 mostra la differenza tra lo slittamento di testa e di coda in funzione dello slittamento di testa per i provini della seconda serie. Durante la prima fase della prova le curve non si discostano molto dalla retta, in quanto gli sforzi di aderenza assumono valori elevati nella parte iniziale dell'ancoraggio e trascurabili nella parte finale, pertanto lo slittamento di coda in questa fase è nullo. La differenza tra gli slittamenti tende ad un valore massimo in corrispondenza del carico di picco per poi decrescere successivamente nel ramo discendente.

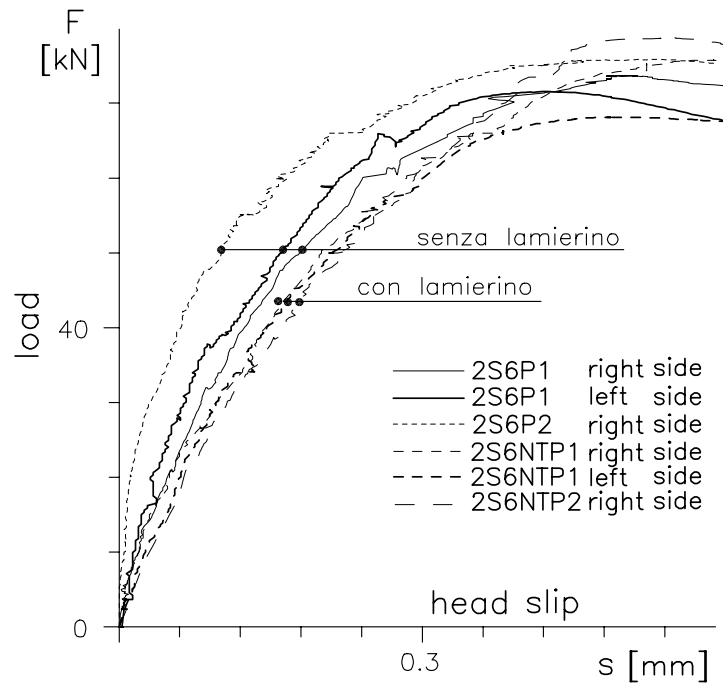


Figure 6.19: Confronto tra le curve forza di estrazione - slittamento di testa della seconda serie di prove riportate fino al carico di picco.

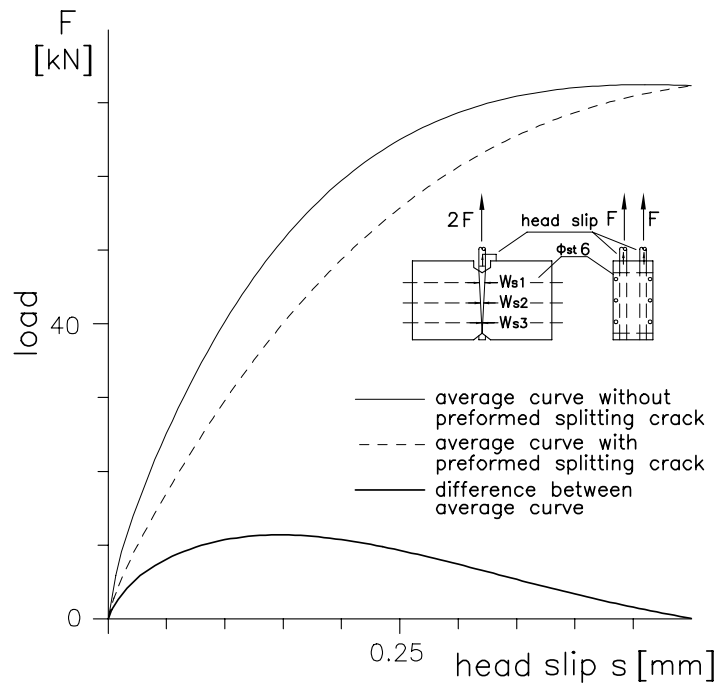


Figure 6.20: Confronto tra le curve medie forza di estrazione - slittamento di testa dei provini con e senza fessura di splitting preformata.



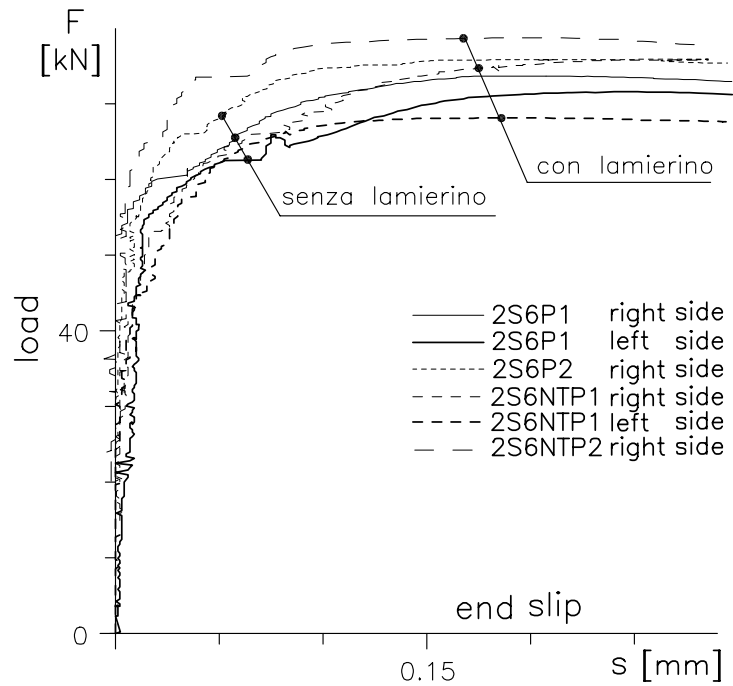


Figure 6.21: Confronto tra le curve forza di estrazione - slittamento di coda della seconda serie di prove riportate fino al carico di picco.

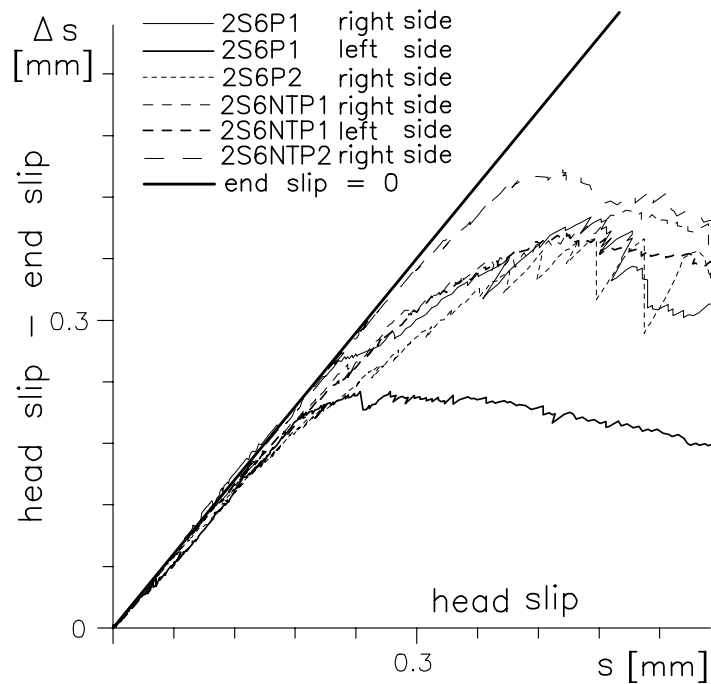


Figure 6.22: Rappresentazione della differenza tra gli slittamenti di testa e di coda in funzione degli slittamenti di testa.

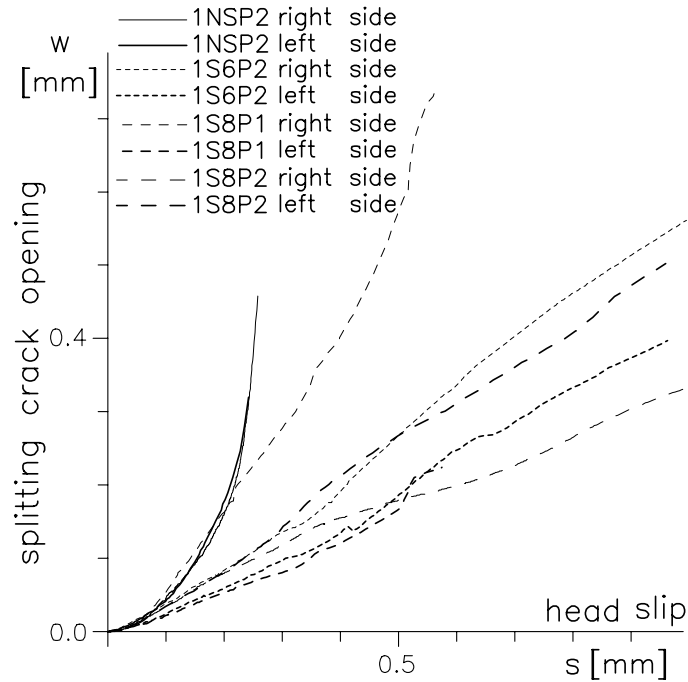


Figure 6.23: Apertura della fessura di splitting  $w_{s1}$  in funzione dello slittamento di testa, per la prima serie di prove.

Le Figg. 6.23÷6.28 riportano, per le due serie di prove, l'andamento dell'apertura della fessura di splitting, misurata in corrispondenza dell'armatura trasversale, in funzione dello slittamento di testa della rispettiva barra ancorata.

Come si può osservare, nelle Figg. 6.23÷6.25, relative alla prima serie di prove, le curve sono poco disperse ad eccezione di quelle del provino senza armatura trasversale (1NSP2) nel quale per valori dello slittamento di testa di circa 0.1 mm, si discostano dalle altre evidenziando valori sensibilmente maggiori. In queste Figure si nota il comportamento anomalo dell'apertura della fessura di splitting  $w_{s1}$  del provino "1S8P1" e  $w_{s2}$  di quello "1S6P2". Tale comportamento anomalo è probabilmente da attribuire alla leggera inclinazione della barra ancorata rispetto alla superficie esterna del provino, come sembrerebbe confermare l'apertura  $w_{s3}$  del provino "1S8P1", che mostra valori inferiori rispetto alle altre curve. Anche per queste curve si può osservare che la differenza tra i provini aventi un'armatura trasversale di diametro  $\phi_{st} = 6$  mm e quelli di diametro  $\phi_{st} = 8$  mm è minima in accordo con quanto detto precedentemente. Nella Figura 6.25 si può notare che, fino a valori dello slittamento di circa 0.3 mm, in corrispondenza della terza armatura trasversale si hanno delle leggere compressioni, dopochè ha inizio l'apertura della fessura di splitting; da questo punto l'andamento della curva  $w_{s3}$ , come quello delle curve  $w_{s1}$  e  $w_{s2}$ , non si discosta molto da un andamento di tipo rettilineo. Tali leggere compressioni sono dovute probabilmente alla piccola eccentricità della risultante degli sforzi tangenziali su metà barra rispetto alla cerniera "H" (vedi cap.3, Fig. 3.1).

Anche per la seconda serie di prove, si può osservare dalle Figure 6.26÷6.28 che i valori delle aperture delle fessure di splitting  $w_{s1}$ ,  $w_{s2}$  e  $w_{s3}$  sono molto raccolti ad eccezione di quelli

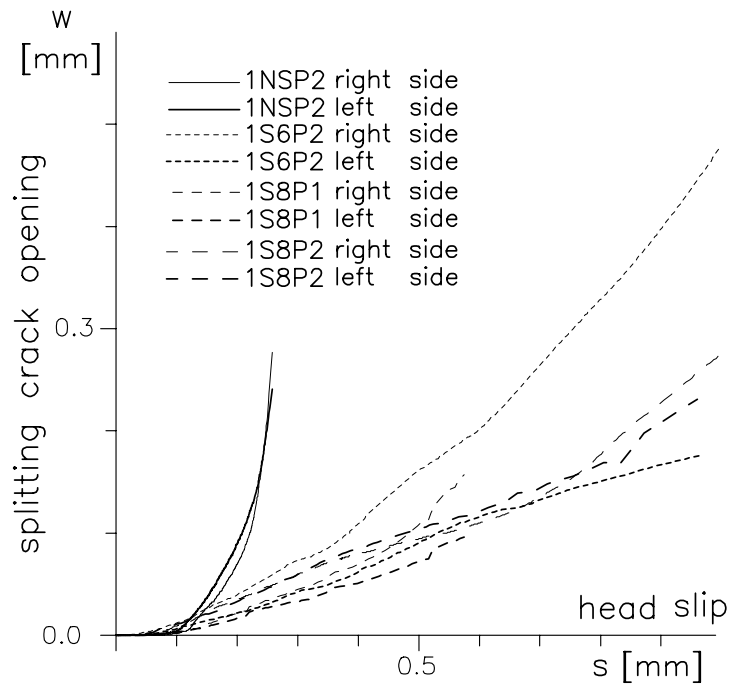


Figure 6.24: Apertura della fessura di splitting  $w_{s2}$  in funzione dello slittamento di testa, per la prima serie di prove.

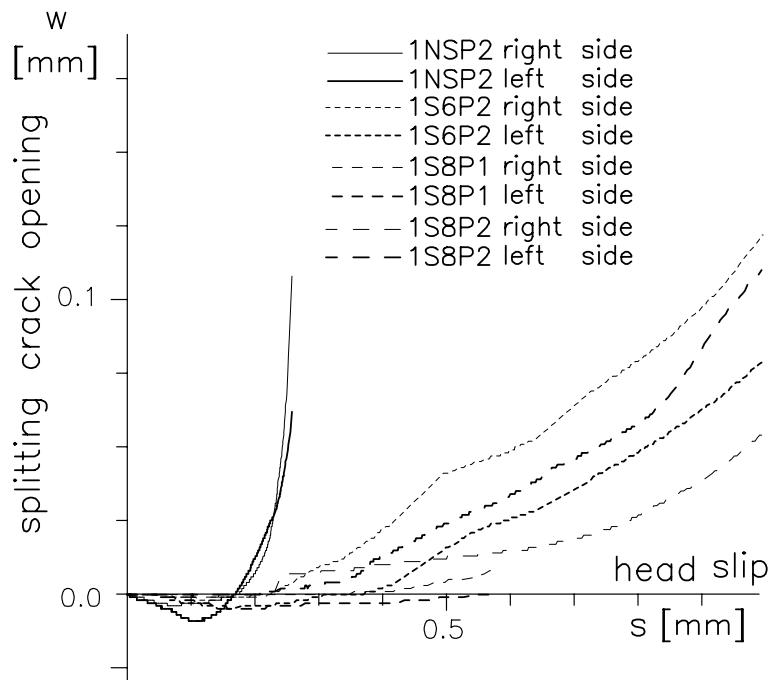


Figure 6.25: Apertura della fessura di splitting  $w_{s3}$  in funzione dello slittamento di testa, per la prima serie di prove.

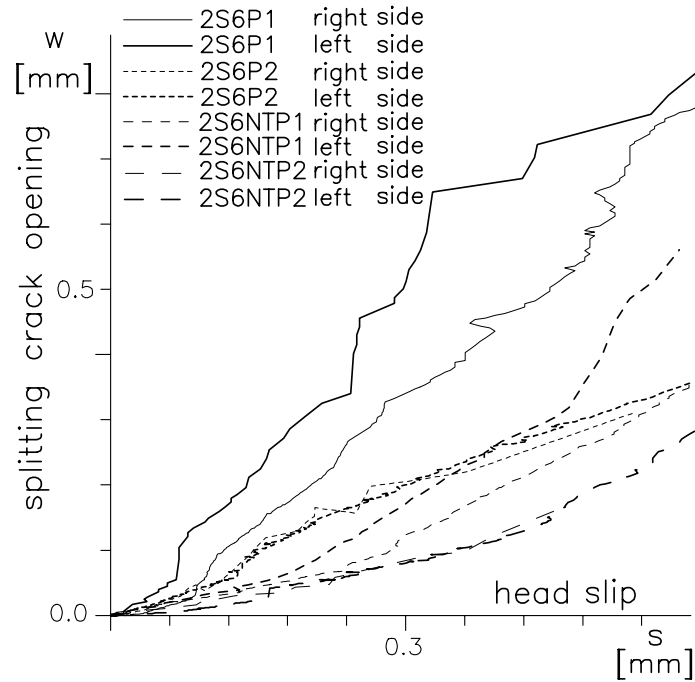


Figure 6.26: Apertura della fessura di splitting  $w_{s1}$  in funzione dello slittamento di testa, per la seconda serie di prove.

relativi al provino “2S6P1”.

Il diagramma di Figura 6.29 mostra il legame tra lo sforzo di aderenza medio e lo slittamento di testa al variare della percentuale di armatura trasversale rispetto a quella principale ancorata. In particolare nel diagramma sono riportate le curve relative al provino 1S6P2 con una barra ancorata a cui corrisponde una percentuale di armatura trasversale  $A_{st}/A_p = 0.54$  e le curve relative ai provini 2S6P1 e 2S6P2 con due barre ancorate cui corrisponde una percentuale di armatura trasversale  $A_{st}/A_p = 0.27$ . Si può notare come, al dimezzarsi della percentuale di armatura trasversale, lo sforzo di aderenza medio a rottura, diminuisca del 57%; questo conferma ulteriormente l'importanza dell'armatura di contenimento nella resistenza degli ancoraggi.

Le Figure 6.30 e 6.31 riportano la lunghezza di propagazione della fessura di splitting, misurata a partire dal punto superiore dell'ancoraggio, in funzione della forza applicata all'armatura principale. La Figura 6.30, relativa alla prima serie di prove, mostra, per entrambi i tipi di provini, che le curve sono ben raccolte ed il loro andamento è simile a quello di una bilatera. Le uniche curve che si discostano sono quelle relative al provino “1NSP2” senza armatura trasversale nel quale la fessura si è propagata molto più velocemente. La misura della lunghezza della fessura di splitting è stata effettuata mediante una lente d'ingrandimento (x6); per facilitare le letture, sulla superficie del provino era stata preventivamente eseguita una rasatura in gesso in corrispondenza della zona di formazione della fessura di splitting. Nella seconda serie di prove (Fig. 6.31), le lunghezze della fessura di splitting, relative al lato destro dei provini “2S6P2” e “2S6NTP2” sono state rilevate con la tecnica del Moirè per sovrapposizione di retini [34]. Come si può osservare, i valori rilevati

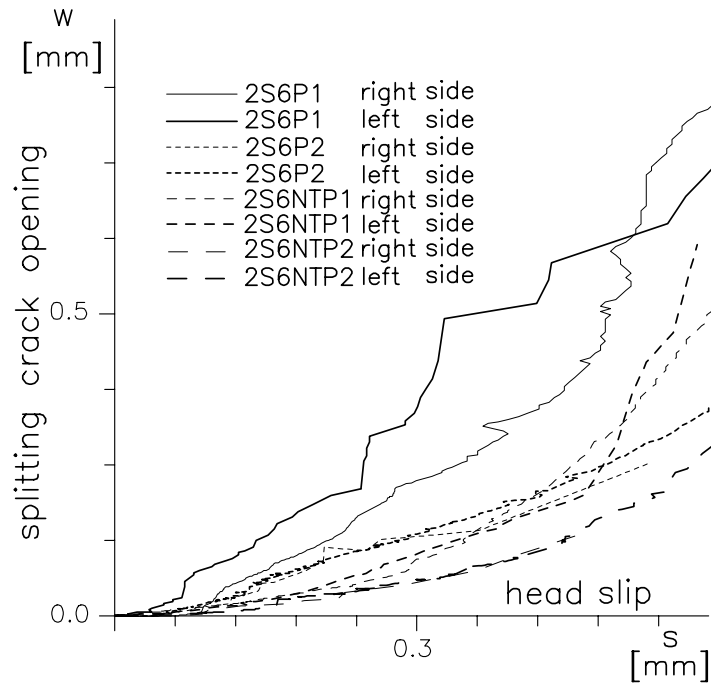


Figure 6.27: Apertura della fessura di splitting  $w_{s2}$  in funzione dello slittamento di testa, per la seconda serie di prove.

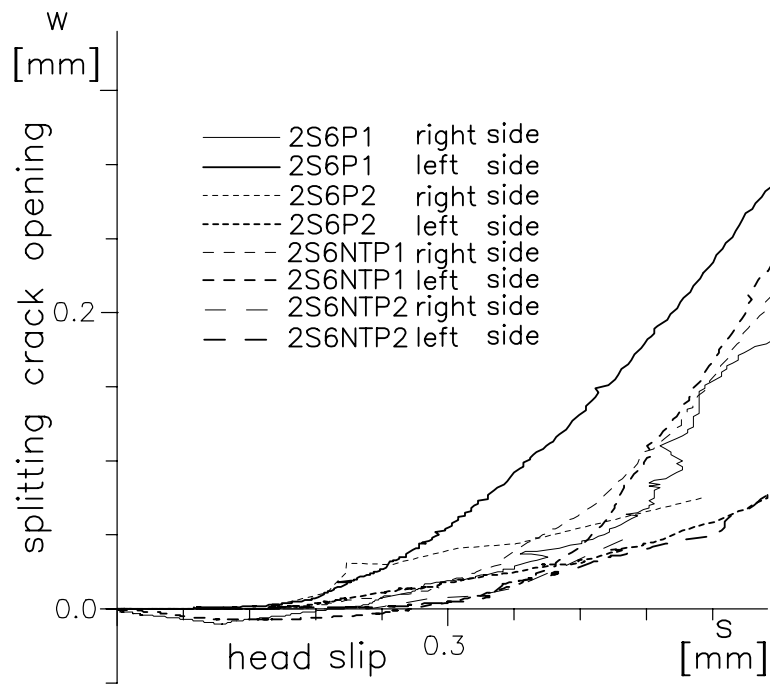


Figure 6.28: Apertura della fessura di splitting  $w_{s3}$  in funzione dello slittamento di testa, per la seconda serie di prove.

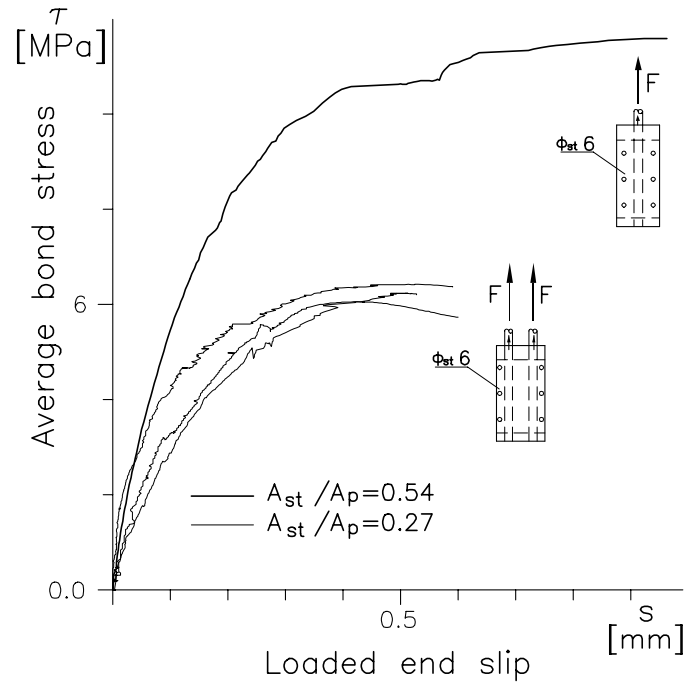


Figure 6.29: Confronto tra le curve sforzo di aderenza medio - slittamento di testa al variare della percentuale di armatura trasversale rispetto a quella principale ancorata.

con le due diverse tecniche di misura risultano simili tra di loro.

La Figura 6.32 riporta i quadri fessurativi finali dei provini relativi alla seconda serie di prove. Si può notare la presenza di diverse fessure secondarie che tendono ad orientarsi secondo un angolo di circa  $45^\circ$  rispetto alla direzione della forza di estrazione. Tali fessure sono dovute ai coni di calcestruzzo concentrici con vertice sulla barra ancorata [2], come mostrato dalla Fotografia in Fig. 6.33; queste fessure secondarie si sono sviluppate dopo il raggiungimento del carico massimo. Per la prima serie di prove non è stata rilevata alcuna fessura secondaria, probabilmente a causa del maggior valore del copriferro (il doppio rispetto a quello della seconda serie) e della maggior azione di confinamento esercitata dalle staffe.

La Figura 6.34, relativamente ai provini “2S6P2” e “2S6NTP2”, mostra il profilo della fessura di splitting misurata per tre diversi valori del carico; tali fessure sono state rilevate attraverso la elaborazione delle frange Moirè, con una tolleranza di circa 1/100 di mm.

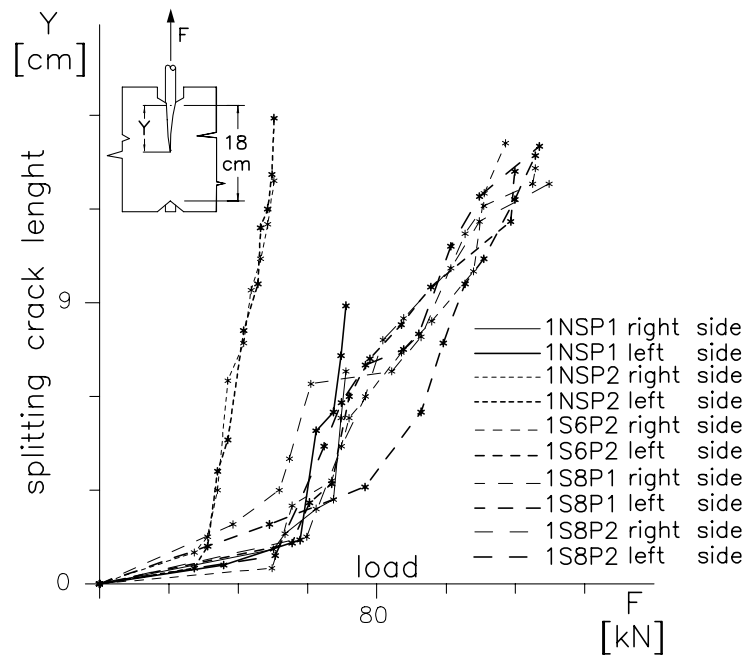


Figure 6.30: Lunghezza della fessura di splitting misurata a partire dal punto superiore dell'ancoraggio in funzione della forza d'estrazione  $F$ , riferita alla prima serie di prove.

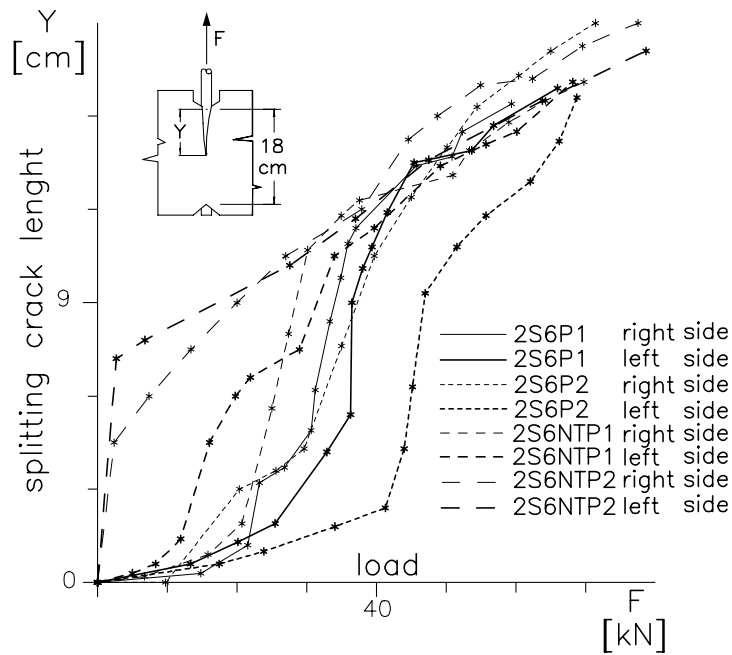


Figure 6.31: Lunghezza della fessura di splitting misurata a partire dal punto superiore dell'ancoraggio in funzione della forza d'estrazione  $F$ , riferita alla seconda serie di prove.

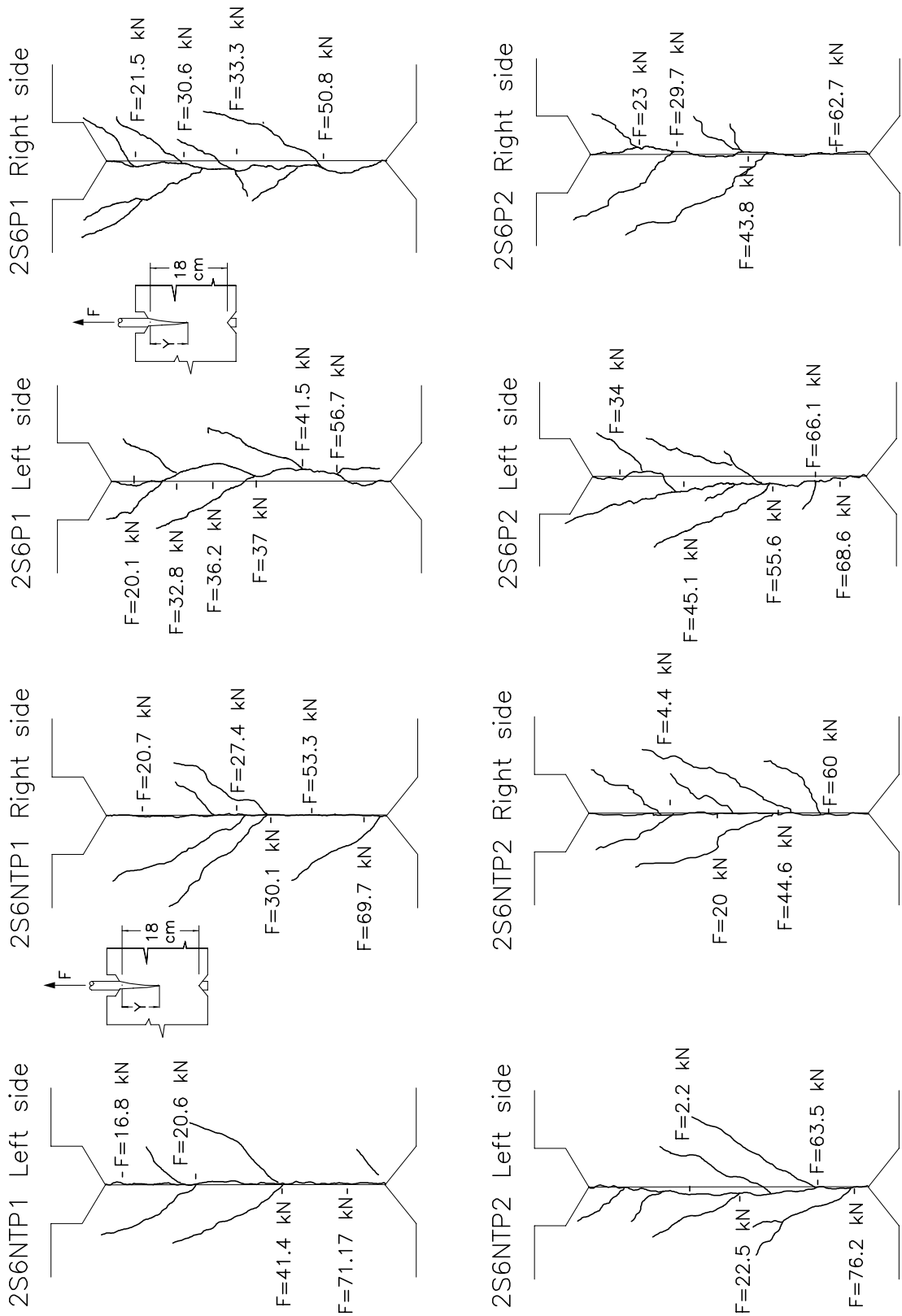


Figure 6.32: Quadro fessurativo finale rilevato su i due lati dei provini relativi alla seconda serie di prove.



Figure 6.33: Rilevazione dei coni di calcestruzzo concentrici con vertice sulla barra ancorata.

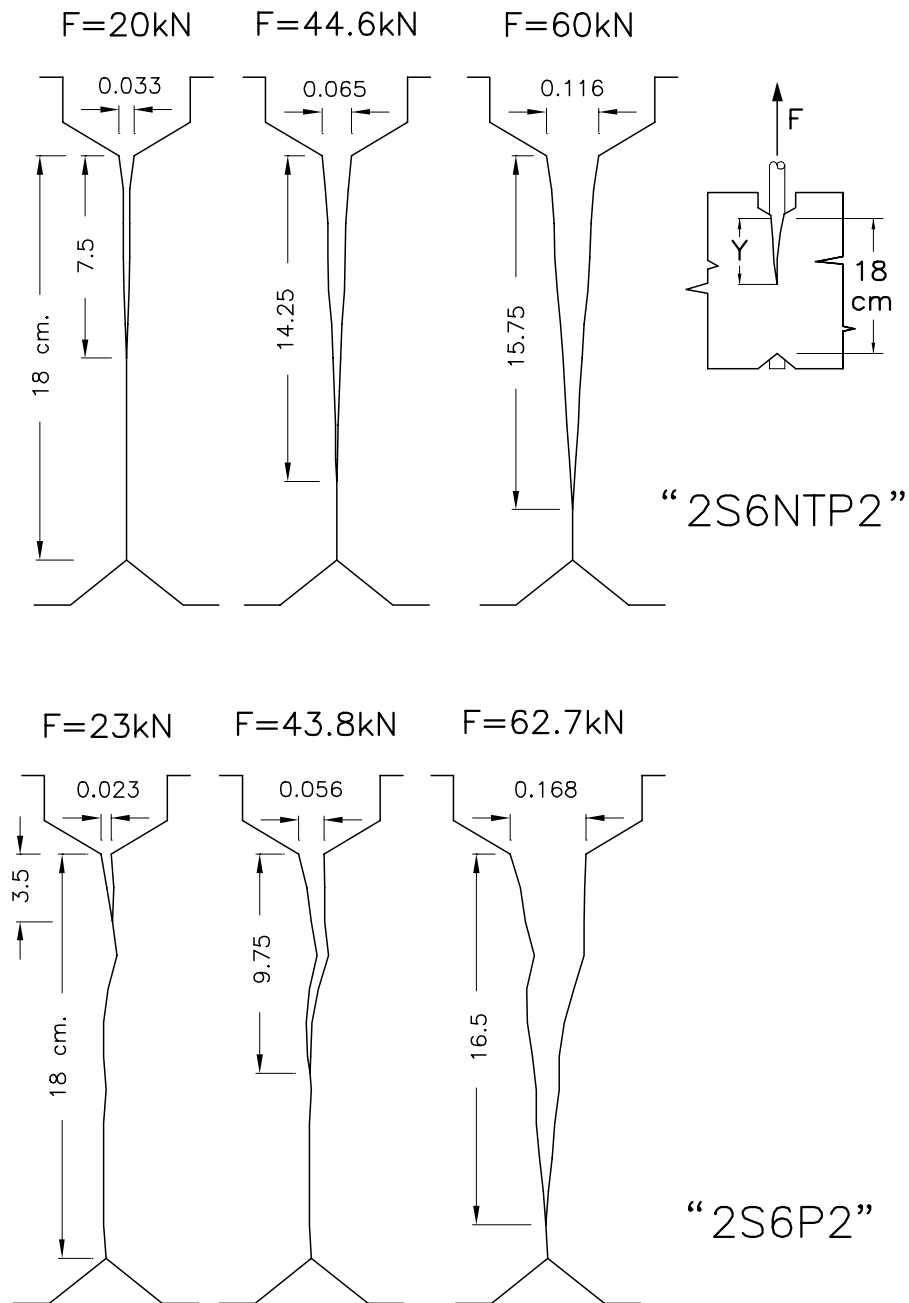


Figure 6.34: Fasi di propagazione della fessura di splitting sul lato destro dei provini "2S6P2" e "2S6NTP2", ottenute per mezzo dell'elaborazione delle frange Moirè.

# Chapter 7

## 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 era rivolto al contributo all'azione di contenimento dovuto al calcestruzzo di ricoprimento ed all'armatura trasversale. A tal fine sono state condotte due serie di prove sperimentali.

La prima serie era costituita da sei provini di calcestruzzo con una barra ancorata e diverse percentuali di armatura trasversale (Fig. 2.1). Con questa prima serie di prove si è voluto studiare l'influenza dell'armatura trasversale sul comportamento dell'ancoraggio.

La seconda serie di prove era costituita da quattro provini con due barre principali ancorate e sei armature trasversali aventi diametro  $\phi_{st} = 6$  mm; in due di tali provini è stata preformata una fessura di splitting con un lamierino in modo che il calcestruzzo tra le due facce della fessura non esercitasse alcuna azione di contenimento. Con questa seconda serie di prove si è voluto studiare l'influenza del calcestruzzo di contenimento sul comportamento degli ancoraggi.

Le principali osservazioni sperimentali sono nel seguito riassunte.

Per la prima serie di prove:

- Nei provini senza armatura di contenimento il carico massimo è risultato minore di un 1/2 di quello dei provini con armatura secondaria e, all'inizio dello slittamento dell'estremo inferiore della barra ancorata, si è verificato il collasso per splitting.
- Le curve forza di estrazione - slittamento di testa al variare dell'armatura trasversale da un diametro  $\phi_{st} = 6$  a  $\phi_{st} = 8$  non hanno mostrato sostanziali differenze, in quanto i provini sono risultati comunque sottoposti ad una elevata azione di contenimento.
- Nei provini senza armatura trasversale di contenimento, in corrispondenza dell'inizio dello slittamento di coda della barra ancorata, si ha il collasso per splitting.
- Nei provini con armatura trasversale di contenimento si è verificato il collasso per pull-out dell'ancoraggio, con schiacciamento dei puntoni di calcestruzzo circostante la barra.

Per la seconda serie di prove:

- Le curve dei provini con fessura preformata hanno una minor rigidezza fino al carico di picco.

- Il carico massimo dei provini con e senza fessura di splitting preformata è risultato praticamente lo stesso in quanto, in corrispondenza del carico massimo, l'apertura della fessura di splitting era tale che non venissero trasmessi sforzi di trazione nel calcestruzzo; in questo caso l'azione di contenimento dipendeva dalle sole staffe ed era quindi la stessa per tutti i provini.
- L'azione di confinamento del calcestruzzo è massima per un valore dello slittamento di testa pari a circa  $1/3$  di quello corrispondente al carico di picco.
- Confrontando i provini delle due serie di prove con lo stesso diametro dell'armatura trasversale ( $\phi_{st} = 6$  mm) si può osservare come, al dimezzarsi della percentuale dell'armatura trasversale ( $A_{st}/A_p = 0.54$  nei provini della prima serie e  $A_{st}/A_p = 0.27$  nei provini della seconda serie), lo sforzo di aderenza medio a rottura diminuisca del 57%. Questo dimostra ancora una volta l'importanza dell'armatura di contenimento sulla resistenza degli ancoraggi.

I risultati forniti, riguardanti i legami tra la forza di estrazione, lo slittamento di testa e di coda della barra ancorata, e l'apertura della fessura di splitting in corrispondenza dell'armatura trasversale di contenimento, possono essere impiegati per la messa a punto dei numerosi parametri che intervengono nei modelli teorici di comportamento dell'ancoraggio. Il proseguimento dell'indagine sperimentale potrà riguardare l'influenza del passo  $\Delta z$  delle armature trasversali di confinamento, del numero di tali armature e del diametro dell'armatura principale.

Inoltre, per poter fornire un ulteriore dato sperimentale per la verifica al modello teorico, si potrebbero rilevare anche gli sforzi di trazione nelle armature di contenimento in corrispondenza della fessura di splitting.

Una futura sperimentazione potrebbe anche indagare il comportamento dell'ancoraggio sottoposto a carichi ciclici.

# Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Prof. Ezio Giuriani per gli innumerevoli suggerimenti e per il continuo interessamento mostrato durante lo svolgimento della ricerca.

# Bibliography

- [1] E. Giuriani. Experimental investigation on the Bond-Slip Law of Deformed Bars in Concrete. In *IABSE Colloquium: Advanced Mechanics of Reinforced Concrete, Final Report*, pages 121–142, Delft, The Netherlands, 1981.
- [2] R. Tepfers. Cracking of Concrete Cover along Anchored Deformed Reinforcing Bars. *Magazine of Concrete Research*, 31(106):3–12, 1979.
- [3] 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.
- [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] 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.
- [6] A.H. Nilson. Internal Measurement of Bond Slip. *Proceedings, American Concrete Institute Journal*, 69(7):439–441, 1972.
- [7] T. P. Tassios and E. G. Koroneos. Local Bond-Slip by means of the Moiré Method. *Proceedings, American Concrete Institute Journal*, 81(4):27–34, 1984.
- [8] 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.
- [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. Rehm. Ueber die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton. *Deutcher Ausschuß für Stahlbeton (D.A.f.St)*, 138, 1961. in German.
- [11] Y. Goto. Crack formed in Concrete around Deformed Tension Bars. *American Concrete Institute Journal*, 68(4):244–251, 1971.

- [12] R. Tepfers and P-Å Olsson. Ring Test for evaluation of Bond Properties of Reinforcing Bars. In CEB Comite Eurointernational du Beton, editor, *International Conference: Bond in Concrete, from Research to Practice*, volume 1, pages 1,89–1,99, Riga, Latvia, October 15-17 1992. RTU - Riga Technical University.
- [13] S. Morita and T. Kaku. Splitting Bond Failures of Large Deformed Reinforcing Bars. *ACI Journal, Proceedings*, 76(1):93–110, 1979.
- [14] 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.
- [15] R. Tepfers. *A Theory of Bond applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars*. PhD thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, 1973.
- [16] 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.
- [17] J.R. Robinson. Influence of transverse reinforcement on shear and bond strength. *Proceedings, American Concrete Institute Journal*, 62(3):343–362, 1965.
- [18] 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.
- [19] G.P. Rosati and C. Schumm. Modeling of Local Bar-to-Concrete Bond in R.C. Beams. In CEB Comite Eurointernational du Beton, editor, *International Conference: Bond in Concrete, from Research to Practice*, volume 3, pages 12,34–12,43, Riga, Latvia, October 15-17 1992. RTU - Riga Technical University.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] P.G. Gambarova, G.P. Rosati, and O.S. Sharif. Bond and Splitting in Reinforced Concrete. In CEB Comite Eurointernational du Beton, editor, *International Conference: Bond in Concrete, from Research to Practice*, volume 1, pages 1,48–1,57, Riga, Latvia, October 15-17 1992. RTU - Riga Technical University.
- [23] 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.

- [24] P.G. Gambarova, G.P. Rosati, and B. Zasso. Steel-to-Concrete Bond after Splitting: Constitutive Laws and Interface Deterioration. *RILEM Materials and Structures*, 22:347–356, 1989.
- [25] 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.
- [26] E. Giuriani, G.A. Plizzari, and G. Terzini. Indagine teorica e sperimentale sull'interazione tra l'armatura principale e quella trasversale nei problemi di ancoraggio. Technical Report No. 6/85, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano, Milano (Italy), July 1985.
- [27] 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).
- [28] E. Giuriani and G.P. Rosati. An analytical model for the study of Crack Propagation in Plain Concrete Elements under Bending. *Studi e Ricerche, School for the Design of R.C. Structures, Milan University of Technology*, 9:107–127, 1987.
- [29] R.J. Malvar. Bond of Reinforcement under Controlled Confinement. Technical Report N-1833, Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California, June 1991.
- [30] P.J. Robins and I.G. Standish. The influence of Lateral Pressure upon Anchorage Bond. *Magazine of Concrete Research*, 36:195–202, 1984.
- [31] G. Schmidt-Thr , S. St ckl, and H. Kupfer. Einflu  einer einachsigen Querverpressung und der Verankerungsl nge auf das Verbundverhalten von Rippenst hlen im Beton. *Deutscher Ausschuf  f r Stahlbeton (D.A.f.St)*, 389:99–174, 1988. in German.
- [32] R.E. Untrauer and R.L. Henry. Influence of Normal Pressure on Bond Strength. *ACI Journal, Proceedings*, 62(5):577–586, 1965.
- [33] E. Giuriani and P. Ronca. The grid moir  method applied to study a reinforced concrete beam. In *Atti del VII Convegno Nazionale A.I.A.S.*, pages 655–668, Cagliari (Italy), September 26-29 1979. in Italian.
- [34] A.M. Deldossi and S. Massimo. Studio sperimentale su barre ancorate in elementi di Cemento Armato con armatura trasversale di contenimento. Master's thesis, University of Brescia, Dept. of Civil Engineering, Brescia, Italy, October 1993.