



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE**

---

**TECHNICAL REPORT N. 5.4, 1996.**

**Le prove di aderenza nelle normative nazionali di  
alcuni paesi Europei**

Giovanni A. Plizzari<sup>1</sup> e Alberto Franchi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Brescia*  
<sup>2</sup>*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano*

---

## ***Ringraziamenti***

*La presente ricerca è stata finanziata dalla Ferriera Valsabbia S.p.A. di Odolo (BS); un ringraziamento particolare è rivolto al Dott. Ruggero Brunori ed al Sig. Fabrizio Oliva che hanno creduto in questa ricerca e l'hanno resa possibile.*

*Il primo autore desidera ringraziare il Prof. Ezio Giuriani per le piacevoli discussioni sugli argomenti trattati nella presente ricerca.*

*Gli autori ringraziano anche l'Ing. Enrico Donini, il Sig. Domenico Caravaggi ed il Sig. Sebastiano Curcio e tutti i tecnici del Laboratorio Prove Materiali "Pietro Pisa" dell'Università di Brescia per l'assistenza nella preparazione dei provini sperimentali.*

*Un ringraziamento particolare è infine rivolto all'Ing. Paolo Guana per la preziosa collaborazione nella conduzione delle prove sperimentali.*



# Indice

<b>Ringraziamenti</b>	i
<b>1 Introduzione</b>	1
<b>2 Descrizione delle prove</b>	9
2.1 Caratteristiche generali	9
2.2 Normativa Italiana	10
2.2.1 Descrizione dei provini	10
2.2.2 Valutazione della tensione di aderenza	12
2.2.3 Strumentazione	13
2.2.4 Modalità di prova	14
2.2.5 Modalità di getto	15
2.2.6 Controllo della geometria delle nervature	15
2.3 Normativa Inglese	16
2.3.1 Descrizione dei provini	16
2.3.2 Strumentazione	18
2.3.3 Modalità di prova	19
2.3.4 Descrizione del banco di prova	20
2.3.5 Modalità di getto	21
2.4 Normativa Svizzera	22
2.4.1 Descrizione dei provini	22
2.4.2 Strumentazione	25
2.4.3 Modalità di prova	25
2.4.4 Descrizione del banco di prova	26
2.4.5 Modalità di getto	26
2.5 Normativa Austriaca	26
2.5.1 Descrizione dei provini	26
2.5.2 Modalità di prova	26
2.6 Normativa Tedesca	27
2.6.1 Controllo dell'aderenza	27
2.7 Prove di aderenza con azione di contenimento controllata	28
2.7.1 Problematiche generali	
28	
2.7.2 Descrizione dei provini	29
2.7.3 Strumentazione	35
2.7.4 Modalità di prova	38
2.7.5 Descrizione del banco di prova	38
2.7.6 Modalità di getto	40
<b>3 Caratteristiche dei materiali</b>	41

3.1	Calcestruzzo	41
3.1.1	Requisiti delle normative	41
3.1.1.1	Normativa Italiana (CNR UNI 10020/71)	41
3.1.1.2	Normativa Inglese (BS 4449-1988)	41
3.1.1.3	Normativa Svizzera (SIA 162/1-1989)	41
3.1.1.4	Normativa Austriaca (B 4200-1987)	42
3.1.2	Caratteristiche della miscela impiegata e modalità di getto	42
3.1.3	Caratteristiche meccaniche	45
3.2	Acciaio	46
3.2.1	Prove per la determinazione dell'Indice di aderenza	46
3.2.2	Caratteristiche meccaniche	50
<b>4</b>	<b>Risultati sperimentali</b>	<b>51</b>
4.1	Normativa Italiana	51
4.1.1	Prove secondo la normativa CNR UNI 10020/71	51
4.1.2	Controllo dell'aderenza secondo la Normativa Italiana	57
4.1.3	Prove con velocità di incremento dello sforzo di aderenza costante	60
4.2	Normativa Inglese	62
4.2.1	Prove secondo la normativa BS 4449-1988	65
4.2.2	Controllo dell'aderenza	70
4.2.3	Prove con velocità di incremento dello sforzo di aderenza costante	70
4.3	Normativa Svizzera	76
4.3.1	Prove secondo la normativa SIA 162/1-1989	78
4.3.2	Controllo dell'aderenza	84
4.3.3	Prove con velocità di incremento dello sforzo di aderenza costante	85
4.4	Normativa Austriaca	87
4.4.1	Controllo dell'aderenza	87
4.5	Normativa Tedesca	89
4.5.1	Controllo dell'aderenza	89
4.6	Prove di aderenza ad azione di contenimento controllata	89
<b>5</b>	<b>Discussione sui risultati sperimentali</b>	<b>99</b>
<b>6</b>	<b>Considerazioni conclusive</b>	<b>117</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>119</b>



# 1. INTRODUZIONE

Il comportamento degli ancoraggi e delle giunzioni per sovrapposizione di barre ad aderenza migliorata di grosso diametro ( $\phi > 12-14\text{mm}$ ) è fortemente influenzato dalla fessurazione da spacco che, iniziando dalle fessure flessionali dove lo sforzo di aderenza è massimo, tende a propagarsi lungo tutta la barra in piani longitudinali passanti per il suo asse (Tepfers, 1973; Figg.1.1,1.2c). La fessurazione da spacco (chiamata anche di "splitting" in accordo con la terminologia anglosassone), è provocata dalla spinta radiale esercitata dai puntoni di calcestruzzo che si formano in corrispondenza delle nervature della barra (Tepfers, 1979; Figg. 1.2a,b).

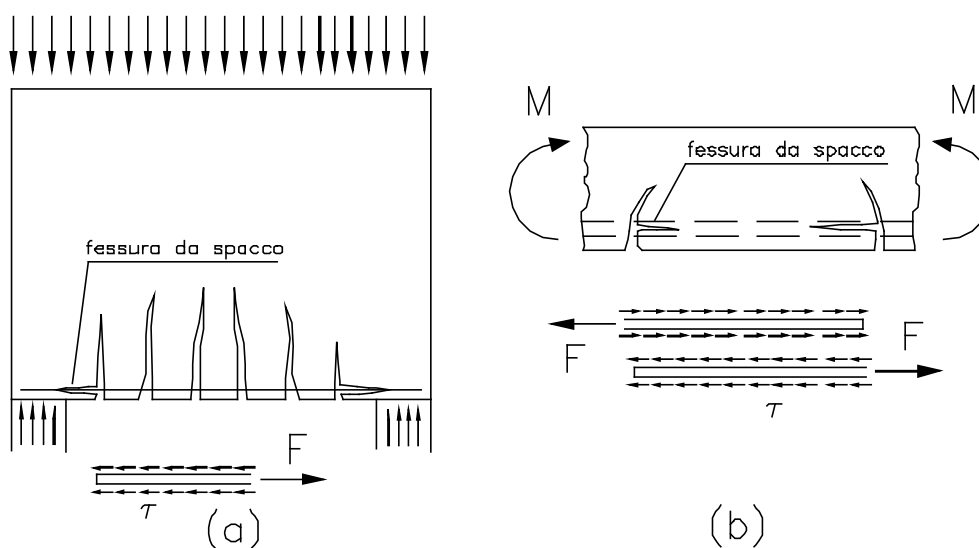


Fig.1.1 Problemi tipici di aderenza: ancoraggi (a) e giunzioni per sovrapposizione (b).

Al fine di limitare la fessurazione da spacco, e quindi di migliorare l'aderenza, risulta fondamentale prevedere un'adeguata azione di contenimento sulla barra ancorata. Parte dell'azione di contenimento è in generale fornita dal calcestruzzo di ricoprimento, con la sua resistenza a trazione prima della formazione della fessura da spacco, e con la sua resistenza residua a trazione tra i lembi della fessura da spacco quando questa è formata (Hillerborg et al., 1976; Giuriani e Rosati, 1987; Fig. 1.3). L'azione di contenimento del calcestruzzo risulta però molto limitata quando la sezione resistente del calcestruzzo è modesta, come si verifica nel caso di piccoli valori del copriferro e della distanza tra le barre ancorate (Plizzari et al., 1987).

L'azione di contenimento sulla barra ancorata potrebbe essere aumentata aggiungendo un'armatura trasversale che, attraversando la fessura da spacco, esercita un'azione di cucitura della fessura per mezzo della sua resistenza a trazione (Fig. 1.3); tale armatura, con i puntoni di calcestruzzo attiva un traliccio resistente che esercita un'azione di contenimento sulla barra (Fig. 1.4). L'azione di contenimento dell'armatura trasversale risulta particolarmente importante

in è quanto facilmente controllabile in fase di progetto. Un'ulteriore azione di contenimento potrebbe essere esercitata da una pressione trasversale esterna, come si verifica per esempio in corrispondenza degli ancoraggi sugli appoggi di una trave (Fig. 1.3b, Malvar, 1991).

In mancanza di un'adeguata azione di contenimento, le fessure da spacco tendono a propagarsi velocemente ed a causare il collasso improvviso dell'aderenza (collasso per "splitting", Fig. 1.5a), in quanto l'apertura della fessura diventa tale da consentire lo scorrimento libero della barra ancorata (Tepfers, 1973; Morita e Kaku, 1979; Plizzari e Schumm, 1990; Giuriani et al., 1991; Deldossi et al., 1993). Viceversa, in presenza di un'adeguata azione di contenimento, lo sforzo locale dell'aderenza può aumentare fino alla rottura per tranciamento dei denti di calcestruzzo tra le nervature della barra (Fig. 1.5b), con conseguente disattivazione dei puntoni di calcestruzzo; in questo caso si verifica il collasso locale dell'aderenza per danneggiamento del calcestruzzo circostante la barra (collasso per "pull-out", Plizzari e Schumm, 1990; Giuriani et al., 1991).

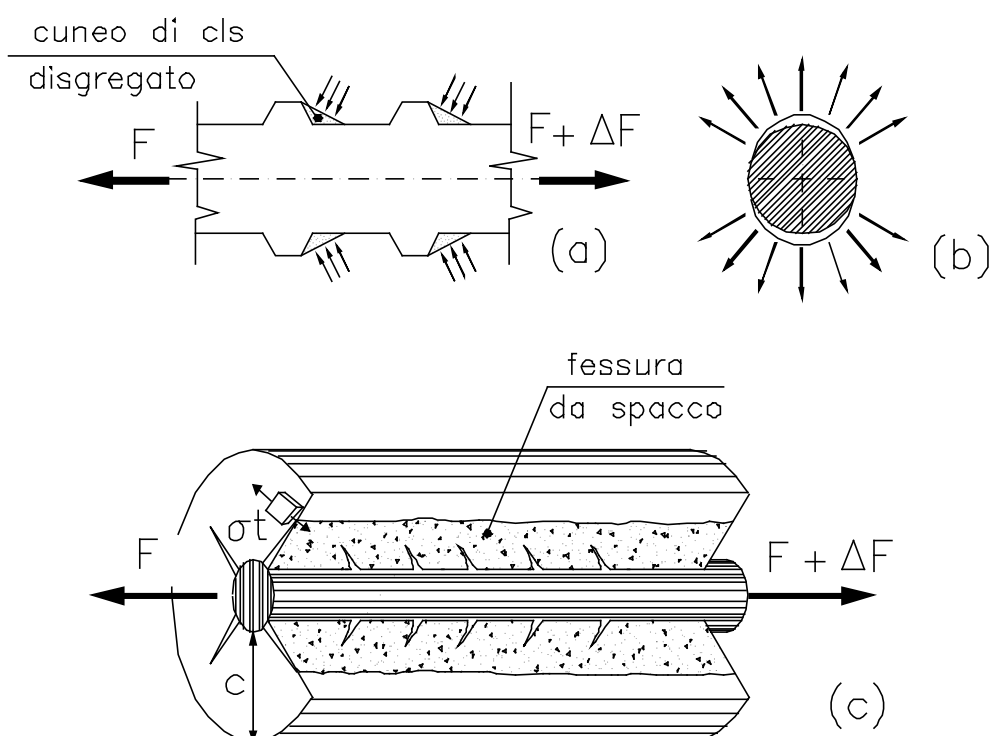


Fig.1.2 Cunei di conglomerato a monte della nervatura (Tepfers, 1979) (a), spinte radiali da essi esercitate (b) e fessure trasversali e longitudinali da spacco (Gambarova e Karakoç, 1982) (c).



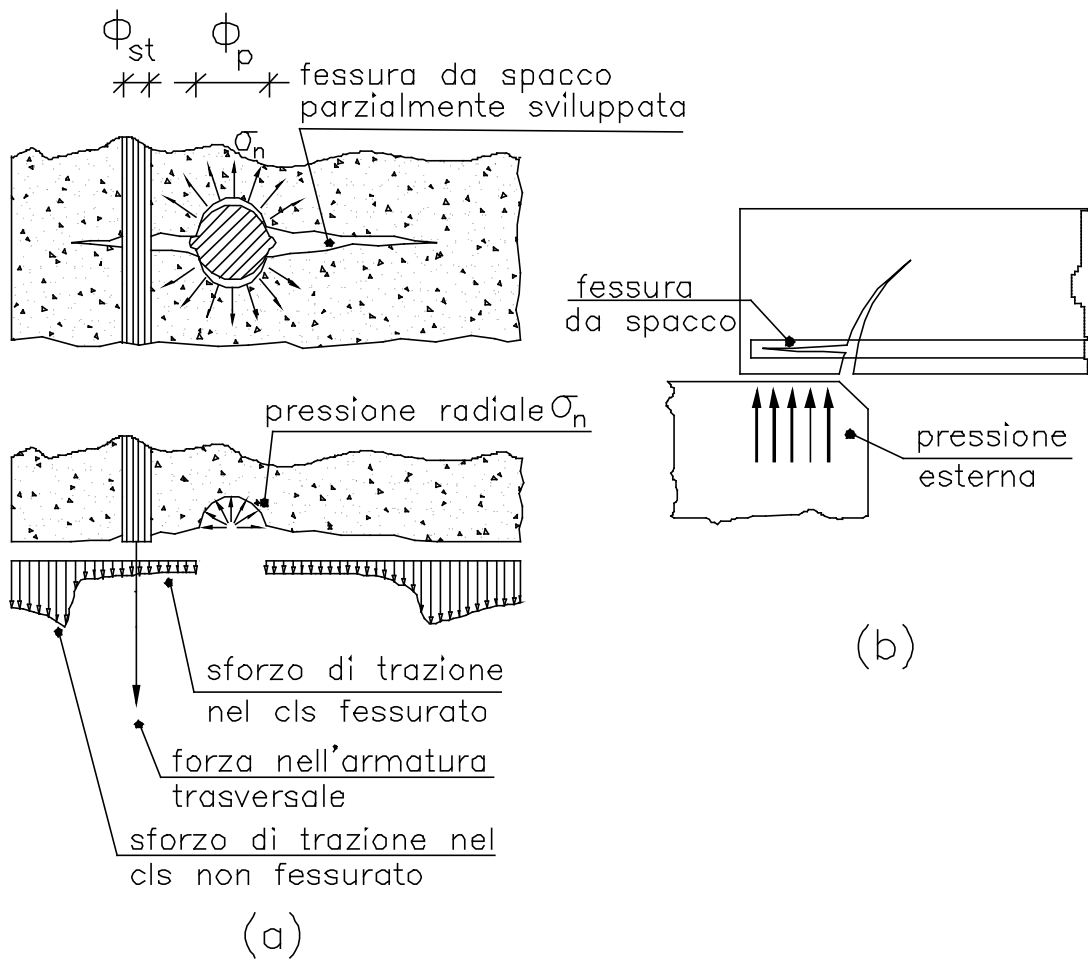


Fig.1.3 Azioni di contenimento sulla barra ancorata; azione dell'armatura trasversale e del calcestruzzo (Giuriani et al., 1991)(a); azione della pressione esterna (b).

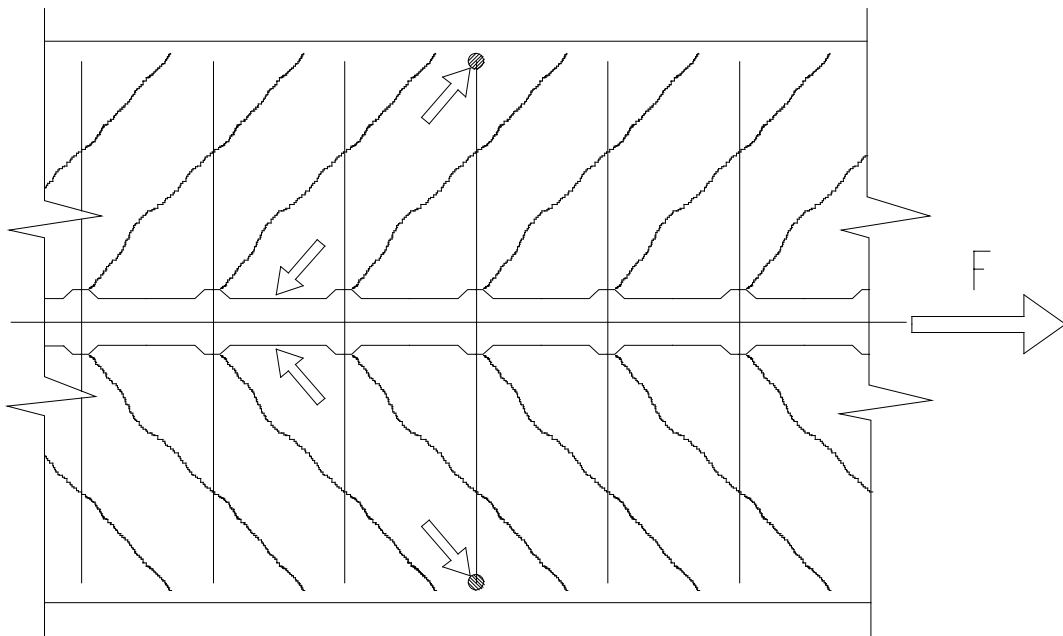


Fig.1.4 Particolare del traliccio resistente attivato dall'armatura trasversale di contenimento.

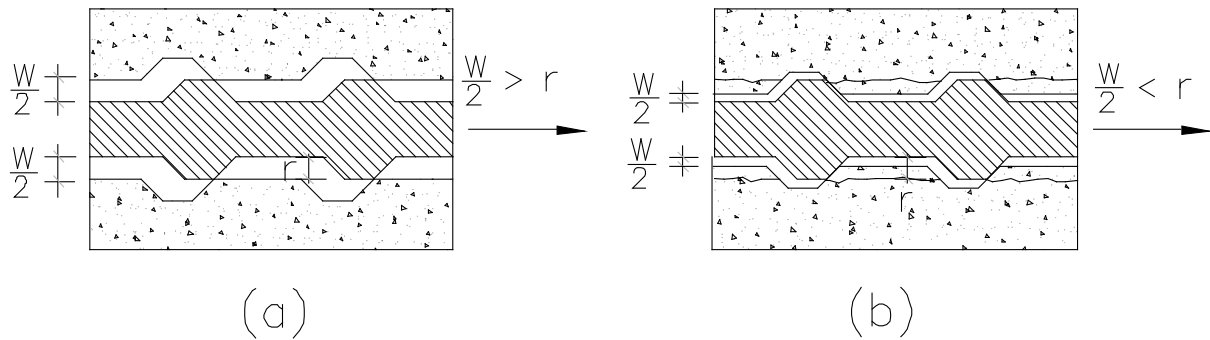


Fig.1.5 Schema del collasso locale dell'aderenza: collasso per incontrollata apertura della fessura da spacco (a); collasso per tranciamento dei denti di calcestruzzo (pull-out) (b) (Plizzari e Schumm, 1990).

Il collasso locale dell'aderenza comporta una redistribuzione degli sforzi di aderenza lungo l'ancoraggio che deve così trovare una nuova configurazione di equilibrio; quando questo non è più possibile, si verifica il collasso dell'intero ancoraggio.

Le considerazioni fatte in precedenza mettono in risalto il comportamento strutturale degli ancoraggi, fortemente influenzato dell'azione di contenimento presente sulle barre. Tale comportamento strutturale influenza certamente anche i risultati delle prove di aderenza previste dalle normative per il controllo di qualità della barra nei confronti dell'aderenza; infatti, a seconda della modalità di prova, della geometria del provino e delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo, le prove forniscono risultati diversi tra di loro. Questo aspetto risulta particolarmente importante se si pensa al mercato dell'acciaio da cemento armato in Europa, rispetto al quale la Tab. 1.1, fornita dalla FEDERACCIAI, mostra alcuni dati relativi al 1994 per alcuni paesi della Comunità Europea. Dalla tabella si può notare che l'Italia è stata il maggior produttore di acciaio da calcestruzzo armato (37.9 % del prodotto totale) e, con la Spagna, è il paese che esporta il maggior quantitativo di prodotto in altre nazioni (27.6 % del prodotto esportato). I dati in tabella non riguardano altri paesi Europei, come la Svizzera e l'Austria, o di altri continenti, come Israele, anch'essi importatori di acciaio prodotto nel nostro paese.

L'acciaio prodotto, per poter essere esportato, deve ovviamente essere conforme ai requisiti previsti dalle normative in vigore nei diversi paesi, ed in generale deve essere sottoposto a verifica sperimentale. Questo comporta, per i produttori, la necessità di avere relazioni con diversi laboratori in Europa per lo svolgimento delle prove. Occorre inoltre osservare che le diverse normative prevedono provini e modalità di prova diverse tra di loro; a titolo di esempio, si può citare che mentre la Normativa Italiana (CNR UNI 10020, 1971) e la Normativa Austriaca (B 4200, 1987) prevedono l'impiego di provini di trave (*beam test*) con diverse modalità di prova, la Normativa Svizzera (SIA 162/1, 1989) e la Normativa Inglese (BS 4449, 1988) prevedono prove di estrazione di una barra da un prisma di calcestruzzo (*pull-out test*), avente comunque geometria ed armatura integrativa diverse tra di loro. Ogni normativa prevede poi una diversa composizione e diverse caratteristiche meccaniche per il calcestruzzo da impiegare per il confezionamento dei provini. Queste diversità portano

certamente ad ottenere risultati sperimentali diversi tra di loro; inoltre, poichè il problema dell'effetto dell'azione di contenimento sugli ancoraggi è un problema ancora aperto ed oggetto di ricerche, i limiti previsti dalle varie normative potrebbero non risultare omogenei tra di loro. Per tale motivo, una stessa barra di armatura potrebbe risultare idonea all'impiego per una certa normativa ma risultare non idonea per un'altra normativa.

*Tabelle 1.1 Mercato dell'acciaio da cemento armato in alcuni paesi europei, relativo all'anno 1994 (dati FEDERACCIAI).*

<b>Paesi Europei</b>	<b>Produzione [Ktonn]</b>	<b>Importazione [Ktonn]</b>	<b>Esportazione [Ktonn]</b>	<b>Consumo App. [Ktonn]</b>
<b>Italia</b>	4453	32	1129	3356
<b>Germania</b>	1187	1038	167	2058
<b>Francia</b>	913	135	473	575
<b>Regno Unito</b>	534	146	232	448
<b>Belux</b>	352	170	311	211
<b>Olanda</b>	428	134	351	211
<b>Danimarca</b>	92	37	46	83
<b>Spagna</b>	2655	67	1256	1466
<b>Portogallo</b>	379	259	72	566
<b>Grecia</b>	672	222	45	849
<b>Irlanda</b>	0	93	3	90

Un ultimo aspetto da sottolineare riguarda la rappresentatività dei risultati delle prove di aderenza nei confronti dell'effettivo comportamento di una barra ancorata in una struttura. Con riferimento alle prove di estrazione (*pull-out test*) si verifica spesso che l'elevato valore del copriferro nei provini non corrisponde ai valori normalmente impiegati nella pratica progettuale. Inoltre, l'attrito tra il provino e la piastra di contrasto rappresenta un'azione di contenimento difficilmente quantificabile e molto variabile da prova a prova; tale azione non è oltretutto presente nelle situazioni pratiche degli ancoraggi delle giunzioni per sovrapposizione. Con riferimento alle prove su travi (*beam test*), spesso è necessario aggiungere una armatura trasversale, normalmente molto superiore a quella impiegata nella pratica progettuale, per evitare che si verifichi il collasso per taglio del provino prima del collasso dell'aderenza; il tratto ancorato potrebbe inoltre risentire dell'azione trasversale esercitata dagli appoggi della trave, azione che rappresenta un contenimento variabile durante la prova (a causa dell'incremento del

carico). Sarebbe certamente auspicabile che la prova di aderenza, oltre che consentire il controllo di qualità della barra, rappresentasse situazioni ricorrenti nella pratica progettuale, in modo da fornire delle indicazioni sull'effettivo coefficiente di sicurezza nei confronti della resistenza ultima dell'ancoraggio.

In attesa di una prossima Normativa armonizzata Europea, risulta interessante uno sull'esistenza di eventuali fattori di correlazione tra i risultati ottenuti dalle prove su una stessa barra secondo le diverse normative nazionali, in modo che i risultati ottenuti secondo una certa normativa possano essere convertiti in risultati ottenibili secondo le altre normative.

La disponibilità di affidabili modelli teorici di comportamento consentirebbe di determinare questi fattori di correlazione; purtroppo però, anche a causa della complessità del problema dell'aderenza, tali modelli non sono al momento disponibili in forma completa. Infatti, il modello proposto da Giuriani e Plizzari (1985), e successivamente integrato da Giuriani et al. (1991), presuppone l'esistenza di una fessura da spacco completamente propagata e non considera l'effetto di azioni di contenimento esterne, che si verificano per esempio a causa dell'attrito tra il provino e la piastra di contrasto, mentre i modelli proposti da Reinhardt e Van der Veen (1990) e da Rosati e Schumm (1992), integrato da Gambarova et al. (1994), non considerano l'effetto dell'armatura trasversale di contenimento. In mancanza di modelli teorici risulta utile avere alcuni primi riferimenti e fattori di correlazione sperimentali, indispensabili per una verifica degli eventuali modelli che verranno disponibili.

Scopo del presente lavoro è il confronto tra i risultati sperimentali delle prove di aderenza previste da alcune normative Europee per fornire alcune prime indicazioni sugli eventuali fattori di correlazione esistenti tra i diversi risultati. In particolare, vengono considerati le prove previste dalla Normativa Italiana (CNR UNI 10020, 1971), dalla Normativa Inglese (BS 4449, 1988), dalla Normativa Svizzera (SIA 162/1, 1989), dalla Normativa Austriaca (B 4200, 1987) e dalla Normativa Tedesca (DIN 488, 1986).

Le prove riguardano acciaio *TEMPCORE* ad aderenza migliorata del tipo B500B, comunemente impiegato nei paesi considerati, e due diversi diametri della barra ancorata, pari a 16 mm e 24 mm, per verificare gli effetti della fessura da spacco. Infatti, mentre la barra  $\phi$  16 dovrebbe comportare modeste spinte radiali, la barra  $\phi$  24 esercita elevate spinte radiali che favoriscono certamente la fessurazione da spacco. Tutti i provini delle diverse normative sono confezionati con tronchi di armatura provenienti dalla stessa colata e con lo stesso calcestruzzo, in modo da rendere i risultati indipendenti dalle caratteristiche dei materiali. In vista di una possibile Normativa Europea, le varie prove vengono commentate dettagliatamente e criticati gli eventuali problemi ad esse connessi.

Infine, poichè le differenze tra i risultati ottenuti sono dovute principalmente alla diversa azione di contenimento, viene effettuata una serie di prove sperimentali impiegando il banco di prova proposta da Plizzari, Deldossi e Massimo (1996b) che consente di controllare l'azione di contenimento applicata alla barra e di avvicinarsi alle situazioni di ancoraggi presenti nella applicazioni pratiche; i risultati ottenuti da questa serie di prove vengono confrontati con quelli ottenuti dalle prove secondo le normative.

Il rapporto è articolato in sei capitoli, brevemente riassunti nel seguito, che riguardano i diversi aspetti del lavoro.

- Nel secondo capitolo vengono descritte le geometrie dei provini previsti dalle diverse normative e le diverse modalità di prova.
- Nel terzo capitolo vengono descritte le caratteristiche geometriche e meccaniche dei materiali previsti dalle diverse normative ed impiegati nel presente lavoro.
- Nel quarto capitolo vengono riportati i principali risultati sperimentali ottenuti ed il controllo dell'aderenza della barra secondo le procedure previste dalle normative considerate.
- Nel quinto capitolo viene effettuato un confronto tra tutti i risultati ottenuti da tutte le serie di prove.
- Nel sesto capitolo vengono riportate le principali considerazioni conclusive sul lavoro svolto ed indicati i possibili sviluppi del lavoro di ricerca.



## 2. DESCRIZIONE DELLE PROVE

### 2.1 Caratteristiche generali

Le prove sperimentali della presente ricerca hanno lo scopo di confrontare la resistenza dell'aderenza di barre ad aderenza migliorata secondo le modalità di prova previste da alcune normative europee. Nei paragrafi successivi vengono descritte le geometrie dei provini richiesti dalle normative in esame e le caratteristiche dei materiali che tali normative richiedono. Per le prove sono stati realizzati otto provini, dei quali quattro con armatura  $\phi 16$  ed altri quattro con armatura  $\phi 24$ . Per il singolo diametro sono state condotte due prove secondo le modalità previste dalle diverse normative (denominate nel seguito di tipo "veloce") e due prove con incremento dello sforzo tangenziale costante (denominate nel seguito di tipo "lento"). Le prove "veloci" hanno consentito di determinare i valori richiesti dalle normative per il controllo dell'aderenza. Nelle prove di tipo "lento" si è applicato uno sforzo di aderenza (ipotizzato uniformemente distribuito lungo il tratto ancorato della barra) con velocità costante di 0.1 MPa/min, uguale per tutti i provini previsti dalle diverse normative, pari a; in questo modo è possibile eliminare la dipendenza dei risultati sperimentali dalle diverse velocità di applicazione dei carichi previste dalle varie normative. In questo caso è possibile fare un confronto tra i risultati sperimentali ottenuti per le diverse geometrie dei provini, in particolare in termini di resistenza ultima dell'ancoraggio.

Nel presente lavoro ciascun provino viene individuato da una sigla in cui:

- le prime lettere individuano il tipo di normativa (UNI o BS o SIA);
- i primi due numeri indicano il diametro della barra ancorata nel provino (16 o 24);
- le lettere - H - ed - S - indicano rispettivamente la prova veloce e la prova lenta;
- l'ultimo numero distingue i provini con lo stesso diametro e da sottoporre allo stesso tipo di prova .

In questo modo, ad esempio, con la sigla UNI24H1, si individua il primo provino della serie di prove secondo la Normativa Italiana su una barra del diametro di 24 mm da sottoporre alla prova di tipo veloce.

## 2.2 Normativa Italiana

La Normativa Italiana (D.M. 9.1.1996) prevede il controllo dell'aderenza sia attraverso prove su travi secondo le modalità previste dalla CNR UNI 10020/71, che attraverso il controllo della geometria delle nervature.

### 2.2.1 Descrizione dei provini

Il provino richiesto dalla Normativa Italiana è una trave in calcestruzzo composta da due prismi di uguale forma e dimensione, uniti con una cerniera superiormente e collegati inferiormente dalla barra (Fig.2.1). Questa, all'interno di ciascun prisma, aderisce al calcestruzzo per un tratto di lunghezza  $L_d$  pari a 10 volte il diametro; la restante porzione di barra viene rivestita con delle guaine di materiale plastico che la separano completamente dal conglomerato. Per bloccare la guaina nella posizione corretta si è provveduto ad avvolgere del nastro adesivo sul tratto di barra da proteggere, eliminando il gioco esistente tra la guaina e l'armatura.

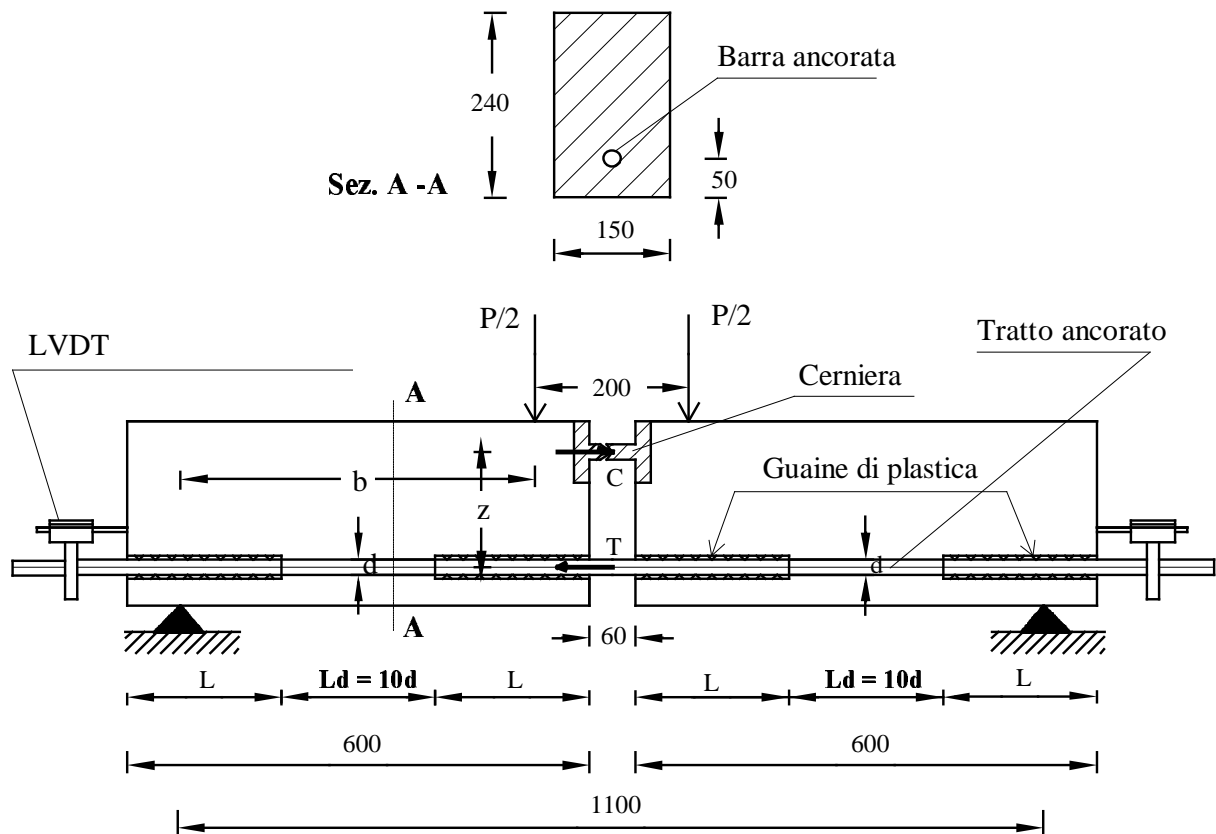


Fig.2.1 Provino previsto dalla norma CNR-UNI 10020 -71 per barre con diametro minimo di 16 mm.

La trave viene appoggiata alle estremità del banco di prova e sollecitata a flessione da due carichi concentrati di pari intensità applicati simmetricamente rispetto alla sezione di mezzeria. All'estradosso della trave, superiormente alla cerniera metallica di collegamento dei due prismi



di calcestruzzo, viene posizionata una piastra di acciaio che appoggia sulla trave in corrispondenza delle due sezioni di applicazione dei carichi. Su di essa, in posizione centrale, viene montato il martinetto per l'applicazione del carico (Fig.2.4). Il martinetto è collegato ad una pompa idraulica dotata di valvola di regolazione della pressione dell'olio a comando manuale. Sul piatto superiore del pistone del martinetto viene posta una cella di carico da 20 kN. La Normativa Italiana prescrive di inserire all'interno di ogni prisma un'armatura d'acciaio tondo liscio con una tensione di snervamento non inferiore a  $2200 \text{ Kg/cm}^2$ , avente prevalentemente il compito di incrementare la resistenza a taglio della trave. Per le prove della presente ricerca è stato impiegato un acciaio del tipo Fe 360. In Fig.2.2 vengono riportate le caratteristiche geometriche del provino e dell'armatura in esso contenuta. In Fig.2.3 è mostrato l'orientamento delle nervature della barra, posizionate in modo che le spinte radiali agiscono prevalentemente in direzione verticale. I due blocchi di acciaio che costituiscono la cerniera sono stati progettati per venire a contatto nel solo punto della sezione di mezzeria nel quale è applicata la risultante delle compressioni C (Fig.2.1). La risultante delle trazioni T è invece applicata nel baricentro della barra.

Nella Tabella 2.1, accanto alla sigla di ciascun provino, si riporta il diametro della barra in esso ancorata ed il tipo di prova eseguita.

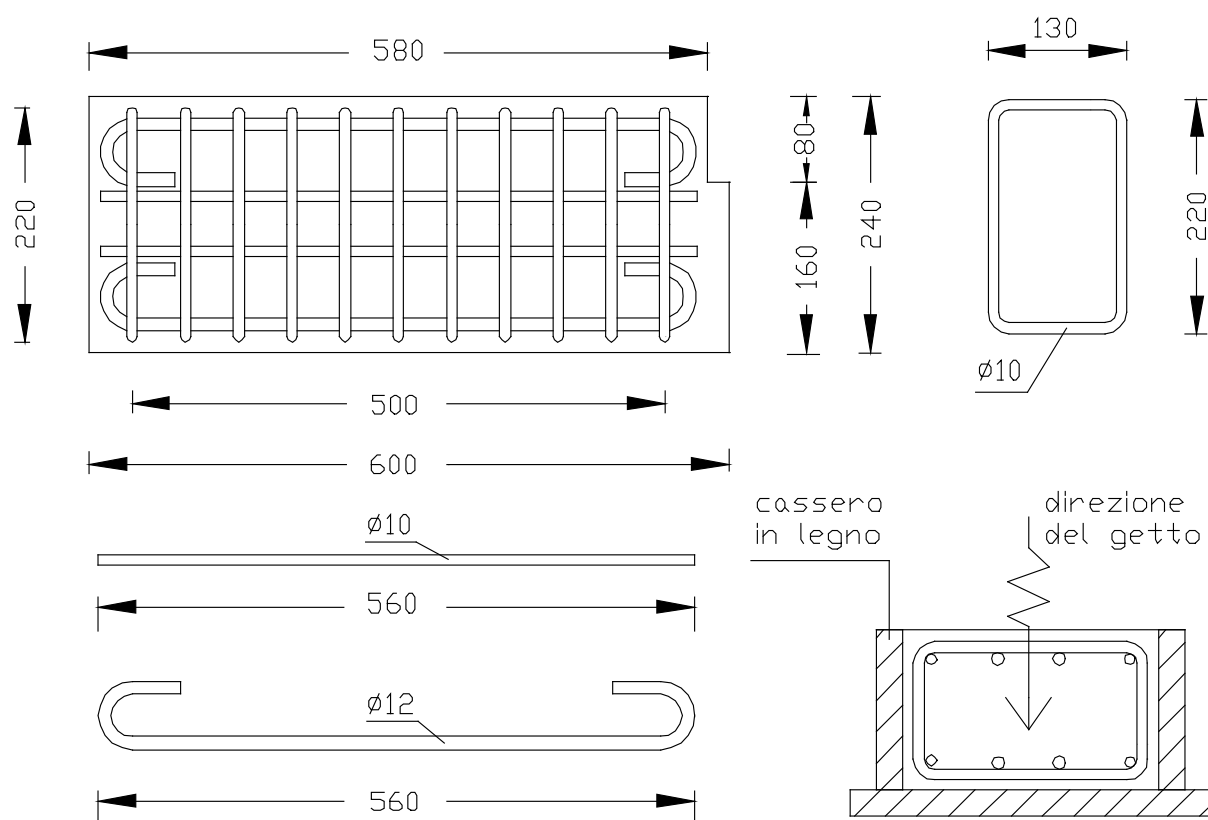


Fig. 2.2 Particolare dell'armatura contenuta nel provino di trave.

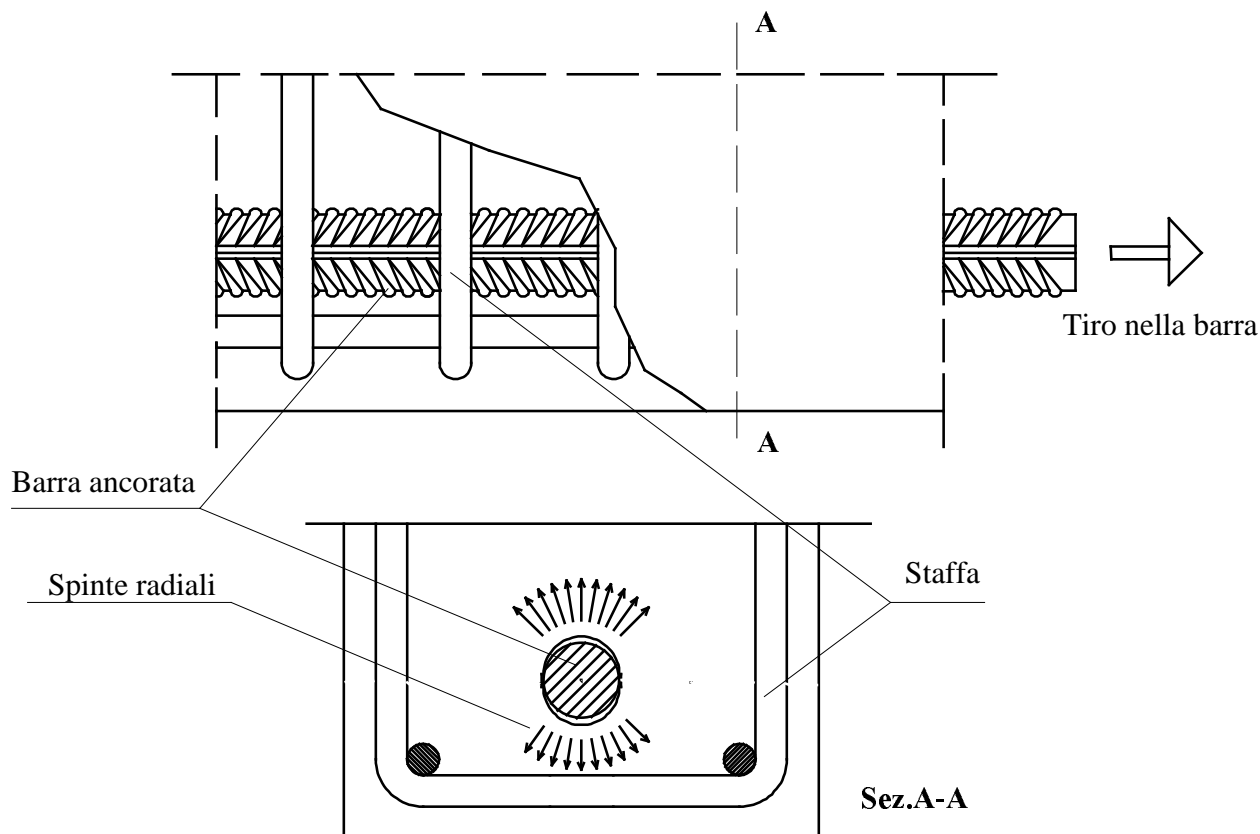


Fig.2.3 Orientamento delle nervature della barra ancorata nel provino di trave.

Tabella 2.1 Classificazione dei provini previsti nella serie di prove secondo la Normativa Italiana.

PROVINO	DIAMETRO	DATA GETTO	TIPO DI PROVA
UNI16H1	16	05/09/95	CNR-UNI 10020-71
UNI16H2	16	05/09/95	CNR-UNI 10020-71
UNI24H1	24	05/09/95	CNR-UNI 10020-71
UNI24H2	24	05/09/95	CNR-UNI 10020-71
UNI16S1	16	13/09/95	$d\tau / dt = 0.1 \text{ MPa/min.}$
UNI16S2	16	13/09/95	$d\tau / dt = 0.1 \text{ MPa/min.}$
UNI24S1	24	13/09/95	$d\tau / dt = 0.1 \text{ MPa/min.}$
UNI24S2	24	13/09/95	$d\tau / dt = 0.1 \text{ MPa/min.}$

### 2.2.2 Valutazione della tensione di aderenza

Facendo riferimento alla Fig.2.1, per l'equilibrio alla traslazione ed alla rotazione della sezione di mezzeria, è possibile determinare il legame esistente tra il carico totale  $P$  applicato alla trave ed il tiro  $T$  nella barra valutato in corrispondenza della sezione di mezzeria. I momenti flettenti esterno ed interno valgono rispettivamente :

$$M_{est} = \frac{Pb}{2}$$

$$M_{int} = Tz = \sigma_s Az$$

dove :

- A è l'area della barra;
- z è il braccio della coppia interna;
- b è la distanza tra il carico P/2 applicato al singolo prisma e la relativa sezione d'appoggio;
- $\sigma_s$  è la tensione nella barra.

Imponendo l'uguaglianza tra i due momenti si ottiene il legame:

$$T = \sigma_s A = \frac{Pb}{2z}$$

Utilizzando i valori reali  $b = 450$  mm e di  $z = 150$  mm del provino di calcestruzzo si ottiene:

$$\sigma_s = 1.5 \frac{P}{A} \quad (1)$$

Il legame analitico esistente tra la tensione nella barra e lo sforzo medio di aderenza  $\tau_b$  viene determinato imponendo l'equilibrio alla traslazione del tratto di barra ancorato, nell'ipotesi di distribuzione uniforme degli sforzi di aderenza lungo l'ancoraggio.

Per l'equilibrio si ha:

$$F_b = T$$

dove  $F_b$  è la risultante degli sforzi di aderenza.

$$F_b = 10\pi\phi^2\tau_b$$

$$T = \pi \frac{\phi^2}{4} \sigma_s$$

$$\tau_b = \frac{\sigma_s \pi \phi^2}{4 \cdot 10\pi\phi^2} = \frac{\sigma_s}{40} \quad (2)$$

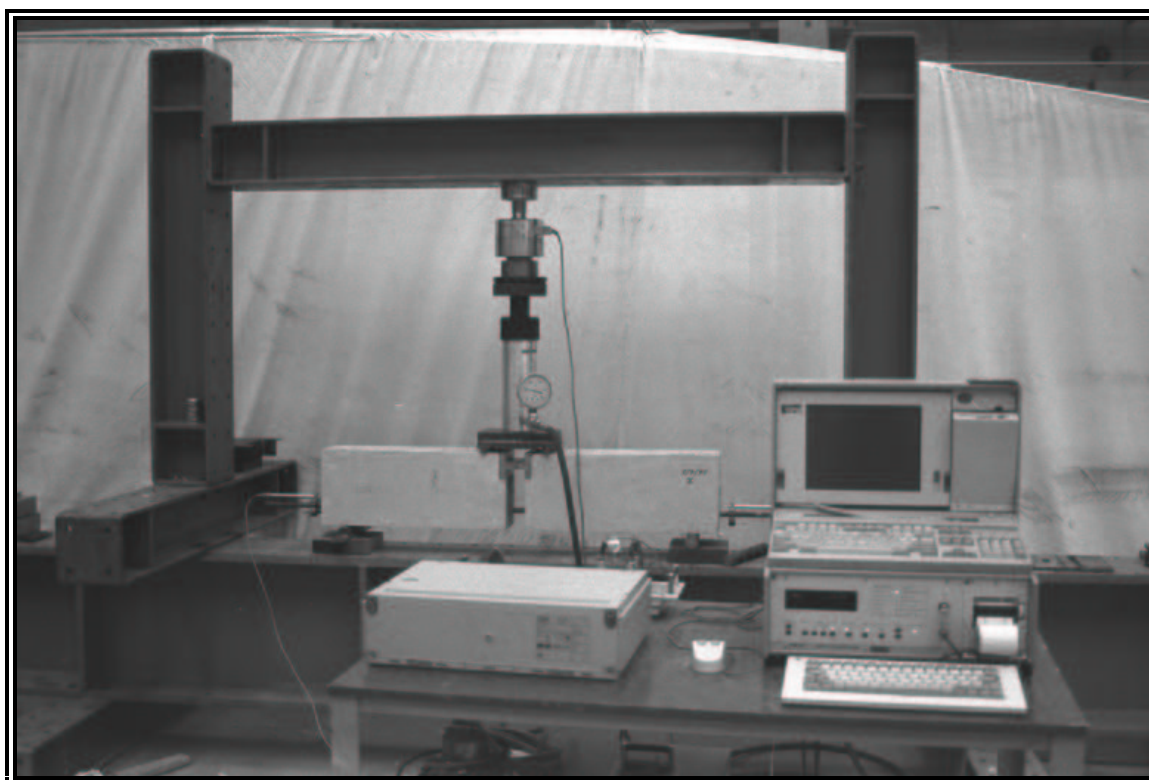
Conosciuto il carico, attraverso le relazioni (1) e (2) è possibile calcolare i valori della tensione nella barra e dello sforzo di aderenza medio presente nell'ancoraggio.

### 2.2.3 Strumentazione

La strumentazione impiegata ha lo scopo di misurare il carico applicato alla trave e gli scorrimenti alle estremità libere (esterne al provino) dei tratti ancorati. Per la misura degli scorrimenti, la Normativa Italiana prevede l'impiego di comparatori centesimali da applicare alla barra con contrasto sul calcestruzzo. Questi strumenti di misurazione, pur essendo

sufficientemente precisi, possono creare dei problemi a seguito degli errori che si possono commettere sia nella fase di lettura delle misure e sia nella fase di registrazione manuale dei dati. Per evitare questi inconvenienti, si è preferito utilizzare dei trasduttori di spostamento induttivi LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*); la punta di ciascun trasduttore viene posizionata all'interno di una scanalatura conica di una piastrina di plexiglass incollata all'estremità.

Il carico è stato misurato per mezzo di una cella di carico da 200 kN, posizionata fra il martinetto ed il telaio di contrasto superiore (Fig.2.4).



*Fig.2.4 Vista d'insieme della strumentazione utilizzata e del banco di prova.*

Tutti i segnali analogici provenienti dai trasduttori di spostamento e dalla cella di carico sono stati digitalizzati dalla centralina UPM100 della HBM collegata al P.C. per l'acquisizione e la memorizzazione dei dati (Fig.2.4).

#### **2.2.4 Modalità di prova**

In accordo con le prescrizioni delle CNR-UNI 10020-71, la prova deve essere condotta applicando passi di carico tali che l'incremento di tensione nella barra ancorata sia di  $4 \text{ Kg/mm}^2$  per ogni passo di carico. Ogni passo di carico è composto da due fasi:

1. fase di incremento del carico, da effettuare nell'arco di 30 secondi;
2. fase di stazionamento del carico, fino alla completa stabilizzazione degli scorrimenti della barra e comunque mai superiore a 120 secondi.

Ad ogni incremento del carico applicato corrisponde un proporzionale incremento della forza di estrazione della barra; ne consegue un proporzionale incremento dello sforzo di aderenza in entrambi gli ancoraggi contenuti nei prismi di calcestruzzo. Se la trave fosse perfettamente simmetrica, durante l'applicazione del carico di estrazione si dovrebbe misurare un identico sfilamento della barra alle due estremità. In realtà la condizione di perfetta simmetria viene meno a causa di diversi fattori quali: piccole differenze geometriche tra i due prismi, piccole differenze tra le armature secondarie in essi disposte, leggeri spostamenti delle guaine di plastica durante la fase di getto e presenza di piccoli difetti di montaggio della trave sul banco di prova. Per tutti questi motivi, durante la crescita dei carichi si misurano alle due estremità della trave scorrimenti leggermente diversi.

La Normativa Italiana prevede che quando all'estremità libera della barra più sollecitata viene misurato uno scorrimento di 3 mm, la prova venga fermata per consentire l'applicazione di un opportuno dispositivo di bloccaggio che impedisca all'estremità della barra di subire ulteriori scorrimenti. A questo punto la prova prosegue con ulteriori incrementi del carico fino a quando anche sulla seconda estremità libera della barra viene misurato uno scorrimento di 3 mm. Nella presente ricerca la prova non è stata interrotta al raggiungimento dello scorrimento di 3 mm sul lato del provino con maggior scorrimento, ma è stata proseguita fino al collasso dell'ancoraggio su tale lato. Solo in questo momento la barra sfilata è stata bloccata per mezzo di piastre saldate che fanno contrasto sul calcestruzzo del provino.

Le procedure per la determinazione delle caratteristiche di aderenza della barra vengono descritte in dettaglio nel Cap.4 dei risultati sperimentali.

### **2.2.5 Modalità di getto**

I casseri sono stati disposti in posizione orizzontale ed il getto è stato effettuato in due fasi successive lungo la direzione minore del prisma (Fig.2.2). Dopo circa due ore dal getto si è effettuata la lisciatura della superficie non cassetata del prisma. Prima di essere inserite nei casseri, tutte le barre sono state accuratamente lavate con acetone al fine di eliminare eventuali strati di grasso in grado di compromettere l'adesione chimica tra l'acciaio ed il calcestruzzo.

La Normativa Italiana prescrive anche le caratteristiche dei materiali da impiegare per la preparazione dei provini. Le caratteristiche del calcestruzzo richiesto dalle CNR UNI 10020-71 sono riportate nel Cap.3, dedicato alla descrizione dei materiali impiegati.

### **2.2.6 Controllo della geometria delle nervature**

La geometria delle nervature viene calcolata attraverso l'Indice di Aderenza  $I_R$ , definito dalla Normativa Italiana (D.M. 9.1.1996) come:

$$I_R = \frac{2}{\pi \cdot D_n \cdot c} \cdot (a_m \cdot I_R \cdot \cos(90 - \beta))$$

dove:

- $D_n$  è il diametro nominale della barra;
- $a_m$  è l'altezza media delle nervature;

- $c$  è l'interasse delle nervature;
- $\beta$  è l'inclinazione delle nervature sull'asse della barra (in gradi);
- $l_r$  è la lunghezza della nervatura (misurata lungo la superficie del nocciolo delle barra).

Come si può notare, il D.M. 9.1.1996 fornisce una formula per il calcolo di IR che non tiene assolutamente conto delle diverse caratteristiche geometriche delle nervature presenti sui due semiperimetri di una barra saldabile. Per ulteriori chiarimenti circa le modalità d'impiego della formula proposta dalla Normativa Italiana si rimanda il lettore al Par.3.2.1, in cui è riportato il calcolo preciso dell'indice di aderenza di tutti i diametri impiegati nella presente ricerca. Il controllo della geometria delle nervature secondo le prescrizioni della Normativa Italiana viene descritto nel dettaglio nel Cap.4 dei risultati sperimentali.

## 2.3 Normativa Inglese

La Normativa Inglese (BS 4449-1988) prevede l'esecuzione di prove di estrazione (*pull-out*) su un ancoraggio lungo di una barra in un prisma di calcestruzzo.

### 2.3.1 Descrizione dei provini

I provini sono dei semplici prismi le cui dimensioni geometriche variano a seconda del diametro della barra di prova. Nella Fig.2.5 si riporta lo schema del provino con il particolare nel quale viene indicata la corretta disposizione delle nervature della barra ancorata.

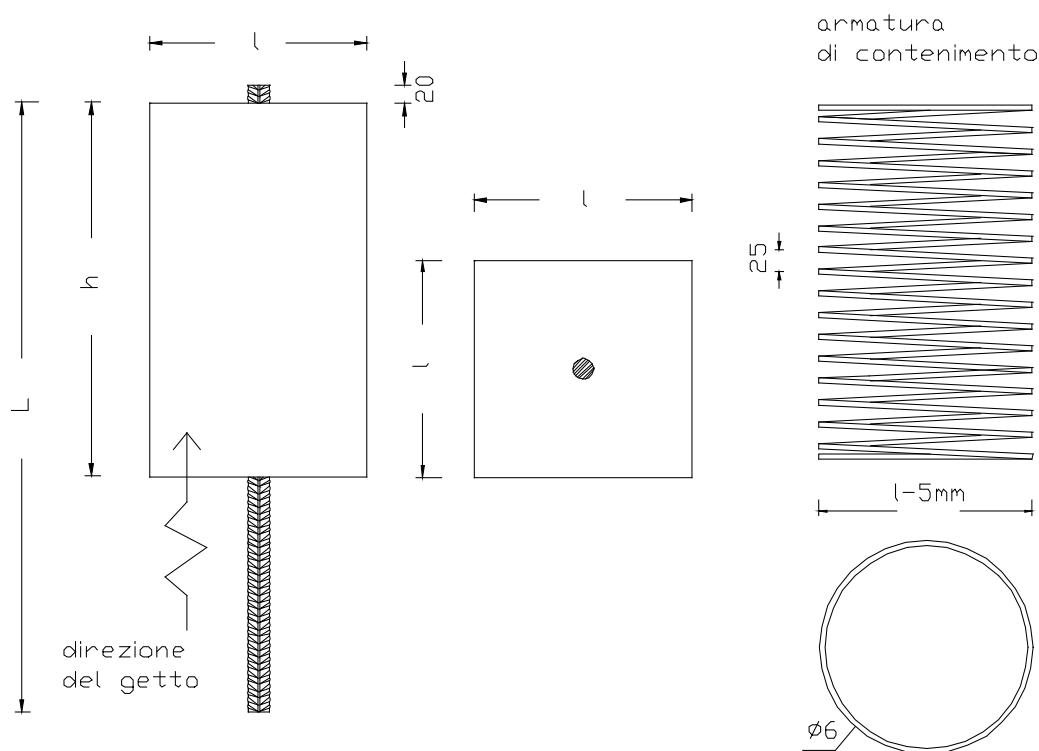


Fig.2.5 Provino per le prove di aderenza su barre come previsto dalla norma BS 4449 -1988.

La normativa prescrive la preparazione di un prisma di calcestruzzo con una sezione quadrata di 150 mm di lato per barre fino a 20 mm, e di 250 mm di lato per barre con diametro superiore. L'altezza del provino viene valutata tenendo conto delle caratteristiche di resistenza dell'acciaio di cui sono composte le barre e del diametro della barra. Per le usuali barre nervate a sezione circolare (classificate come "tipo2" dalla Normativa Inglese), l'altezza h del provino espressa in millimetri deve essere pari a :

$$h = \frac{f_y \phi}{28}$$

dove:

- $f_y$  è la resistenza caratteristica specificata dell'acciaio espressa in MPa;
- $\phi$  è il diametro nominale della barra espresso in millimetri.

A tale lunghezza di ancoraggio corrisponde una tensione media di aderenza di 7 MPa, in corrispondenza del raggiungimento del valore caratteristico dello snervamento della barra. In Tabella 2.2 si riportano, per i due diametri, le caratteristiche geometriche dei provini e la lunghezza complessiva delle barre.

*Tabella 2.2 Caratteristiche geometriche dei provini previsti dalla Normativa Inglese.*

DIM. ARMATURA		DIMENSIONI PROVINO	
DIAMETRO	LUNGHEZZA	LATO DI BASE	ALTEZZA
( mm )	L ( mm )	l ( mm )	h ( mm )
16	486	150	286
24	700	250	429

*Tabella.2.3 Caratteristiche geometriche dell'armatura di contenimento (spirale).*

DIAMETRO BARRA	DIAMETRO ESTERNO	DIAMETRO SPIRA	PASSO SPIRA
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
16	145	6	25
24	245	6	25

All'interno del prisma viene posizionata una spirale di acciaio dolce al carbonio di 6 mm di diametro, con passo di 25 mm ed avente diametro esterno 5 mm inferiore alla dimensione della sezione di base del prisma. Per la realizzazione delle spirali è stato utilizzato acciaio tipo Feb32k. In Tabella 2.3 sono indicate le caratteristiche geometriche delle armature. In Tabella 2.4 si riporta la classificazione dei provini confezionati, il tipo di prova e la data di realizzazione del getto.

Tabella 2.4 Classificazione dei provini per la serie di prove secondo la Normativa Inglese.

PROVINO	DIAMETRO	DATA GETTO	TIPO DI PROVA
BS16H1	16	05/09/95	BS 4449-1988
BS16H2	16	05/09/95	BS 4449-1988
BS24H1	24	05/09/95	BS 4449-1988
BS24H2	24	05/09/95	BS 4449-1988
BS16S1	16	13/09/95	$d\tau / dt = 0.1 \text{ MPa/min.}$
BS16S2	16	13/09/95	$d\tau / dt = 0.1 \text{ MPa/min.}$
BS24S1	24	13/09/95	$d\tau / dt = 0.1 \text{ MPa/min.}$
BS24S2	24	13/09/95	$d\tau / dt = 0.1 \text{ MPa/min.}$

### 2.3.2 Strumentazione

La strumentazione per le prove previste dalla BS 4449-1988 ha il compito di misurare il carico applicato e lo scorrimento all'estremità libera della barra. Il carico applicato viene misurato direttamente dalla cella di carico da 500 kN della macchina di prova Instron 1274. Per la misura degli spostamenti della barra ancorata si è fatto uso di trasduttori di LVDT. Il trasduttore all'estremo libero della barra viene fissato ad un supporto di alluminio incollato al calcestruzzo (Fig.2.6a); le deformazioni del calcestruzzo in corrispondenza del punto di incollaggio del supporto di alluminio vengono considerate nulle. La testina mobile del trasduttore viene collegata ad una squadretta di alluminio con sezione a C, incollata direttamente sull'estremità della barra. Per alcuni provini è stato impiegato un trasduttore a molla; in questo caso la punta del trasduttore viene inserita in una sede semisferica ricavata sulla coda della barra ancorata allo scopo di impedire improvvisi spostamenti orizzontali (Fig.2.6b).

Nelle prove denominate "lente", in cui viene applicata una velocità di carico  $d\tau/dt = 0.1 \text{ MPa/min.}$ , viene misurato anche lo spostamento dell'estremità caricata della barra. Per la misura di tale scorrimento si sono utilizzati due trasduttori di spostamento induttivi collegati ad un supporto di alluminio, fissato ortogonalmente sulla barra, in modo da compensare le eventuali rotazioni della stessa (Fig.2.7). Le punte dei trasduttori sono fissate ad una coppia di piastrine di alluminio incollate alle estremità superiori della piastra di supporto del provino. Lo spostamento dell'estremo caricato della barra è stato misurato anche in alcune prove secondo normativa. Poichè le deformazioni della piastra sono trascurabili, lo scorrimento di testa " $\delta_L$ " della barra rispetto al calcestruzzo è pari alla media delle misure fornite dai due trasduttori, depurata della deformazione elastica che si verifica nel tratto di barra "a" compreso tra la sezione di estremità del provino ed il supporto dei trasduttori (Fig.2.7):

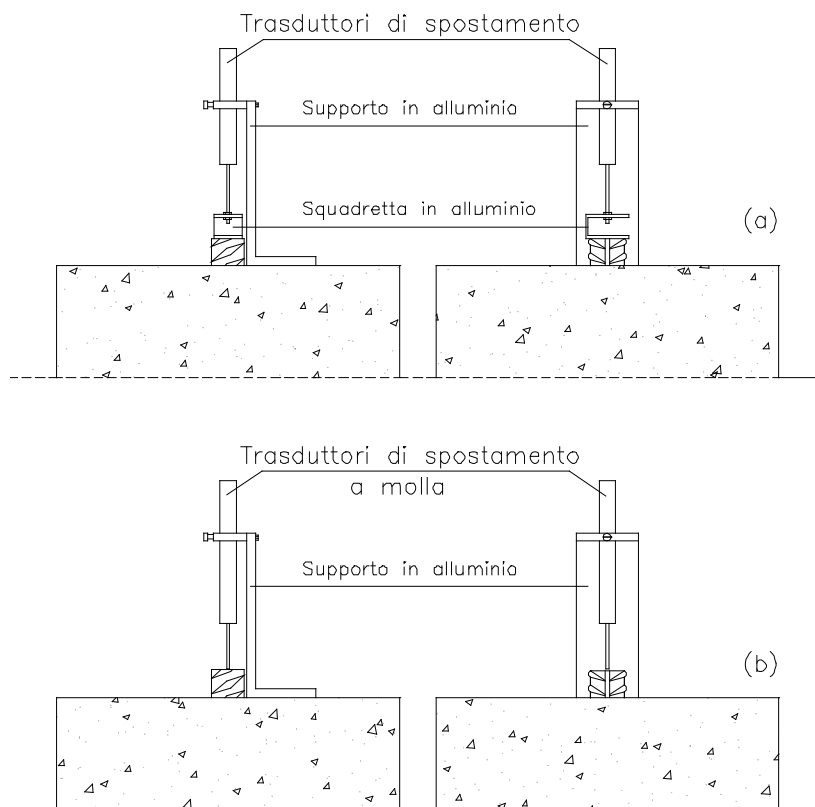
$$\delta_L = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} - \frac{F}{EA}a$$

dove :

-  $\delta_1$  e  $\delta_2$  sono le misure degli scorrimenti effettuate dai due trasduttori di testa;



- $F$  è il carico di estrazione applicato alla barra;
- $A$  è l'area nominale della barra;
- $E=206000$  MPa è il modulo di Young dell'acciaio.

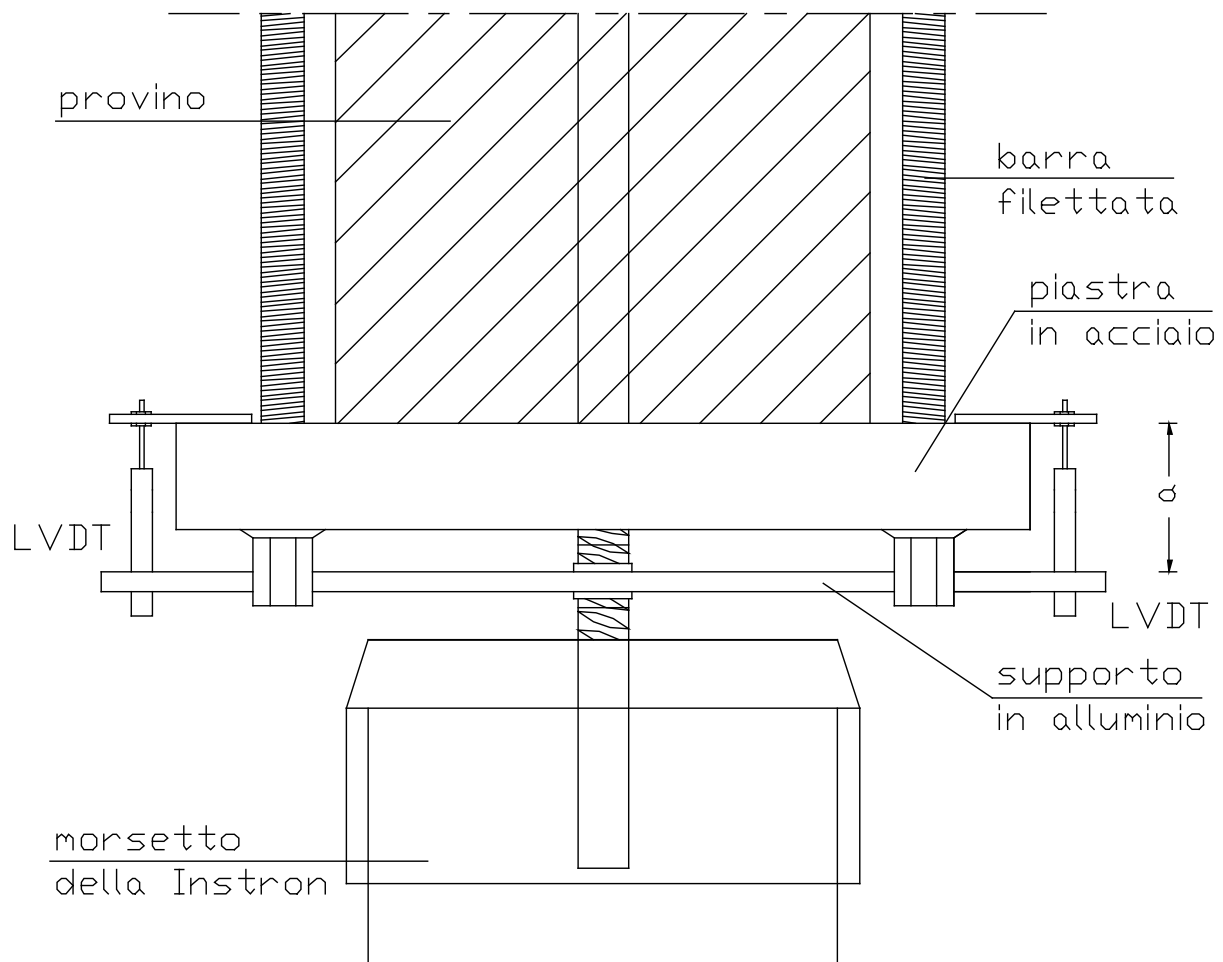


*Fig.2.6 Particolare della strumentazione per la misura degli scorrimenti all'estremità libera della barra ancorata*

Tutti i segnali analogici provenienti dai trasduttori di spostamento sono stati amplificati per mezzo di una centralina HBM e, con il segnale già amplificato della cella di carico, sono stati digitalizzati dalla scheda di conversione analogico/digitale ATMIO16X della National Instruments, ed infine registrati su un P.C. per mezzo del programma DAS per l'acquisizione dei dati.

### **2.3.3 Modalità di prova**

La Normativa Inglese prescrive di aumentare la forza assiale applicata con velocità costante in modo da raggiungere, in un periodo di due minuti, la resistenza caratteristica di snervamento dell'acciaio impiegato per le barre. Tale sollecitazione deve essere mantenuta costante per altri due minuti, trascorsi i quali viene effettuata la misura dello scorrimento alla estremità libera della barra. I limiti di accettazione previsti dalla Normativa Inglese sono riportati nel Cap.4 dei risultati sperimentali.



*Fig.2.7 Dispositivo di misurazione dello spostamento dell'estremità caricata della barra.*

### **2.3.4 Descrizione del banco di prova**

Le prove vengono effettuate con l'ausilio di un banco di contrasto, che, inserito nella macchina di prova Instron 1274, consente di effettuare prove di estrazione della barra (Fig.2.8). Il banco è costituito da due piastre di grosso spessore (50 mm), collegate ai quattro vertici da barre filettate M20; il collegamento fra il banco di prova ed il morsetto superiore della Instron non è diretto in quanto la piastra superiore è stata aggrappata tramite altri quattro tiranti filettati ad uno snodo d'acciaio, impiegato da Plizzari e coautori per precedenti prove di estrazione di barre da provini di calcestruzzo (Plizzari, Deldossi e Massimo, 1996b). Per le caratteristiche geometriche dello snodo superiore in acciaio si rimanda il lettore al Paragrafo 2.7.5, relativo alla descrizione del banco di contrasto utilizzato nella serie di prove ad azione di contenimento controllata. Nella Fig.2.9 viene riportata una fotografia che mostra il posizionamento del provino sul banco di contrasto, al momento della prova.

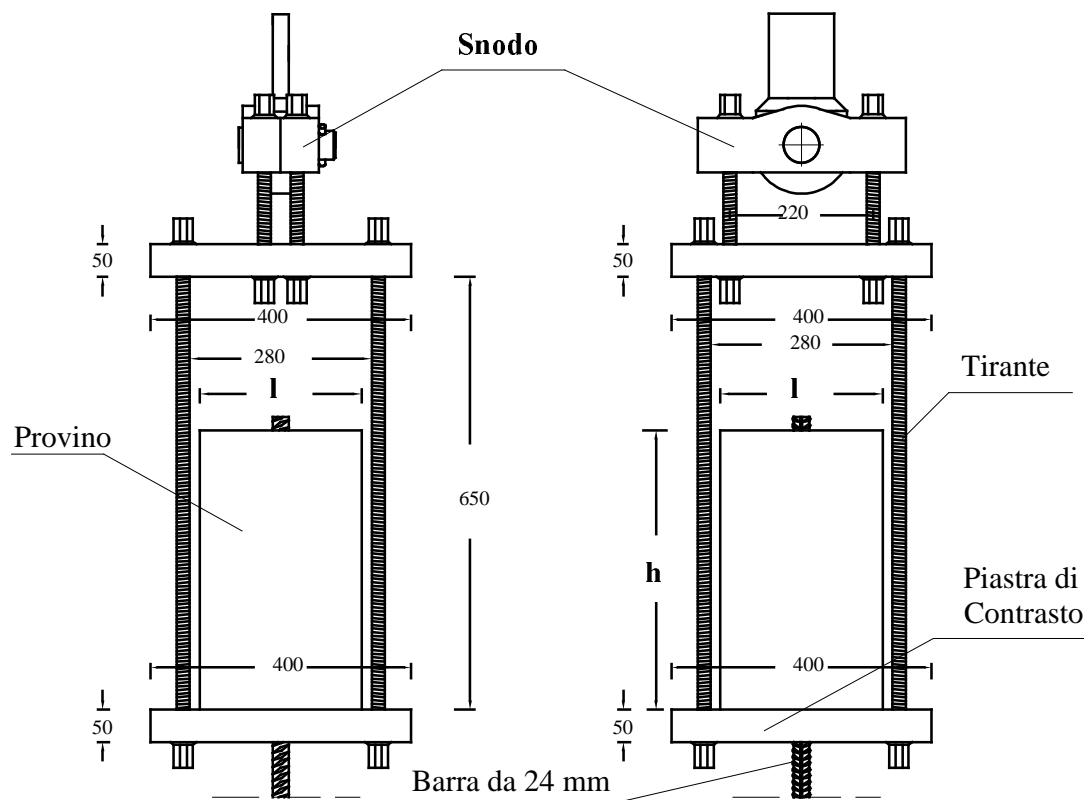


Fig.2.8 Banco impiegato per le prove di estrazione previste dalla Normativa Inglese.

Il carico considerato per la verifica di resistenza dei singoli componenti del banco di prova è il carico di snervamento della barra da 24 mm. Le prove di trazione sulla barra con diametro di 24 mm hanno fornito un carico di snervamento di 246 kN che per le verifiche di resistenza è stato arrotondato a 250 kN. I tiranti sono composti da acciaio bonificato che raggiunge il limite di rottura per tensioni comprese tra gli 800 MPa ed i 900 MPa. Lo snodo è composto da acciaio C40 ed è stato progettato per resistere ad un carico massimo di 500 kN e quindi non presenta problemi di resistenza per le prove previste dalla Normativa Inglese. Le piastre del banco sono state costruite utilizzando un acciaio del tipo Fe430b ed hanno uno spessore di 50 mm. La piastra inferiore di supporto risulta vincolata da quattro appoggi concentrati e caricata centralmente dal carico di estrazione della barra pensato uniformemente distribuito sull'impronta d'appoggio del prisma (Fig.2.9). La Normativa Inglese non prevede la presenza di alcun materiale all'interfaccia tra il provino e la piastra di contrasto.

### 2.3.5 Modalità di getto

Come per le travi del "beam-test", anche il getto dei provini della Normativa Inglese è stato effettuato in due tempi successivi per poter controllare la posizione dell'armatura di contenimento nel cassero. Prima di gettare il calcestruzzo, si è provveduto a tenere sollevata la spirale legandola con del filo di ferro all'estremità superiore del cassero. Si è così fatto un primo getto in modo da riempire metà cassero e lo si è vibrato. A questo punto si è slegata la spirale e si è fatto il secondo getto al quale ha fatto seguito una seconda vibratura e la lisciatura della superficie non cassetta del prisma.



*Fig.2.9 Particolare del provino inserito nel banco di contrasto.*

## **2.4 Normativa Svizzera**

La Normativa Svizzera SIA 162/1-1989 prevede l'esecuzione di prove di estrazione (*pull-out*) su un ancoraggio corto di una barra in un prisma di calcestruzzo.

### **2.4.1 Descrizione dei provini**

Il provino previsto alla Normativa Svizzera è un cubo di calcestruzzo nel quale, in posizione baricentrica, viene ancorata la barra (Fig.2.10). La dimensione del lato del cubo non dipende soltanto dal diametro della barra ma anche dalle caratteristiche di resistenza dell'acciaio di cui questa è composta. Per l'acciaio tipo S 500 (definito nel seguito anche B500B, con resistenza caratteristica  $f_{yk} = 500$  MPa) il lato del cubo deve essere pari a 10 volte il diametro della barra,

e comunque mai inferiore a 160 mm. Per acciaio del tipo S 550 è invece richiesto un lato pari a 20 volte il diametro della barra e comunque mai inferiore a 160 mm. L'acciaio utilizzato nella presente ricerca è del tipo S 500 (o B500B). Le nervature della barra sono state sistemate in modo esercitare sul calcestruzzo delle spinte radiali nella direzione di uno dei due assi di simmetria del provino.

Nella Tab.2.6 sono riportate le caratteristiche geometriche dei provini impiegati per la serie di prove secondo la Normativa Svizzera.

Tabella 2.6 *Caratteristiche geometriche dei provini per la serie di prove secondo la Normativa Svizzera.*

DIM. ARMATURA		LATO
DIAMETRO	LUNGHEZZA	PROVINO
[mm]	L [mm]	l [mm]
16	360	160
24	440	240

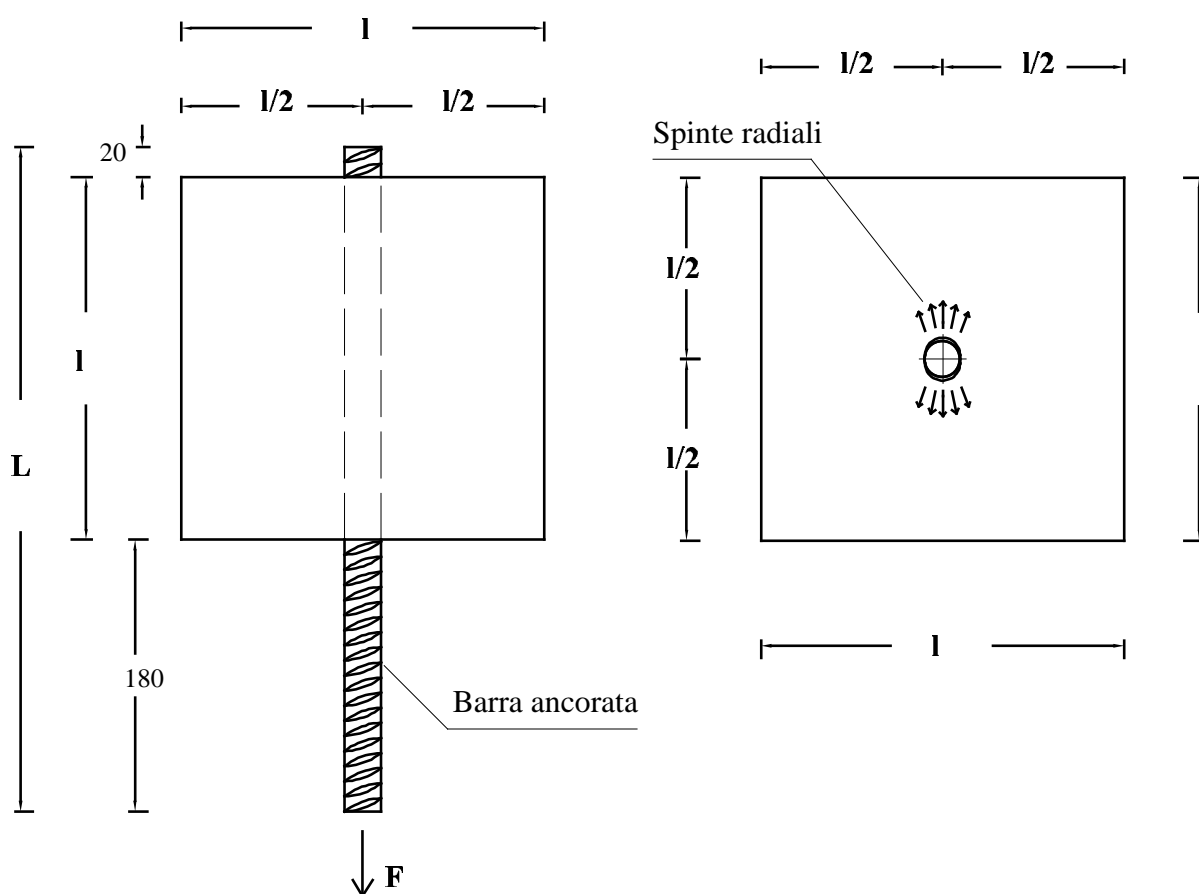


Fig.2.10 *Provino per le prove di aderenza previsto dalla norma SIA 162/1-1989.*

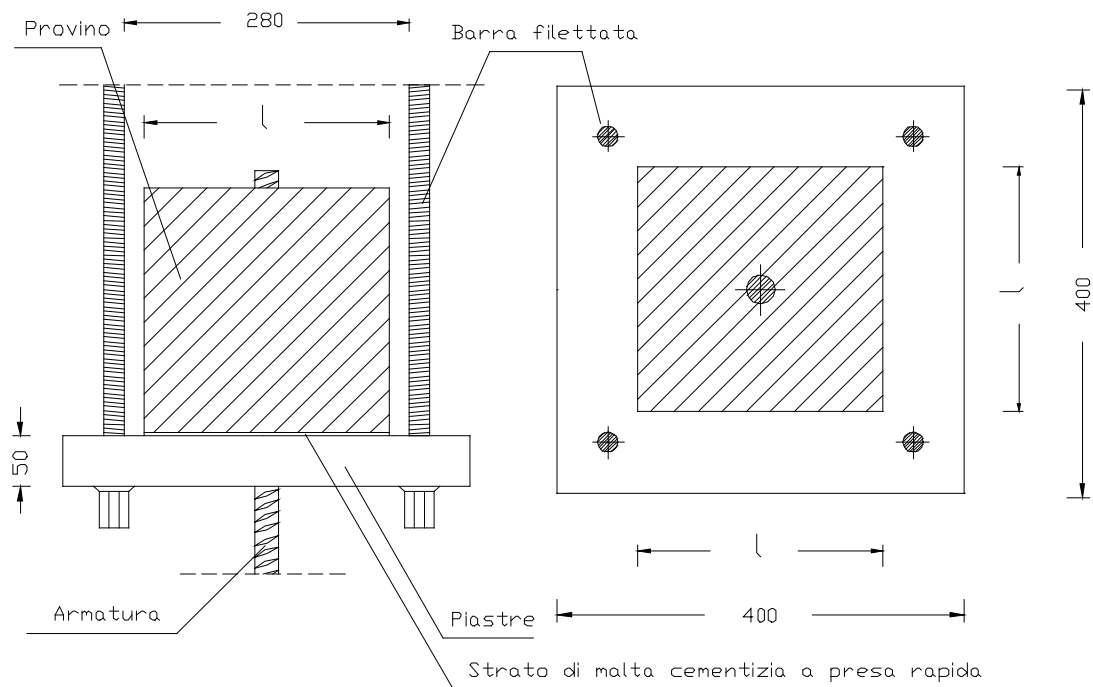


Fig.2.11 Posizionamento del provino sul banco di prova.

La Normativa Svizzera non richiede l'aggiunta di armatura secondaria di contenimento nel provino e prevede l'applicazione di uno strato di materiale che consenta di avere un appoggio uniforme del provino sulla piastra di acciaio (Fig.2.11). A tal fine, per le prove della presente ricerca è stata impiegata una malta a rapida presa e indurimento (UMAFIX), che consente di avere una resistenza di 4,0 MPa dopo un'ora dall'impasto. Prima di inserire il singolo provino sul banco di prova si è provveduto a spalmare un sottile strato di malta direttamente sulla piastra inferiore di contrasto. Il letto di malta cementizia consente di appoggiare correttamente il provino, livellando le imperfezioni presenti sulla superficie d'appoggio.

La classificazione dei provini prevista per questa serie di prove è mostrata nella Tab.2.7.

Tabella 2.7 Classificazione dei provini per la serie di prove secondo la Normativa Svizzera.

PROVINO	DIAMETRO	DATA GETTO	TIPO DI PROVA
SIA16H1	16	05/09/95	SIA 162/1-1989
SIA16H2	16	05/09/95	SIA 162/1-1989
SIA24H1	24	05/09/95	SIA 162/1-1989
SIA24H2	24	05/09/95	SIA 162/1-1989
SIA16S1	16	13/09/95	$d\tau / dt = 0.1 \text{ MPa/min.}$
SIA16S2	16	13/09/95	$d\tau / dt = 0.1 \text{ MPa/min.}$
SIA24S1	24	13/09/95	$d\tau / dt = 0.1 \text{ MPa/min.}$
SIA24S2	24	13/09/95	$d\tau / dt = 0.1 \text{ MPa/min.}$



*Fig.2.12 Vista della strumentazione applicata al provino inserito nel banco di contrasto.*

#### **2.4.2 Strumentazione**

Come per la Normativa Inglese, la strumentazione impiegata ha lo scopo di misurare il carico applicato e lo scorrimento della barra, sia all'estremità caricata che all'estremità non caricata della barra. Poiché la strumentazione impiegata è identica a quella per le prove della Normativa Inglese, per una sua descrizione dettagliata si rimanda al Par.2.3.2. In Fig.2.12 è mostrato il provino inserito nel banco di contrasto e strumentato con i trasduttori di spostamento applicati sull'estremo libero e sull'estremo caricato della barra.

#### **2.4.3 Modalità di prova**

La Normativa Svizzera SIA 162/1-1989 prescrive che il carico di estrazione sia aumentato progressivamente in modo che la tensione nella barra aumenti di 25 MPa ogni minuto. La misura dell'aderenza viene effettuata in corrispondenza di uno scorrimento all'estremo non caricato pari a 0.1 mm per l'acciaio S 500 e 0.01 per l'acciaio S 550. La procedura per la verifica dell'aderenza della barra secondo la Normativa Svizzera viene descritta in dettaglio nel Cap.4 dei risultati sperimentali.

## **2.4.4 Descrizione del banco di prova**

Il banco di prova è identico a quello impiegato per le prove secondo la Normativa Inglese, descritto dettagliatamente nel Par.2.3.4.

## **2.4.5 Modalità di getto**

Le modalità riguardanti la sistemazione della barra all'interno del cassero e le fasi del getto sono identiche a quelle descritte relativamente alla Normativa Inglese, descritte nel dettaglio nel Par.2.3.5.

## **2.5 Normativa Austriaca**

La Normativa Austriaca (B 4200-1987), come la Normativa Italiana, prevede l'esecuzione di prove su travi (*beam test*) ed il controllo della geometria delle nervature.

### **2.5.1 Descrizione dei provini**

I provini richiesti dalla Normativa Austriaca sono identici a quelli richiesti dalla Normativa Italiana (Par.2.2.1.); identiche risultano pure le condizioni di vincolo a cui la trave risulta sottoposta nel corso della prova.

### **2.5.2 Modalità di prova**

La prova di aderenza deve aver luogo dopo 28 giorni di presa ed è costituita da almeno 20 fasi di carico. Il carico viene aumentato progressivamente per mezzo minuto e viene successivamente lasciato assestare per un altro mezzo minuto. Al termine del periodo di assestamento si misurano gli scorrimenti alle due estremità della barra; tali scorrimenti devono essere misurati con la precisione minima di 1/100 di millimetro. Per ogni prova vengono effettuate dieci misurazioni degli scorrimenti alle due estremità della barra ed è così possibile tracciare i grafici delle due curve relative al legame sperimentale esistente fra lo sforzo di aderenza e lo scorrimento dell'estremità libera della barra.

Le modalità per la determinazione dell'aderenza secondo la Normativa Austriaca, molto simili a quelle previste dalla Normativa Italiana, sono descritte dettagliatamente nel Cap.4 dei risultati sperimentali. Un'ultima piccola differenza fra le due normative riguarda le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo da impiegare per il confezionamento dei provini: infatti, mentre la Normativa Italiana prevede una resistenza cubica a compressione del calcestruzzo che variabile tra i 22 e i 32 MPa (con un valore di riferimento di 27 MPa), per la Normativa Austriaca tale valore può variare fra i 27 e i 33 MPa (con un valore di riferimento di 30 MPa). Poichè la resistenza del calcestruzzo è stata comunque mantenuta costante per tutte le prove, i provini sono uguali e la velocità di carico è molto simile, nella presente ricerca la



determinazione dell'aderenza secondo la Normativa Austriaca è stata fatta sulla base dei risultati sperimentali ottenuti dalle prove condotte secondo la Normativa Italiana.

## 2.6 Normativa Tedesca

La Normativa Tedesca (DIN 488-1986) prescrive per le barre da cemento armato solo un test per il controllo delle caratteristiche geometriche delle nervature.

### 2.6.1 Controllo dell'Aderenza

Come per la Normativa Italiana, la DIN 488-1986 richiede la determinazione di un Indice di Aderenza  $f_R$ ; nella determinazione di tale coefficiente, la Normativa Tedesca tiene conto della possibilità che sulla barra siano presenti diversi tipi di nervature, ciascuna con una propria forma geometrica ed una propria inclinazione rispetto all'asse longitudinale della barra. La formula generale proposta dalla DIN 488-1986 per una barra ad aderenza migliorata laminata a caldo è la seguente:

$$f_R = \frac{1}{\pi \cdot d_s} \cdot \sum_{n=1}^k \frac{(1/m) \cdot \sum_{l=1}^m F_{R(n,l)} \cdot \sin \beta_{(n,l)}}{c_{s(n)}}$$

in cui:

- $f_R$  è l'indice di aderenza della barra;
- $F_R$  è l'area della sezione longitudinale della generica nervatura;
- $d_s$  è il diametro nominale della barra espresso in mm;
- $\beta$  è l'inclinazione della generica nervatura rispetto all'asse longitudinale della barra;
- $k$  è il numero delle serie di nervature presenti sulla circonferenza;
- $m$  è il numero di angolature (nervature) che compongono la generica serie;
- $c_s$  è la distanza media fra due nervature consecutive dello stesso tipo espressa in mm.

Le barre  $\phi 16$  e  $\phi 24$  impiegate nella presente ricerca, presentano due serie di nervature disposte simmetricamente sulle due semicirconferenze del nocciolo della barra, separate dalle due costole longitudinali. Nella prima serie è presente un solo tipo di nervatura, inclinata rispetto all'asse longitudinale della barra di un angolo pari a  $\beta_1$ , ed avente sezione di area  $F_{R1}$  (lato a, Fig.3.1). La seconda serie è invece composta da due diverse nervature, aventi inclinazione rispetto all'asse della barra pari a  $\beta_2$  e  $\beta_3$ , e sezioni di area pari a  $F_{R2}$  e  $F_{R3}$  (lato b, Fig.3.1). Per barre di questo tipo, la formula prescritta dalla DIN 488-1986 assume la seguente forma:

$$f_R = \frac{1}{\pi \cdot d_s} \cdot \left[ \frac{F_{R1} \sin \beta_1}{c_{s1}} + \frac{(F_{R2} \sin \beta_2 + F_{R3} \sin \beta_3) / 2}{(c_{s2} + c_{s3}) / 2} \right]$$

dove:

- $F_{R1}$  è l'area della sezione longitudinale della nervatura della prima serie;
- $F_{R2}$  e  $F_{R3}$  sono le aree delle sezioni longitudinali per le due nervature della seconda serie;
- $c_{s1}$  è la distanza media tra due nervature consecutive appartenenti alla prima serie;

-  $c_{s2}$  e  $c_{s3}$  sono le distanze medie fra due nervature consecutive dello stesso tipo, appartenenti alla seconda serie.

L'area  $F_R$  della sezione longitudinale della generica nervatura viene calcolata facendo riferimento ad un rettangolo equivalente, avente per base la lunghezza  $l_R$  della nervatura (misurata lungo il perimetro del nocciolo della barra) ed altezza calcolata come media di tre termini; le due altezze della nervatura misurate in corrispondenza di  $l_R/4$  e  $(3/4)l_R$  e la metà dell'altezza della nervatura misurata in corrispondenza di  $l_R/2$ . L'altezza equivalente di ciascuna tipo di nervatura deve essere calcolata facendo la media delle misure effettuate su almeno due nervature consecutive di quel tipo e rispettando la tolleranza minima di 0.1 mm. Analogamente, il valore della distanza media  $c_s$  per ciascun tipo di nervatura deve essere determinato come valore medio delle distanze di almeno undici nervature di quel tipo, e sempre rispettando la tolleranza minima di 0.1 mm. Come si può facilmente osservare, la Normativa Tedesca prescrive che, relativamente alla seconda serie di nervature, venga considerata come sezione complessiva resistente la media delle proiezioni delle due angolature sul piano ortogonale all'asse della barra. È importante sottolineare il fatto che, nelle prescrizioni della Normativa Italiana, non viene fornita alcuna indicazione in ordine alla determinazione dell'indice di aderenza per le barre munite di serie di nervature diverse tra di loro.

Il controllo dell'aderenza secondo la Normativa Tedesca viene descritto nel dettaglio nel Cap.4 dei risultati sperimentali.

## **2.7 Prove di aderenza con azione di contenimento controllata**

### **2.7.1 Problematiche generali**

Come ampiamente descritto in precedenza ed evidenziato dai numerosi risultati sperimentali presenti in letteratura, il comportamento e la resistenza ultima dell'aderenza è fortemente influenzata dall'azione di contenimento presente sulla barra. Quando questa azione è legata alle caratteristiche geometriche del provino ed alle caratteristiche meccaniche dei materiali, il suo contributo può essere valutato per mezzo di modelli di comportamento teorici. Più difficilmente valutabile risulta invece l'azione di contenimento che nasce per l'attrito sulla superficie di contatto tra il provino e la piastra di contrasto, che ostacola la libera apertura delle fessure da spacco, oppure l'azione causata dalla reazione degli appoggi sui provini di trave quando agiscono sul tratto di barra ancorata. Tali azioni, legate alle modalità di prova e molto variabili da caso a caso, sono difficilmente valutabili con precisione e variano al variare del carico di estrazione applicato al provino. Per tali motivi, in una prova di aderenza risulta particolarmente importante eliminare la dipendenza dei risultati sperimentali da queste azioni di contenimento non controllabili, in modo da rendere i risultati della prova più rappresentativi, aspetto particolarmente importante per una prova secondo normativa, e facilmente riproducibili.

Il banco di prova proposto da Plizzari, Deldossi e Massimo (1996b) consente l'esecuzione di prove di estrazione senza azioni di contenimento trasversale (dovute all'attrito fra il provino ed i supporti), e nello stesso tempo consente la formazione della fessura da spacco nel piano

longitudinale di simmetria del provino (AA, Fig.2.13), in quanto la piastra di contrasto è composta da due blocchi di acciaio separati (Fig. 2.14).

## 2.7.2 Descrizione dei provini

Il provino è costituito da un prisma di calcestruzzo nel quale è stata ancorata la barra, disposta lungo uno degli assi di simmetria del provino (Fig.2.13). Le nervature della barra ancorata sono disposte in modo da esercitare la massima spinta radiale nella direzione dei blocchi B1 e B2 del provino e formare quindi la fessura da spacco principale nel piano AA, non contrastata dalle piastre inferiori del banco (Fig.2.14). I provini sono dotati di due angolari di acciaio che con un lato ridistribuiscono le forti compressioni che si verificano nel calcestruzzo, con l'altro lato creano una discontinuità nel provino che favorisce la formazione della fessura da spacco nel piano AA (Figg.2.13 e 2.15). La lunghezza del tratto ancorato, costante per tutti i provini, è stata scelta per simulare il comportamento di una barra ancorata nella zona di influenza  $\Delta z$  dell'armatura trasversale, assunta in queste prove pari a 150 mm (Fig.2.16). Questo corrisponde ad una lunghezza di ancoraggio pari a 9.4 diametri per la barra  $\phi 16$  e 6.2 diametri per la barra  $\phi 24$ . Questa leggera disomogeneità tra le due barre non dovrebbe però influenzare sensibilmente i risultati.

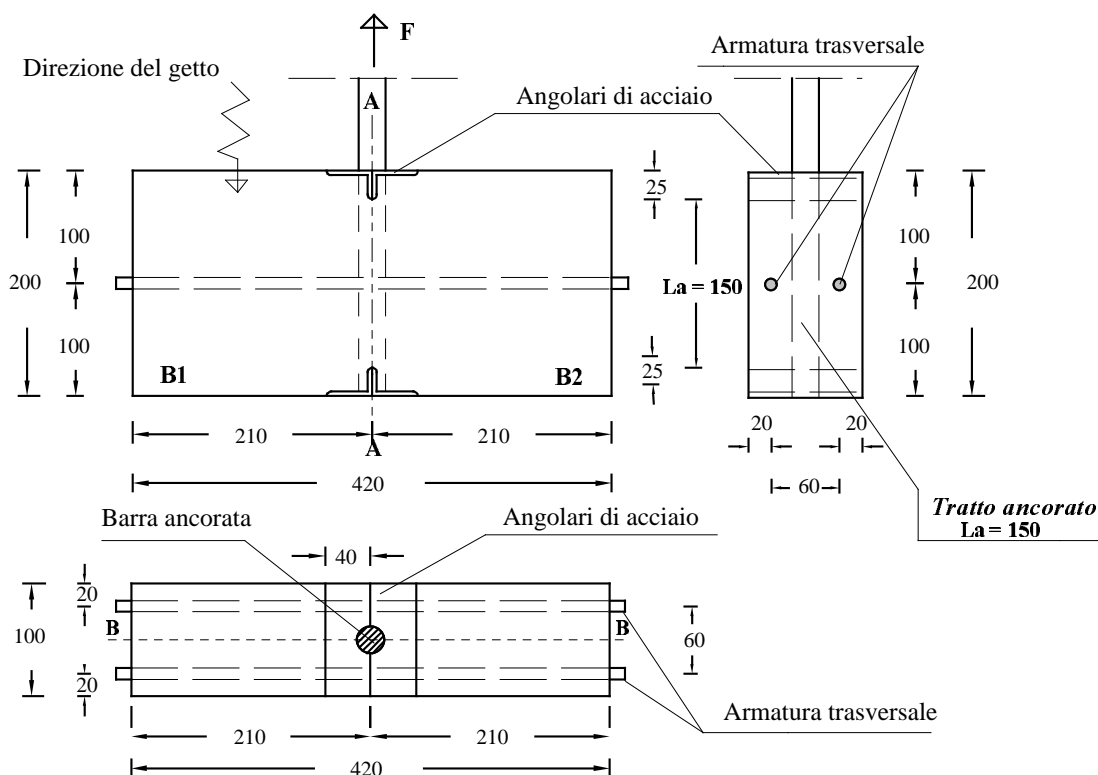


Fig.2.13 Caratteristiche geometriche dei provini per le prove con azione di contenimento controllata.

Le armature trasversali di contenimento sono costituite da due barre disposte ortogonalmente al piano AA di formazione della fessura da spacco principale. Tale disposizione fa sì che le due

armature trasversali subiscono la massima sollecitazione e risultino sollecitate dalla stessa forza di trazione, evitando così l'insorgere di indesiderate rotazioni relative tra i due blocchi di calcestruzzo B1 e B2 separati dalla fessura da spacco. La scelta di barre trasversali di piccolo diametro, lunghe quanto il provino, rappresenta anche il comportamento di armature trasversali infinitamente lunghe. Le nervature dell'armatura secondaria sono disposte in modo da evitare spinte radiali verso l'esterno del provino (Fig.2.17).

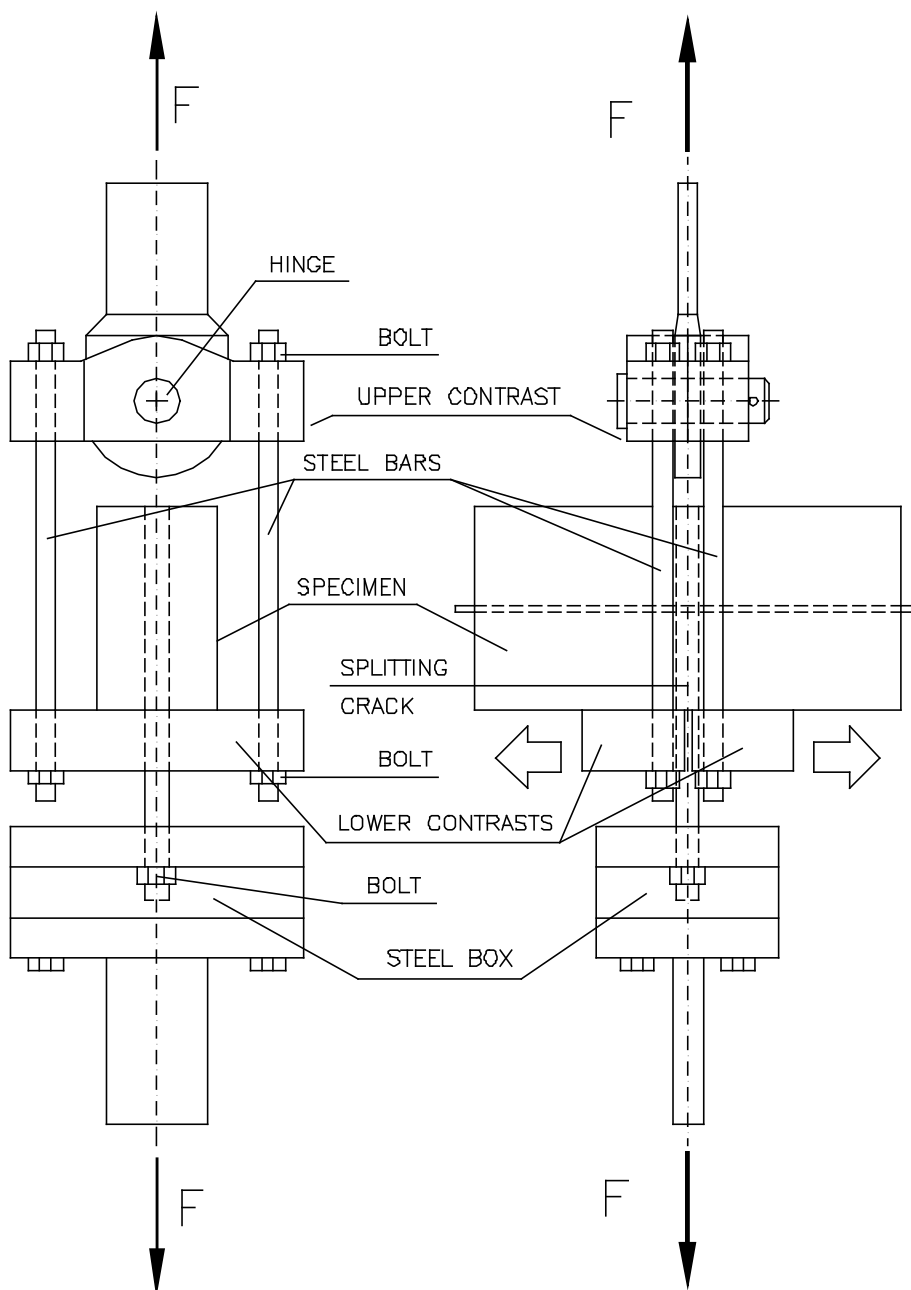


Fig.2.14 Schema del banco per le prove con azione di contenimento controllata.

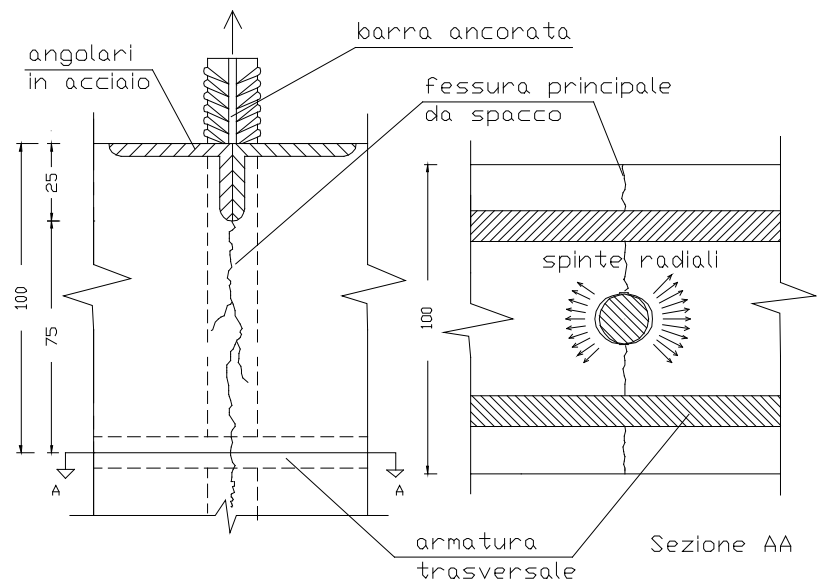


Fig.2.15 Particolare dell'orientamento delle nervature della barra ancorata nel provino di calcestruzzo.

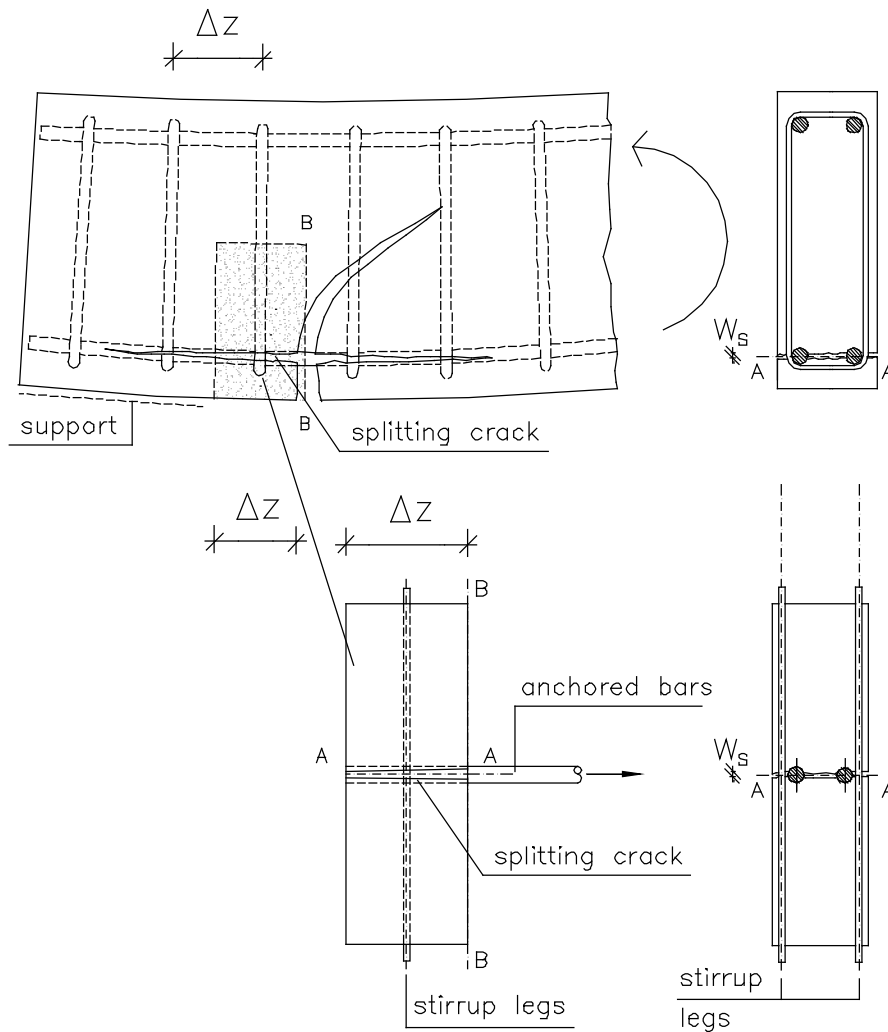
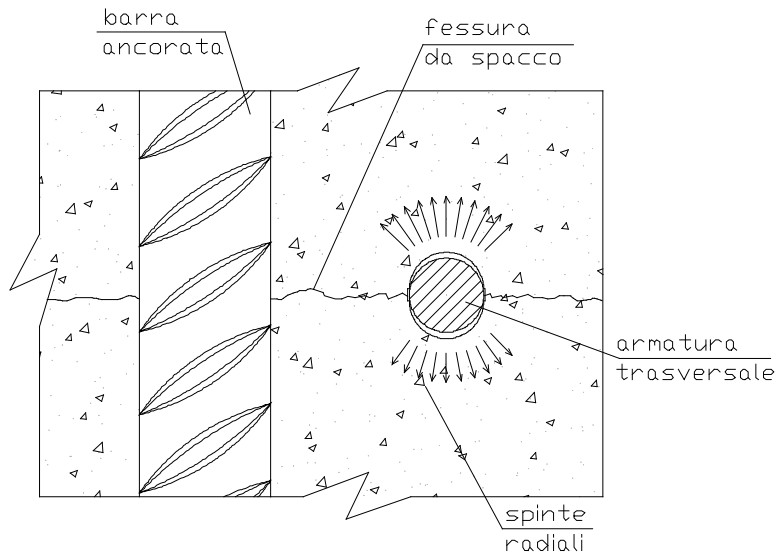
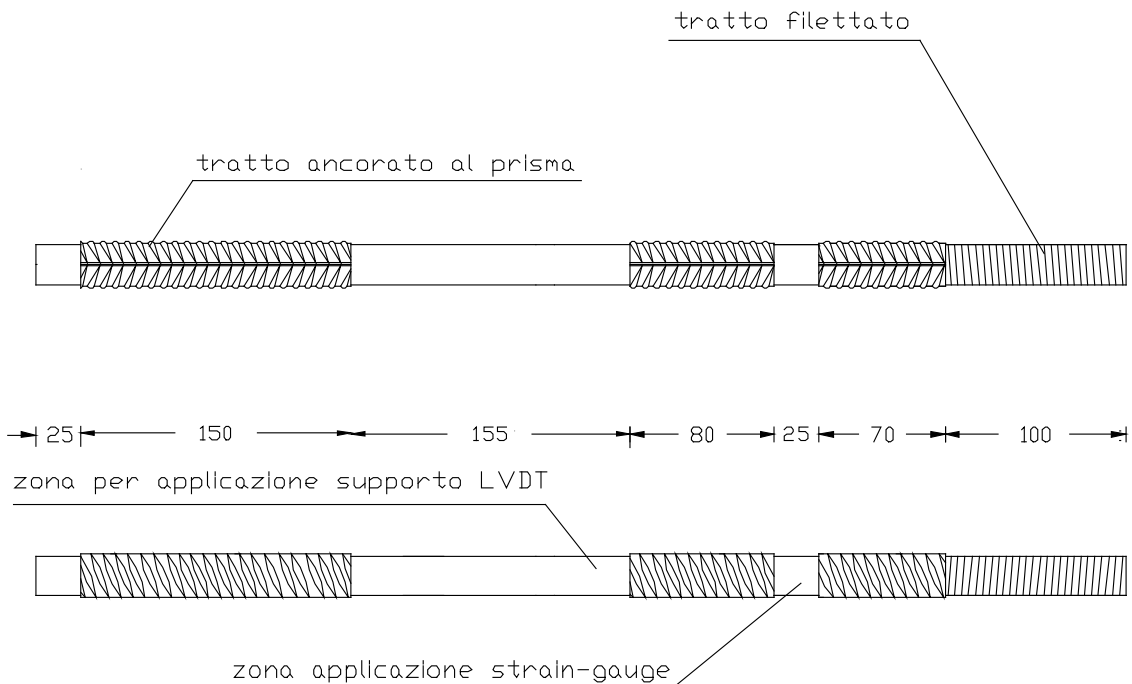


Fig.2.16 Esempio applicativo delle prove con azione di contenimento controllata.



*Fig.2.17 Particolare dell'orientamento delle nervature delle armature longitudinali e trasversali.*

Le barre con diametro da 24 mm sono state recuperate da provini per prove sperimentali eseguite precedentemente da Marchina e Plizzari (1996), ed aventi caratteristiche analoghe a quelle in esame. Il tratto centrale della barra è stato tornito in modo da poter facilmente applicare il supporto di alluminio dei due trasduttori di spostamento induttivi per la misura degli scorrimenti all'estremità caricata della barra ancorata. Tale estremità è stata filettata per consentire l'aggancio allo snodo da collegare alla ganascia inferiore della Instron 1274 (Figg.2.14 e 2.18).



*Fig.2.18 Particolare relativo alla tornitura della barra con diametro da 24 mm.*

Poiché l'acciaio "Tempcore" di cui sono composte le barre possiede uno strato esterno più resistente del nucleo interno, le barre con 16 mm di diametro non sono state tornite per evitare un eccessivo indebolimento della sezione. In queste barre il supporto di alluminio per la misura degli scorrimenti di testa è stato applicato su un anello metallico fissato esternamente sulla barra. All'estremità libera di tutte le barre è stato praticato un foro filettato per il fissaggio del trasduttore per la misura scorrimento.

Il tipo di collasso dell'ancoraggio di una barra ed il valore della resistenza ultima sono fortemente condizionati dalle caratteristiche meccaniche e geometriche del calcestruzzo di ricoprimento e soprattutto dall'azione di contenimento esercitata dall'armatura trasversale (Giuriani et al., 1991). È noto che in assenza di armatura trasversale l'ancoraggio subisce un collasso di tipo fragile (collasso per "splitting") perché, in corrispondenza della completa apertura della fessura da spacco, diventano inattivi i puntoni di calcestruzzo e si verifica l'immediata fuoriuscita della barra (Fig.1.5a). Inserendo delle staffe in direzione ortogonale al piano delle fessure longitudinali da spacco, si ottiene una azione di cucitura della fessura tra i due blocchi B1 e B2, esercitando in questo modo un'azione di contenimento sulla barra ancorata. Si passa così da un collasso di tipo fragile ad un collasso di tipo duttile che si verifica in corrispondenza della rottura per compressione dei puntoni di calcestruzzo a contatto con le nervature. Questo tipo di collasso è detto di "pull-out" ed è caratterizzato da valori dello sforzo di aderenza ben maggiori di quelli ottenuti in assenza di armatura di contenimento (Plizzari e Schumm, 1990).

È evidente che la resistenza ultima di un ancoraggio è tanto maggiore quanto più efficace risulta l'azione di cucitura delle fessure da spacco e di conseguenza quanto più grande è il quantitativo di staffe inserite. Prove di aderenza simili a quelle di qui analizzate hanno evidenziato come, con piccole percentuali di armatura trasversale e forti spinte radiali legate a barre di grosso diametro, la tensione nelle staffe possa raggiungere il limite di snervamento dell'acciaio limitando così l'azione di contenimento (Marchina e Plizzari, 1996). Per valutarne l'efficacia, il quantitativo delle staffe dovrebbe essere espresso come percentuale geometrica riferita all'area dell'armatura ancorata che provoca azioni radiali. Basandosi su questo principio, Giuriani e coautori hanno espresso la percentuale di armatura attraverso l'*Indice di Contenimento delle Staffe*  $\Omega$  (Giuriani et al, 1991), definito come:

$$\Omega = \frac{n_{st} A_{st}}{n_p \phi_p \Delta z}$$

dove:

- $\Delta z$  è il passo delle staffe;
- $n_{st}$  è il numero di staffe predisposte nella zona di influenza  $\Delta z$ ;
- $A_{st}$  è l'area nominale della singola staffa;
- $n_p$  è il numero delle barre principali presenti nell'ancoraggio;
- $\phi_p$  è il diametro nominale della singola barra principale.

In aggiunta all'armatura trasversale, anche il calcestruzzo di ricoprimento esercita un'azione di contenimento, sia prima della fessurazione che a fessurazione avvenuta, attraverso

la sua resistenza di trazione residua. Giuriani e coautori (1991) hanno espresso questo contributo attraverso l'indice di contenimento del calcestruzzo B definito come:

$$B = \frac{b - n_p \phi_p}{n_p \phi_p}$$

dove:

- b è la larghezza totale del provino nel piano della fessura principale da spacco;
- (b-n<sub>p</sub>·φ<sub>p</sub>) è larghezza netta reagente di calcestruzzo (Fig.2.19).

Per i provini in esame, i valori di Ω e B sono stati calcolati considerando che n<sub>st</sub>=2, n<sub>p</sub>=1, Δz=150mm e b=100mm.

Le armature trasversali sono state scelte in modo da avere, per i diversi diametri della barra, indici di contenimento dell'armatura trasversale Ω simili tra di loro. Nella Tabella 2.8 si riporta la classificazione dei provini di questa serie di prove con l'indicazione delle caratteristiche geometriche delle barre ancorate e delle armature trasversali, ed i valori degli indici di contenimento dell'ancoraggio. Per ciascun diametro sono state preparate due coppie di provini che si differenziano per le dimensioni dell'armatura di contenimento. Analogamente ai provini delle diverse normative europee, anche i provini di questa serie di prove vengono individuati da una sigla, nella quale la seconda cifra indica il diametro dell'armatura di contenimento, mentre la prima indica il diametro dell'armatura ancorata.

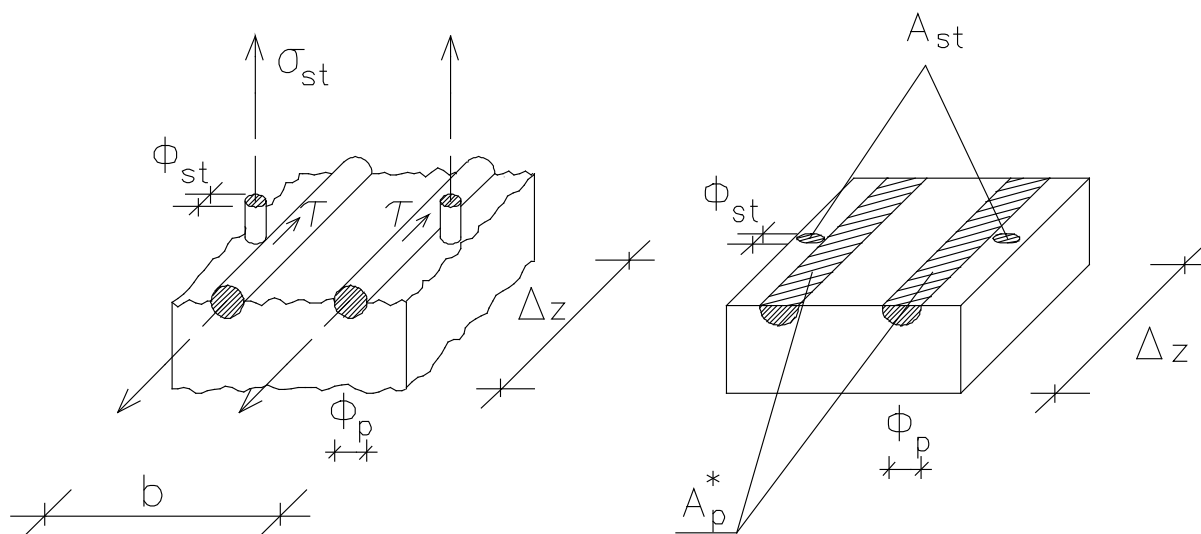


Fig.2.19 Caratteristiche geometriche dell'ancoraggio.



*Tabella 2.8 Classificazione dei provini impiegati nella serie di prove con azione di contenimento controllata.*

<b>PROVINO</b>	<b>DATA GETTO</b>	<b>BARRE</b>	<b>STAFFE</b>	<b><math>\Omega</math></b>	<b>B</b>
16NC8-1	05/09/95	1 $\phi$ 16	2 $\phi$ 8	0.0419	5.25
16NC8-2	13/09/95	1 $\phi$ 16	2 $\phi$ 8	0.0419	5.25
16NC10-1	05/09/95	1 $\phi$ 16	2 $\phi$ 10	0.0654	5.25
16NC10-2	13/09/95	1 $\phi$ 16	2 $\phi$ 10	0.0654	5.25
24NC10-1	05/09/95	1 $\phi$ 24	2 $\phi$ 10	0.0436	3.17
24NC10-2	13/09/95	1 $\phi$ 24	2 $\phi$ 10	0.0436	3.17
24NC12-1	05/09/95	1 $\phi$ 24	2 $\phi$ 12	0.0628	3.17
24NC12-2	13/09/95	1 $\phi$ 24	2 $\phi$ 12	0.0628	3.17

### 2.7.3 Strumentazione

La strumentazione impiegata ha lo scopo di misurare il carico applicato alla barra, i suoi scorrimenti rispetto all'estremo caricato e non caricato ed infine l'apertura della fessura principale da spacco, sia al livello dell'armatura trasversale che all'inizio del tratto ancorato. La misura del carico è stata fornita direttamente dalla cella di carico da 500 kN della macchina di prova. La misura dello slittamento all'estremità libera della barra è stata effettuata per mezzo di un LVDT, sostenuto da un supporto di alluminio imbullonato nella sezione di coda delle barre; la punta dello strumento è stata vincolata ad una squadretta di alluminio con sezione a C incollata ad una delle due superfici laterali del provino (Fig.2.20).

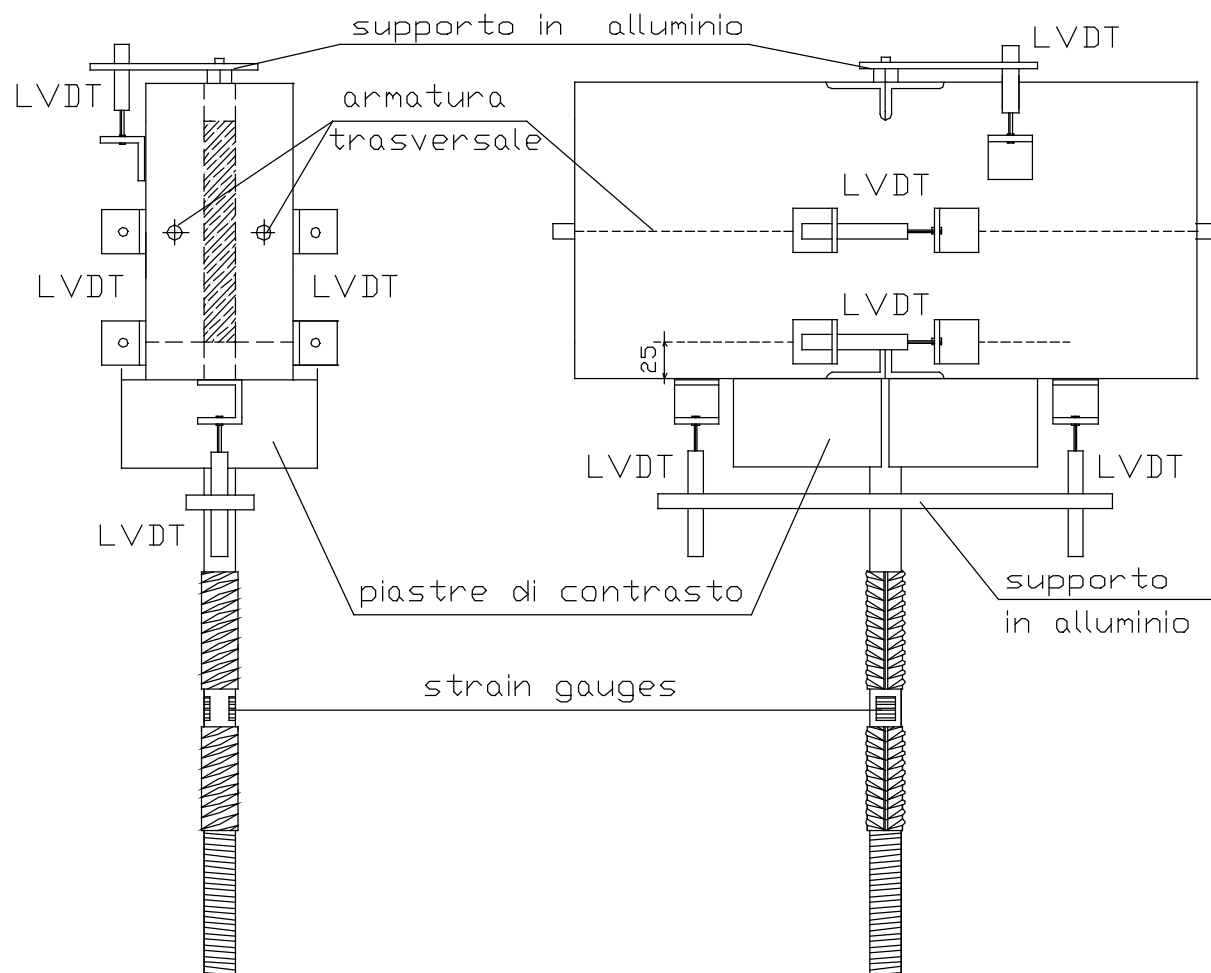
La misura dello scorrimento di testa viene effettuata tramite due LVDT vincolati alla barra per mezzo di un supporto di alluminio, ed alla superficie di calcestruzzo del provino per mezzo di squadrette di fissaggio, sempre in alluminio. Lo slittamento di testa effettivo, valutato all'inizio del tratto ancorato, viene calcolato sulla base delle medie delle letture dei due trasduttori, in modo da compensare eventuali rotazioni non desiderate, dal quale deve essere tolto l'allungamento elastico della barra nella zona compresa fra il punto di applicazione dei trasduttori e l'inizio del tratto ancorato (Fig.2.20). Lo scorrimento tra acciaio e calcestruzzo all'estremità caricata della barra è dato quindi da:

$$\delta_L = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} - \frac{F}{EA}a$$

dove:

- $\delta_1$  e  $\delta_2$  sono le misure degli spostamenti effettuate dai due trasduttori di testa;
- F è il carico di estrazione applicato alla barra;
- A è l'area nominale della barra;
- E = 206000 MPa è il modulo di Young dell'acciaio.

Su ogni faccia laterale dei provini sono stati applicati due LVDT, uno per rilevare l'apertura della fessura da spacco all'inizio del tratto ancorato, l'altro per misurare l'apertura della fessura da spacco al livello dell'armatura trasversale (Fig.2.21). In corrispondenza di tutti i punti di incollaggio dei supporti di alluminio possono essere considerate nulle le deformazioni del calcestruzzo.



*Fig.2.20 Strumentazione applicata ai provini nelle prove di aderenza con azione di contenimento controllata.*

Tutti i segnali analogici provenienti dai trasduttori di spostamento sono stati amplificati per mezzo di una centralina HBM e, con il segnale già amplificato della cella di carico, sono stati digitalizzati dalla scheda di conversione analogico/digitale ATMIO16X della National Instruments, ed infine registrati su PC. In Fig.2.22 viene riportata una vista d'insieme del banco e del sistema di acquisizione dei dati impiegati in questa serie di prove.



*Fig. 2.21 Vista del provino strumentato inserito nel banco di contrasto.*



*Fig.2.22 Vista d'insieme del banco di contrasto e del sistema di acquisizione dati impiegato nelle prove con azione di contenimento controllata.*

#### 2.7.4 Modalità di prova

Tutte le prove sono state eseguite in controllo di carico imponendo una velocità di incremento dello sforzo di aderenza medio  $d\tau/dt$  pari a 0.1 MPa/min. Tale velocità di carico consente di classificare le prove di questa serie di tipo lento e consente un confronto con i risultati ottenuti dalle prove effettuate con i provini previsti dalle diverse normative condotte con la stessa velocità di carico.

#### 2.7.5 Descrizione del banco di prova

Il banco di prova è ampiamente descritto sul lavoro di Plizzari, Deldossi e Massimo (1996b); per facilitare il lettore vengono nel seguito brevemente riassunte le sue principali caratteristiche. Il banco di prova costituisce un sistema di contrasto da inserire nella macchina di prova Instron 1274. Esso è costituito da uno snodo collegato direttamente alla ganascia superiore della Instron, da due piastre di supporto separate nel piano AA della fessura principale da spacco, e da quattro barre filettate che collegano le piastre inferiori allo snodo inferiore (Fig.2.14). Il collegamento fra la barra ancorata ed il morsetto inferiore della macchina non è diretto ma avviene attraverso un secondo snodo costituito da una scatola d'acciaio, munita di foro centrale, nel quale viene inserito il tratto filettato della barra bloccato tramite una bullonatura, e di un tirante a T che viene inserito nel morsetto inferiore della Instron.

Le piastre inferiori sono separate in modo da non ostacolare la libera apertura della fessura principale da spacco. Questa fessura che nasce per effetto delle spinte radiali esercitate dalle nervature della barra, si forma inizialmente fra i due blocchi di calcestruzzo B1 e B2 che tendono ad allontanarsi mettendo in trazione le staffe. Il movimento relativo tra i due blocchi B1 e B2 non è contrastato dall'attrito della piastra di contrasto, in quanto, come detto questa è composta da due blocchi di acciaio separati tra di loro e liberi di allontanarsi senza vincoli in quanto le barre filettate di acciaio, agendo da bielle tese, non esercitano alcuna rigidità sulle piastre di contrasto (Figg.2.14-2.23).

Lo snodo superiore e la piastra di supporto (Fig.2.14) sono composti da acciaio del tipo C40; l'elevata resistenza di questo materiale e gli elevati valori degli spessori dei due elementi consentono di effettuare prove con carichi di estrazione fino a 500 kN. I quattro tiranti sono costituiti da barre filettate M20 Cl.8.8. di acciaio bonificato ad elevata resistenza. Sulle due testate di ciascun supporto sono stati creati dei fori filettati del tipo M4 nei quali vanno provvisoriamente inserite le viti per il fissaggio delle piastrine di posizionamento che servono per garantire una distanza iniziale dei supporti di 5 mm durante il montaggio del provino nel banco, e per facilitare le operazioni di applicazione degli strumenti di misurazione sulle facce del prisma (Fig. 2.24). Queste piastrine vengono rimosse prima dell'inizio della prova.

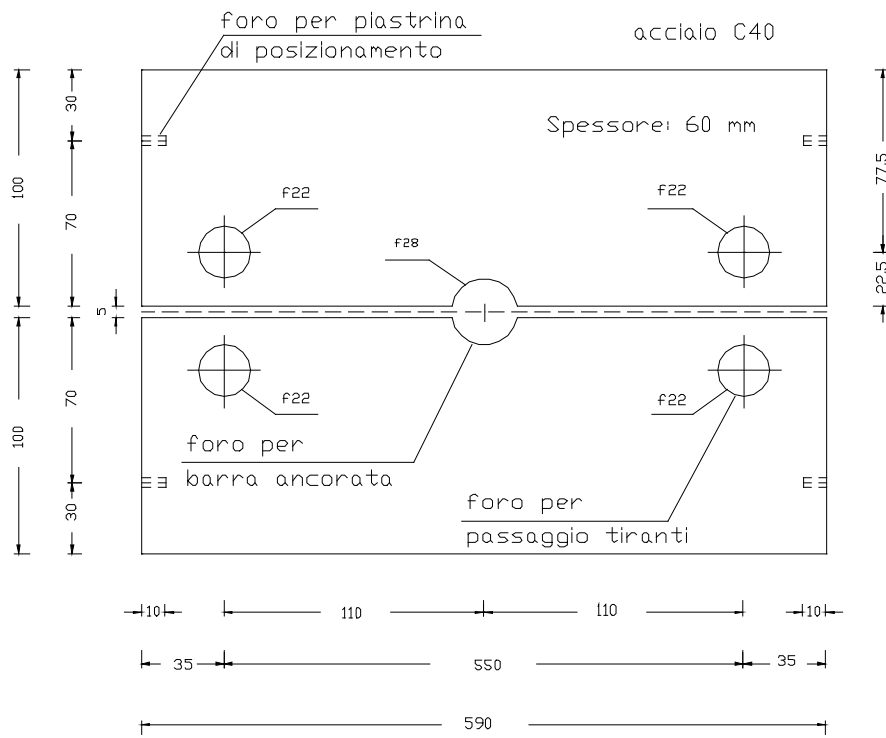


Fig.2.23 Particolare delle piastre di contrasto dei provini con azione di contenimento controllata.

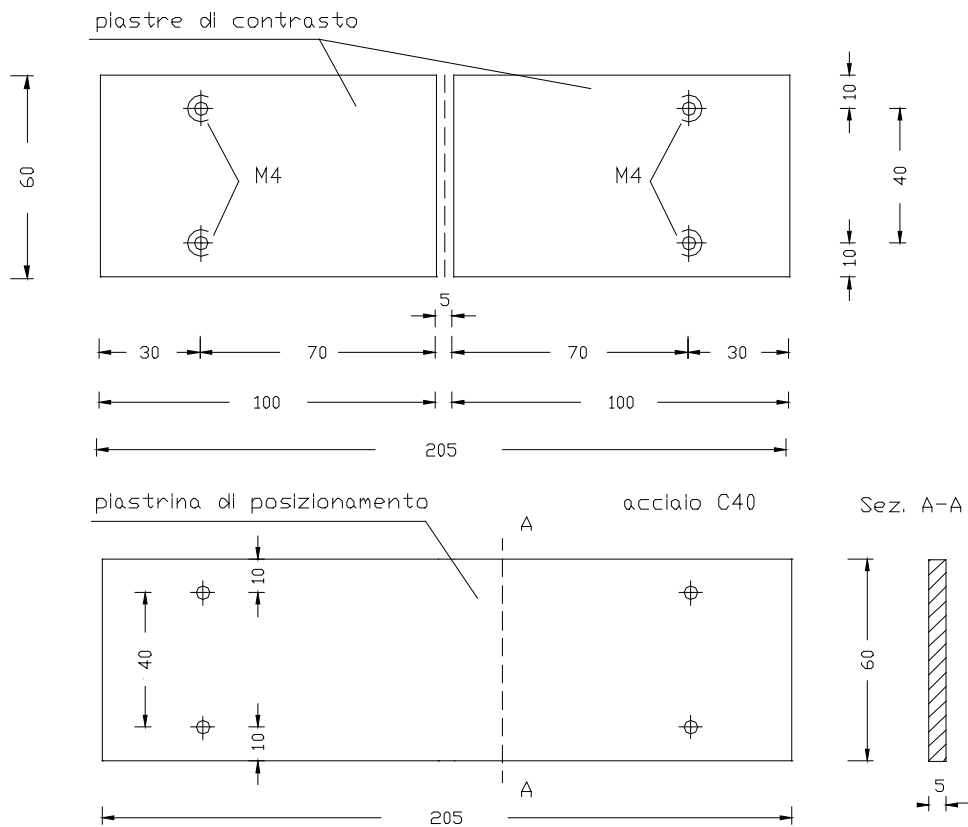


Fig.2.24 Piastrina di posizionamento provvisorio dei due blocchi componenti la piastra di contrasto.

### **2.7.6 Modalità di getto**

Il getto è stato eseguito in direzione opposta a quella del carico di estrazione allo scopo di migliorare le condizioni locali del calcestruzzo a diretto contatto con le superfici prementi delle nervature (Rehm, 1961; Fig.2.13). Infatti, per effetto del fenomeno di risalita dell'acqua d'impasto ("bleeding") l'acqua si deposita attorno alla barra sul lato inferiore delle nervature che è a diretto contatto con tali superfici, e quindi la porosità causata dalla evaporazione nel corso della stagionatura non compromette la resistenza dell'ancoraggio. A tale proposito, va ricordato che la resistenza di un ancoraggio con azione di contenimento è legata alla compressione locale del calcestruzzo compreso fra le nervature e, se il materiale diventa troppo poroso, tale resistenza risulta notevolmente compromessa.

## 3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

### 3.1 Calcestruzzo

#### 3.1.1 Requisiti delle Normative

##### 3.1.1.1. *Normativa Italiana* (CNR UNI 10020/71)

Per il confezionamento delle travi di prova deve essere impiegato calcestruzzo con cemento Portland ad alta resistenza, avente composizione indicata in Tabella 3.1.

*Tab.3.1 Composizione del calcestruzzo prevista dalla CNR UNI 10020/71.*

<b>Componenti c.l.s.</b>	<b>Dosaggio</b>
	<b>( Kg /mc )</b>
Ghiaia (5-15)	1300
Sabbia (0-2)	660
Acqua	165
Cemento R42,5	250

La resistenza del calcestruzzo, misurata al momento della prova su cubi di 16 cm di lato, deve essere compresa tra 235 Kg/cm<sup>2</sup> e 315Kg/cm<sup>2</sup>; la maturazione delle travi di prova e dei cubetti deve avvenire in ambiente umido a temperatura di 20-22 °C.

##### 3.1.1.2. *Normativa Inglese* (BS 4449-1988)

La normativa inglese richiede di utilizzare un impasto di malta per calcestruzzo con una resistenza del cubo compresa fra 40 MPa e 45 MPa al momento della prova di estrazione e non fornisce indicazioni relative ai componenti della miscela ed alle modalità di maturazione dei provini confezionati.

##### 3.1.1.3. *Normativa Svizzera* (SIA 162/1-1989)

Le barre non devono presentare difetti di alcun tipo e il calcestruzzo deve essere confezionato impiegando aggregati con diametro massimo di 32 mm, adottando un rapporto acqua/cemento pari a 0,62 ed un dosaggio del cemento pari a 275 Kg/mc. La resistenza del calcestruzzo misurata a 28 giorni di maturazione non deve risultare inferiore ai 30 MPa. La granulometria degli aggregati impiegati deve presentare le seguenti caratteristiche:

D = 16,00 mm - Q = 80%  
 D = 8,00 mm - Q = 60%  
 D = 2,00 mm - Q = 30%  
 D = 0.25 mm - Q = 6%

essendo D il diametro dell'aggregato e Q il passante percentuale degli aggregati con diametro minore di D, calcolato sull'intero quantitativo.

#### 3.1.1.4. *Normativa Austriaca* (B 4200-1987)

In conformità alle richieste della Normativa Austriaca B 3304, il calcestruzzo impiegato per il confezionamento dei provini deve contenere 250 Kg di cemento per ogni metro cubo, ed il valore del rapporto acqua/cemento deve essere compreso tra 0,6 e 0,7. Le prove di compressione per la determinazione della resistenza a 28 giorni devono essere fatte su cubi di 20 cm di lato; tale resistenza deve avere un valore compreso tra 27 MPa e 33 MPa. I cubi e le travi di prova confezionate vanno fatti stagionare in ambiente umido ad una temperatura compresa tra i 18 °C ed i 22°C nei primi sette giorni. Successivamente vanno esposti all'aria in un ambiente avente umidità relativa compresa tra il 55% ed il 65% .

### 3.1.2 **Caratteristiche della miscela impiegata e modalità di getto**

Poichè lo scopo della presente ricerca è lo studio degli effetti delle modalità di prova previste dalle diverse normative, i risultati dovrebbero essere indipendenti dalle caratteristiche del calcestruzzo impiegato per il confezionamento dei provini. Tale risultato può essere ottenuto impiegando lo stesso calcestruzzo per il confezionamento di tutti i provini. Allo stesso tempo, per non influenzare eccessivamente i risultati, la composizione e le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo dovrebbero avvicinarsi il più possibile a quelle richieste dalle varie normative. Questo allo scopo di rendere più realistico il confronto dei risultati sperimentali, rendendoli indipendenti dalle caratteristiche del materiale previste nelle diverse normative. Per tale motivo è stato scelto un calcestruzzo di media resistenza ( $R_{cm} = 30-35$  MPa), i cui componenti sono descritti in Tabella 3.2, con la granulometria degli aggregati descritta nella Tabella 3.3. La Tabella 3.4 mette a confronto la composizione della miscela e la resistenza cubica a compressione dopo 28 giorni di maturazione del calcestruzzo adottato per il confezionamento dei provini, con i valori previsti dalle diverse normative al momento della prova sperimentale (vedi Par.3.1.3).

*Tabella 3.2 Composizione del calcestruzzo impiegato per tutte le serie di prove.*

Cemento R32.5 [kg/mc]	Acqua [l/mc]	Rapp. a/c	Aggregati [kg/mc]	Superfluidif. [l/mc]	Slump [mm]
325	175	0.54	1881	3.3	150



Tabella 3.3 Granulometria degli aggregati impiegati nel calcestruzzo.

<b>Diametro ( mm )</b>	<b>Peso ( Kg/mc )</b>	<b>Percentuale ( % )</b>
0,00 - 0,35	227	12,1
0,35 - 0,45	40	2,1
0,45 - 0,60	52	2,7
0,60 - 1,50	227	12,1
1,50 - 2,50	180	9,6
2,50 - 4,00	211	11,2
4,00 - 6,00	227	12,1
6,00 - 10,00	359	19,1
10,00 - 15,0	358	19,0
<b>Totale</b>	<b>1881</b>	<b>100</b>

Tabella 3.4 Confronti fra le miscele proposte dalle varie normative e la miscela adottata.

<b>Tipo di NORMATIVA</b>	<b>Tipo Cemento</b>	<b>Dosaggio Cemento (Kg/mc)</b>	<b>Rapporto A/C</b>	<b>Dmax ( mm )</b>	<b>Resistenza ( MPa )</b>
<b>Italiana</b>	Portland R42.5	250	0.66	15	23.5-31.5
<b>Svizzera</b>	n.p.	275	0.62	32	>30
<b>Austriaca</b>	n.p.	250	0.6-0.7	n.p.	27-33
<b>Inglese</b>	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	40-45
<b>Miscela adottata</b>	Portland ordin.	325	0.54	15	30,9

(n.p. = non prescritto)

Per la miscela adottata è stata indicata la resistenza a 28 giorni di maturazione, mentre la resistenza al momento della prova è riportata nel Cap.4 dei risultati sperimentali. Il dosaggio di cemento impiegato ed il rapporto acqua/cemento, leggermente diversi da quelli delle diverse normative, sono stati scelti in modo da avere resistenze leggermente superiori e quindi più vicine a quelle previste dalla Normativa Inglese.

Il getto dei provini è stato effettuato in due fasi successive ed in ogni fase sono state necessarie due betoniere di calcestruzzo. In ogni fase sono stati confezionati la metà dei provini previsti, otto cilindri aventi un diametro di 9,4 cm ed un'altezza di 30 cm, sui quali sono state misurate le caratteristiche meccaniche a 28 giorni di maturazione, e sedici cubetti aventi lato di 15 cm sui quali sono state misurate le resistenze cubiche a compressione al momento delle prove. Lo slump per tutti gli impasti preparati è risultato di 150-160 mm.

La maturazione dei provini è proseguita in acqua con temperatura di circa 20°C, fino ad una settimana prima della prova, nella quale i provini hanno proseguito la maturazione in laboratorio alla temperatura di 20°C circa ed umidità relativa pari al 60-70%. La Tabella 3.5 mostra i provini confezionati con i diversi getti di calcestruzzo.

*Tabella 3.5 Date dei getti e tipo di confezionamento impiegato per tutti i provini.*

<b>PROVINO</b>	<b>DATA GETTO</b>	<b>BETONIERA</b>
UNI16H1	05/09/95	I
UNI16H2	05/09/95	II
UNI24H1	05/09/95	I
UNI24H2	05/09/95	II
UNI16S1	13/09/95	I
UNI16S2	13/09/95	II
UNI24S1	13/09/95	I
UNI24S2	13/09/95	II
BS16H1	05/09/95	I
BS16H2	05/09/95	II
BS24H1	05/09/95	I
BS24H2	05/09/95	II
BS16S1	13/09/95	I
BS16S2	13/09/95	II
BS24S1	13/09/95	I
BS24S2	13/09/95	II
SIA16H1	05/09/95	I
SIA16H2	05/09/95	II
SIA24H1	05/09/95	I
SIA24H2	05/09/95	II
SIA16S1	13/09/95	I
SIA16S2	13/09/95	II
SIA24S1	13/09/95	I
SIA24S2	13/09/95	II
16NC8-1	05/09/95	I
16NC8-2	13/09/95	II
16NC10-1	05/09/95	I
16NC10-2	13/09/95	II
24NC10-1	05/09/95	I
24NC10-2	13/09/95	II
24NC12-1	05/09/95	I
24NC12-2	13/09/95	II

### 3.1.3 Caratteristiche meccaniche

Dopo un periodo di maturazione di 28 giorni, sono state condotte le prove per la determinazione del modulo elastico secante e delle resistenze cilindriche a trazione ed a compressione. Il modulo elastico a compressione ed a trazione è stato determinato su due coppie di cilindri applicando una velocità di carico di 2,5 Kg/cm<sup>2</sup>/sec., come stabilito dalla norma UNI 6556, e facendo riferimento alle letture di ritorno dei cicli stabilizzati. In queste prove il valore del carico massimo è risultato pari a circa un terzo del carico di rottura. Gli estensimetri per la misura delle deformazioni nelle prove di modulo sono stati posizionati con una base di misurazione di 135 mm; tutte le letture dei comparatori millesimali sono state eseguite a spostamenti stabilizzati.

Sempre al ventottesimo giorno di maturazione sono state eseguite prove per la determinazione della resistenza cubica a compressione. Le prove sono state condotte applicando un carico con una velocità di 5-7 Kg/cm<sup>2</sup>/sec in accordo con la norma UNI 6132-72.

I risultati ottenuti dalle prove al ventottesimo giorno di maturazione sono raccolti nella Tabella 3.6 che mostra i valori del modulo elastico a trazione ( $E_{c, \text{traz}}$ ) ed a compressione ( $E_{c, \text{compr.}}$ ), della resistenza cilindrica a compressione ( $f_{c,28}$ ) ed a trazione ( $f_{ct,28}$ ) e della resistenza cubica a compressione ( $f_{c, \text{cube},28}$ ) do 28 giorni di maturazione.

Tabella 3.6 Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo.

Data getto	Data prova	$E_{c, \text{traz}}$ [Mpa]	$E_{c, \text{compr.}}$ [Mpa]	$f_{c,28}$ [Mpa]	$f_{ct,28}$ [Mpa]	$f_{c, \text{cube},28}$ [Mpa]
05/09/95	03/10/95	30233	26400	24.2	1.96	29.2
13/09/95	11/10/95	33590	31160	24.4	2.90 <sup>(*)</sup>	32.5

(\*) In entrambe i cilindri, prima della rottura, si è verificato lo scollamento delle piastre di estremità. Le due prove di rottura sono state così effettuate di nuovo il giorno 23/10/95, dopo 40 giorni di maturazione.

Dato che le prove di aderenza hanno avuto inizio dopo un periodo minimo di maturazione di due mesi dalla data del getto, la variazione di resistenza nel tempo necessaria per la conduzione delle prove sperimentali è praticamente trascurabile; ciò ha consentito di ritenere costante, per i diversi provini, le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo durante il periodo di prova.

## 3.2 Acciaio

### 3.2.1 Prove per la determinazione dell'Indice di aderenza

Le barre ad aderenza migliorata di tipo saldabile utilizzate nella presente ricerca presentano nervature non simmetriche sui due lati della barra (Fig.3.1). Mentre sulla faccia 1 le nervature hanno tutte la stessa inclinazione  $\beta_1$  rispetto all'asse della barra, sulla faccia 2 sono presenti due serie alternate di nervature con diversa inclinazione  $\beta_{2a}$  e  $\beta_{2b}$ .

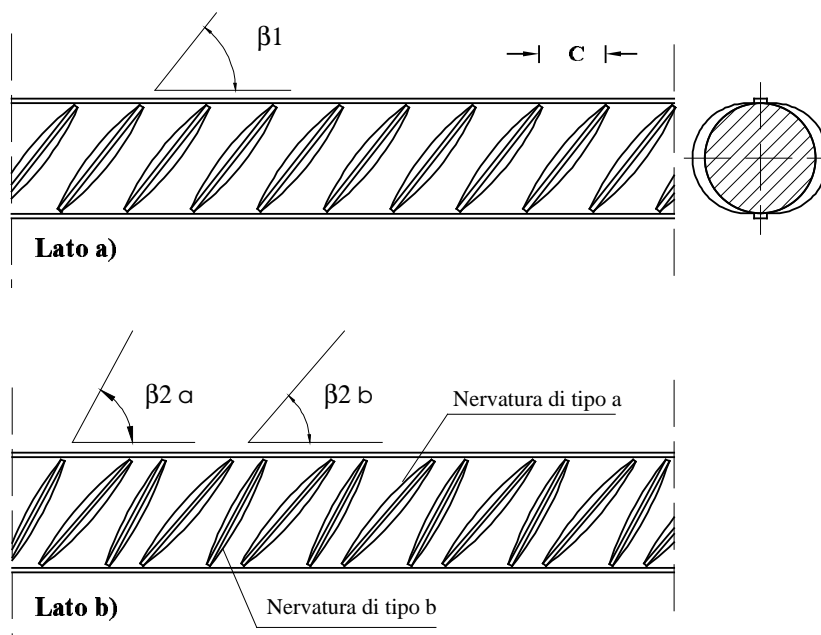


Fig.3.1 Particolare delle nervature della barra di armatura.

La normativa italiana (DM 9.01.1996) prevede la verifica della geometria della barra attraverso la determinazione dell'indice di aderenza. Tale parametro viene determinato con una formula che esprime il rapporto fra l'area della sezione della singola nervatura proiettata ortogonalmente all'asse della barra, e la superficie del tratto cilindrico di lunghezza pari all'interasse "c" fra le nervature (Par.2.2.6). Nelle Tabelle 3.7-3.11 si riportano i valori delle caratteristiche geometriche dei cinque tipi di barra impiegati nella realizzazione dei provini ed i rispettivi valori dell'Indice di Aderenza IR. Nel calcolo di tale indice si è tenuto conto del valore medio delle proiezioni delle due nervature del lato b sul piano ortogonale all'asse della barra; per il valore di c si è considerato il valore medio delle tre distanze (medie) misurate. Per ciascun tipo di dente, il valore della altezza media è stato ottenuto come media delle altezze misurate su tre denti consecutivi dello stesso tipo. L'Indice di Aderenza IR è ottenuto come:

$$IR = \frac{[a_{1m} \cdot l_{R1} \cdot \text{Sen}\beta_1 + (a_{2am} \cdot l_{R2a} \cdot \text{Sen}\beta_{2a} + a_{2bm} \cdot l_{R2b} \cdot \text{Sen}\beta_{2b}) / 2]}{\pi \cdot D_n \cdot C}$$

$$i = 1,2,3$$

$$a_{im} = \frac{(a_{i1} + a_{i2} / 2 + a_{i3})}{3}$$

dove:

- $a_{im}$  è l'altezza media della  $i$ -esima nervatura;
- $\beta_i$  è l'inclinazione della  $i$ -esima nervatura rispetto all'asse della barra;
- $l_{Ri}$  è la lunghezza della  $i$ -esima nervatura;
- $D_n$  è il diametro nominale della barra;
- $c$  è l'interasse medio delle tre nervature;
- $a_{i1}$ ,  $a_{i3}$  sono le altezze della nervatura misurate ad  $1/4$  di  $l_i$ ;
- $a_{i2}$  è l'altezza della nervatura misurata in mezzeria.

Tabella 3.7 Caratteristiche geometriche della barra  $\phi 8$ .

<b>Dn</b>	<b>Faccia</b>	<b>Nervat.</b>	<b>a1</b>	<b>a2</b>	<b>a3</b>	<b>am</b>	<b>Sen <math>\beta</math></b>	<b>l<sub>R</sub></b>	<b>C</b>
<b>( mm )</b>			<b>( mm )</b>	<b>( mm )</b>	<b>( mm )</b>	<b>( mm )</b>		<b>( mm )</b>	<b>( mm )</b>
8	1	1	0.40	0.72	0.54		0,80	15	6,2
		2	0.39	0.72	0.56				
		3	0.38	0.75	0.55				
		<b>Media 1</b>	0.39	0.73	0.55	0.32			
33	2a	1	0.48	0,75	0.50		0.89	14	6,1
2		0.46	0.74	0.47					
3		0.45	0.77	0.49					
<b>Codice</b>		<b>Media 2a</b>	0.463	0.753	0.486	0.32			
0-4-1-9	2b	1	0.50	0,80	0.51		0.69	17	6,2
		2	0.48	0.81	0.53				
		3	0.47	0.79	0.53				
		<b>Media 2b</b>	0.483	0.8	0.523	0.47			
							<b>IR = 0.054</b>		

Tabella 3.8 Caratteristiche geometriche della barra  $\phi 10$ .

<b>Dn</b>	<b>Faccia</b>	<b>Nervat.</b>	<b>a1</b>	<b>a2</b>	<b>a3</b>	<b>am</b>	<b>Sen <math>\beta</math></b>	<b>I<sub>R</sub></b>	<b>C</b>
( mm )			( mm )	( mm )	( mm )	( mm )		( mm )	( mm )
10	1	1	0.59	0.65	0.64		0.84	16	6,5
		2	0.61	0.64	0.66				
		3	0.62	0.68	0.66				
		Media 1	0.607	0.657	0.653	0.53			
Marchio									
33	2a	1	0.67	0.74	0.62		0.92	16	6,7
		2	0.64	0.73	0.65				
		3	0.68	0.74	0.64				
		Media 2a	0.663	0.737	0.636	0.56			
Codice									
0-4-1-9	2b	1	0.56	0.68	0.65		0.75	18	6,6
		2	0.58	0.67	0.67				
		3	0.57	0.68	0.62				
		Media 2b	0.57	0.677	0.647	0.52			
							<b>IR = 0.071</b>		

Tabella 3.9 Caratteristiche geometriche della barra  $\phi 12$ .

<b>Dn</b>	<b>Faccia</b>	<b>Nervat.</b>	<b>a1</b>	<b>a2</b>	<b>a3</b>	<b>am</b>	<b>Sen <math>\beta</math></b>	<b>I<sub>R</sub></b>	<b>C</b>
( mm )			( mm )	( mm )	( mm )	( mm )		( mm )	( mm )
12	1	1	0.77	0.83	0.73		0.83	23	7,7
		2	0.76	0.83	0.72				
		3	0.78	0.83	0.71				
		Media 1	0.77	0.83	0.72	0.635			
Marchio									
33	2a	1	0.59	0.79	0.72		0.92	20	6,7
		2	0.58	0.78	0.74				
		3	0.57	0.8	0.7				
		Media 2a	0.58	0.79	0.72	0.565			
Codice									
0-4-1-9	2b	1	0.57	0.72	0.68		0.77	24	6,7
		2	0.56	0.73	0.68				
		3	0.55	0.71	0.68				
		Media 2b	0.56	0.72	0.68	0.533			
							<b>IR = 0.077</b>		

Tabella 3.10 Caratteristiche geometriche della barra  $\phi 16$ .

<b>Dn</b>	<b>Faccia</b>	<b>Nervat.</b>	<b>a1</b>	<b>a2</b>	<b>a3</b>	<b>am</b>	<b>Sen <math>\beta</math></b>	<b>I<sub>R</sub></b>	<b>C</b>
<b>( mm )</b>			<b>( mm )</b>	<b>( mm )</b>	<b>( mm )</b>	<b>( mm )</b>		<b>( mm )</b>	<b>( mm )</b>
16	1	1	1.05	1.16	0.81		0.95	28	9.3
		2	1.06	1.08	0.97				
		3	1.07	1.15	0.87				
<b>Marchio</b>		<b>Media 1</b>	1.06	1.13	0.88	0.84			
33	2a	1	0.93	1.17	0.86		0.82	31	9.5
		2	0.94	1.12	0.86				
		3	0.91	1.15	0.87				
<b>Codice</b>		<b>Media 2a</b>	0.93	1.15	0.86	0.79			
0-4-1-9	2b	1	0.88	1.17	0.88		0.94	26	9.5
		2	0.88	1.17	0.91				
		3	0.87	1.14	0.9				
		<b>Media 2b</b>	0.88	1.16	0.9	0.79			
						<b>IR = 0,089</b>			

Tabella 3.11 Caratteristiche geometriche della barra  $\phi 24$ .

<b>Dn</b>	<b>Faccia</b>	<b>Nervat.</b>	<b>a1</b>	<b>a2</b>	<b>a3</b>	<b>am</b>	<b>Sen <math>\beta</math></b>	<b>I<sub>R</sub></b>	<b>C</b>
<b>( mm )</b>			<b>( mm )</b>	<b>( mm )</b>	<b>( mm )</b>	<b>( mm )</b>		<b>( mm )</b>	<b>( mm )</b>
24	1	1	1.23	1.33	1.12		0.88	43	14
		2	1.25	1.35	1.13				
		3	1.27	1.33	1.15				
<b>Marchio</b>		<b>Media 1</b>	1.25	1.34	1.13	1.02			
33	2a	1	1.08	1.33	1.25		0.8	47	14.5
		2	1.09	1.3	1.26				
		3	1.1	1.31	1.26				
<b>Codici</b>		<b>Media 2a</b>	1.09	1.31	1.26	1			
0-4-1-9	2b	1	1.1	1.34	1.28		0.94	40	14.5
		2	1.08	1.36	1.28				
		3	1.1	1.36	1.28				
		<b>Media 2b</b>	1.09	1.35	1.28	1.02			
						<b>IR = 0,071</b>			

### 3.2.2 Caratteristiche meccaniche

I valori del carico di snervamento e di rottura determinati con prove di trazione, applicando la velocità di carico richiesta dalla normativa (UNI EN 10002/92-parte 1), sono riportati in Tabella 3.12.

*Tabella 3.12 Caratteristiche meccaniche dell'acciaio*

Caratteristiche dei provini						Carico di Snervamento		Carico di Rottura		Allung. 5Dn
Dn	Peso	Lung.	$\phi$ Equip.	Area Sez.	Scost. Dn	Totale	Unitario	Totale	Unitario	
( mm )	( gr )	( mm )	( mm )	( mm )	( % )	( daN )	( N/mm <sup>2</sup> )	( daN )	( N/mm <sup>2</sup> )	( % )
8	191,4	500	7,9	48,8	-3	2957	606	3276	672	22,5
10	295,7	500	9,8	75,3	-4	4263	566	5006	664	24
12	407	460	12,00	112,7	-0,3	5552	492,6	6637	588,9	25
16	779,8	500	15,9	198,7	1,2	10560	531,5	12600	634	23,8
24	1722	500	23,6	438,7	3	24600	560,7	29880	681	25

Dai risultati sperimentali si deduce che l'acciaio impiegato per le barre ancorate è classificabile come B 500B, in accordo con la Normativa Europea (ENV 10080).



## **4. RISULTATI SPERIMENTALI**

### **4.1 Normativa Italiana**

Come già descritto nel Cap.2, la CNR UNI 10020/71 prevede l'esecuzione di prove di flessione su travi all'interno delle quali la barra di armatura è ancorata per una lunghezza pari a 10 volte il diametro (Fig.2.1). Le prove sperimentali della Normativa Italiana hanno avuto inizio dopo 62 giorni di maturazione dei provini ed hanno avuto una durata complessiva di 5 giorni. Il carico è stato applicato alle travi mediante un martinetto ed una pompa idraulica dotata di valvola di regolazione della pressione dell'olio a comando manuale, il che ha comportato leggeri scostamenti dalla velocità di carico prevista all'inizio della prova. Nella elaborazione dei risultati sperimentali si è tenuto conto che, all'inizio della prova, lo sforzo di aderenza nei due ancoraggi non è nullo, poichè sul provino grava il peso proprio della trave, il peso della piastra di supporto del martinetto, il peso del martinetto e della cella di carico posti sull'estradosso della trave (Fig.2.4). Tale carico, pari complessivamente a 170 Kg, è stato aggiunto ai carichi misurati dalla cella di carico durante la prova. Per tale motivo, in tutti i diagrammi elaborati, il valore del carico e dello sforzo medio di aderenza all'origine è diverso da zero.

Le misure relative a questa serie di prove hanno riguardato il carico applicato alla trave di prova per mezzo della cella di carico da 200 kN, e lo scorrimento della barra ancorata rispetto al calcestruzzo nelle estremità libere per mezzo di trasduttori di spostamento (LVDT) applicati alle estremità del provino.

#### **4.1.1 Prove secondo la CNR UNI 10020/71**

Secondo le prescrizioni della CNR UNI 10020/71 le prove devono essere condotte applicando alla trave, in 30 secondi, un carico che comporta un incremento di tensione nella barra di 4 Kg/mm<sup>2</sup>, consentendo successivamente agli scorrimenti di stabilizzarsi per due minuti prima dell'applicazione dell'incremento di carico successivo. Il valore della pendenza media della rampa di carico applicata è stato calcolato come rapporto tra l'incremento del carico fornito nei 30" e la durata complessiva di 2.5' del singolo passo di carico. Nella Tabella 4.1 si riportano le velocità di carico ( $dP/dt$ ) e l'incremento dello sforzo di aderenza medio nel tempo ( $d\tau_m/dt$ ); per ciascun provino viene inoltre indicata la resistenza cubica del calcestruzzo ( $R_{cm}$ ) ed il tempo di maturazione del calcestruzzo al momento della prova.

*Tabella 4.1 Velocità di applicazione del carico nelle prove condotte secondo la CNR UNI 10020/71.*

Provino	dP/dt	d $\tau_m$ /dt	R <sub>cm</sub>	Maturazione
	[kN/min]	[MPa/min]	[MPa]	[gg.]
UNI16H1	2.10	0.392	33.89	62
UNI16H2	2.10	0.392	33.89	63
UNI24H1	4.73	0.392	33.89	62
UNI24H2	4.73	0.392	33.89	64

Facendo riferimento ai risultati tipici ottenuti sul provino UNI16H1, la Fig.4.1 mostra il diagramma del carico in funzione del tempo nel quale sono evidenziati i passi di carico (applicati in 30"), i successivi periodi di assestamento dello scorrimento (circa due minuti), e la velocità media di applicazione del carico nelle due fasi della prova. Nel grafico si può notare come la forma del generico gradino sia influenzata dal livello di carico raggiunto in quell'istante. Nelle fasi iniziali della prova, ai tempi di attesa corrispondono tratti pressochè orizzontali del grafico; in queste fasi, al termine del periodo di incremento del carico non si riscontrano ulteriori incrementi viscosi degli scorrimenti e di conseguenza non si verificano assestamenti del carico. Nelle fasi finali la prova è caratterizzata dallo schiacciamento del calcestruzzo a contatto con le nervature ("crushing") e dalla propagazione delle fessure da spacco; dopo la fase di incremento del carico, si manifestano quindi scorrimenti sempre maggiori che comportano un incremento delle rotazioni dei due blocchi del provino attorno alle sezioni di appoggio ed il conseguente scarico del martinetto idraulico. Questo comportamento risulta ancor più evidente dall'analisi del grafico di Fig.4.2, che riporta l'andamento dello scorrimento sui due lati del provino in funzione del tempo. Anche in questo diagramma si può notare il modesto incremento di scorrimento nei primi passi di carico ed i notevoli scorrimenti che si verificano nella fase finale della prova. Si può inoltre notare come l'incremento di scorrimento del secondo tratto di barra durante il ricarico sia molto modesto; una volta però raggiunto il valore massimo precedente allo scarico, lo scorrimento aumenta velocemente fino al collasso dell'aderenza.

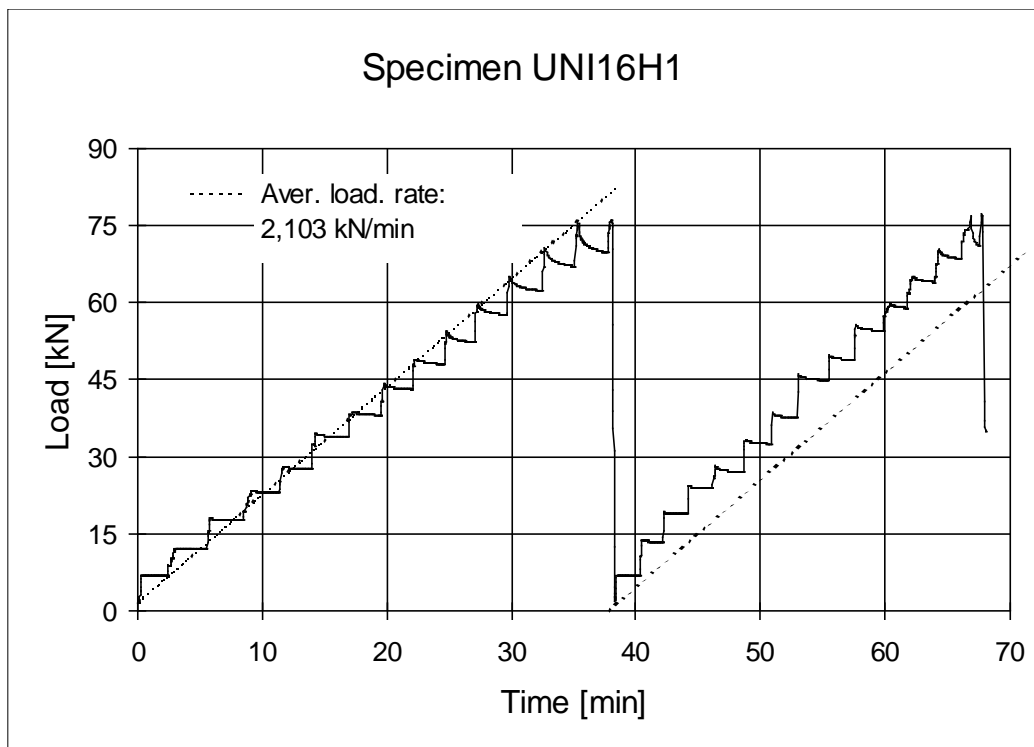


Fig.4.1 Diagramma del carico in funzione del tempo per il provino UNI16H1.

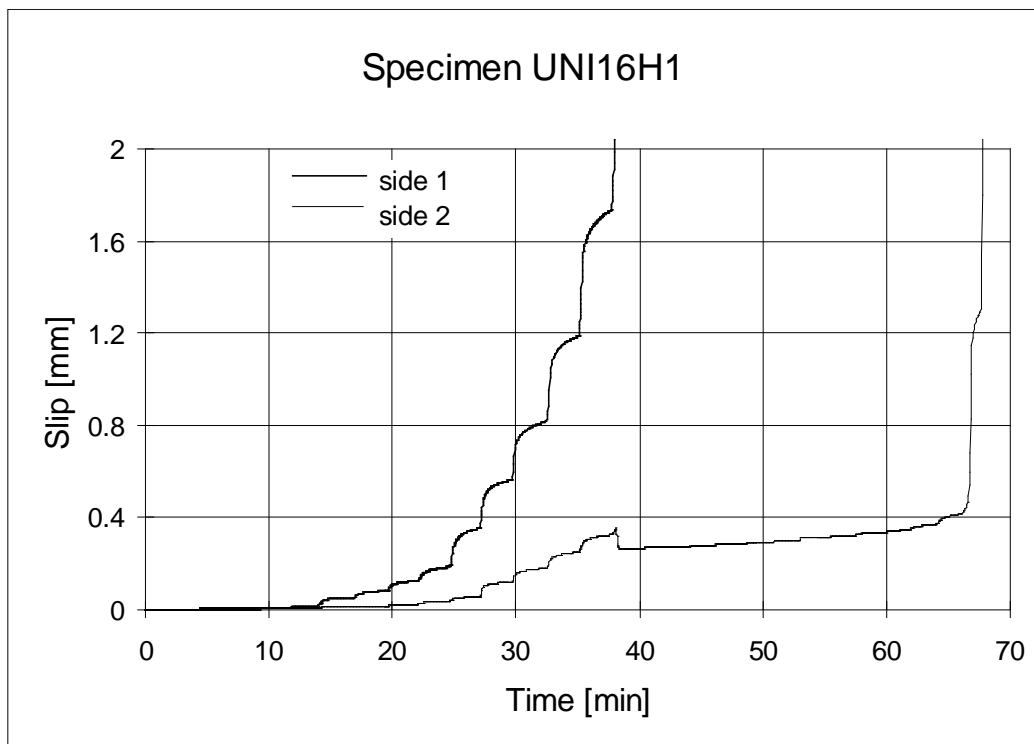


Fig.4.2 Diagramma dello scorrimento all'estremo libero della barra in funzione del tempo per il provino UNI16H1.

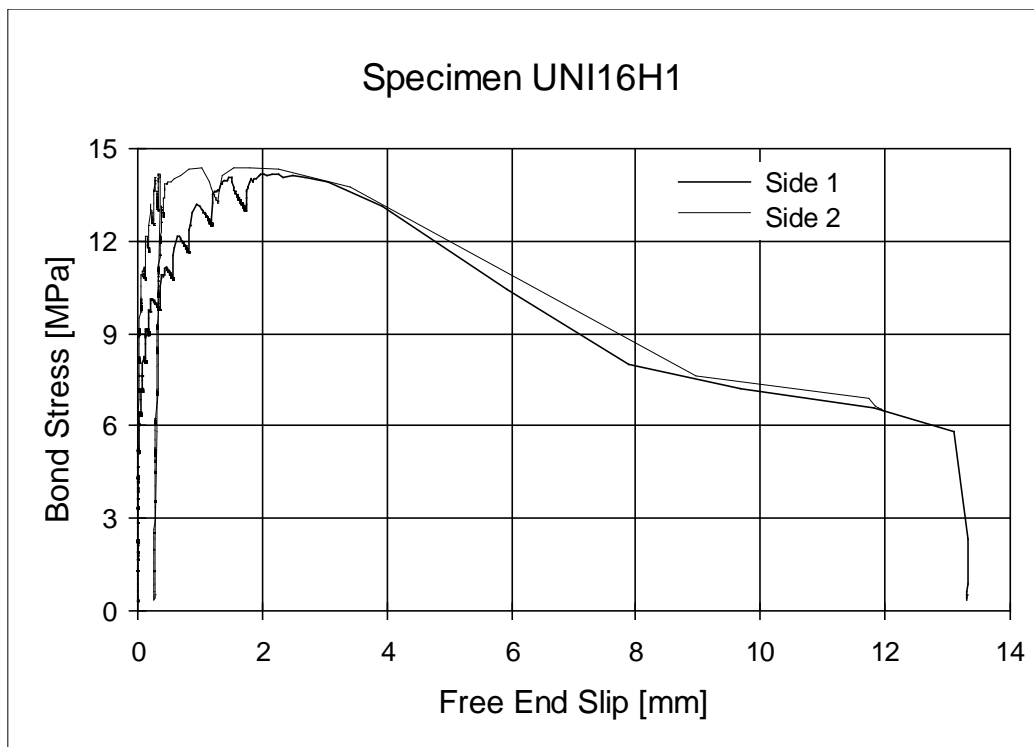


Fig.4.3 Diagramma completo dello sforzo medio di aderenza in funzione dello scorrimento dell'estremo libero della barra nel provino UNI16H1.

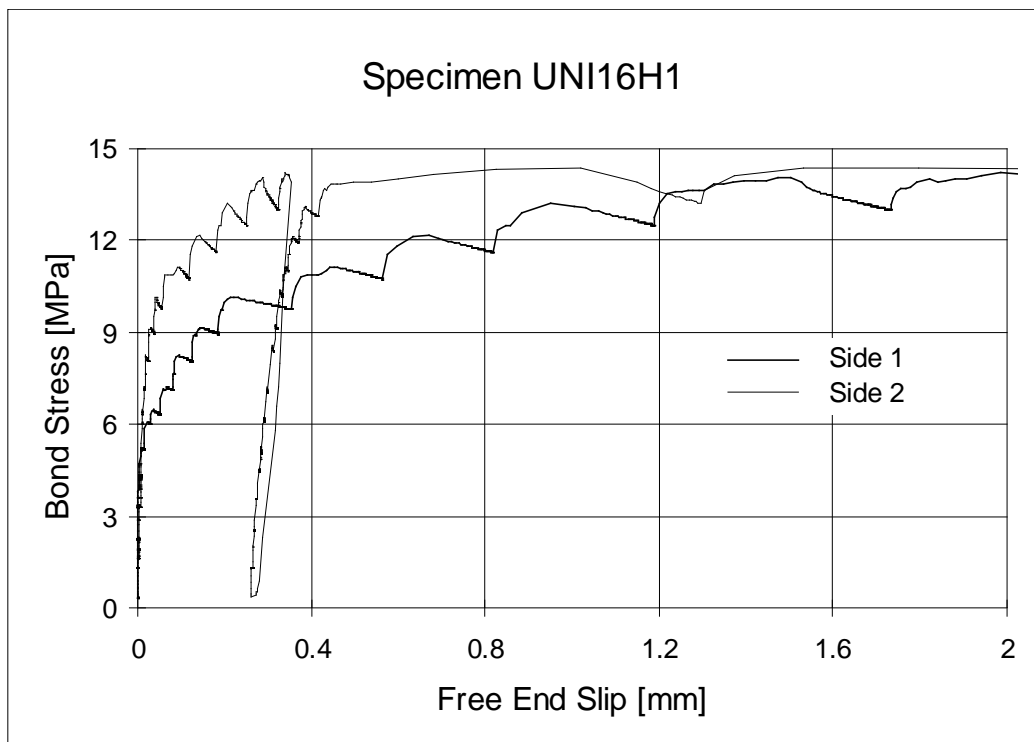
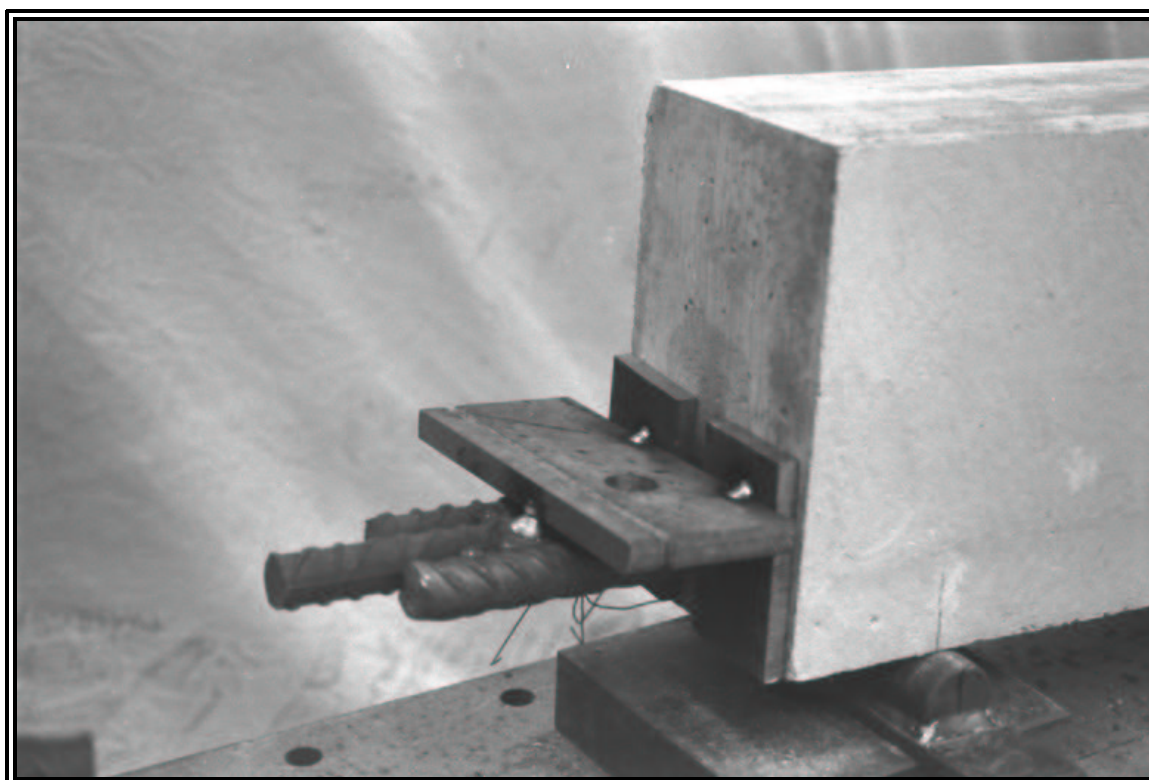


Fig.4.4 Parte iniziale del diagramma dello sforzo medio di aderenza in funzione dello scorrimento dell'estremo libero della barra nel provino UNI16H1.

Il diagramma dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento all'estremità libera della barra è mostrato in Fig.4.3 per l'intera prova ed in Fig.4.4 per il tratto iniziale della prova. Tutti i diagrammi mostrano chiaramente le due fasi della prova, descritta nel Par.2.2.4. Infatti, a causa del comportamento non simmetrico della trave, il collasso dell'aderenza non avviene contemporaneamente nei due tratti ancorati della barra, ma solo su uno di essi. Quando si verifica il collasso sul primo lato (lato 1) la trave si inflette, il martinetto perde pressione e si verifica lo scarico elastico del secondo tratto ancorato (lato2, Fig.4.3). A scarico avvenuto, la prova viene interrotta e la barra sfilata viene bloccata mediante saldatura di piccole piastre di acciaio che fanno contrasto sul calcestruzzo della trave (Fig.4.5). La prova può essere ripresa e continuata fino al collasso del tratto di barra ancorata sull'altro lato del provino. Per ogni prova si sono quindi ottenute due curve sforzo di aderenza-scorrimento, relative alle due zone ancorate della barra. In Fig. 4.4 si può notare come, durante il ricarico, sul lato2 non si sviluppino nuovi scorrimenti plastici fino al raggiungimento del 80% del carico massimo. In questa prima parte di ripresa della prova si può infatti osservare come la curva di ricarico si mantenga vicina a quella dello scarico elastico. Per tale motivo, l'applicazione del carico sul lato 2 del provino in alcune delle prove successive è stata fatta senza aspettare i due minuti di assestamento del carico fino a valori prossimi all'80% del carico massimo misurato sul lato 1. Nella Tabella 4.2 si riporta, per ciascun lato del provino, il valore dello sforzo massimo di aderenza raggiunto durante la prova ed il relativo valore dello scorrimento acciaio-calcestruzzo.



*Fig.4.5 Particolare delle piastre in acciaio di contrasto, saldate sull'estremità libera della barra ancorata, in corrispondenza del tratto ancorato meno resistente (lato-1).*

Tabella 4.2 Valori dello sforzo medio di aderenza e dello scorrimento all'estremità libera della barra, in corrispondenza del carico massimo misurato durante la prova.

Provino	$\tau_{\max}$	$\delta F(\tau_{\max})$	Lato
	[MPa]	[mm]	
UNI16H1	14,193	1,99	S1
UNI16H1	14,389	1,80	S2
UNI16H2	13,355	2,47	S1
UNI16H2	13,355	1,75	S2
UNI24H1	8,624	0,951	S1
UNI24H1	8,852	1,03	S2
UNI24H2	8,958	0,763	S1
UNI24H2	10,634	2,24	S2

Occorre osservare che nel provino UNI24H1, sul quale anzichè una piastra di bloccaggio erano stati saldati tre spezzoni di barra all'estremità della trave, si è verificato il collasso locale del calcestruzzo per le elevate tensioni di compressione esercitate dai tondi di barra saldata, che ha provocato il distacco del calcestruzzo di ricoprimento (Fig.4.6) e l'interruzione della prova quando il carico sul martinetto era pari a circa 100 kN.

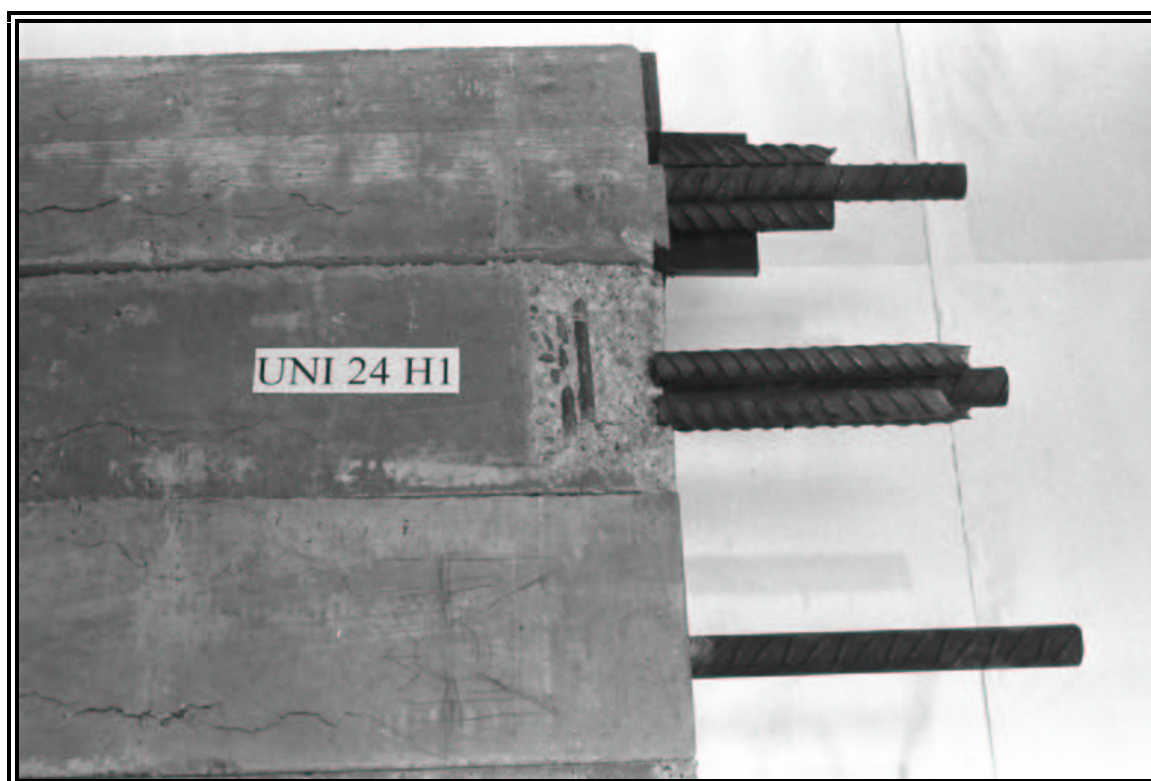


Fig.4.6 Particolare del collasso locale del calcestruzzo di ricoprimento all'estremità libera della barra sul lato-1, relativo al provino UNI24H1.

#### 4.1.2 Controllo dell'aderenza secondo la Normativa Italiana

La CNR UNI 10020/71 prevede la determinazione dei seguenti valori dello sforzo medio di aderenza :

$\tau_{0.01}$  = sforzo di aderenza misurato in corrispondenza di uno scorrimento di 0.01 mm;

$\tau_{0.1}$  = sforzo di aderenza misurato in corrispondenza di uno scorrimento di 0.1 mm;

$\tau_1$  = sforzo di aderenza misurato in corrispondenza di uno scorrimento di 1 mm;

$\tau_m = (\tau_{0.01} + \tau_{0.1} + \tau_1) / 3$ ;

$\tau_r$  = sforzo di aderenza misurato in corrispondenza di uno scorrimento di 3 mm, oppure lo sforzo di aderenza massimo misurato durante la prova quando lo scorrimento massimo è minore di 3 mm.

Nella Tabella 4.3, per ciascun provino, vengono riportati due valori dello sforzo; il primo è relativo agli scorrimenti misurati sul lato della trave in cui si verifica per primo il collasso dell'aderenza (lato 1), mentre il secondo è relativo all'altro lato della trave (lato 2).

Tabella 4.3 Valori caratteristici dello sforzo di aderenza previsti dalla CNR UNI 10020/71.

Provino	$\tau_{0.01}$	$\tau_{0.1}$	$\tau_1$	$\tau_m$	$\tau_r$	Lato
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
UNI16H1	5.23	8.20	13.15	<b>8.86</b>	<b>13.95</b>	S1
UNI16H1	5.87	11.05	14.36	<b>10.43</b>	<b>13.97</b>	S2
UNI16H2	5.00	8.22	12.87	<b>8.70</b>	<b>13.22</b>	S1
UNI16H2	4.95	7.18	11.65	<b>7.92</b>	<b>12.80</b>	S2
UNI24H1	3.13	5.98	8.61	<b>5.91</b>	<b>7.18</b>	S1
UNI24H1	4.19	5.86	8.67	<b>6.24</b>	<b>8.85</b>	S2
UNI24H2	4.11	5.98	8.93	<b>6.34</b>	<b>7.18</b>	S1
UNI24H2	4.16	5.90	9.88	<b>6.65</b>	<b>10.55</b>	S2

Mentre la CNR UNI 10020/71 indica le modalità di prova, l'accettabilità della barra nei confronti dell'aderenza viene descritta nell'Allegato 6 delle Norme Tecniche per le opere in Cemento Armato (D.M. 9.01.1996). I valori degli sforzi di aderenza  $\tau_m$  e  $\tau_r$  ricavati dalle prove sperimentali eseguite secondo la CNR UNI 10020/71, per il D.M. 9.01.1996 devono essere rapportati ad un calcestruzzo con resistenza nominale alla compressione pari a 27 MPa. La formula che il D.M. 9.01.1996 propone per la correzione dello sforzo di aderenza misurato sperimentalmente è la seguente:

$$\tau_c = \tau_d - (R_c - 27) \cdot 0.2 \text{ [MPa]}$$

dove:

- $R_c$  è la resistenza cubica del calcestruzzo che deve essere compresa nell'intervallo  $27 \pm 5.5$  [MPa];

- $\tau_d$  è lo sforzo di aderenza sperimentale;

- $\tau_c$  è lo sforzo di aderenza corretto, rapportato cioè ad una tensione nominale del calcestruzzo di 27 MPa;

I valori corretti  $\tau_{mc}$  e  $\tau_{rc}$  devono essere confrontati con i “*valori minimi nominali*”  $\tau_{ml}$  e  $\tau_{rl}$ , imposti dalla normativa in funzione del diametro della barra di prova. Affinchè la prova di aderenza venga superata, per la normativa devono risultare soddisfatte entrambe le seguenti disuguaglianze:

$$\tau_{mc} \geq \tau_{ml} = 8 - 0.12\phi$$

$$\tau_{rc} \geq \tau_{rl} = 13 - 0.19\phi$$

In Tabella 4.4 si riporta, per ciascun provino, il valore dello sforzo di aderenza  $\tau_m$  ricavato dalle prove sperimentali, il valore  $\tau_{mc}$  rapportato al calcestruzzo con resistenza nominale alla compressione di 27 MPa ed il valore nominale minimo  $\tau_{ml}$  imposto dal D.M. 9.1.1996, relativi alle medie dei valori sperimentali sui due lati del provino; per ciascun provino viene inoltre calcolato il rapporto tra la tensione corretta e quella minima nominale, in modo di avere una indicazione sul margine di superamento della prova. In Tabella 4.5 si riportano gli stessi parametri relativamente allo sforzo di aderenza  $\tau_r$ .

*Tabella 4.4 Confronto tra gli sforzi di aderenza  $\tau_m$  calcolati secondo la CNR UNI 10020/71 ed i valori minimi previsti dal D.M. 9.1.1996.*

<b>PROVINO</b>	$\tau_m$ [MPa]	$\tau_{mc}$ [MPa]	$\tau_{ml}$ [MPa]	$\tau_{mc} / \tau_{ml}$	<b><math>[\tau_{mc} / \tau_{ml}]_{\text{medio}}</math></b>
UNI16H1	9.64	8.26	6.08	1.36	<b>1.25</b>
UNI16H2	8.31	6.93	6.08	1.14	
UNI24H1	6.07	4.69	5.12	0.92	<b>0.96</b>
UNI24H2	6.49	5.11	5.12	1.00	



Tabella 4.5 Confronto tra gli sforzi di aderenza  $\tau_r$  calcolati secondo la CNR UNI 10020/71 ed i valori minimi previsti dal D.M. 9.1.1996.

PROVINO	$\tau_r$ [MPa]	$\tau_{rc}$ [MPa]	$\tau_{rl}$ [MPa]	$\tau_{rc} / \tau_{rl}$	$[\tau_{rc} / \tau_{rl}]_{\text{medio}}$
UNI16H1	13.96	12.58	9.96	1.26	<b>1.22</b>
UNI16H2	13.01	11.63	9.96	1.17	
UNI24H1	8.01*	6.63*	8.44*	0.79*	<b>0.89</b>
UNI24H2	8.86	7.48	8.44	0.89	

(\*) Il valore di  $\tau_r$  misurato sul provino UNI24H1 non viene considerato nella determinazione della media a causa dell'interruzione anticipata della prova.

Dall'osservazione dei valori riportati nelle due tabelle si evince come per i provini con barra ancorata  $\phi 16$  i valori minimi nominali siano superati con un margine superiore al 20%, mentre per i provini con barra ancorata  $\phi 24$  i valori minimi richiesti dalla normativa non vengono raggiunti. A tal proposito occorre osservare che i risultati sperimentali sono stati ridotti in modo significativo dalle formule di correzione dello sforzo, a causa della sensibile differenza tra la resistenza del calcestruzzo prevista dalla norma ( $R_c = 27$  MPa), e quella effettiva dei provini, peraltro leggermente superiore a quella massima prevista dalla norma (32,5 MPa).

Il D.M. 9.1.1996 impone inoltre delle limitazioni sui valori della geometria delle nervature, misurate attraverso l'indice di aderenza  $I_R$  (definito nel Cap.3). In particolare il regolamento prescrive che risulti verificata almeno una delle seguenti disuguaglianze:

$$\frac{I_R}{I_R(L)} \geq \frac{\tau_{ml}}{\tau_{mc}}$$

$$I_R \geq 0.065 \text{ per } \phi > 12 \text{ mm}$$

essendo:

- $I_R$  il valore dell'indice di aderenza determinato sulla barra della fornitura considerata;

- $I_R(L)$  il valore dell'indice di aderenza determinato sulla barra utilizzata per il *beam test*.

Avendo misurato (Cap.3) per la barra  $\phi 16$  un valore dell'indice di aderenza pari a 0.089 (1.37 volte il valore minimo) e per la barra  $\phi 24$  un valore pari a 0.071 (1.09 volte il valore minimo), la seconda condizione è certamente soddisfatta.

### 4.1.3 Prove con velocità di incremento dello sforzo di aderenza costante

Nelle prove lente si è applicato una rampa di carico tale da provocare una velocità di incremento dello sforzo medio di aderenza pari a 0.1 MPa/min. Nella Tabella 4.6 si riportano le velocità del carico del martinetto nelle quattro prove lente e per ciascun provino viene indicata la resistenza cubica a compressione del calcestruzzo ( $R_{cm}$ ) ed il tempo di maturazione al momento della prova.

*Tabella 4.6 Velocità di applicazione del carico nelle prove condotte con velocità di incremento dello sforzo di aderenza costante.*

Provino	$dP/dt$	$d\tau_m /dt$	$R_{cm}$	Maturazione
	[kN/min]	[MPa/min]	[Mpa]	[gg.]
UNI16S1	0,536	0.1	35,316	65
UNI16S2	0,536	0.1	35,316	66
UNI24S1	1,206	0.1	35,316	64
UNI24S2	1,206	0.1	35,316	65

Analogamente alle prove con le modalità previste dalla CNR UNI 10020/71, nelle Tabelle 4.7 e 4.8 si riportano, per ciascun provino, i valori caratteristici richiesti dalla normativa e le massime tensioni di aderenza registrate. Come si può notare, i valori sono simili a quelli delle prove condotte con la velocità di carico prevista dalla normativa, indicando che la differenza tra le velocità di carico adottate non influenza in modo significativo i risultati.

Come nel caso del provino UNI24H1, anche nel provino UNI16S1 si è verificato il collasso locale del calcestruzzo in corrispondenza della saldatura delle piastre di contrasto che ha provocato il distacco del copriferro di calcestruzzo e lo sfilamento della barra sul lato 1; anche in questo caso sul lato 2 non si è raggiunto il valore di collasso dell'aderenza. In questo caso lo scorrimento massimo è risultato inferiore a 1 mm e per tale motivo si è assunto  $\tau_r$  pari allo sforzo massimo di aderenza misurato sul lato 2 nell'arco dell'intera prova. Analogamente, nella determinazione di  $\tau_m$ , si è assunto come  $\tau_1$  lo stesso valore massimo.

Tabella 4.7 Valori caratteristici dello sforzo di aderenza determinati secondo la CNR UNI 10020/71.

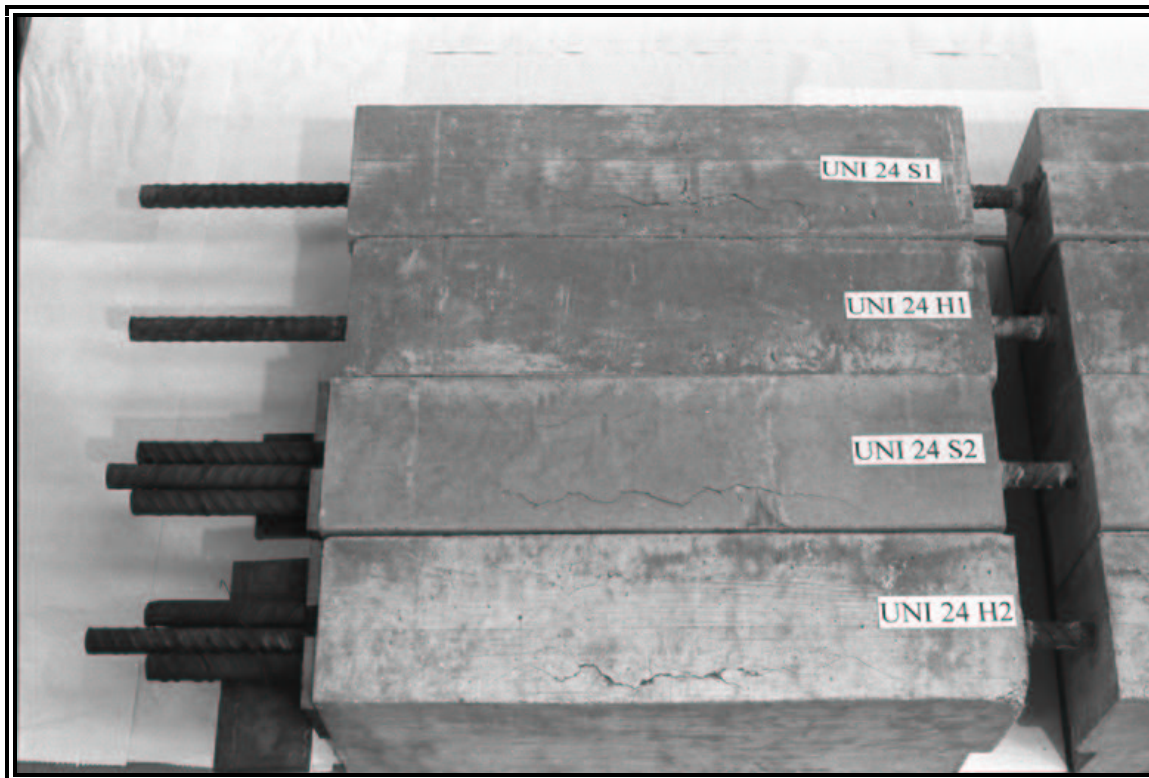
Provino	$\tau_{0.01}$	$\tau_{0.1}$	$\tau_1$	$\tau_m$	$\tau_r$	Lato
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
UNI16S1	4,374	7,211	12,995	<b>8,193</b>	<b>11,566</b>	S1
UNI16S1	6,073	9,901	13.068*	<b>9,681</b>	<b>13.068*</b>	S2
UNI16S2	7,398	10,908	13,573	<b>10,626</b>	<b>11,746</b>	S1
UNI16S2	5,910	10,357	14,172	<b>10,142</b>	<b>13,213</b>	S2
UNI24S1	4,231	6,149	9,494	<b>6,625</b>	<b>7,644</b>	S1
UNI24S1	4,974	6,410	10,277	<b>7,221</b>	<b>8,599</b>	S2
UNI24S2	4,352	5,443	9,006	<b>6,267</b>	<b>7,571</b>	S1
UNI24S2	5,205	6,502	9,610	<b>7,098</b>	<b>9,435</b>	S2

Tabella 4.8 Valori dello sforzo medio di aderenza e dello scorrimento all'estremo libero della barra, in corrispondenza del carico massimo misurato durante la prova.

Provino	$\tau_{max}$	$\delta F(\tau_{max})$	Lato
	[MPa]	[mm]	
UNI16S1	<b>13,068</b>	<b>1,035</b>	S1
UNI16S1	<b>13,068</b>	<b>0,671</b>	S2
UNI16S2	<b>14,001</b>	<b>0,403</b>	S1
UNI16S2	<b>14,175</b>	<b>1,02</b>	S2
UNI24S1	<b>9,553</b>	<b>1,084</b>	S1
UNI24S1	<b>10,325</b>	<b>0,850</b>	S2
UNI24S2	<b>9,072</b>	<b>1,260</b>	S1
UNI24S2	<b>9,588</b>	<b>0,896</b>	S2

Un aspetto significativo dei provini con le armature  $\phi 24$  è la presenza di fessure da spacco sulla superficie inferiore dei provini (Fig.4.7); infatti, a causa delle elevate spinte radiali esercitate dalla barra  $\phi 24$ , nonostante il notevole quantitativo di armatura (Fig.2.2), la fessura da spacco è riuscita a propagarsi fin sulla superficie esterna del provino. Questo ha certamente provocato una riduzione dello sforzo massimo di aderenza che per le barre  $\phi 24$  è risultato 3-4 MPa inferiore a quello delle barre  $\phi 16$ . Ciò era in un certo senso prevedibile in quanto l'armatura trasversale di contenimento prevista dalla CNR UNI 10020/71 è la stessa per tutte le armature aventi diametro minimo di 16 mm. Tale armatura di contenimento è sufficiente per

contrastare le spinte radiali dell'armatura  $\phi 16$  ma non lo è per le maggiori spinte radiali dell'armatura  $\phi 24$ , che comportano la propagazione delle fessure da spacco fin sulla superficie esterna del provino. Questo ancora una volta sottolinea l'importanza delle caratteristiche geometriche del provino nella valutazione dello sforzo di aderenza di una barra di armatura (Giuriani e Plizzari, 1985).

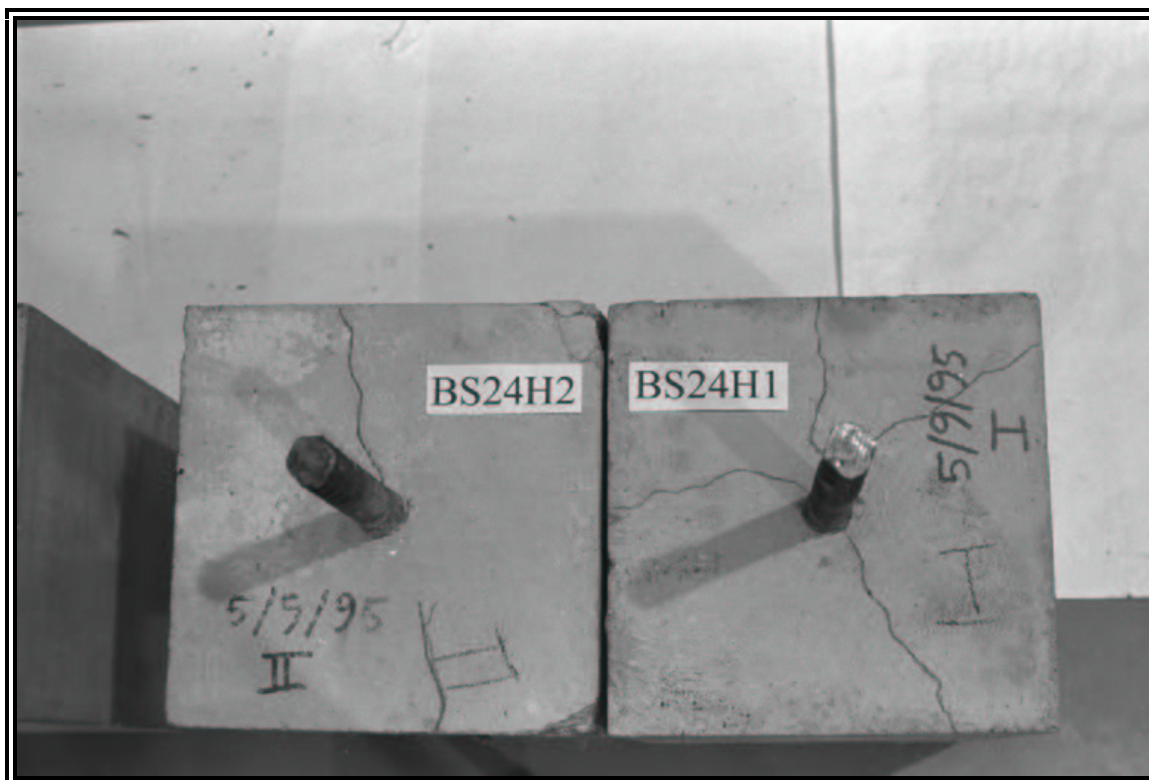


*Fig.4.7 Particolare delle fessure principali da spacco per i provini con barra ancorata  $\phi 24$ .*

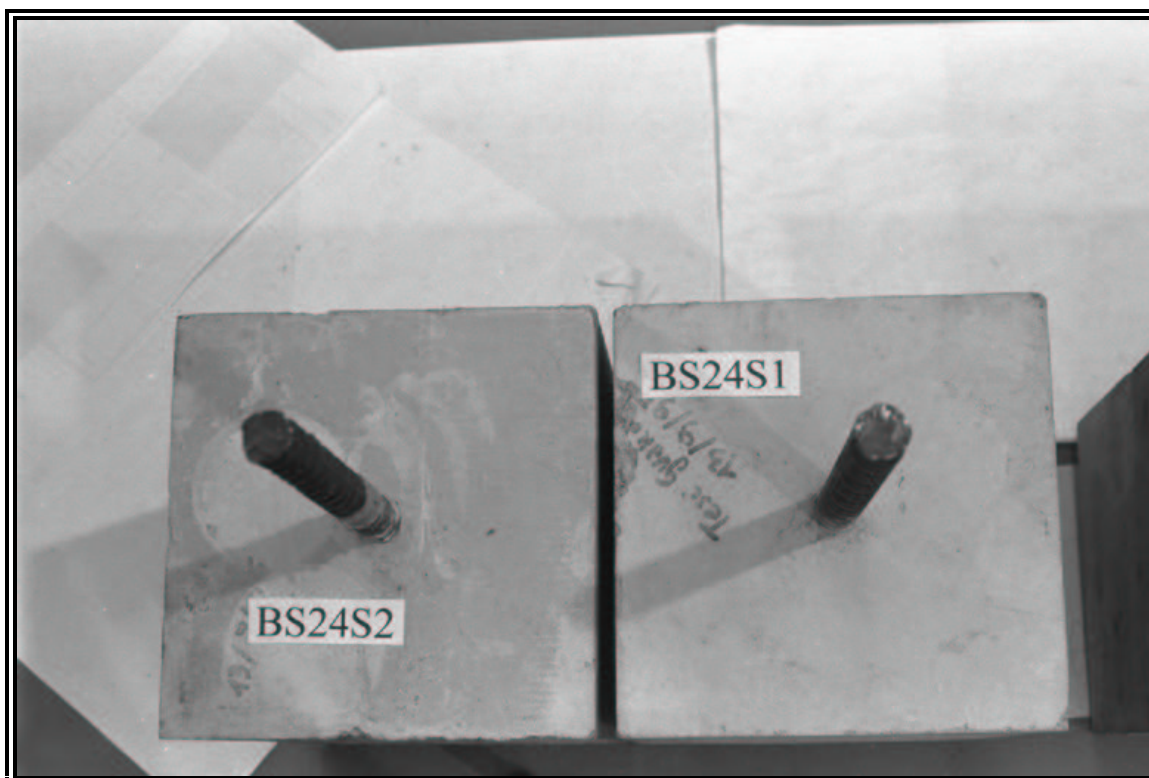
## **4.2 Normativa Inglese**

Come già descritto nel Cap.2, la Normativa Inglese BS 4449-1988 prevede l'esecuzione di prove di estrazione sull'ancoraggio di una barra immersa in un prisma di calcestruzzo avente base a forma quadrata con lato pari a 10 volte il diametro della stessa; la lunghezza di tale ancoraggio corrisponde ad una tensione di aderenza media di 7 MPa al raggiungimento della tensione caratteristica di snervamento della barra. Le prove secondo la Normativa Inglese hanno avuto inizio dopo un periodo di 83 giorni dalla data di esecuzione del getto e si sono concluse dopo 97 giorni di maturazione. Nel corso di tutte le prove si è potuto constatare come la presenza dell'armatura di contenimento, disposta all'interno dei provini, abbia consentito il raggiungimento della tensione di snervamento della barra  $\phi 16$  senza la propagazione della fessura da spacco sulla superficie esterna del provino, mentre in alcuni provini con la barra  $\phi 24$  sono apparse, nella fase finale della prova, piccole fessure da spacco (Figg.4.8-4.9). Infatti, mentre l'armatura di contenimento (spirale) è uguale per entrambi i provini, la barra  $\phi 24$  esercita una spinta radiale maggiore che ha provocato l'estensione delle

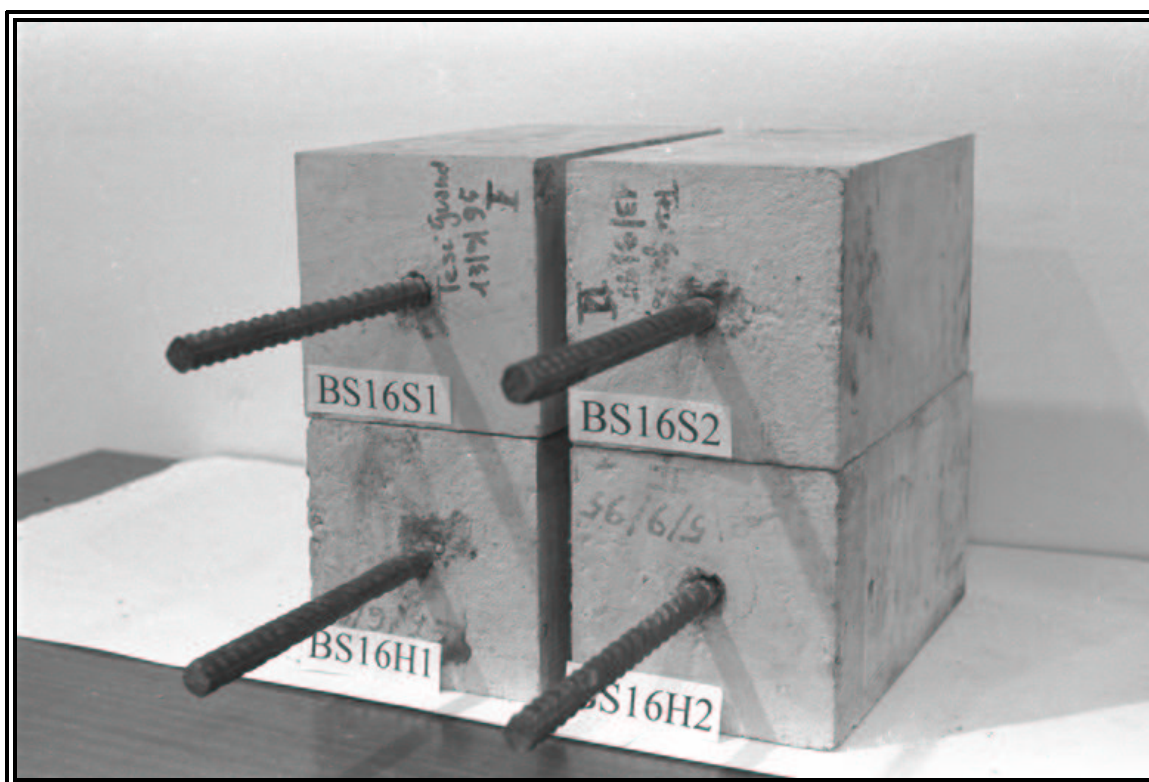
fessure da spacco sulla superficie esterna del provino. Le Figg.4.10 e 4.11 mostrano lo sgretolamento del calcestruzzo a contatto della barra, in corrispondenza del foro nella superficie di appoggio alla piastra di contrasto, segno che le sollecitazioni di compressione esercitate dai primi denti della barra ancorata, soprattutto durante lo snervamento della stessa, hanno comportato il collasso dei primi coni resistenti di calcestruzzo che si formano lungo la barra ancorata.



*Fig.4.8 Vista d'insieme dei provini BS24H1 e BS24H2 con barra ancorata  $\phi 24$  in cui le fessure da spacco si sono propagate sulla superficie esterna del provino.*



*Fig.4.9 Vista d'insieme dei provini BS24S1 e BS24S2 con barra ancorata  $\phi 24$  in cui le fessure da spacco non si sono propagate.*



*Fig.4.10 Vista d'insieme dei provini con barra ancorata  $\phi 16$ , nei quali è evidente il collasso locale del calcestruzzo in corrispondenza della sezione d'inizio dell'ancoraggio.*



*Fig.4.11 Particolare relativo al collasso locale dei puntoni conici di calcestruzzo in corrispondenza della sezione d'inizio dell'ancoraggio, per il provino BS16H2.*

#### **4.2.1 Prove secondo la BS 4449-1988**

La Normativa Inglese prescrive di applicare alla barra ancorata una rampa di carico tale da raggiungere in due minuti la tensione nominale caratteristica di snervamento (pari a 500 MPa per le barre impiegate), e di mantenere tale sollecitazione per altri due minuti in modo da consentire la propagazione e la completa stabilizzazione degli scorrimenti plastici. In Tabella 4.9 si riportano le velocità ( $dP/dt$ ) del carico applicato e la velocità di incremento dello sforzo medio di aderenza ( $d\tau_m/dt$ ) per i quattro provini esaminati. Nella stessa tabella viene anche indicato anche il tempo di maturazione del singolo provino e la resistenza alla compressione del calcestruzzo al momento delle prove, misurata mediante prove di compressione su cubetti con lato di 15 cm. Occorre osservare che tale resistenza, pari a 39 MPa, è in realtà leggermente inferiore al valore massimo previsto dalla Normativa Inglese, pari a 45 MPa.

Tabella 4.9 Velocità di applicazione del carico nelle prove condotte secondo la BS 4449-1988.

Provino	dP/dt	d $\tau_m$ /dt	Rcm	Maturazione
	[kN/min]	[MPa/min]	[MPa]	[gg.]
BS16H1	50.25	3.50	39.02	83
BS16H2	50.25	3.50	39.02	84
BS24H1	113.00	3.49	39.02	84
BS24H2	113.00	3.49	39.02	92

In Tabella 4.10 si riportano i valori degli scorrimenti dell'estremo caricato  $\delta_{L,y}$  e dell'estremo libero della barra  $\delta_{F,y}$ , il valore dello sforzo di aderenza medio  $\tau_{sn}$  e la tensione nella barra  $f_{sn}$ , corrispondenti al raggiungimento dello snervamento effettivo della barra. In tale tabella non è stato riportato il valore dello spostamento di testa relativo al provino BS24H2, in quanto si è probabilmente verificato un movimento del supporto in alluminio per i trasduttori durante la prova.

Tabella 4.10 Valori sperimentali misurati sui provini in corrispondenza dello snervamento della barra.

Provino	$\tau_{sn}$	$\delta_{L,y}$	$\delta_{F,y}$	$f_{sn}$
	[MPa]	[mm]	[mm]	[MPa]
BS16H1	6.81	1.176	0.000	487.24
BS16H2	6.89	1.068	0.005	492.44
BS24H1	7.02	1.444	0.000	502.13
BS24H2	6.94	2.236	0.003	496.35

Nel seguito vengono commentati i risultati del provino BS16H1, che mostrano alcuni risultati tipici di questa serie di prove. La Fig.4.12 mostra il diagramma lineare del carico applicato alla barra in funzione del tempo, caratterizzato da una velocità di 50.25 kN/min. per la barra  $\phi 16$  (e di 113 kN/min. per la barra  $\phi 24$ ). Come descritto precedentemente, dopo i primi due minuti di prova, il carico è stato mantenuto costante per altri due minuti. La Fig.4.13 mostra l'andamento dello spostamento di testa in funzione del tempo; si può notare



l'incremento di tale spostamento al raggiungimento dello snervamento della barra, risultato poco inferiore ( $f_{sn} = 487.24$  MPa) al valore nominale previsto ( $f_y = 500$  MPa). Tale spostamento è prevalentemente legato alla deformazione plastica della barra snervata. La Fig.4.14 mostra l'andamento nel tempo dello spostamento dell'estremo libero della barra che rappresenta il suo scorrimento rispetto al calcestruzzo; tale scorrimento, di piccola entità, si è verificato durante gli ultimi due minuti con carico costante sulla barra. Il diagramma dello sforzo di aderenza medio in funzione dello spostamento di testa è mostrato in Fig.4.15, relativamente alla durata complessiva di 4 minuti prevista dalla BS 4449-1988, ed in Fig.4.16 relativamente alla fase iniziale della prova (fino allo snervamento della barra). In tale figura, assieme allo spostamento di testa della barra, è riportata la retta dello spostamento  $S_e$ , legato alla deformazione elastica della barra nel tratto compreso tra la sezione d'inizio dell'ancoraggio e la sezione di supporto dei due trasduttori di testa. In questo modo, per ciascun valore del carico di estrazione, è possibile conoscere il valore dello scorrimento  $\delta_L$  della barra rispetto al calcestruzzo; tale scorrimento per un certo valore dello sforzo di aderenza, è uguale alla misura del segmento orizzontale compreso tra la retta dello spostamento elastico  $S_e$ , e la curva dello spostamento della barra. La Fig.4.17 mostra infine il diagramma dello sforzo di aderenza medio in funzione dello scorrimento di coda, che risulta nullo nella fase di incremento del carico.

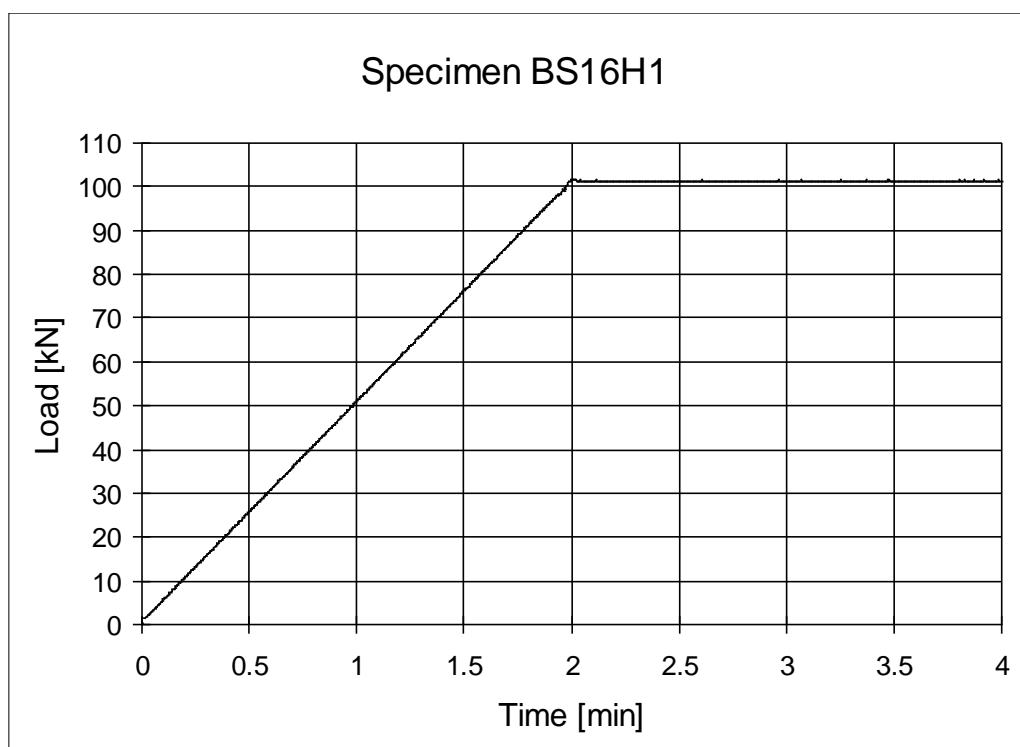
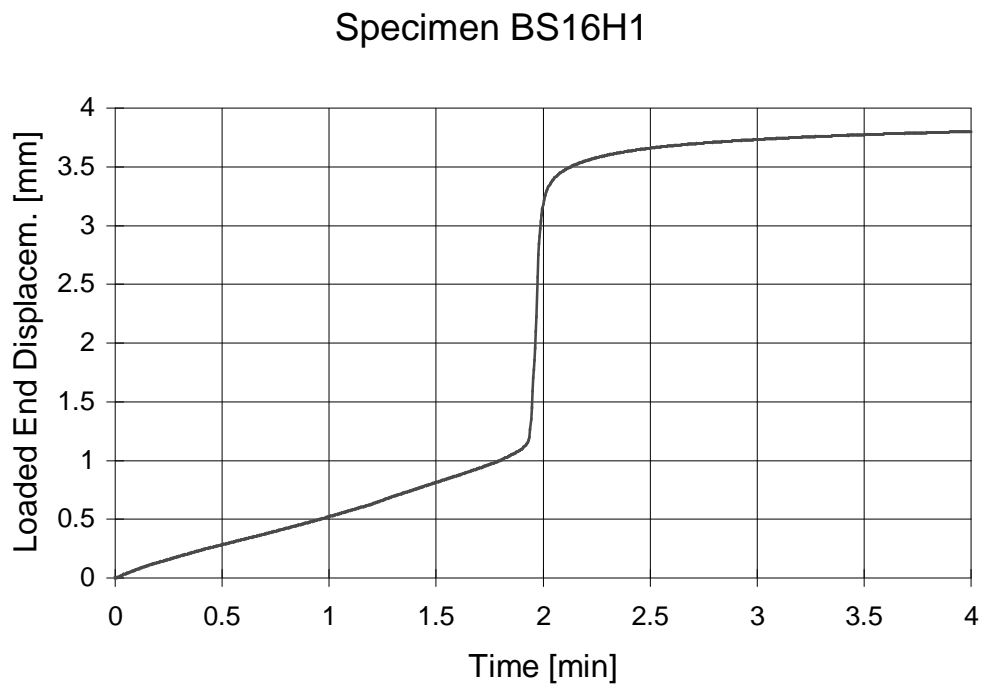
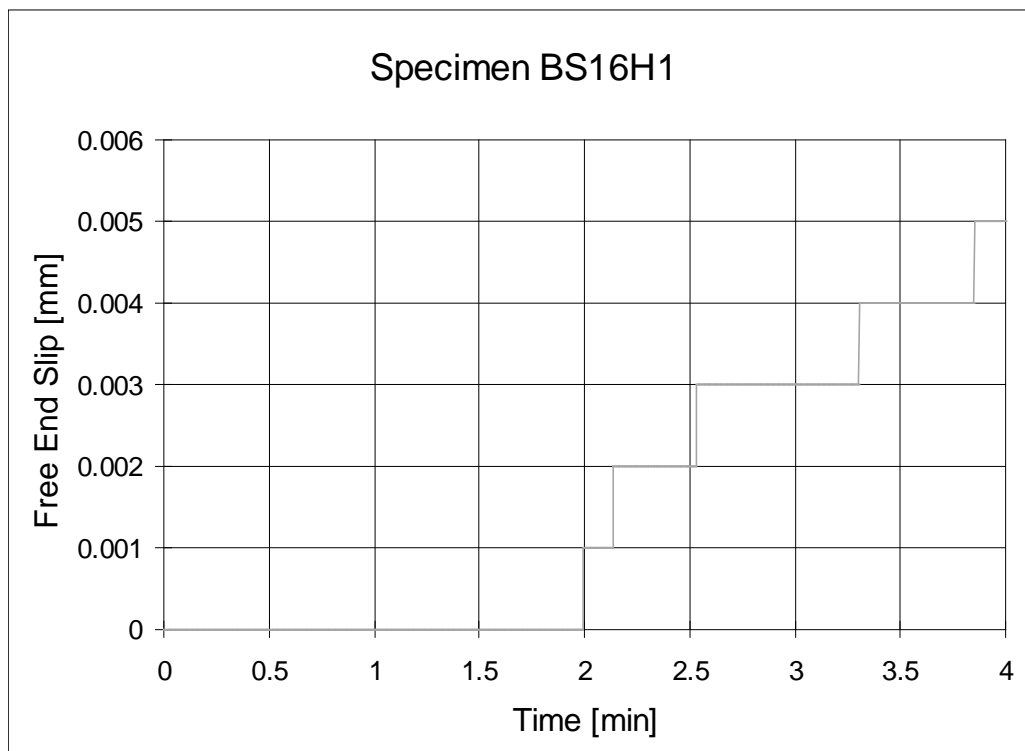


Fig.4.12 Diagramma del carico in funzione del tempo per il provino BS16H1.



*Fig.4.13 Diagramma dello spostamento dell'estremo caricato della barra in funzione del tempo per il provino BS16H1.*



*Fig.4.14 Diagramma dello scorrimento all'estremo libero della barra in funzione del tempo per il provino BS16H1.*

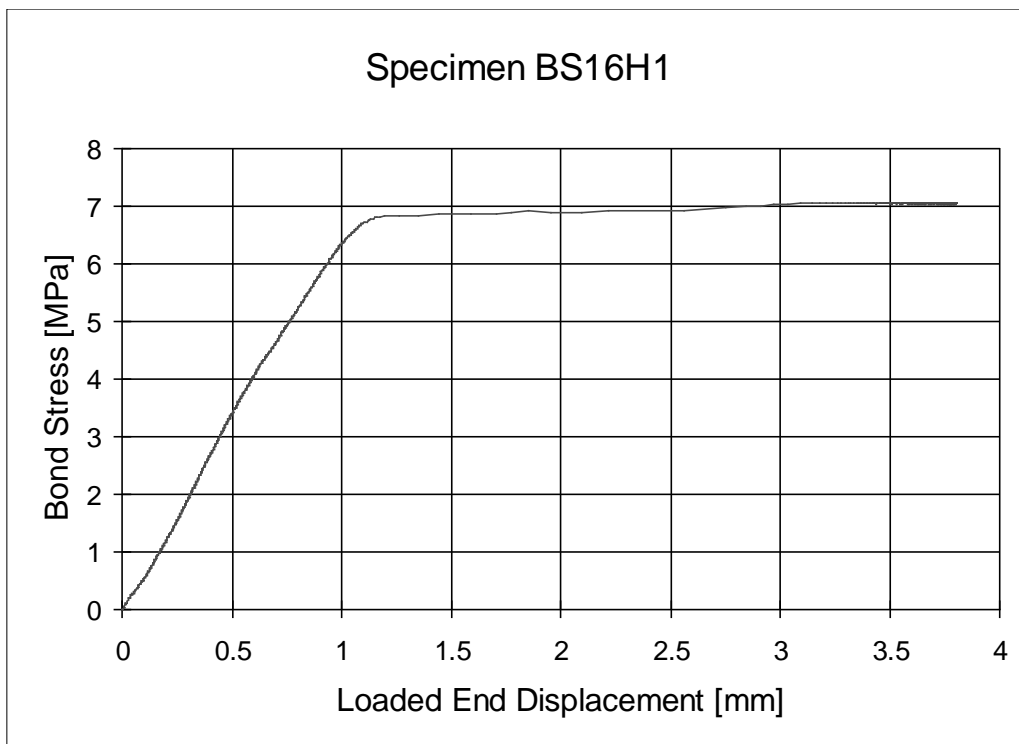


Fig.4.15 Diagramma completo dello sforzo medio di aderenza in funzione dello spostamento dell'estremo caricato della barra nel provino BS16H1.

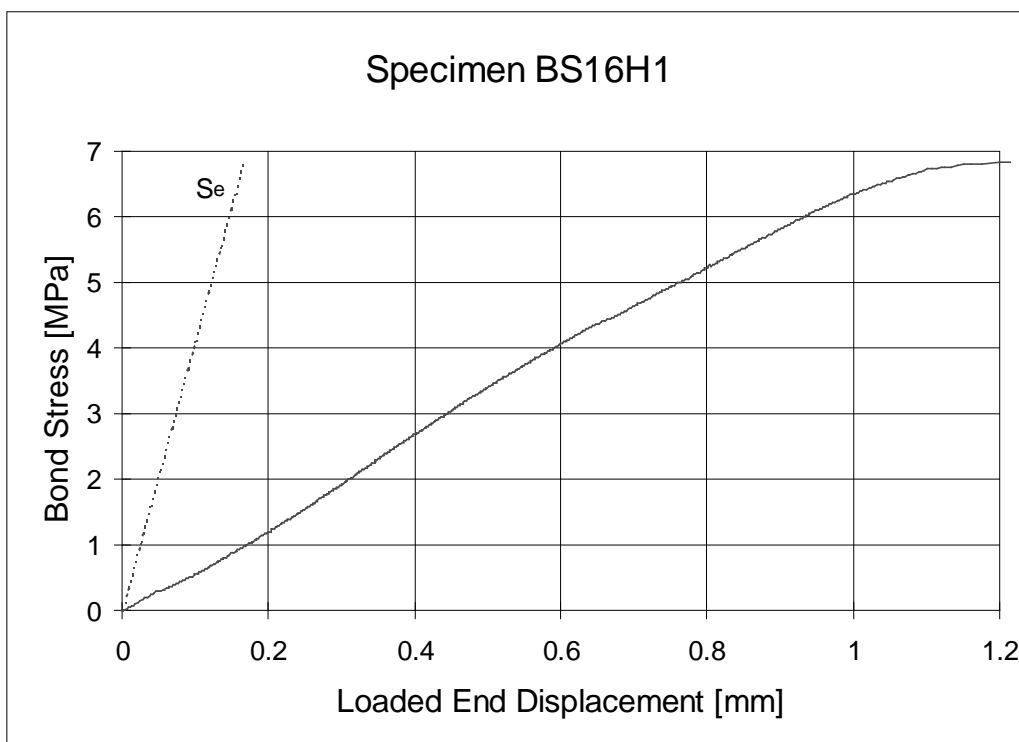


Fig.4.16 Parte iniziale del diagramma dello sforzo medio di aderenza in funzione dello spostamento dell'estremo caricato della barra nel provino BS16H1.



*Fig.4.17 Diagramma dello sforzo medio di aderenza in funzione dello scorrimento all'estremo libero della barra nel provino BS16H1.*

#### **4.2.2 Controllo dell'aderenza**

La Normativa Inglese BS 4449-1988 stabilisce che la prova di aderenza è superata se lo scorrimento della estremità libera della barra non eccede i 0.2 mm. In Tabella 4.11 si riportano, per i quattro provini, lo scorrimento di coda delle barre al termine della prova ( $t = 4$  min.), il valore limite imposto dalla Normativa ed il rapporto tra i due precedenti scorrimenti. Si può notare che, nonostante la resistenza a compressione del calcestruzzo leggermente inferiore a quella prevista, i risultati di tutte le prove hanno ampiamente superato i valori minimi previsti dalla normativa.

La Normativa Inglese non prevede prove per il controllo della geometria della nervatura.

#### **4.2.3 Prove con velocità di incremento dello sforzo di aderenza costante**

Come descritto nel Cap.2, queste prove vengono condotte applicando una velocità di carico tale da avere un incremento dello sforzo medio di aderenza pari a 0.1 MPa/min. In Tabella 4.12 si riporta, accanto alla velocità del carico di estrazione imposto a ciascun provino, il valore della resistenza a compressione del calcestruzzo ed il tempo di maturazione dei provini al momento della prova.

Tabella 4.11 Confronto tra gli scorrimenti all'estremità libera della barra misurati sperimentalmente ed i valori minimi previsti dalla BS 4449-1988.

PROVINO	$\delta_{F,max}$ [mm]	$\delta_{F,l}$ [mm]	$\delta_{F,l} / \delta_{F,max}$	$[\delta_{cF,l} / \delta_{F,max}]_{medio}$
BS16H1	0.005	0.200	40.00	25.00
BS16H2	0.020	0.200	10.00	
BS24H1	0.006	0.200	33.33	23.81
BS24H2	0.014	0.200	14.29	

Tabella 4.12 Velocità di applicazione del carico nelle prove condotte con velocità di incremento dello sforzo di aderenza costante.

Provino	dP/dt	d $\tau_m$ /dt	Rcm	Maturazione
	[kN/min]	[MPa/min]	[MPa]	[gg.]
BS16S1	1.44	0.10	42.18	83
BS16S2	1.44	0.10	42.18	85
BS24S1	3.24	0.10	42.18	93
BS24S2	3.24	0.10	42.18	97

Le prove a velocità di carico imposta sono state condotte in modo differente in funzione del diametro della barra ancorata. Per i provini con barra  $\phi 16$ , una volta raggiunto il limite di snervamento, le prove sono proseguite in controllo di spostamento con velocità dello spostamento del pistone pari a 0.5 mm/min., fino al raggiungimento del carico massimo della barra. Nelle prove con le barre  $\phi 24$ , il carico è stato applicato con velocità costante fino a 250 kN che rappresenta il massimo carico applicabile alla macchina di prova Instron 1274. In corrispondenza di tale valore la barra ha superato il limite di snervamento ma non ha ancora raggiunto il carico massimo; i valori sperimentali relativi a tale carico non sono quindi disponibili per le prove con la barra  $\phi 24$ . La Fig.4.18 mostra il diagramma del carico in funzione del tempo per il provino BS16S1, nel quale è evidenziato l'andamento lineare durante la fase iniziale in controllo di carico, e la piccola perdita di carico che si è verificata durante l'interruzione della prova per il passaggio in controllo di spostamento. La Fig.4.19 mostra l'andamento dello spostamento di testa in funzione del tempo relativamente alla fase in

controllo di carico, mentre in Fig.4.20 è indicato lo spostamento dell'estremo libero della barra che si verifica dopo lo snervamento della barra nell'estremo caricato. La Fig.4.21 mostra lo sforzo di aderenza in funzione dello spostamento di testa per l'intera prova, nel quale è evidenziato lo snervamento e l'incrudimento dell'acciaio. La Fig.4.22 è invece relativa alla fase iniziale della prova, fino al raggiungimento dello snervamento. La Fig.4.23 mostra infine il diagramma dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento all'estremo non caricato della barra, nel quale si nota che lo spostamento si verifica solo dopo lo snervamento della barra.

In Tabella 4.13, relativamente ai due provini con barra  $\phi 16$ , si riportano i valori dello sforzo di aderenza, dello spostamento dell'estremo caricato, dello scorrimento all'estremo libero e della tensione nella barra in corrispondenza del carico massimo, misurato nella fase con controllo di spostamento. In Tabella 4.14 si riportano i valori degli sforzi e degli scorrimenti registrati nelle prove al raggiungimento dello snervamento dell'acciaio. Lo spostamento dell'estremo caricato del provino BS24S1 non è stato riportato in quanto si è probabilmente verificato un movimento del supporto degli LVDT durante la prova.

*Tabella 4.13 Valori sperimentali misurati sul provino in corrispondenza del carico massimo raggiunto dalle barre.*

Provino	$\tau_{\max}$	$\delta_{L,\max}$	$\delta_{F,\max}$	$\sigma_{s(\max)}$
	[MPa]	[mm]	[mm]	[MPa]
BS16S1	8.03	15.309	0.010	574.18
BS16S2	7.98	16.156	0.007	570.67

*Tabella 4.14 Valori sperimentali misurati sui provini delle prove lente in corrispondenza dello snervamento della barra.*

Provino	$\tau_{sn}$	$\delta_{L,y}$	$\delta_{F,y}$	$f_{sn}$
	[MPa]	[mm]	[mm]	[MPa]
BS16S1	6.79	0.965	0.000	485.53
BS16S2	6.79	0.803	0.000	485.77
BS24S1	7.07	2.024	0.001	506.07
BS24S2	7.10	1.037	0.004	508.16

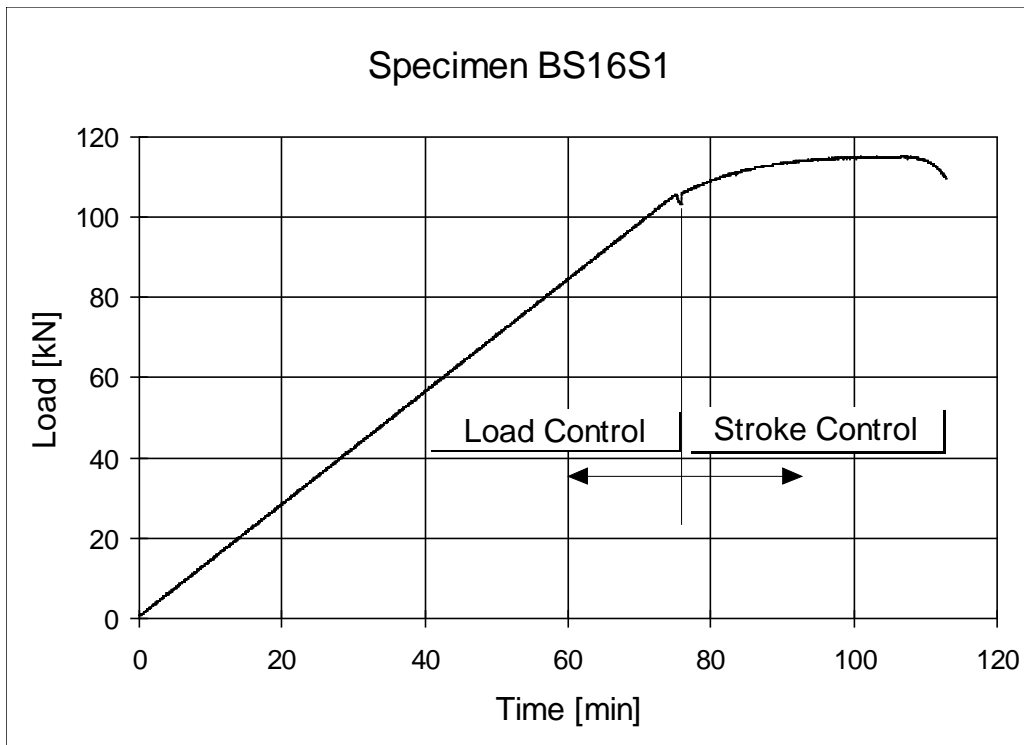


Fig.4.18 Diagramma del carico in funzione del tempo nel provino BS16S1.

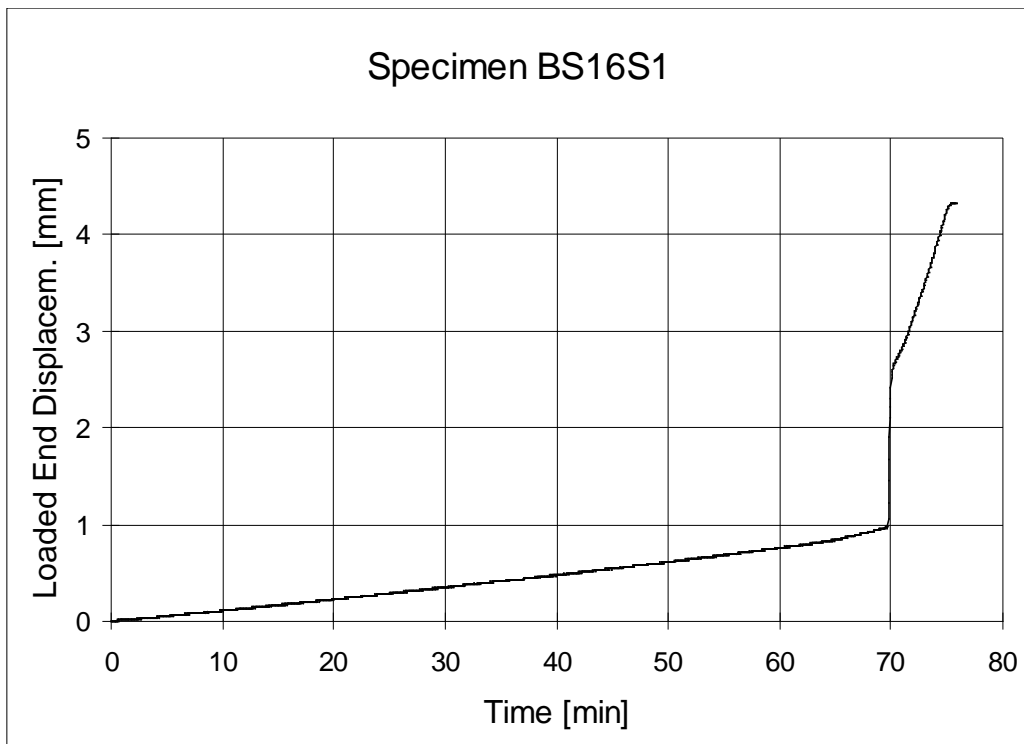


Fig.4.19 Diagramma dello spostamento dell'estremo caricato della barra in funzione del tempo per il provino BS16S1.

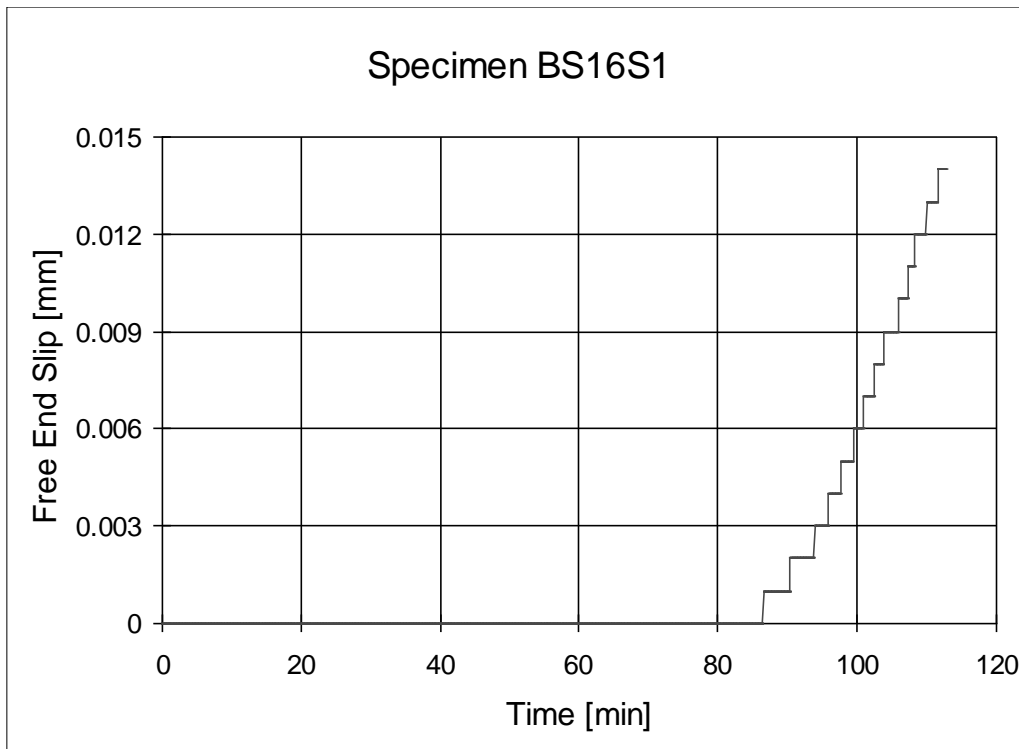


Fig.4.20 Diagramma dello scorrimento all'estremo libero della barra in funzione del tempo per il provino BS16S1.

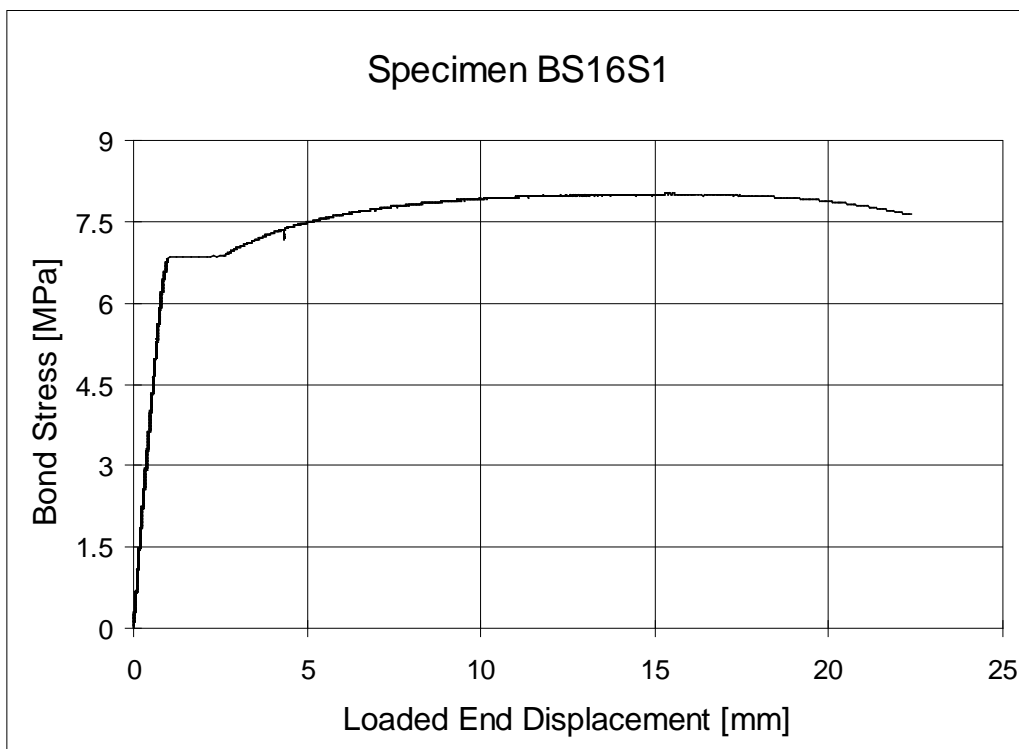


Fig.4.21 Diagramma completo dello sforzo medio di aderenza in funzione dello spostamento dell'estremo caricato della barra nel provino BS16S1.



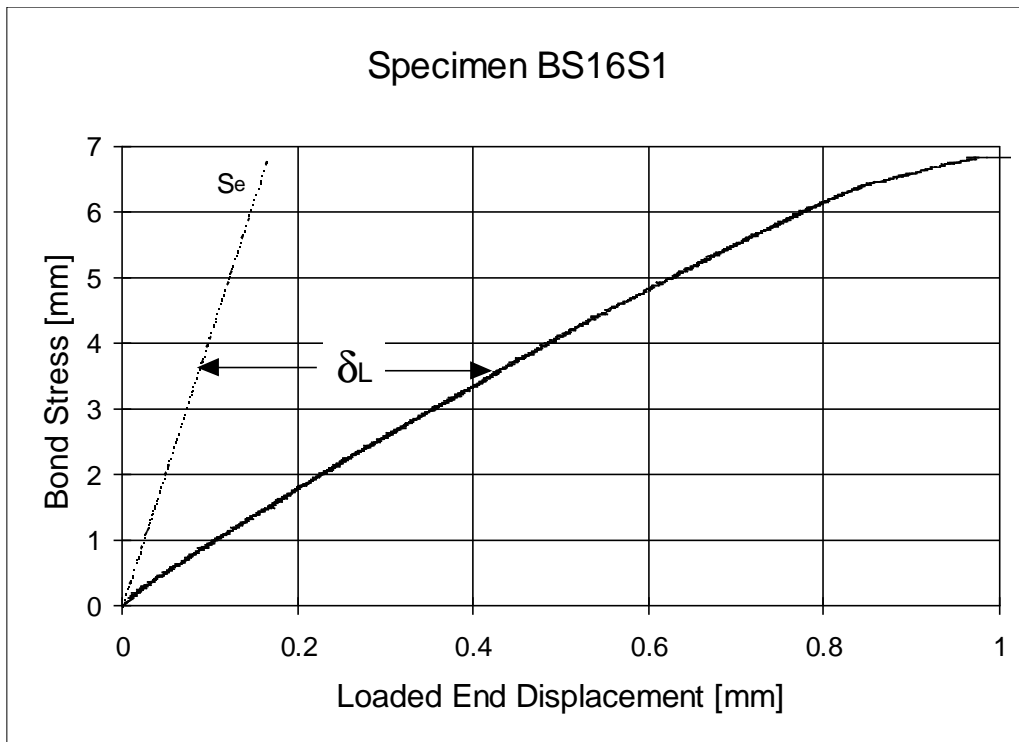


Fig.4.22 Parte iniziale del diagramma dello sforzo medio di aderenza in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra nel provino BS16S1.



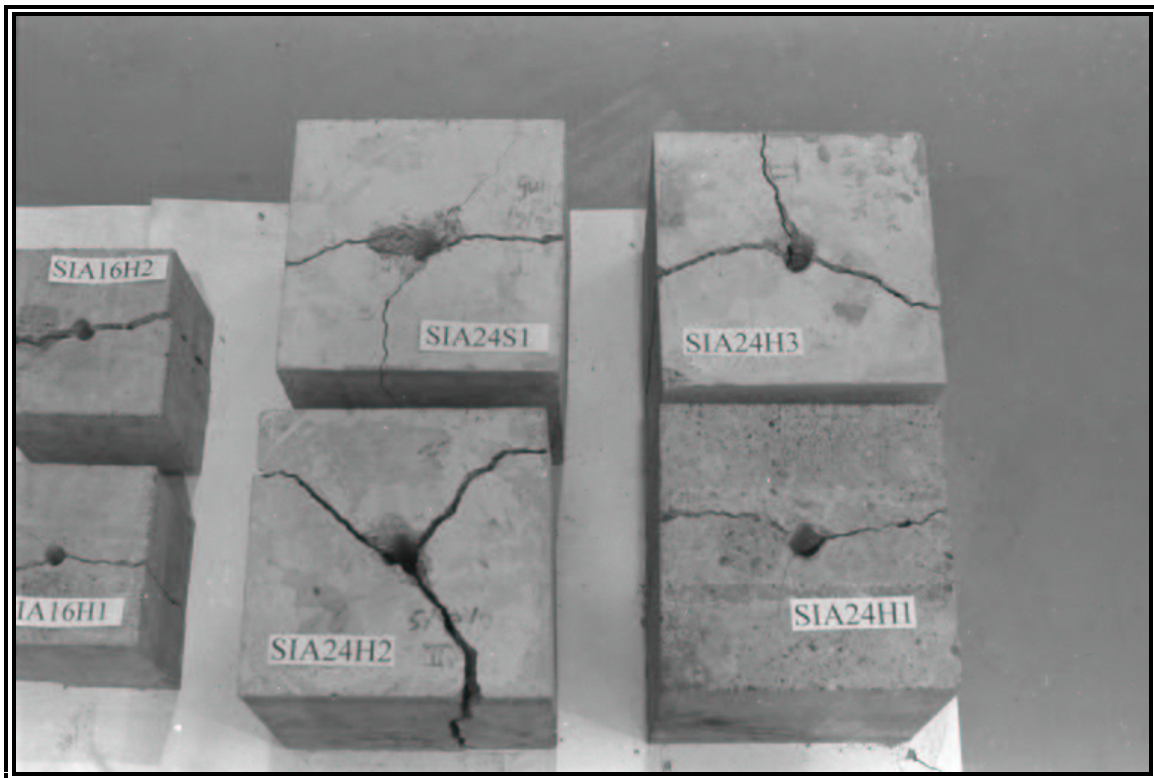
Fig.4.23 Diagramma completo dello sforzo medio di aderenza in funzione dello scorrimento all'estremo libero della barra nel provino BS16S1.

### 4.3 Normativa Svizzera

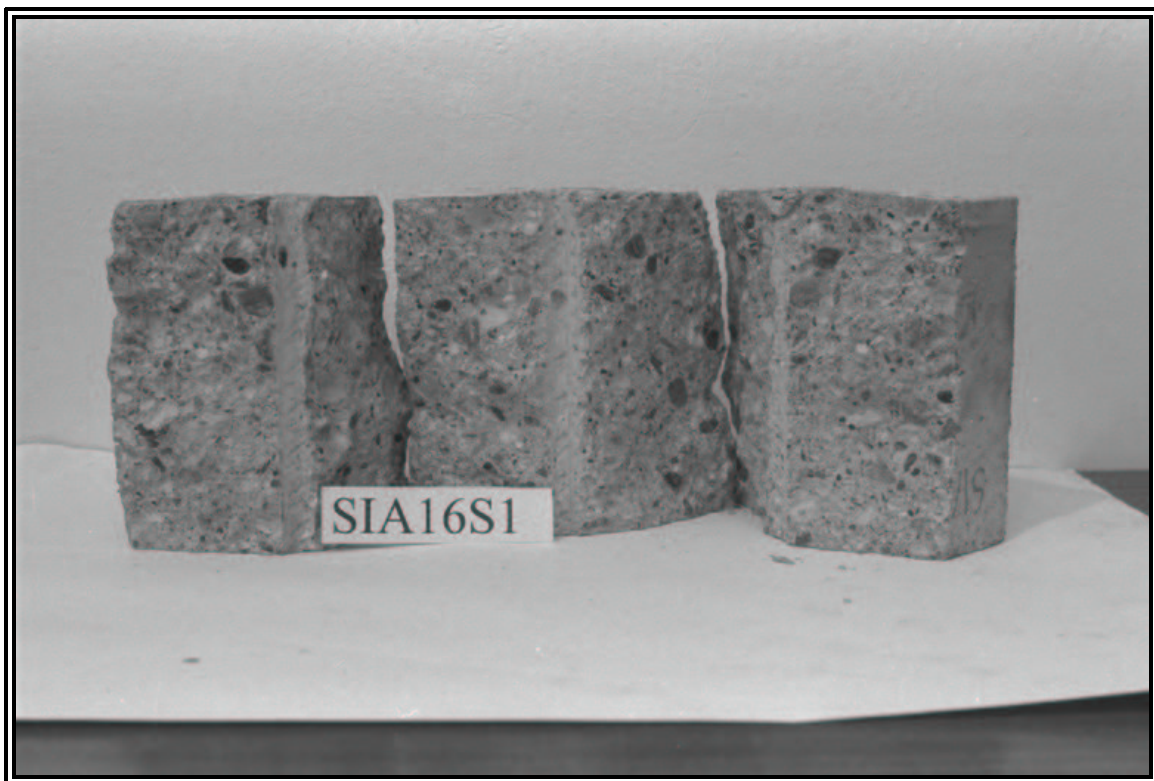
Come già descritto nel Cap.2, la Normativa Svizzera SIA162/1-1989 prevede l'esecuzione di prove di estrazione di una barra da un prisma di calcestruzzo avente base a forma di cubo con lato pari a 10 volte il diametro della barra stessa.

Tali prove hanno avuto inizio dopo 76 giorni di maturazione del calcestruzzo dei provini e sono state terminate dopo 79 giorni di maturazione, ad eccezione della prova SIA24H3 che è stata condotta dopo 87 giorni di maturazione. I dati relativi al provino SIA24H1 non sono stati registrati per errore dal programma di acquisizione dati; è stato comunque possibile leggere direttamente dal pannello di controllo della macchina di prova il carico di estrazione massimo raggiunto al momento della rottura per "splitting" del provino, attraverso il quale è stato calcolato il valore dello sforzo di aderenza massimo. Soltanto dopo aver eseguito la seconda prova veloce SIA24H2 e la prima prova lenta SIA24S1, e dopo aver confrontato i risultati sperimentali ottenuti, a causa della sensibile differenza tra i risultati delle prove veloci, si è stabilito di eseguire una ulteriore prova secondo normativa (provino SIA24H3), rinunciando ad una prova di a velocità costante. Come già descritto nel Par.2.4.3, al fine di garantire un contatto uniforme tra il provino e la piastra di contrasto, previsto dalla Normativa Svizzera, si è fatto uso di un particolare cemento a rapida presa e indurimento (UMAFIX), in grado di fornire dopo un'ora dalla sua preparazione una resistenza a compressione di 4 MPa; questo valore è notevolmente superiore alla massima pressione presente sulla superficie d'appoggio del provino in corrispondenza del carico ultimo di estrazione. Prima di inserire il singolo provino sul banco di prova si è provveduto a spalmare un sottile strato di malta direttamente sulla piastra inferiore di contrasto. Il letto di malta cementizia consente di appoggiare correttamente il provino, livellando le imperfezioni presenti sulla superficie d'appoggio. Al termine di ciascuna prova si è potuto osservare come lo strato fosse ancora perfettamente saldato alla piastra d'acciaio nonostante il provino si fosse aperto completamente a causa delle fessure da spacco.

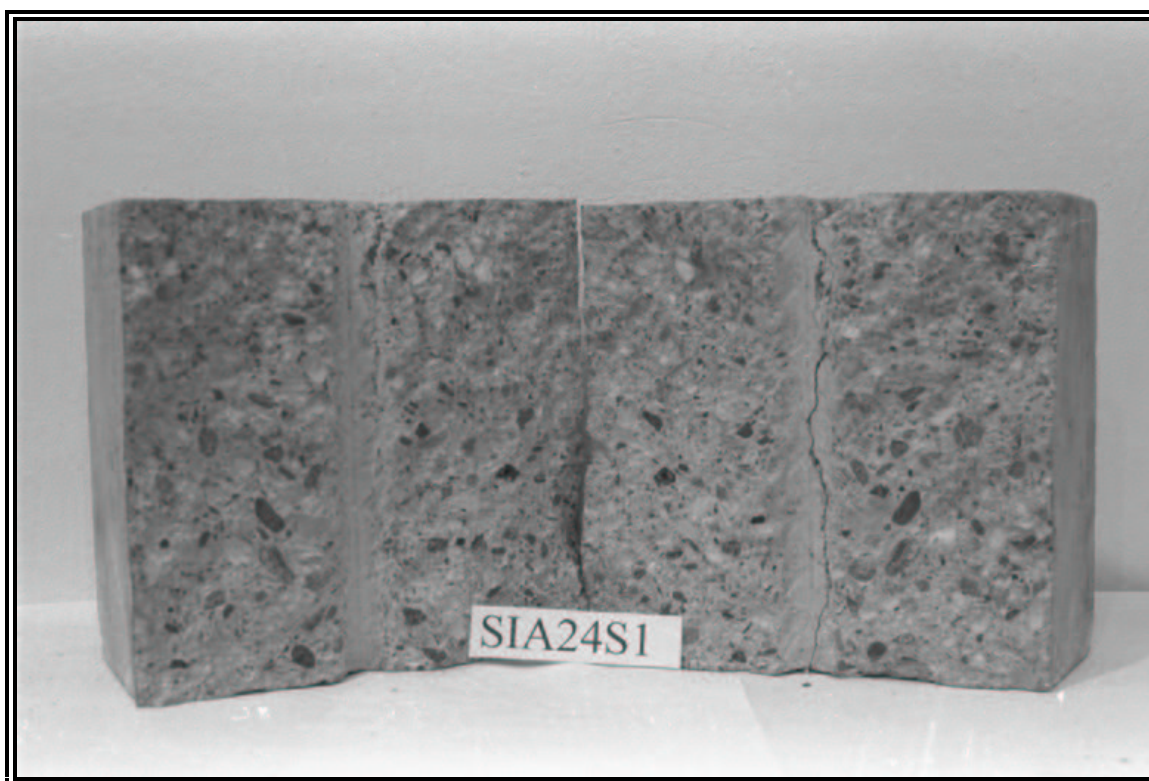
La Fig.4.24 mostra il quadro fessurativo dei provini di questa serie di prove, nel quale sono evidenziate le fessure da spacco che hanno provocato il collasso dell'aderenza. L'adesione e l'attrito fra il calcestruzzo, la malta e l'acciaio ha certamente esercitato un'azione di contenimento, in corrispondenza dell'estremo caricato della barra, dal quale le fessure da spacco iniziano a propagarsi. Questa azione di contenimento si aggiunge a quella esercitata dal calcestruzzo con la sua resistenza a trazione, prima della fessurazione, e con la sua resistenza residua, a fessurazione da spacco avvenuta. Tutto ciò fa sì che la rottura del provino avvenga a valori elevati del carico di estrazione, pur in assenza di ogni tipo di armatura di contenimento interna al cubo di calcestruzzo. Si è inoltre osservato come tale rottura sia di tipo fragile, in quanto le fessure da spacco si propagano istantaneamente. Le Figg.4.25 e 4.26 mostrano il particolare di alcuni provini fessurati per splitting, dopo il completamento delle prove.



*Fig.4.24 Quadro fessurativo complessivo relativo ad alcuni provini della Normativa Svizzera, in cui si è verificato il collasso per splitting dell'aderenza.*



*Fig.4.25 Particolare del provino con barra ancorata  $\phi 16$ , fessurato per splitting dopo il completamento della prova.*



*Fig.4.26 Particolare del provino con barra ancorata  $\phi 24$ , fessurato per splitting dopo il completamento della prova.*

Le misure sperimentali effettuate in questa serie di prove hanno riguardato il carico applicato alla barra, misurato attraverso la cella di carico da 500 kN della macchina di prova, e gli scorrimenti all'estremo caricato e libero della barra, misurati per mezzo di trasduttori di spostamento induttivi (LVDT). Per una descrizione dettagliata della strumentazione, si rimanda il lettore al Par.2.4.2.

#### **4.3.1 Prove secondo la normativa SIA 162/1-1989**

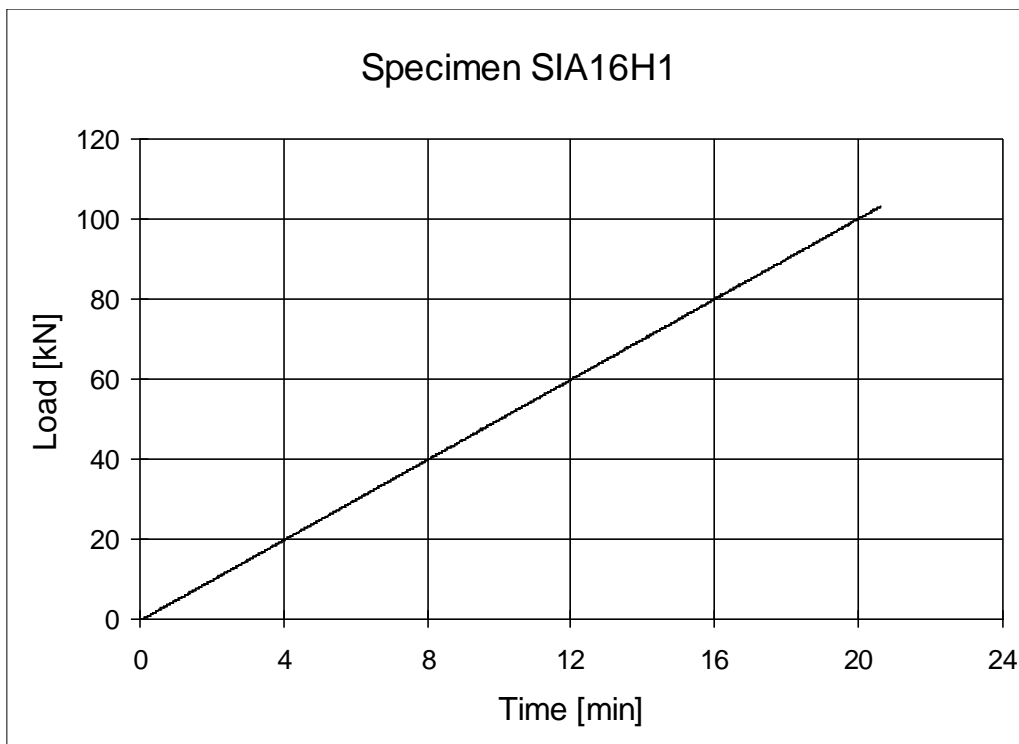
La Normativa Svizzera impone di applicare alla barra ancorata un carico di estrazione che comporti un incremento della tensione della barra stessa pari a 25 MPa/min. A partire da questo valore, si possono determinare i valori della velocità del carico di estrazione ( $dP/dt$ ) e della velocità di incremento dello sforzo medio di aderenza ( $d\tau_m/dt$ ), riportati in Tabella 4.15. Come per il Beam-Test della Normativa Italiana, anche in questi provini la lunghezza di ancoraggio è pari a dieci volte il diametro della barra; poichè la lunghezza di ancoraggio è proporzionale al diametro della barra, nella espressione della  $d\tau_m/dt$  non compare tale diametro. In questa Tabella si riporta inoltre il valore della resistenza del calcestruzzo, (determinata per mezzo di prove di compressione su cubetti aventi lato di 15 cm) ed i tempi di maturazione dei provini al momento della prova.

Tabella 4.15 Velocità di applicazione del carico nelle prove condotte secondo la SIA 162/1-1989.

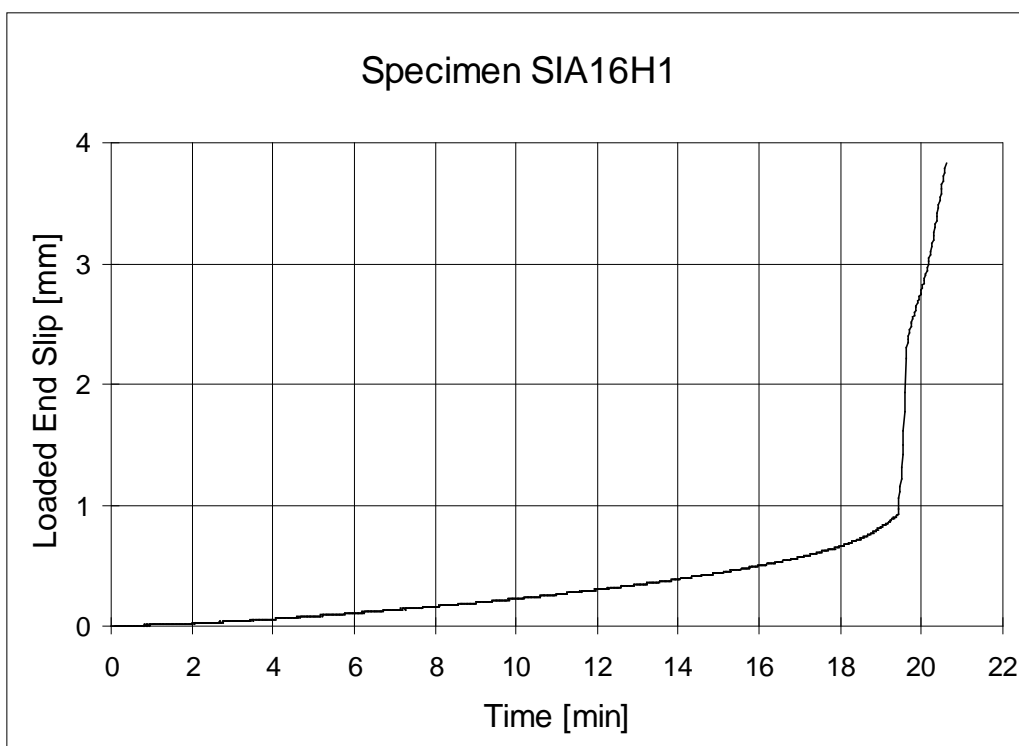
Provino	dP/dt	d $\tau_m$ /dt	Rcm	Maturazione
	[kN/min]	[MPa/min]	[MPa]	[gg.]
SIA16H1	5.03	0.63	37.06	77
SIA16H2	5.03	0.63	37.06	78
SIA24H1	11.30	0.63	37.06	77
SIA24H2	11.30	0.63	37.06	77
SIA24H3	11.30	0.63	37.06	87

Facendo riferimento ai risultati tipici ottenuti sul provino SIA16H1, la Fig 4.27 mostra l'andamento lineare del carico nel tempo, mentre le Figg.4.28 e 4.29 mostrano l'andamento degli scorrimenti di testa per l'intera prova e nella fase iniziale della prova, prima dello snervamento della barra. Lo scorrimento evidenziato nei diagrammi è stato sempre ottenuto togliendo la deformazione elastica della barra nella zona di misura (Fig.2.7) anche ad avvenuto snervamento dell'acciaio. Dopo lo snervamento la misura dello scorrimento perde significato in quanto lo spostamento è prevalentemente dovuto alla deformazione elastica della barra.

In Fig.4.30 è riportato l'andamento dello scorrimento dell'estremo libero in funzione del tempo. L'andamento dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento di testa è mostrato nella Fig.4.31 per l'intera prova e nella Fig.4.32 per il tratto iniziale della prova. Infine, lo sforzo di aderenza è mostrato in funzione dello scorrimento di coda nella Fig.4.33. Dall'osservazione della Fig.4.31, si può constatare come la rottura del provino di calcestruzzo sia avvenuta dopo che la barra ancorata si era snervata e stava percorrendo la fase di incrudimento. Il raggiungimento dello snervamento della barra in questo provino è ancor più evidente in Fig.4.28 che mostra l'andamento dello scorrimento di testa in funzione del tempo. Si può infatti osservare che dopo circa 19 minuti dall'inizio della prova, si verifica un notevole incremento dello spostamento dell'estremo caricato; tale spostamento è prevalentemente legato alla deformazione plastica dell'armatura e non rappresenta quindi il solo scorrimento della barra rispetto al calcestruzzo. La Fig.4.33 mostra come, fino ad un valore dello sforzo di aderenza pari a circa la metà di quello di rottura, gli scorrimenti di coda della barra siano praticamente nulli e come tali scorrimenti si sviluppino rapidamente al raggiungimento del limite di snervamento. I valori relativi al punto di snervamento della barra sono riportati nella Tabella 4.16. In tutti gli altri provini di questa serie, il collasso dell'aderenza è avvenuto a causa della propagazione delle fessure da spacco lungo l'intero provino, con armatura ancora in campo elastico.



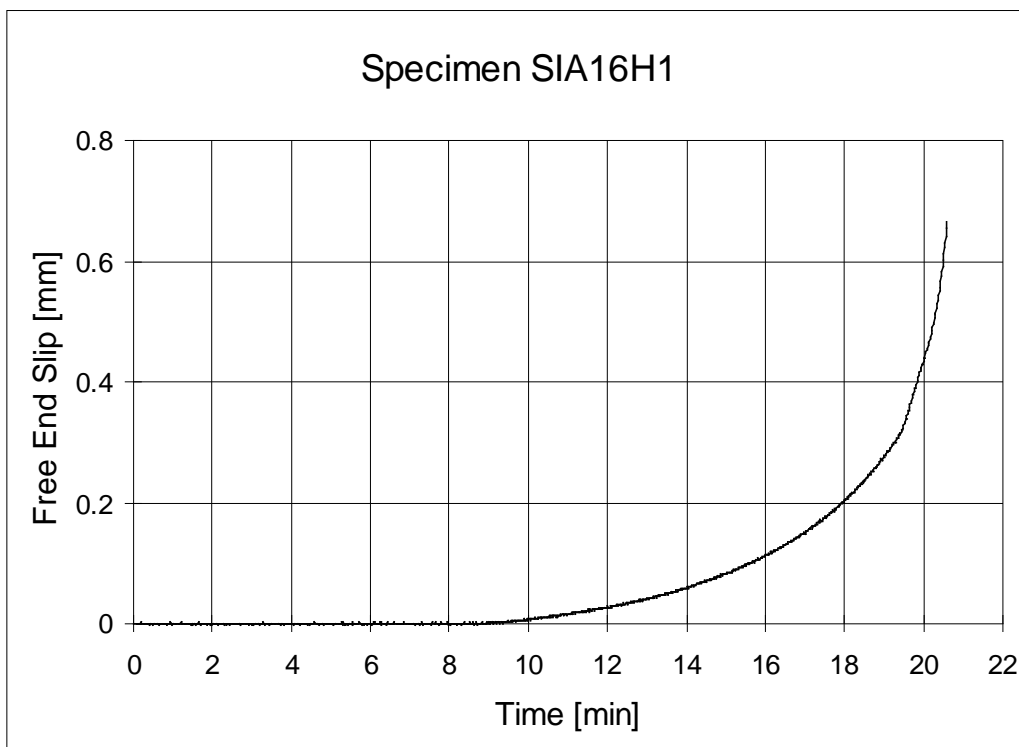
*Fig.4.27 Diagramma del carico in funzione del tempo nel provino SIA16H1.*



*Fig.4.28 Diagramma completo dello scorrimento all'estremo caricato della barra in funzione del tempo nel provino SIA16H1.*



*Fig.4.29 Parte iniziale del diagramma dello scorrimento all'estremo caricato della barra in funzione del tempo nel provino SIA16H1.*



*Fig.4.30 Diagramma completo dello scorrimento all'estremo libero della barra in funzione del tempo nel provino SIA16H1.*

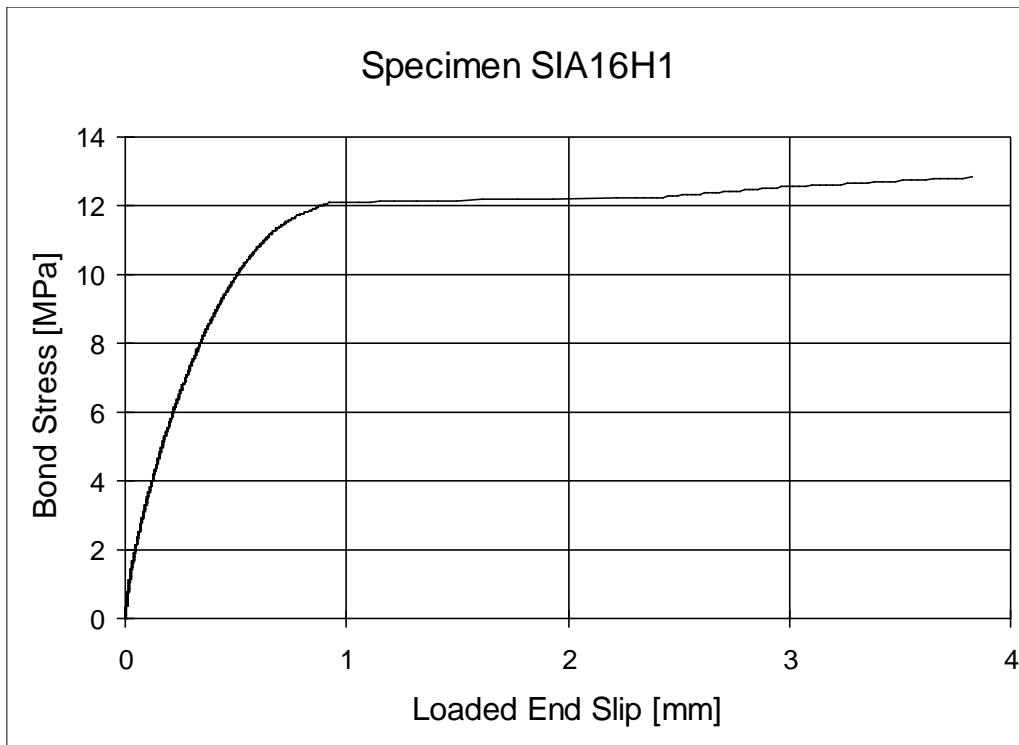


Fig.4.31 Diagramma completo dello sforzo medio di aderenza in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra nel provino SIA16H1.

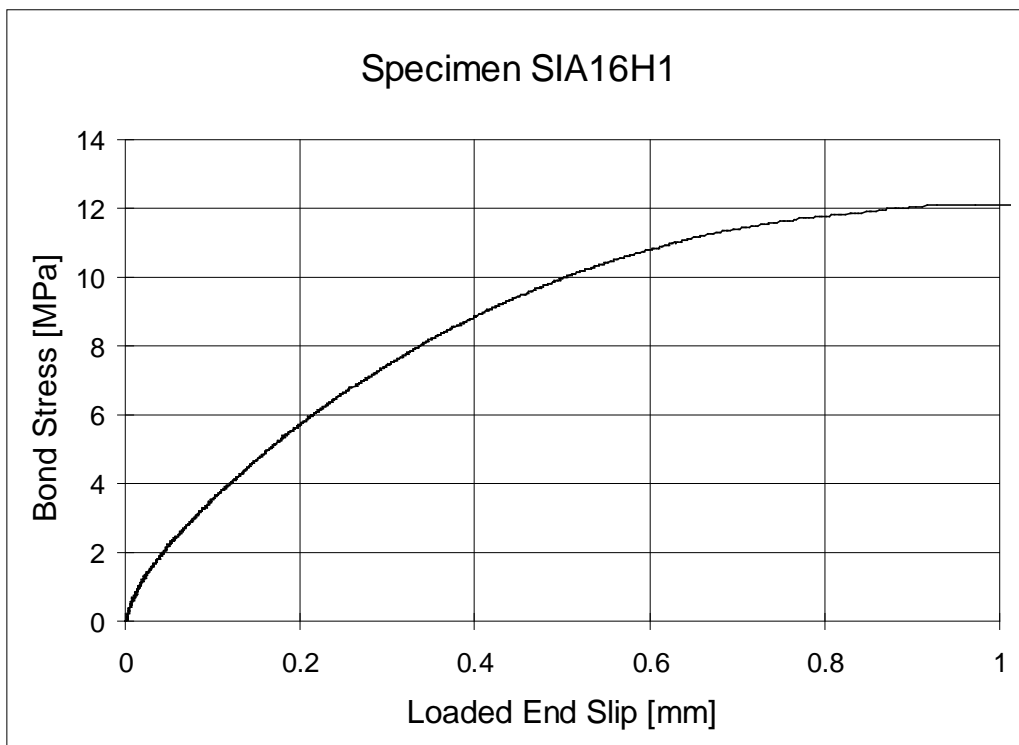


Fig.4.32 Parte iniziale del diagramma dello sforzo medio di aderenza in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra nel provino SIA16H1.





Fig.4.33 Diagramma completo dello sforzo medio di aderenza in funzione dello scorrimento all'estremo libero della barra nel provino SIA16H1.

Tabella 4.16 Valori sperimentali misurati sul provino SIA16H1 al momento dello snervamento della barra.

Provino	$\tau_{sn}$	$\delta_{L,y}$	$\delta_{F,y}$	$\sigma_{sn}$
	[MPa]	[mm]	[mm]	[MPa]
SIA16H1	12.07	0.918	0.315	483.04

In Tabella 4.17 si riportano i valori dello sforzo medio di aderenza, della tensione nella barra e dello scorrimento massimo al momento del collasso dell'ancoraggio. Si può notare come i risultati abbiano una notevole dispersione, legata sia alle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo, ma anche alla variabilità dell'azione di contenimento dovuta all'attrito all'interfaccia tra il provino e la piastra di contrasto, difficilmente controllabile durante la prova.

Tabella 4.17 Valori dello sforzo medio di aderenza, degli scorrimenti dell'estremo caricato e libero e della tensione nella barra in corrispondenza del collasso dell'ancoraggio.

Provino	$\tau_{\max}$	$\delta_{L, \max}$	$\delta F, \max$	$\sigma_{s, \max}$
	[MPa]	[mm]	[mm]	[MPa]
SIA16H1	12.82	3.827	0.665	512.84
SIA16H2	9.42	0.508	0.213	376.77
SIA24H1	9.30	/	/	372.24
SIA24H2	7.53	1.524	0.219	301.34
SIA24H3	11.20	0.919	0.191	448.56

### 4.3.2 Controllo dell'aderenza

La Normativa Svizzera richiede la determinazione della tensione nella barra  $\sigma_{s,0.1}$  in corrispondenza di uno scorrimento dell'estremo libero pari a 0.1 mm. e considera la prova di aderenza superata se è soddisfatta la seguente disuguaglianza:

$$\sigma_{s, F} = \frac{\sigma_{s,0.1}}{f_{cwm}} \geq \sigma_{s, l}$$

dove:

- $f_{cwm}$  è la resistenza alla compressione del calcestruzzo al momento della prova;
- $\sigma_{s, l}$  è il valore minimo previsto dalla normativa; per l'acciaio del tipo S500 e per diametri delle barre inferiori a 30 mm è pari a 7,5.

Nella tabella 4.18, vengono riportati anche il valore dello scorrimento di testa  $\delta_{L,0.1}$ , del carico di estrazione  $P_{0.1}$  e dello sforzo medio di aderenza ( $\tau_{0.1}$ ) valutati in corrispondenza dello scorrimento dell'estremo libero di 0.1 mm.

Nella Tabella 4.19 si riporta, per ciascun provino, il valore della tensione nella barra misurato durante la prova ( $\sigma_{s,0.1}$ ), la tensione adimensionalizzata ( $\sigma_{s,c}$ ) prescritta dalla normativa, il valore nominale minimo imposto ( $\sigma_{s,l}$ ) ed il rapporto tra la tensione della normativa e tale valore nominale. Viene inoltre riportato il valore medio di tale rapporto relativamente alla coppia di provini con barra  $\phi 16$  e a quella con barra  $\phi 24$ . Si può constatare come, per entrambe le barre  $\phi 16$  e  $\phi 24$  la prova risulti superata con un margine superiore al 30%, e come i risultati delle singole prove mostrino una notevole dispersione.

Tabella 4.18 Valori dello sforzo medio di aderenza, dello scorrimento dell'estremo caricato e della tensione nella barra, in corrispondenza dello scorrimento di coda  $\delta_F = 0.1$  mm.

Provino	$\tau_{0.1}$	$\delta_{L, 0.1}$	$P_{0.1}$	$\sigma_{s, 0.1}$
	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]
SIA16H1	9.69	0.474	77.96	387.88
SIA16H2	9.25	0.350	74.37	370.00
SIA24H2	7.50	1.316	135.64	300.09
SIA24H3	11.03	0.721	199.55	441.49

Tabella 4.19 Confronto fra i valori sperimentali ed i valori minimi previsti dalla normativa.

PROVINO	$\sigma_{s, 0.1}$ [MPa]	$\sigma_{s,c}$	$\sigma_{s,l}$	$\sigma_{s,F} / \sigma_{s,l}$	$[\sigma_{s,c} / \sigma_{s,l}]_{\text{medio}}$
SIA16HI	387.88	10.47	7.50	1.395	<b>1.363</b>
SIA16H2	370.00	9.98	7.50	1.331	
SIA24H2	300.09	8.10	7.50	1.080	<b>1.334</b>
SIA24H3	441.49	11.91	7.50	1.588	

#### 4.3.3 Prove con velocità di incremento dello sforzo di aderenza costante

Queste prove sono state condotte in controllo di carico con velocità tale da avere un incremento dello sforzo medio di aderenza pari a 0.1 MPa/min. In Tabella 4.20 si riporta la velocità del carico di estrazione della barra relativa ai tre provini di questa serie di prove, assieme ai valori delle resistenza cubica del calcestruzzo e ai tempi di maturazione dei provini al momento della prova.

Come nel caso delle prove secondo normativa, in Tabella 4.21 si riportano i valori delle diverse misure sperimentali in corrispondenza di un valore dello scorrimento di coda pari a 0.1 mm. In Tabella 4.22 sono indicati gli sforzi e gli scorrimenti della barra ancorata relativi al momento del collasso dell'aderenza. I risultati ottenuti mostrano che, mentre nel provino SIA24S1 si è verificato il collasso dell'aderenza per "splitting" con la barra ancora in campo elastico, nei provini con la barra  $\phi 16$  il collasso dell'aderenza è stato sempre provocato dalla propagazione delle fessure da spacco, con l'acciaio che ha però superato il limite di snervamento ed è entrato nel ramo incrudente. Questo significa che l'azione di contenimento

del calcestruzzo e delle forze di attrito ha consentito una maggiore resistenza dell'aderenza che ha portato le barre  $\phi 16$  oltre la soglia dello snervamento.

*Tabella 4.20 Velocità di applicazione del carico nelle prove condotte con velocità di incremento dello sforzo di aderenza costante.*

Provino	dP/dt	d $\tau_m$ /dt	Rcm	Maturazione
	[kN/min]	[MPa/min]	[MPa]	[gg.]
SIA16S1	0,804	0,1	38,15	78
SIA16S2	0,804	0,1	38,15	79
SIA24S1	1,809	0,1	38,15	79

*Tabella 4.21 Valori dello sforzo medio di aderenza, dello scorrimento dell'estremo caricato e della tensione nella barra, in corrispondenza dello scorrimento di coda  $\delta_F = 0.1$  mm.*

Provino	$\tau_{0.1}$	$\delta L_{0.1}$	P <sub>0.1</sub>	$\sigma_{s, 0.1}$
	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]
SIA16S1	12.32	2.896	99.11	493.10
SIA16S2	11.51	0.643	92.55	460.46
SIA24S1	9.61	0.796	173.88	384.69

*Tabella 4.22 Valori delle misure sperimentali al momento del collasso dell'aderenza.*

Provino	$\tau_{max}$	$\delta L_{max}$	$\delta F_{max}$	$\sigma_{s, max}$
	[MPa]	[mm]	[mm]	[MPa]
SIA16S1	14.34	/	0.578	573.72
SIA16S2	14.20	/	1.335	568.10
SIA24S1	9.64	0.907	0.160	385.74

La maggior spinta radiale delle barre  $\phi 24$  ha viceversa provocato il collasso dell'aderenza per "splitting" con le barre ancora in campo elastico.

In Tabella 4.23 si riportano i valori degli sforzi e degli scorrimenti misurati nei due provini in concomitanza dello snervamento della barra.

Tabella 4.23 Valori sperimentali misurati sui provini SIA16S1 e SIA16S2 al momento dello snervamento dell'armatura.

Provino	$\tau_{sn}$	$\delta_{L,y}$	$\delta_{F,y}$	$\sigma_{sn}$
	[MPa]	[mm]	[mm]	[MPa]
SIA16S1	12.20	0.748	0.081	488.23
SIA16S2	11.81	0.749	0.111	472.38

## 4.4 Normativa Austriaca

Come già descritto nel Cap.2, la determinazione delle caratteristiche dell'aderenza secondo la Normativa Austriaca B 4200-1987 è stata fatta sulla base dei risultati sperimentali ottenuti dalle prove secondo la CNR UNI 10020/71.

### 4.4.1 Controllo dell'aderenza

I valori degli sforzi di aderenza  $\tau_m$  e  $\tau_{max}$  ricavati dalle prove sperimentali, secondo la B 4200-1987 devono essere rapportati ad un calcestruzzo con resistenza nominale alla compressione pari a 30 MPa. La formula che la Normativa Austriaca propone per la correzione degli sforzi di aderenza è la seguente:

$$\tau_c = \tau_d \frac{30}{\beta_w} \text{ [MPa]}$$

dove:

- $\tau_d$  è lo sforzo di aderenza sperimentale;
- $\tau_c$  è lo sforzo di aderenza corretto, rapportato cioè ad una resistenza nominale a compressione del calcestruzzo di 30 MPa;
- $\beta_w$  è la resistenza alla compressione del calcestruzzo misurata al momento delle prove.

I valori corretti di  $\tau_m$  e  $\tau_{max}$  devono essere confrontati con i "valori minimi nominali" imposti dalla normativa, variabili col diametro della barra di prova. Affinchè la prova di aderenza venga superata devono risultare soddisfatte entrambe le seguenti disuguaglianze:

$$\tau_{mc} \geq \tau_{ml} = 8 - 0.10\phi$$

$$\tau_{max,c} \geq \tau_{max,l} = 13 - 0.18\phi$$

In Tabella 4.24 si riporta, per ciascun provino, il valore dello sforzo di aderenza  $\tau_m$  ricavato dalle prove sperimentali, il valore  $\tau_{mc}$  rapportato al calcestruzzo con resistenza

nominale alla compressione di 30 MPa ed il valore nominale minimo  $\tau_{ml}$  imposto dalla B 4200-1987; per ciascun provino viene inoltre calcolato il rapporto  $\tau_{mc} / \tau_{ml}$ , in modo di avere una indicazione sul margine di superamento della prova. In Tabella 4.25 si riportano gli stessi parametri relativamente allo sforzo di aderenza  $\tau_{max}$ .

*Tabella 4.24 Confronto tra gli sforzi di aderenza  $\tau_m$  calcolati secondo la B 4200-1987 ed i valori minimi previsti dalla stessa normativa.*

PROVINO	$\tau_m$ [MPa]	$\tau_{mc}$ [MPa]	$\tau_{ml}$ [MPa]	$\tau_{mc} / \tau_{ml}$	$[\tau_{mc} / \tau_{ml}]_{medio}$
B16H1	9,644	8,535	6,4	1,334	<b>1,241</b>
B16H2	8,311	7,355	6,4	1,149	
B24H1	6,074	5,375	5,6	0.96	<b>0,993</b>
B24H2	6,493	5,746	5,6	1,026	

*Tabella 4.25 Confronto tra gli sforzi di aderenza  $\tau_{max}$  calcolati secondo la B 4200-1987 ed i valori minimi nominali previsti dalla stessa normativa.*

PROVINO	$\tau_{max}$ [MPa]	$\tau_{max,c}$ [MPa]	$\tau_{max,l}$ [MPa]	$\tau_{max,c} / \tau_{max,l}$	$[\tau_{max,c} / \tau_{max,l}]_{medio}$
B16H1	14,291	13,875	10,120	1,371	<b>1,269</b>
B16H2	13,355	11,819	10,120	1,168	
B24H1	8,738*	7,733*	8.680*	0.891*	<b>0.999</b>
B24H2	9,796	8,669	8,680	0.999	

Dalla osservazione dei valori riportati nelle due tabelle, si può ancora notare come per i provini con barra ancorata  $\phi 16$ , i valori minimi nominali siano superati con un margine superiore al 20%, mentre per i provini con barra ancorata  $\phi 24$  i valori minimi non vengono raggiunti. Anche la formula correttiva prevista dalla B 4200-1987 per l'omogeneizzazione dei risultati alla resistenza nominale del calcestruzzo, implica riduzioni degli sforzi di aderenza proporzionali alla crescita della resistenza del calcestruzzo. L'abbattimento della tensione di aderenza, relativamente alla barra  $\phi 24$ , risulta leggermente minore e quindi la verifica dell'ancoraggio risulta meno severa di quella prevista dalla Normativa Italiana.

## 4.5 Normativa Tedesca

È importante sottolineare i calcoli degli Indici di aderenza eseguiti applicando sia la formula prescritta dalla Normativa Tedesca che quella prescritta dalla Normativa Italiana, abbiano fornito gli stessi risultati, sia per la barra  $\phi 16$  che per la barra  $\phi 24$ . Infatti, in entrambe le barre, i valori delle distanze medie delle tre nervature sono praticamente uguali (Tabb.3.12 e 3.13, Par.3.2.1.); occorre infatti evidenziare che l'unica differenza tra i due metodi di calcolo dell'Indice di aderenza, consiste nel diverso utilizzo delle distanze medie delle nervature al denominatore delle rispettive formule. Mentre nel metodo della Normativa Italiana l'area complessiva della proiezione delle sezioni longitudinali delle nervature sul piano ortogonale all'asse della barra viene divisa per il valore medio  $c_{sm} = (c_{s1}+c_{s2}+c_{s3})/3$ , nella Normativa Tedesca si esegue la somma due addendi; il primo è dato dal rapporto tra l'area della proiezione della nervatura del lato a, diviso per la sua distanza media  $c_{s1}$ , mentre il secondo è dato dal rapporto tra l'area media delle proiezione delle due nervature del lato b, divisa per la media delle distanze delle due nervature  $c_{sm} = (c_{s2}+c_{s3})/2$ . Ne deriva che, se le tre nervature presentano distanze medie  $c_s$  identiche o comunque molto simili, le formule proposte dalle due normative coincidono. Questo è quanto si è verificato per le barre utilizzate nella presente ricerca.

### 4.5.1 Controllo dell'aderenza

La Normativa Tedesca richiede che i valori dell'indice di aderenza (calcolati come indicato al paragrafo 2.7.1), siano maggiori di un determinato “*valore nominale minimo*”  $I_{RI}$ , che per l'acciaio B500B e per le barre con diametro nominale minimo di 12mm è pari a 0.056. Avendo misurato (Cap.3) per la barra  $\phi 16$  un valore dell'indice di aderenza pari a 0.089 (1.589 volte il valore minimo) e per la barra  $\phi 24$  un valore pari a 0.071 (1.268 volte il valore minimo), la condizione imposta dalla DIN 488-1986 risulta superata con un margine di circa il 60% per la barra  $\phi 16$  e di circa il 27% per la barra  $\phi 24$ .

## 4.6 Prove di aderenza con azione di contenimento controllata

Come già descritto nel Cap.2, questa serie di prove prevede l'estrazione di una barra ad aderenza migliorata da un provino di calcestruzzo. La peculiarità di queste prove consiste nel fatto che le nervature della barra ancorata sono disposte in modo da esercitare la massima spinta radiale nella direzione dei blocchi B1 e B2 del provino e formare quindi la fessura da spacco principale nel piano AA (Fig.2.13), non contrastata dalla piastra inferiore del banco (Fig.2.14). In questo caso l'azione di contenimento è esercitata dalle sole armature trasversali e dal calcestruzzo presente sul piano della fessura principale da spacco. Le prove hanno avuto inizio dopo 121 giorni di maturazione del calcestruzzo e sono state terminate dopo 126 giorni di maturazione; quelle relative ai provini confezionati con il secondo getto, hanno avuto inizio dopo 114 giorni di maturazione del calcestruzzo e sono state terminate dopo 118 giorni di maturazione.

Tabella 4.26 Velocità di applicazione del carico nelle prove con azione di contenimento controllata.

Provino	dP/dt	d $\tau_m$ /dt	R <sub>cm</sub>	Maturazione
	[kN/min]	[MPa/min]	[MPa]	[gg.]
16NC8-1	0.75	0.1	44.15	123
16NC8-2	0.75	0.1	45.03	118
16NC10-1	0.75	0.1	44.15	126
16NC10-2	0.75	0.1	45.03	119
24NC10-1	1.13	0.1	44.15	122
24NC10-2	1.13	0.1	45.03	115
24NC12-1	1.13	0.1	44.15	121
24NC12-2	1.13	0.1	45.03	114

Tutte le prove sono state condotte in controllo di carico con un incremento dello sforzo medio di aderenza pari a 0.1 MPa/min. In Tabella 4.26 si riporta la velocità del carico di estrazione della barra relativa ai provini di questa serie di prove, assieme ai valori delle resistenza cubica del calcestruzzo ed ai tempi di maturazione dei provini al momento delle prove. Le misure sperimentali effettuate in questa serie di prove hanno riguardato il carico applicato alla barra, misurato attraverso la cella di carico da 500 kN della macchina di prova, lo scorrimento all'estremo caricato ed all'estremo libero della barra e l'apertura della fessura principale da spacco, misurata su entrambe i lati del provino sia in corrispondenza dell'armatura trasversale che dell'inizio del tratto ancorato (Fig.2.20). Facendo riferimento ai risultati tipici ottenuti sul provino 16NC10-1, la Fig.4.34 mostra l'andamento lineare del carico di estrazione nel tempo, mentre la Fig.4.35 mostra l'andamento nel tempo dello scorrimento dell'estremo caricato per l'intera prova. In questo provino si è raggiunto un carico massimo di 92,11 kN, a cui corrisponde una tensione nella barra  $\phi 16$  pari a 458,26 MPa; questo valore è prossimo a quello della tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio B 500 B ( $f_y = 500$  MPa). Per tale motivo il tratto finale del diagramma di Fig.4.35 presenta una pendenza assai elevata, segno che il collasso dell'aderenza si è manifestato in prossimità dello snervamento della barra ancorata. In Fig.4.36 è riportato l'andamento dello scorrimento all'estremo libero in funzione del tempo. L'andamento dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento di testa è mostrato nella Fig.4.37, mentre il diagramma dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento di coda è riportato nella Fig.4.38. Si può osservare che gli scorrimenti di coda si mantengono nulli fino ad un valore dello sforzo medio di aderenza pari a circa la metà del valore massimo raggiunto.



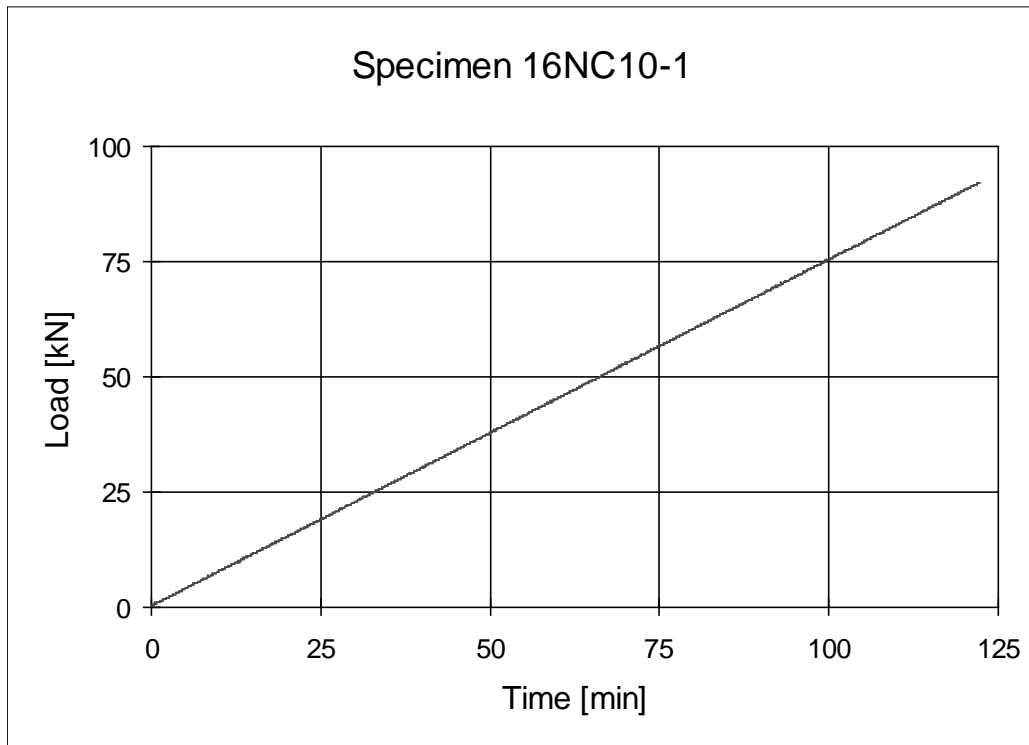


Fig.4.34 Diagramma del carico in funzione del tempo per il provino 16NC10-1.

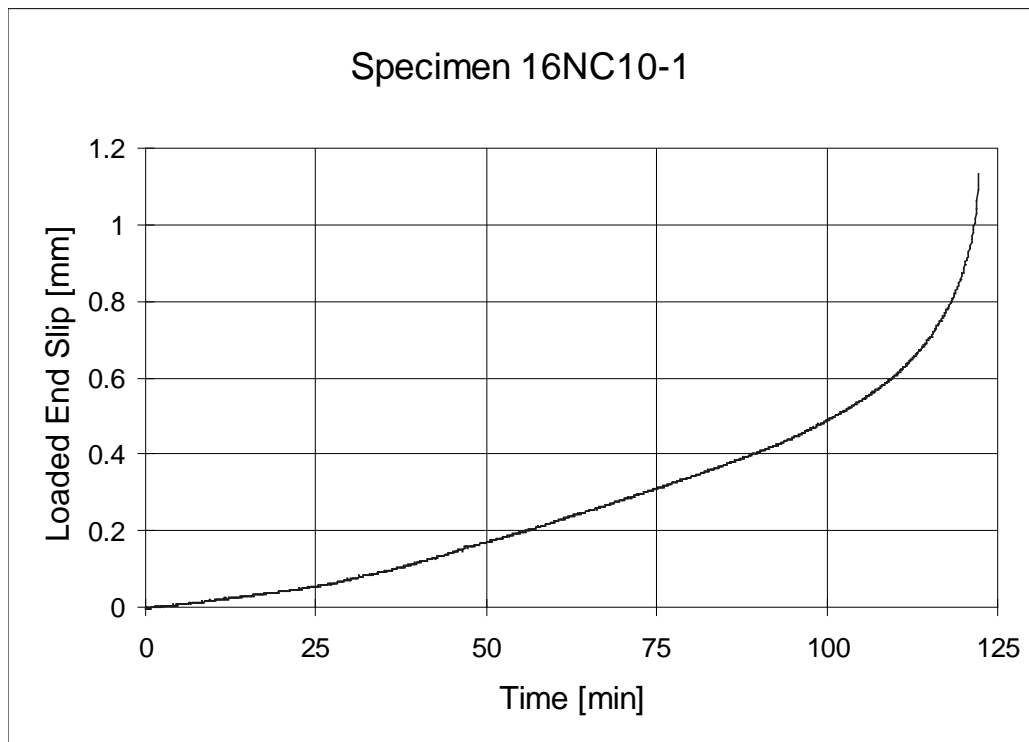


Fig.4.35 Diagramma dello scorrimento all'estremo caricato della barra in funzione del tempo per il provino 16NC10-1.

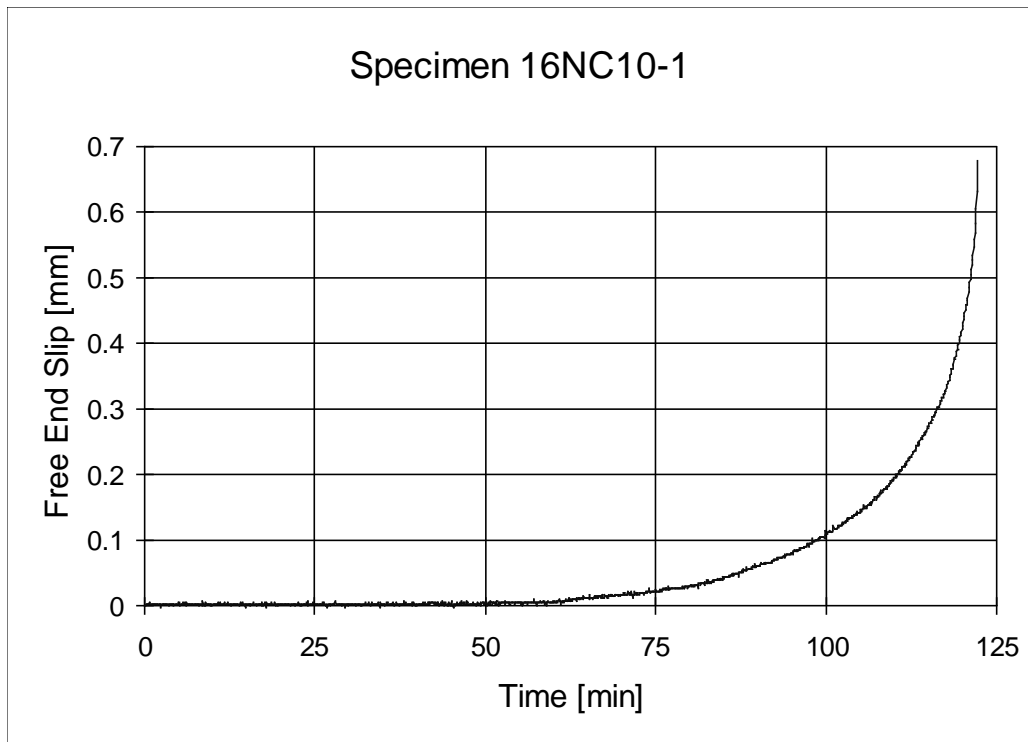


Fig.4.36 Diagramma dello scorrimento all'estremo libero della barra in funzione del tempo per il provino 16NC10-1.

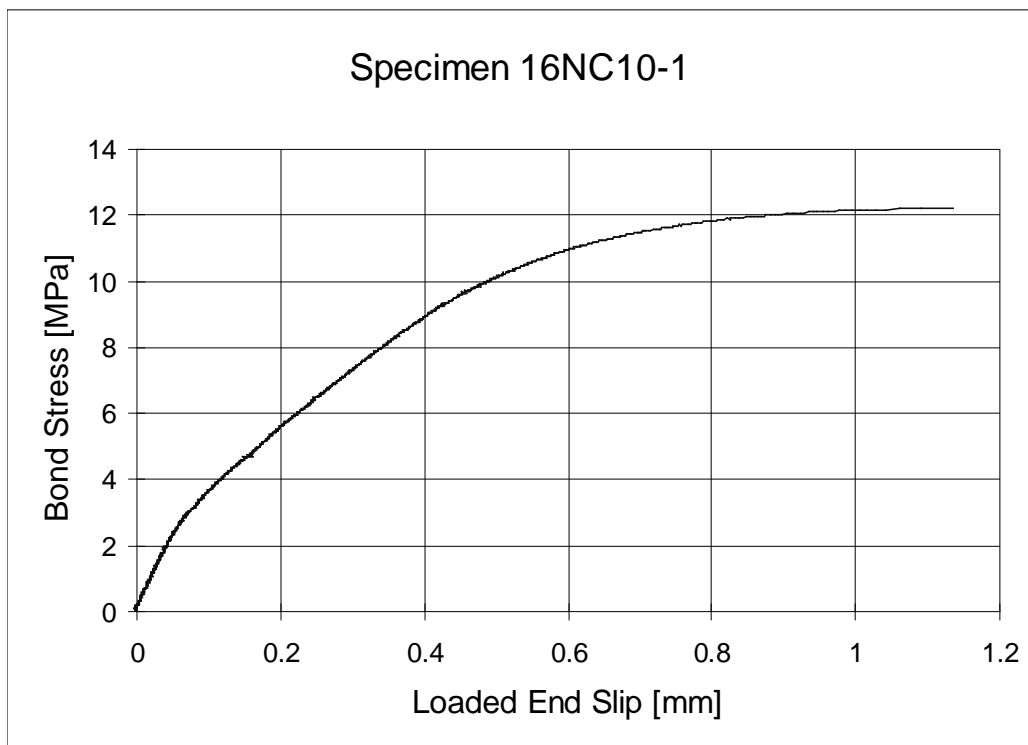


Fig.4.37 Diagramma dello sforzo medio di aderenza in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra nel provino 16NC10-1.

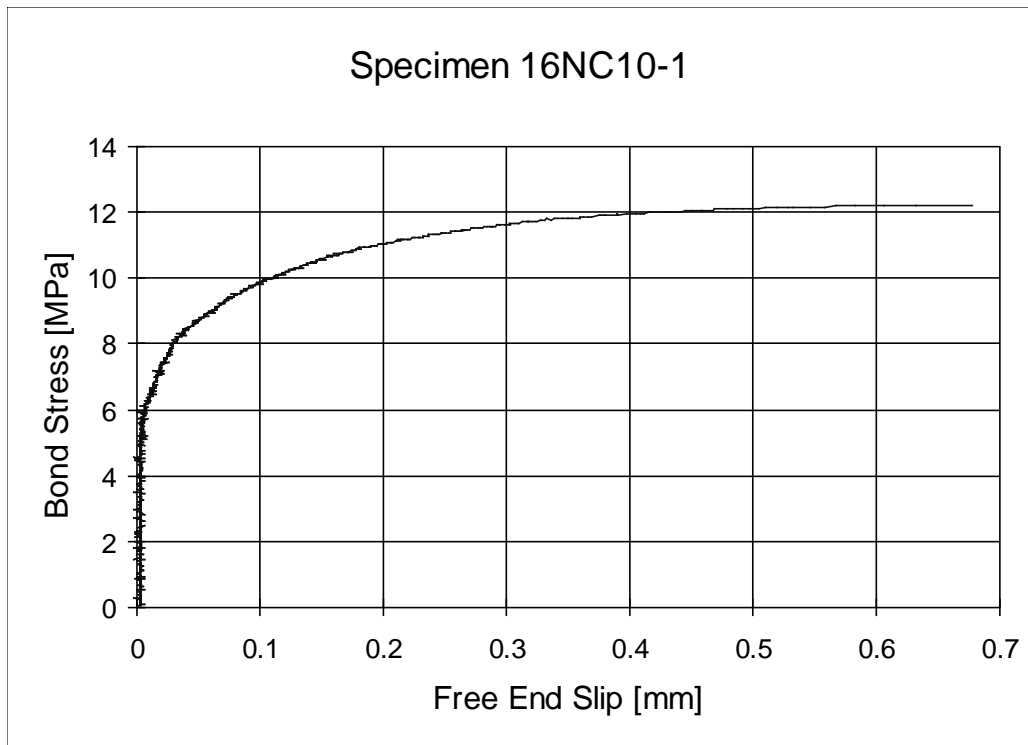


Fig.4.38 Diagramma completo dello sforzo medio di aderenza in funzione dello scorrimento all'estremo libero della barra nel provino 16NC10-1.

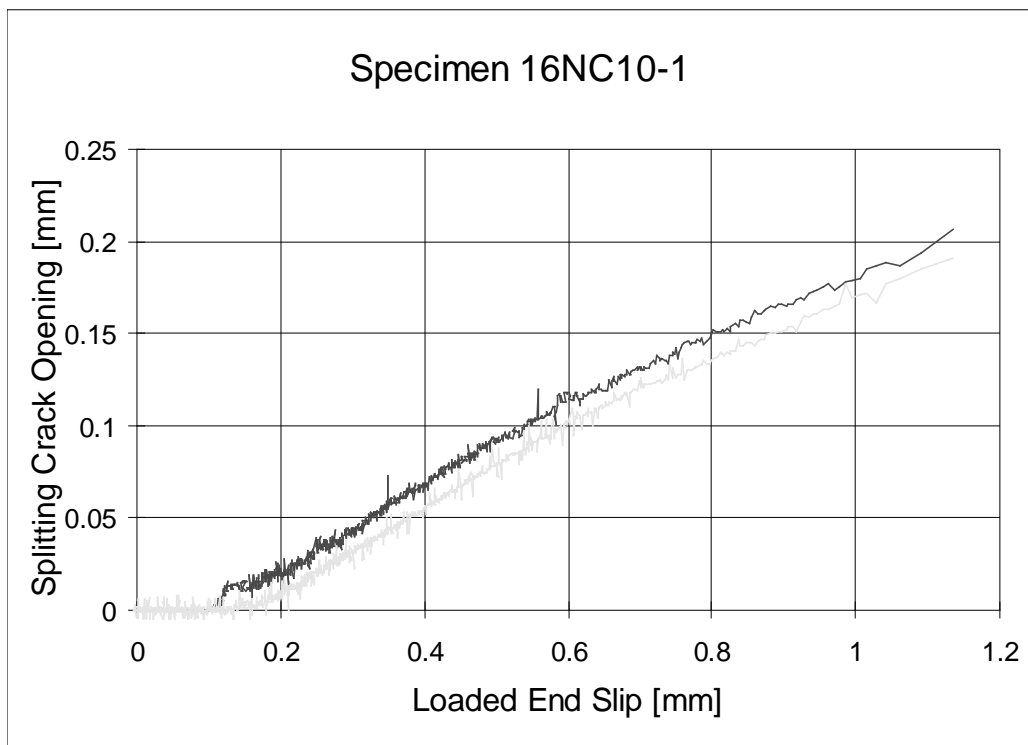
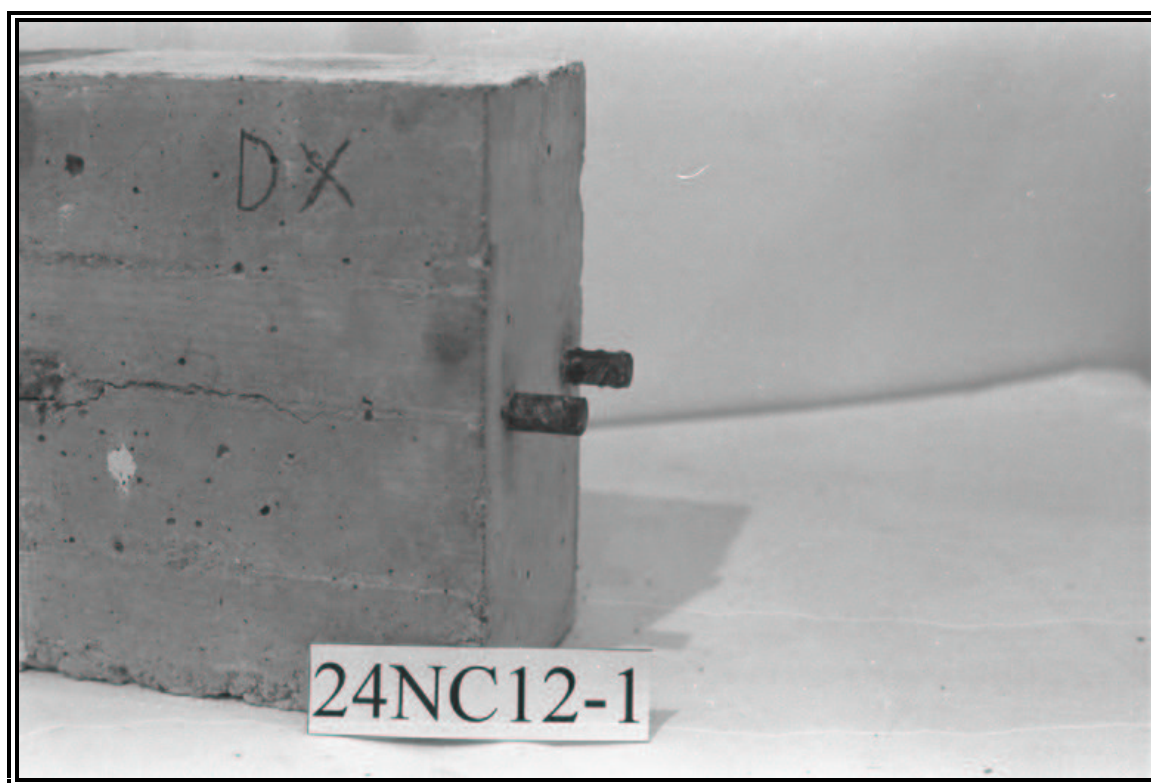


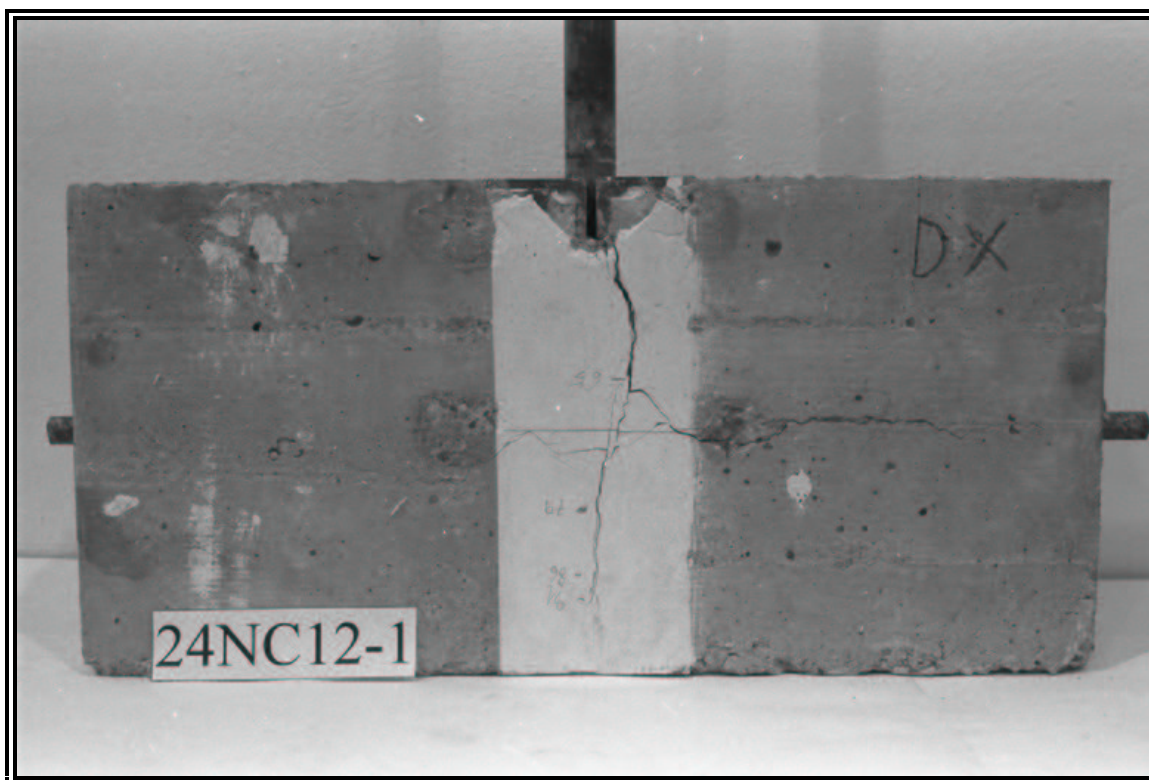
Fig.4.39 Diagramma dell'apertura della fessura da spacco sull'armatura trasversale in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra nel provino 16NC10-1.

In Fig.4.39 è riportato l'andamento dell'apertura della fessura da spacco misurata in corrispondenza delle armature trasversali, in funzione dello scorrimento dell'estremo caricato della barra. Entrambe le curve del diagramma presentano un tratto iniziale orizzontale, corrispondente alla fase iniziale della prova, in cui la fessura principale da spacco non ha ancora raggiunto le armature trasversali. Entrambe le curve presentano inoltre un andamento quasi lineare, rimanendo parallele e ravvicinate per l'intera prova, segno che la fessura da spacco si è propagata in modo simmetrico nel prisma di calcestruzzo.

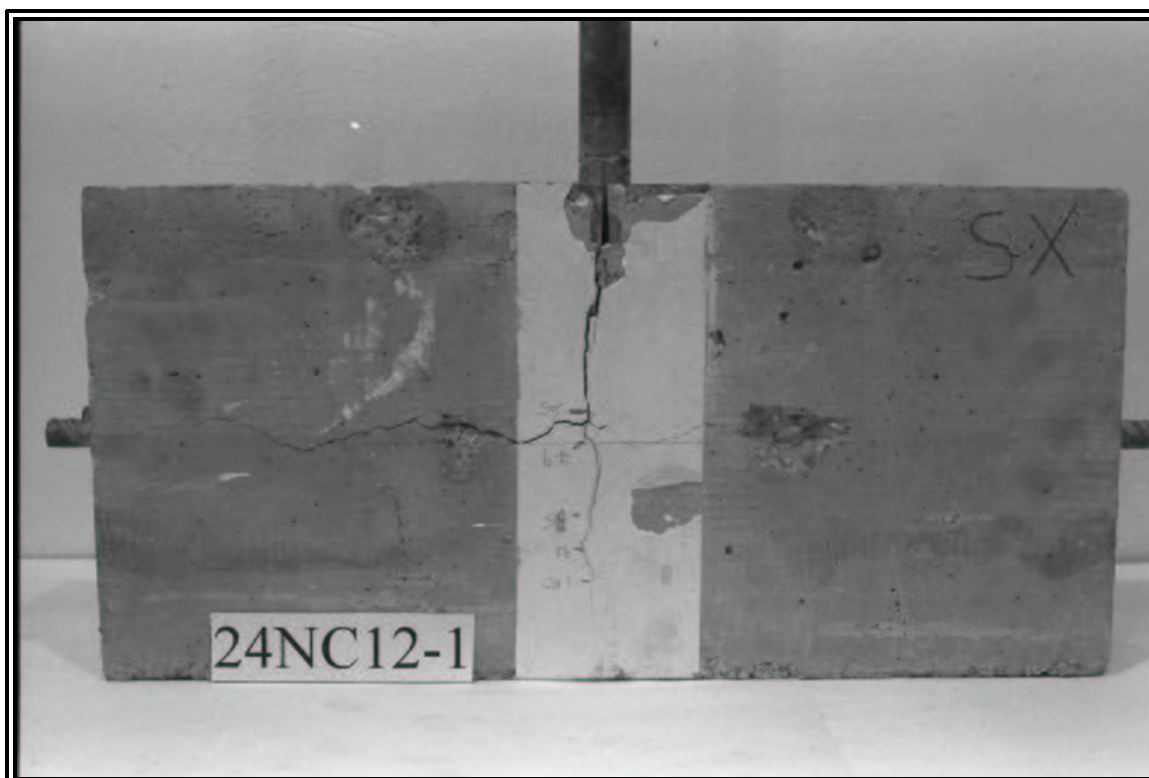
Particolare attenzione va rivolta anche alla prova condotta sul provino 24NC12-1. In questo provino, durante la fase di getto, si è verificata una rotazione di entrambe le armature trasversali attorno ai rispettivi assi longitudinali (Fig.4.40). Di conseguenza, le nervature delle staffe nel corso della prova hanno esercitato delle spinte radiali dirette verso la superficie esterna del provino, provocando il parziale distacco del copriferro e la formazione di evidenti fessure da spacco anche lungo l'armatura trasversale  $\phi 12$  (Figg.4.41 e 4.42). Queste fessure da spacco, che si sono aperte improvvisamente in corrispondenza del collasso dell'ancoraggio, hanno sicuramente ridotto la resistenza ultima dello sforzo di aderenza, in quanto hanno ulteriormente lesionato il provino di calcestruzzo e limitato l'azione di contenimento delle armature trasversali.



*Fig.4.40 Particolare relativo all'errato posizionamento delle nervature dell'armatura trasversale nel provino 24NC12-1.*



*Fig.4.41 Lato destro: fessurazione da spacco trasversale nel provino 24NC12-1.*



*Fig.4.42 Lato sinistro: fessurazione da spacco trasversale nel provino 24NC12-1.*

Nella Tabella 4.27 viene riportato, per ciascun provino, il carico massimo  $P_{max}$  raggiunto durante la prova, lo scorrimento massimo  $\delta_{t,max}$  dell'estremo caricato della barra in corrispondenza di  $P_{max}$ , lo sforzo di aderenza  $\tau_{max}$  ed il rapporto  $(\tau_{max}/R_{cm})$  fra tale sforzo e la resistenza a compressione del calcestruzzo al momento della prova. In tale tabella si osserva che mentre nei provini con barra ancorata  $\phi 16$  ci si è avvicinati allo snervamento della barra ancorata, in quelli con barra ancorata  $\phi 24$  si è verificato il collasso dell'ancoraggio in corrispondenza di sforzi di trazione nella barra molto inferiori al valore limite di snervamento dell'acciaio, sia a causa della lunghezza di ancoraggio leggermente maggiore che a causa delle elevate spinte radiali esercitate dalla barra  $\phi 24$ .

Tabella 4.27 Valori sperimentali misurati in corrispondenza del carico massimo del provino.

Provino	$P_{max}$	$\delta_{L,max}$	$\tau_{max}$	$(\tau_{max} / R_{cm})$
	[kN]	[mm]	[MPa]	/
16NC8-1	93.00	1.285	12.33	0.279
16NC8-2	88.78	0.814	11.77	0.262
16NC10-1	92.11	1.135	12.22	0.277
16NC10-2	95.90	1.154	12.72	0.283
24NC10-1	112.84	1.208	99.77	0.226
24NC10-2	127.18	1.545	112.45	0.250
24NC12-1	112.74	1.318	99.69	0.226
24NC12-2	126.12	1.721	11.15	0.248

Nella Tabella 4.28 si riporta l'apertura della fessura principale da spacco  $w_{dx}$  e  $w_{sx}$  sui due lati di ciascun provino, ed il relativo valore medio  $w_m$ , misurate in corrispondenza del collasso dell'ancoraggio. Va osservato come per i provini con barra ancorata  $\phi 24$  i valori medi delle aperture delle fessure da spacco siano nettamente maggiori a quelli misurati nei provini con barra  $\phi 16$ . Facendo infatti il confronto delle aperture medie valutate sulle due coppie di provini con staffe  $\phi 10$ , si è ottenuto per la coppia con barra ancorata  $\phi 16$  un valore medio pari a 0.233 mm, mentre per la coppia con barra ancorata  $\phi 24$  un valore medio pari a 0.394 mm. L'apertura della fessura da spacco assume una particolare importanza per la durabilità dell'opera in quanto, a differenza della fessura flessionale, espone un lungo tratto di barra agli agenti aggressivi.

È inoltre importante osservare l'influenza della resistenza alla compressione del calcestruzzo al momento della prova, in particolare sulla resistenza ultima dell'ancoraggio dei provini con barra ancorata  $\phi 24$ , caratterizzati da spinte radiali elevate. Il provino 24NC10-2, avendo una resistenza a compressione superiore a quella del provino 24NC10-1, è

caratterizzato da una maggiore resistenza dell'aderenza. La differenza tra i due provini risulta comunque ridotta se lo sforzo di aderenza massimo viene rapportato alla resistenza a compressione del calcestruzzo.

*Tabella 4.28 Valori sperimentali dell'apertura della fessura da spacco misurati in corrispondenza del carico massimo del provino.*

Provino	$W_{dx}$	$W_{sx}$	$W_m$
	[mm]	[mm]	[mm]
16NC8-1	0.209	0.227	0.218
16NC8-2	0.329	0.297	0.313
16NC10-1	0.207	0.191	0.199
16NC10-2	0.247	0.286	0.267
24NC10-1	0.348	0.323	0.336
24NC10-2	0.443	0.460	0.452
24NC12-1	0.426	0.350	0.388
24NC12-2	0.459	0.431	0.445

Tale confronto non è invece proponibile per i provini con barra  $\phi 24$  e staffe  $\phi 12$ , a causa del difettoso posizionamento della armatura trasversale nel provino 24NC12-1 che ha provocato una sensibile diminuzione della resistenza dell'ancoraggio. Per i provini con barra ancorata  $\phi 16$  le differenze fra i valori della resistenza alla compressione del calcestruzzo al momento delle prove non hanno comportato sensibili variazioni delle resistenze degli ancoraggi a causa delle minori spinte radiali esercitate da tali barre. Sempre nella Tabella 4.27 si può notare che, sia per la barra  $\phi 16$  che per la barre  $\phi 24$ , all'aumentare dell'indice di contenimento dell'armatura trasversale  $\Omega$  (Giuriani et al.,1991) non si evidenzia un marcato incremento della resistenza dell'aderenza. Tale comportamento è probabilmente da attribuire all'elevato valore di  $\Omega$ , sempre maggiore di 0.042, oltre il quale probabilmente non si verificano ulteriori incrementi della resistenza dell'aderenza. Una stima di tale valore di soglia  $\Omega_{max}$  è stata fatta da Plizzari, Deldossi e Massimo (1996a) sulla base di risultati sperimentali ottenuti su barre  $\phi 20$ , ed è risultato pari a 0.05, valore simile a quello trovato in questa ricerca.





## 5. DISCUSSIONE SUI RISULTATI SPERIMENTALI

Nella Fig.5.1 vengono mostrati i diagrammi dello sforzo medio di aderenza in funzione dello scorrimento all'estremità libera della barra sul lato 1 (tratto ancorato di minore resistenza) dei provini di trave con barra ancorata  $\phi 16$ , previsti dalla Normativa Italiana. Si osserva che, ad eccezione del provino UNI16S2 caratterizzato da una maggior rigidezza dell'ancoraggio sul lato 1, le rigidzze dei rimanenti provini sono molto simili. Gli stessi diagrammi relativi al lato 2 dei provini sono riportati nella Fig.5.2. Dal confronto delle due figure, è possibile vedere che lo scarico in ciascun provino, si verifica in corrispondenza del collasso dell'aderenza della barra sul lato 1. Si può anche osservare che nelle prove condotte secondo normativa, il collasso sul lato 1 e di conseguenza lo scarico elastico sul lato integro 2, è avvenuto per valori dello scorrimento della barra sul lato 2 molto diversi fra di loro, mentre nelle due prove lente, il collasso dell'aderenza sul lato 1 è avvenuto per valori dello scorrimento più vicini tra di loro. In tutti i quattro provini gli scorrimenti sul lato 1 si sono manifestati in corrispondenza di uno sforzo di aderenza pari a circa 4 MPa, mentre sul lato 2 si sono sviluppati in corrispondenza di uno sforzo di aderenza pari a circa 6 MPa.

Le Figg.5.3 e 5.4 mostrano curve analoghe alle due precedenti, ottenute dai provini con barra ancorata  $\phi 24$ . In questi diagrammi, sia per l'ancoraggio del lato 1 (Fig.5.3) che per quello del lato 2, la dispersione dei risultati sperimentali è ancor più limitata. Dalla Fig.5.4 si può vedere che i punti di scarico del lato 2 sono più ravvicinati, e che questi scarichi elastici si sono manifestati in corrispondenza di scorrimenti più elevati nel caso delle prove veloci.

La Fig.5.5 mostra le curve sforzo di aderenza-spostamento dell'estremo caricato ottenute da tutti i provini con la barra  $\phi 16$ , previsti dalla Normativa Inglese. La Fig.5.6 mostra curve analoghe alle precedenti, relative ai provini BS24H1 e BS24S2; le curve relative ai provini BS24H2 e BS24S1 non sono state riportate in quanto, durante l'esecuzione della prova, si è probabilmente verificato un movimento del supporto di alluminio degli LVDT che misuravano lo spostamento dell'estremo carico della barra ancorata. A causa della notevole lunghezza di ancoraggio, gli scorrimenti della barra rispetto al calcestruzzo sono molto limitati; per tale motivo nelle curve dei provini della Normativa Inglese lo sforzo medio di aderenza è riportato in funzione dello spostamento totale (misurato nella sezione di supporto dei trasduttori di spostamento rispetto alla sezione di inizio del tratto ancorato della barra), non depurato dello spostamento elastico che nasce tra le due sezioni per effetto della deformazione elastica della barra. Si può notare come le due serie di prove relative ai due diametri dell'armatura siano caratterizzate da una dispersione piuttosto limitata.

Le curve sforzo di aderenza medio-scorrimento all'estremo caricato ottenute dai provini previsti dalla Normativa Svizzera per le barre  $\phi 16$  sono riportate nella Fig.5.7. Si può notare che la rigidezza dell'ancoraggio è simile in tutti i provini, così come lo è la resistenza massima dell'aderenza, ad eccezione del provino SIA16H2 per il quale si è manifestato il collasso del provino per splitting in corrispondenza di uno sforzo medio di aderenza inferiore ai 10 MPa.

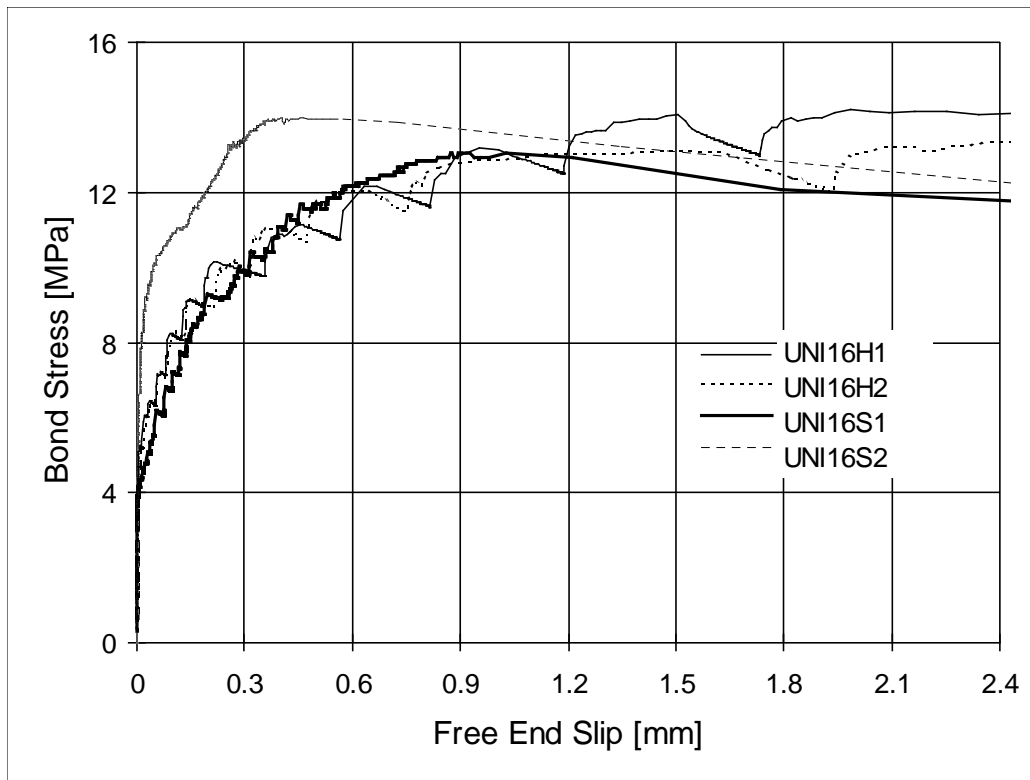


Fig.5.1 Confronto fra le curve dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento della barra sul lato 1, relative ai provini della Normativa Italiana con barra  $\phi 16$ .

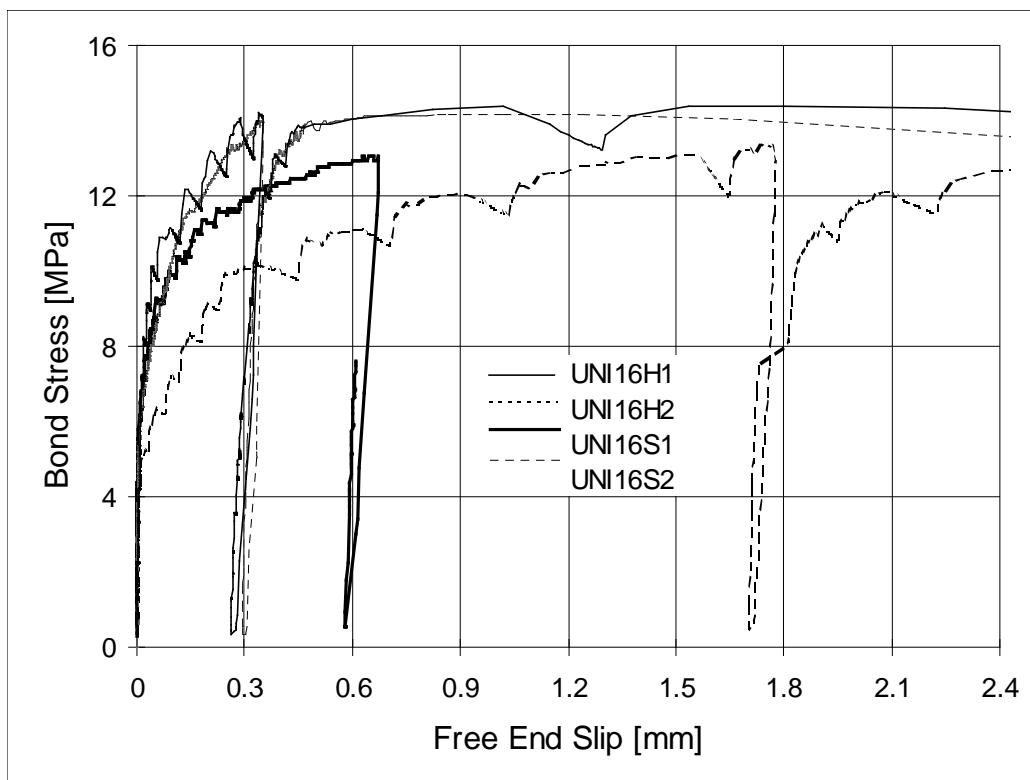


Fig.5.2 Confronto fra le curve dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento della barra sul lato 2, relative ai provini della Normativa Italiana con barra  $\phi 16$ .

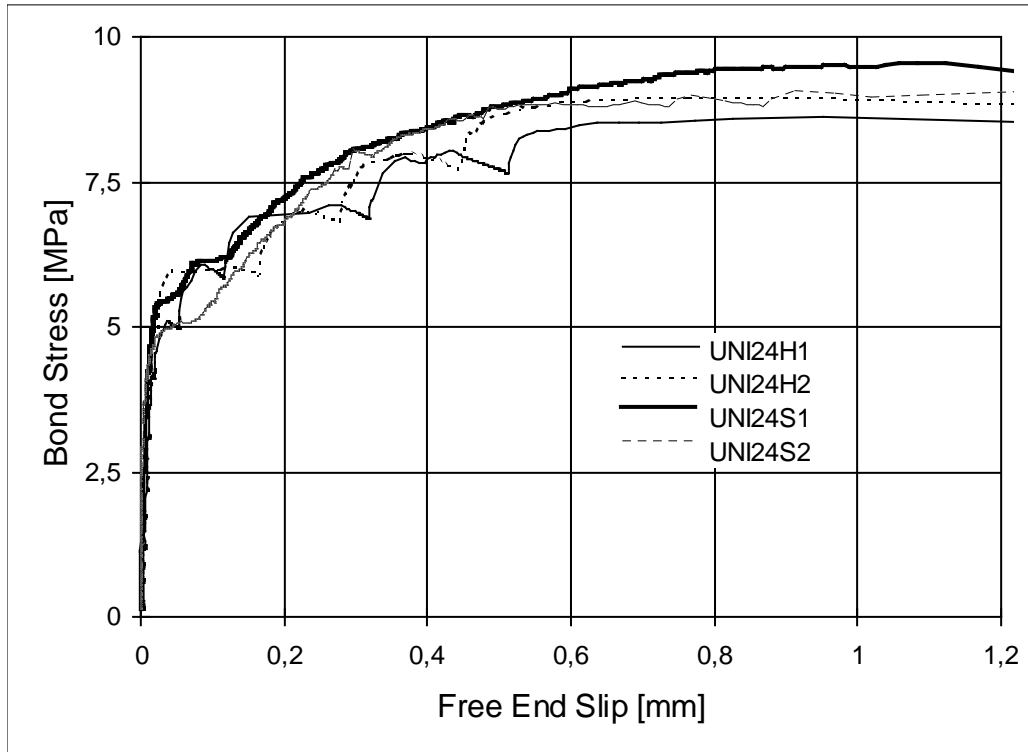


Fig.5.3 Confronto fra le curve dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento della barra sul lato 1, relative ai provini della Normativa Italiana con barra  $\phi 24$ .

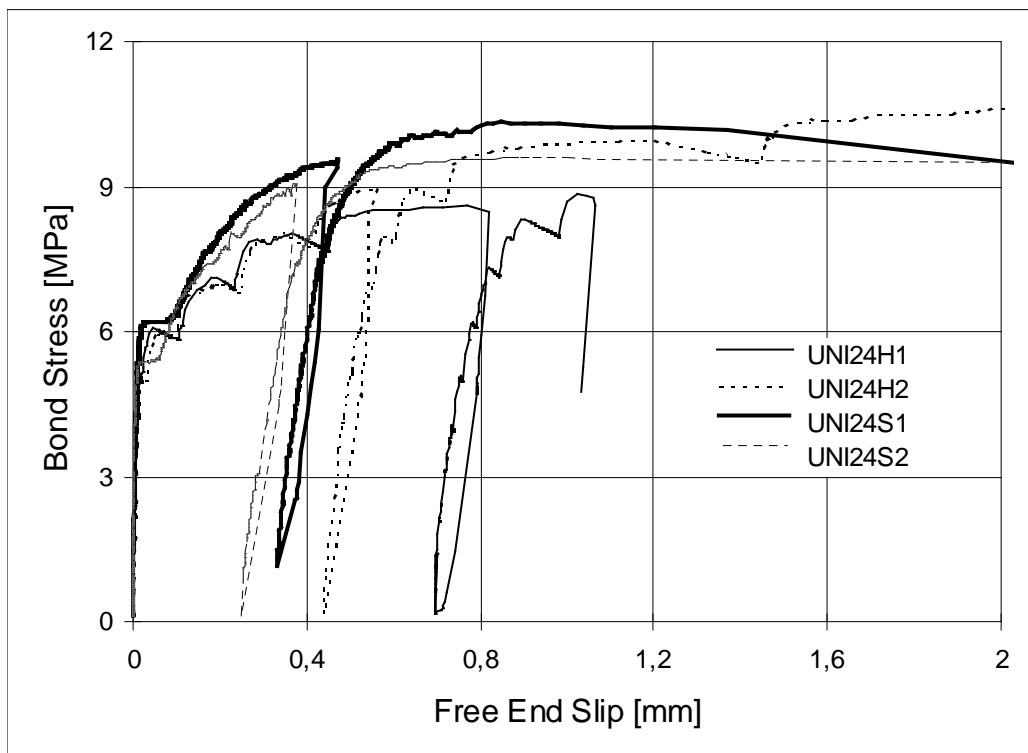


Fig.5.4 Confronto fra le curve dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento della barra sul lato 2, relative ai provini della Normativa Italiana con barra  $\phi 24$ .

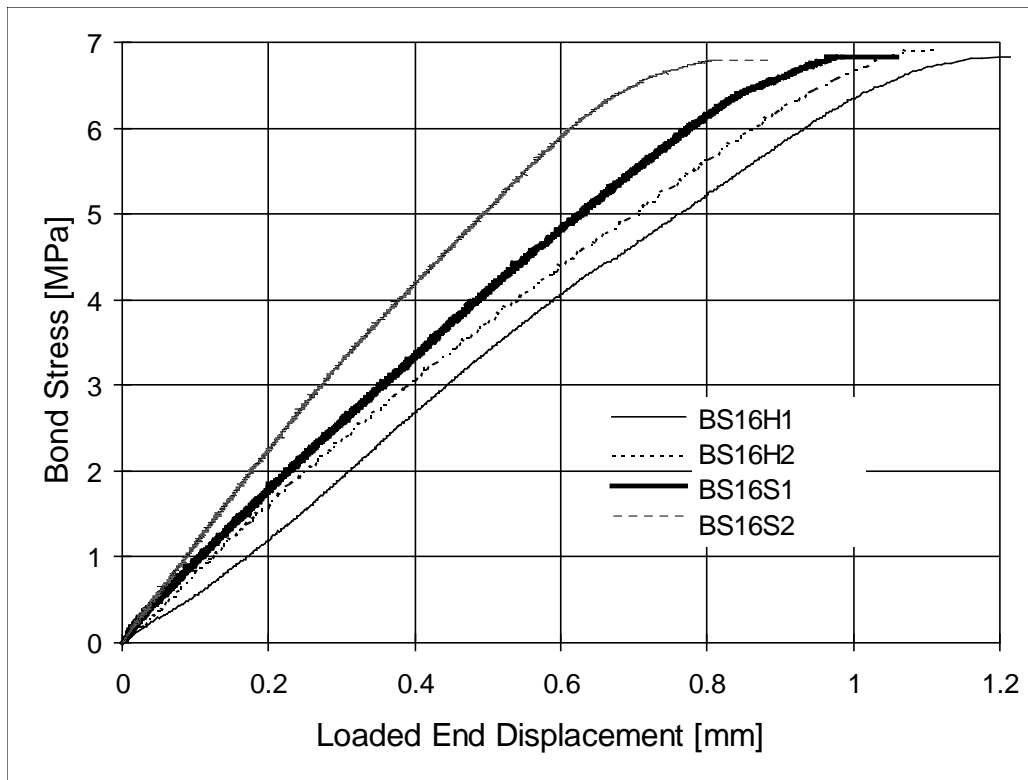


Fig.5.5 Confronto fra le curve dello sforzo di aderenza in funzione dello spostamento dell'estremo caricato della barra, relative ai provini della Normativa Inglese con barra  $\phi 16$ .

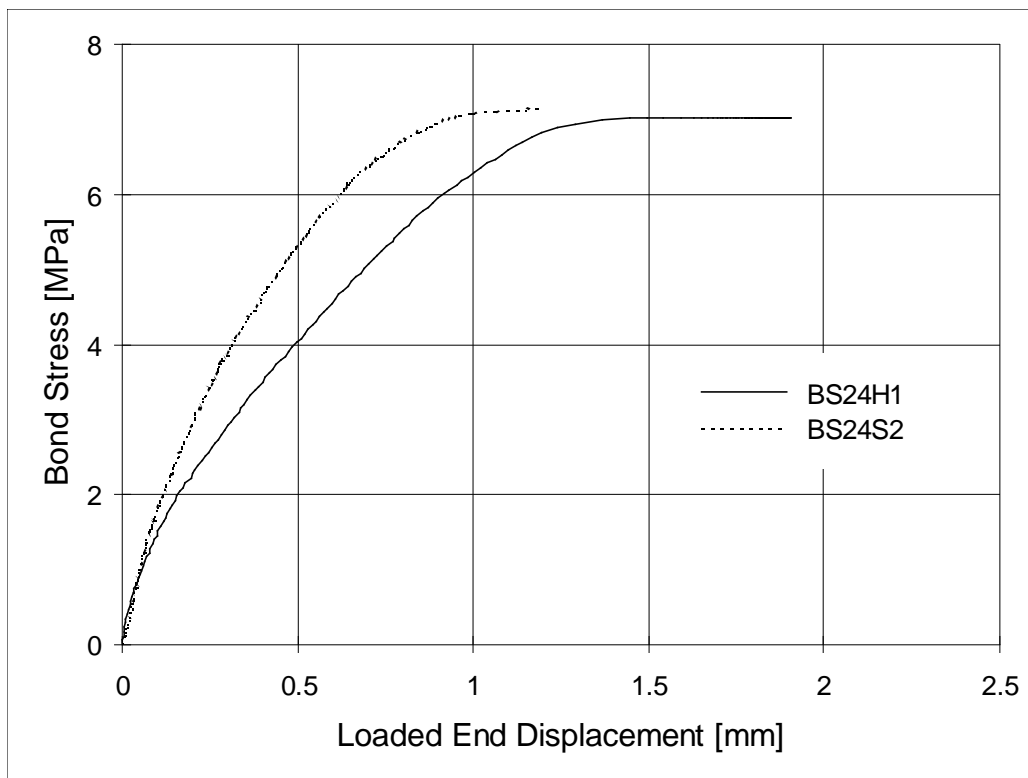


Fig.5.6 Confronto fra le curve dello sforzo di aderenza in funzione dello spostamento dell'estremo caricato della barra, relative ai provini della Normativa Inglese con barra  $\phi 24$ .

La Fig.5.8, sempre per la barra  $\phi 16$ , mostra le curve dello sforzo di aderenza medio in funzione dello scorrimento all'estremo libero; si può notare che in tutti i provini tale scorrimento di coda ha avuto inizio quando lo sforzo di aderenza ha raggiunto un valore prossimo ai 7 MPa.

Le Figg.5.9-5.10 mostrano curve analoghe alle precedenti, relative ai provini con barra  $\phi 24$ ; si può osservare che i risultati evidenziano una notevole dispersione, sia in termini di resistenza che di rigidità, e che gli scorrimenti dell'estremo non caricato della barra hanno avuto inizio con uno sforzo di aderenza di circa 7-8 MPa.

La Fig.5.11 mostra il diagramma dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento di testa misurati nelle prove con azione di contenimento controllata sulla barra  $\phi 16$ ; si può notare che in tutte queste prove si sono ottenute delle rigidità delle resistenze ultime di aderenza molto simili. Questo indica che quando l'indice di contenimento delle staffe  $\Omega$  è maggiore di 0.042, l'azione di contenimento è già talmente elevata che un ulteriore aumento di armatura trasversale non comporta variazioni significative della resistenza dell'aderenza. La Fig.5.12 mostra infine curve analoghe alle precedenti riferite alla barra  $\phi 24$ . Come già descritto nel Cap.4, la minor rigidità e resistenza dell'aderenza riscontrata nelle prove 24NC10-1 e 24NC12-1 sono probabilmente anche da attribuire alla minor resistenza alla compressione del calcestruzzo; inoltre, l'errata disposizione delle nervature dell'armatura trasversale, rivolte verso la superficie esterna del provino, ha probabilmente provocato un'ulteriore diminuzione della resistenza e della rigidità del provino 24NC12-1.

Le Figg.5.13.-5.14 riportano rispettivamente le curve sforzo medio di aderenza-scorrimento dell'estremo libero per i provini con barra  $\phi 16$  e  $\phi 24$  rispettivamente. Le Figg.5.15-5.16 mostrano le curve dell'apertura media della fessura principale da spacco in corrispondenza dell'armatura trasversale, in funzione dello scorrimento di testa. Si può notare che i risultati hanno una dispersione piuttosto limitata, in particolare quelli relativi ai provini con la barra  $\phi 24$ . Inoltre, le curve hanno un andamento ben approssimabile con una retta che interseca l'asse delle ascisse in due punti diversi, pari a circa 0.1 mm per le barre  $\phi 16$  e 0.05 mm per le barre  $\phi 24$ . Pensando ad un problema pratico dove lo scorrimento della barra corrisponde a parte dell'apertura della fessura flessionale (pari alla metà nel caso di perfetta simmetria di comportamento fra i due lembi della fessura; Fig.5.17), questi diagrammi forniscono una relazione fra la fessura flessionale e la fessura da spacco in corrispondenza dell'armatura trasversale; tale fessura ha inizio solo quando la fessura flessionale risulta superiore a certi valori. La zona tratteggiata di Fig.5.17 rappresenta la zona di influenza di una staffa, simulata dai provini sperimentali adottati nella presente ricerca. Si può notare infine che le maggiori spinte radiali della barra  $\phi 24$  provocano aperture di fessure da spacco pari a circa il doppio di quelle della barra  $\phi 16$ ; tale apertura di fessura, in corrispondenza del collasso dell'aderenza, è pari a circa 0.42 mm per la barra  $\phi 24$  e 0.22 mm per la barra  $\phi 16$ .

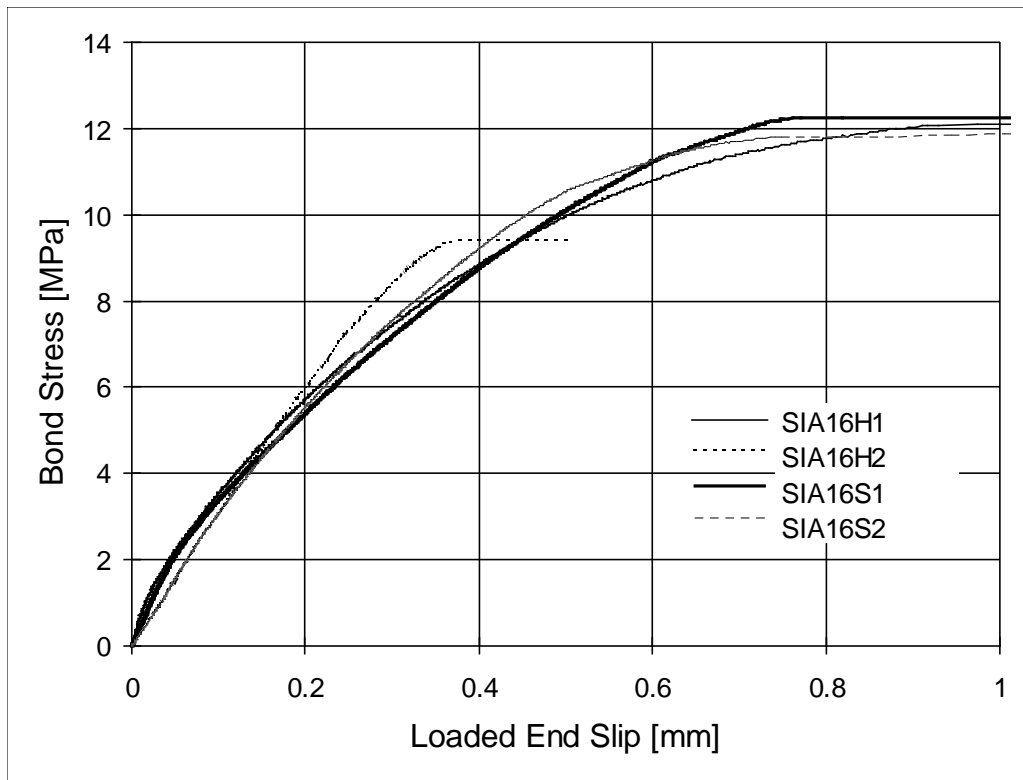


Fig.5.7 Confronto fra le curve dello sforzo di aderenza in funzione dello spostamento dell'estremo caricato della barra, relative ai provini della Normativa Svizzera con barra  $\phi 16$ .

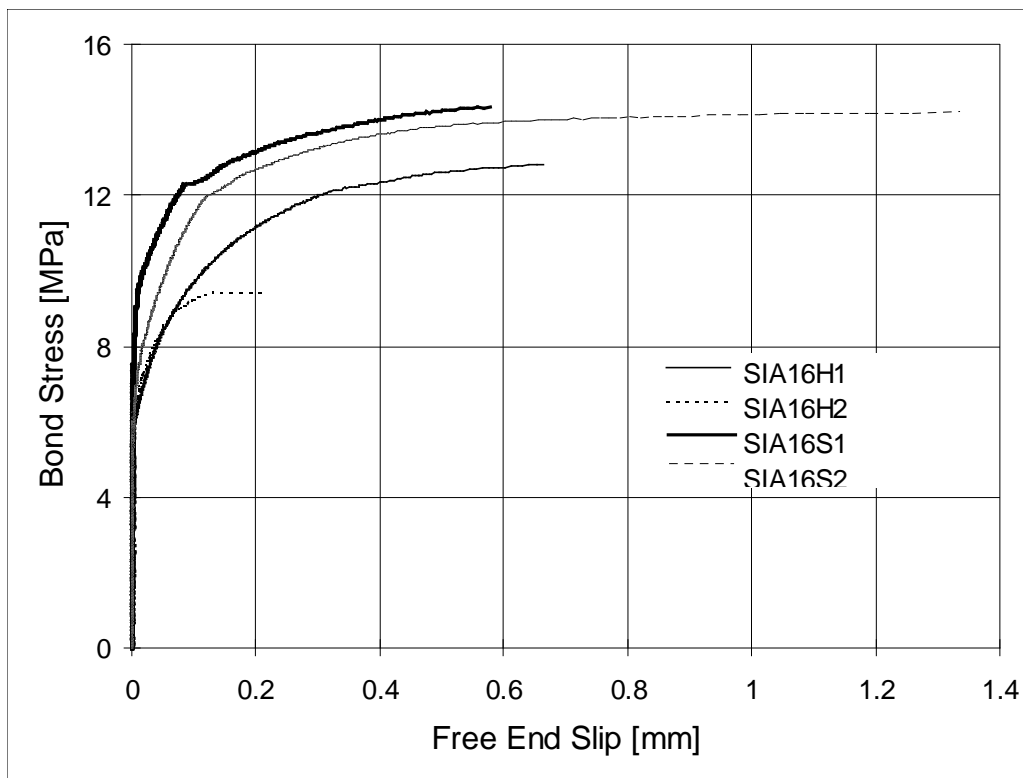


Fig.5.8 Confronto fra le curve dello sforzo di aderenza in funzione dello spostamento dell'estremo libero della barra, relative ai provini della Normativa Svizzera con barra  $\phi 16$ .

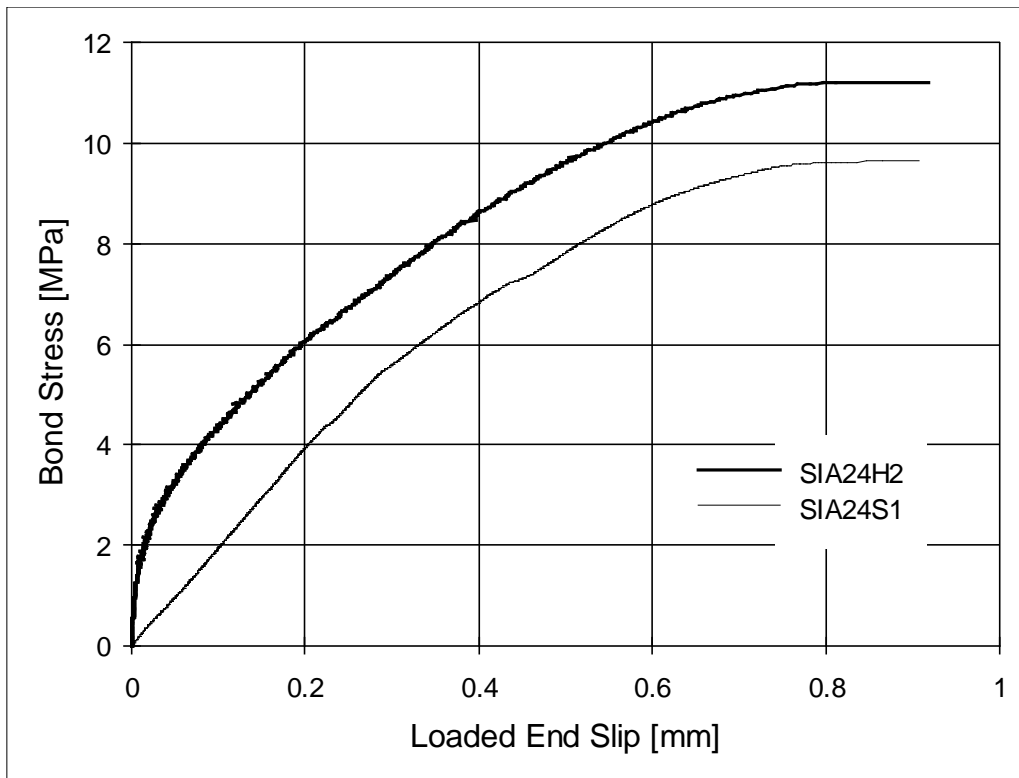


Fig.5.9 Confronto fra le curve dello sforzo di aderenza in funzione dello spostamento dell'estremo caricato della barra, relative ai provini della Normativa Svizzera con barra  $\phi 24$ .

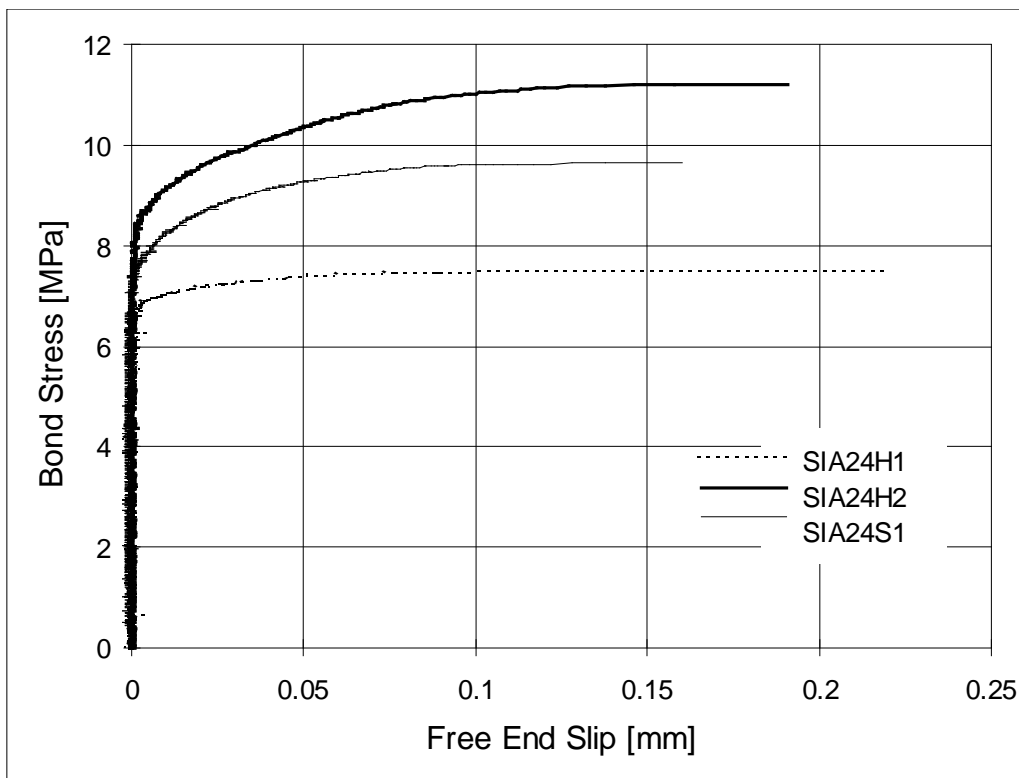


Fig.5.10 Confronto fra le curve dello sforzo di aderenza in funzione dello spostamento dell'estremo libero della barra, relative ai provini della Normativa Svizzera con barra  $\phi 24$ .

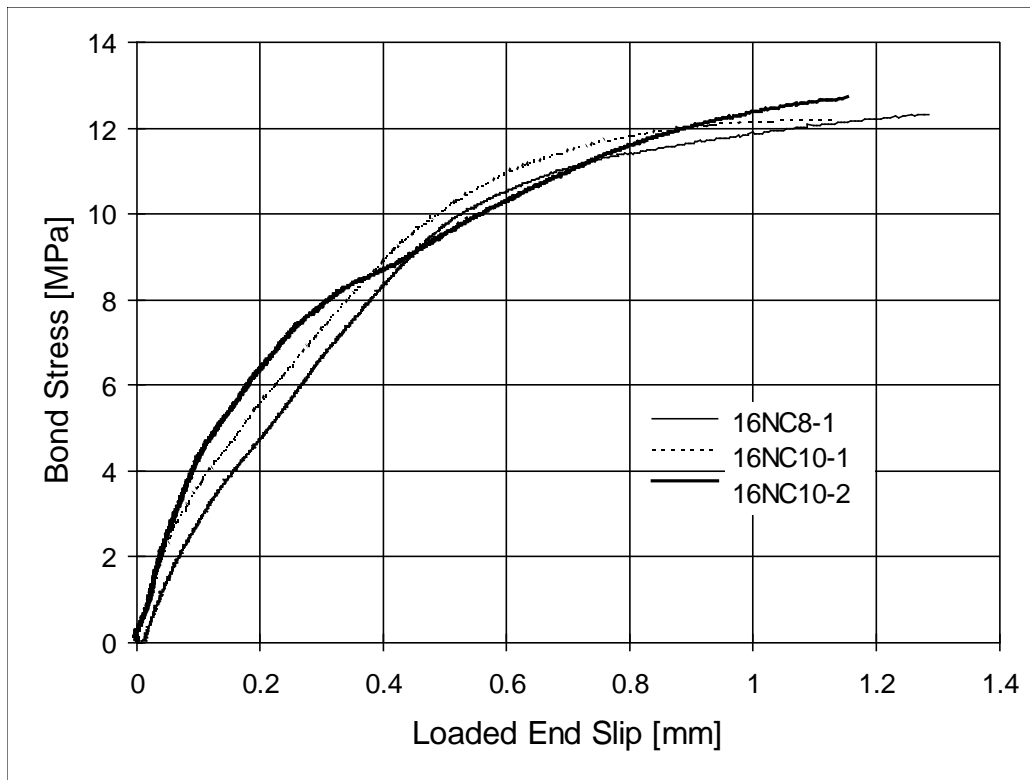


Fig.5.11 Confronto fra le curve sforzo di aderenza - scorrimento all'estremo caricato della barra, relative alle prove con azione di contenimento controllata con barra  $\phi 16$ .

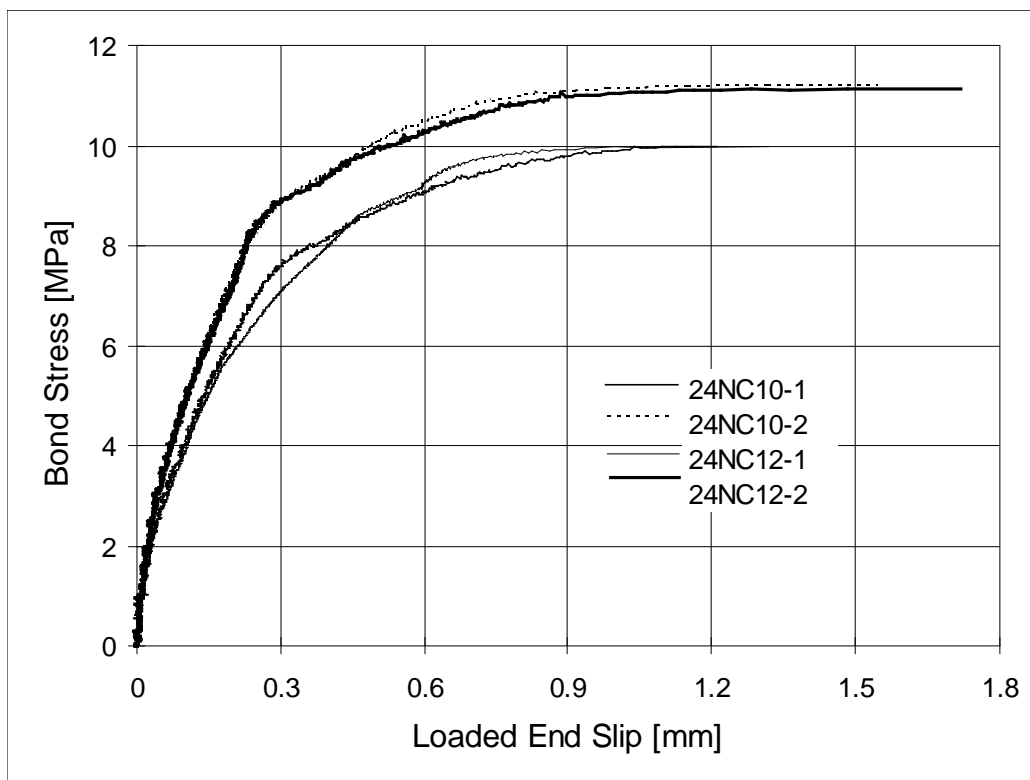


Fig.5.12 Confronto fra le curve sforzo di aderenza - scorrimento all'estremo caricato della barra, relative alle prove con azione di contenimento controllata con barra  $\phi 24$ .



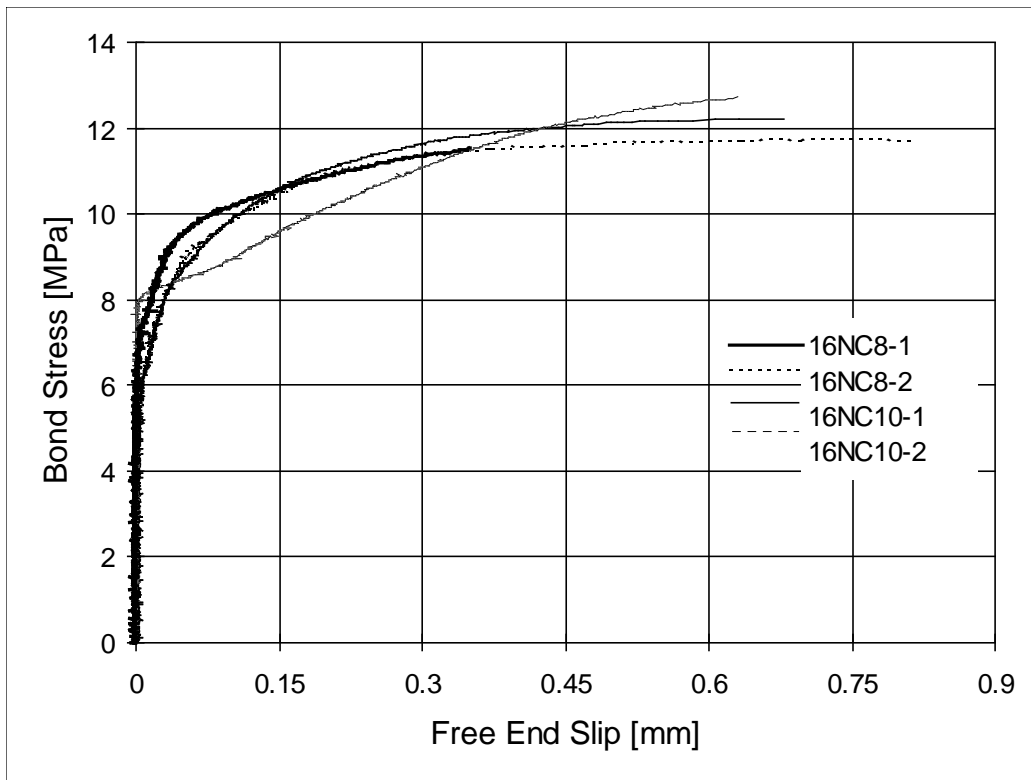


Fig.5.13 Confronto fra le curve sforzo di aderenza - scorrimento all'estremo libero della barra, relative alle prove con azione di contenimento controllata con barra  $\phi 16$ .

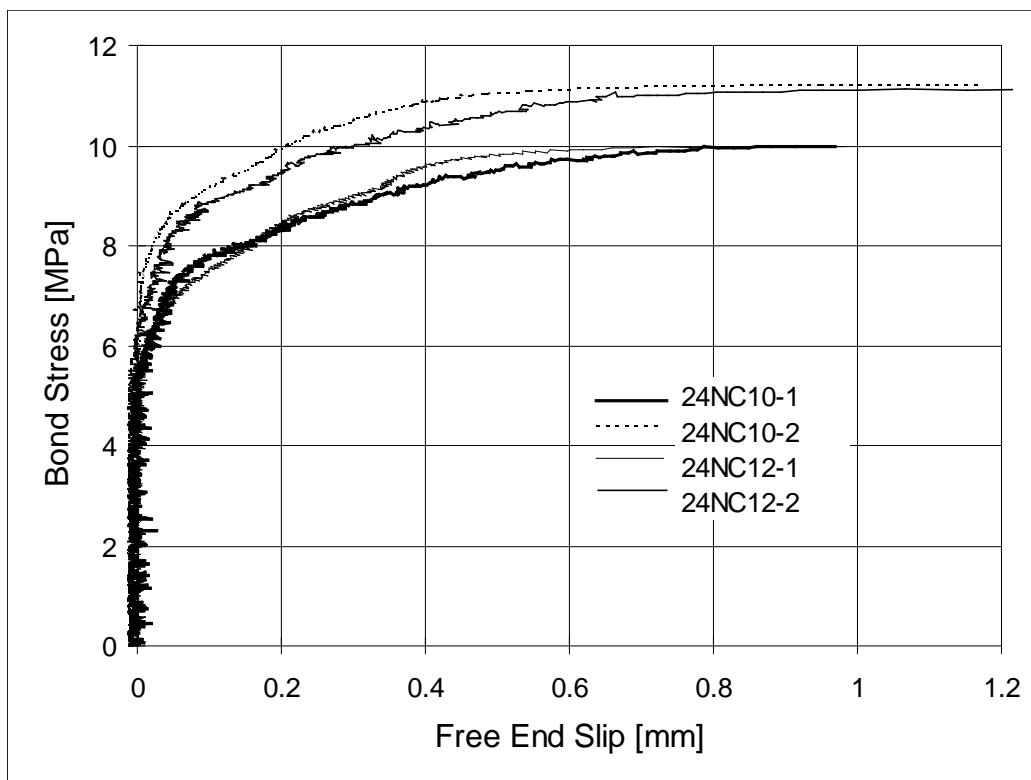


Fig.5.14 Confronto fra le curve sforzo di aderenza - scorrimento all'estremo libero della barra, relative alle prove con azione di contenimento controllata con barra  $\phi 24$ .

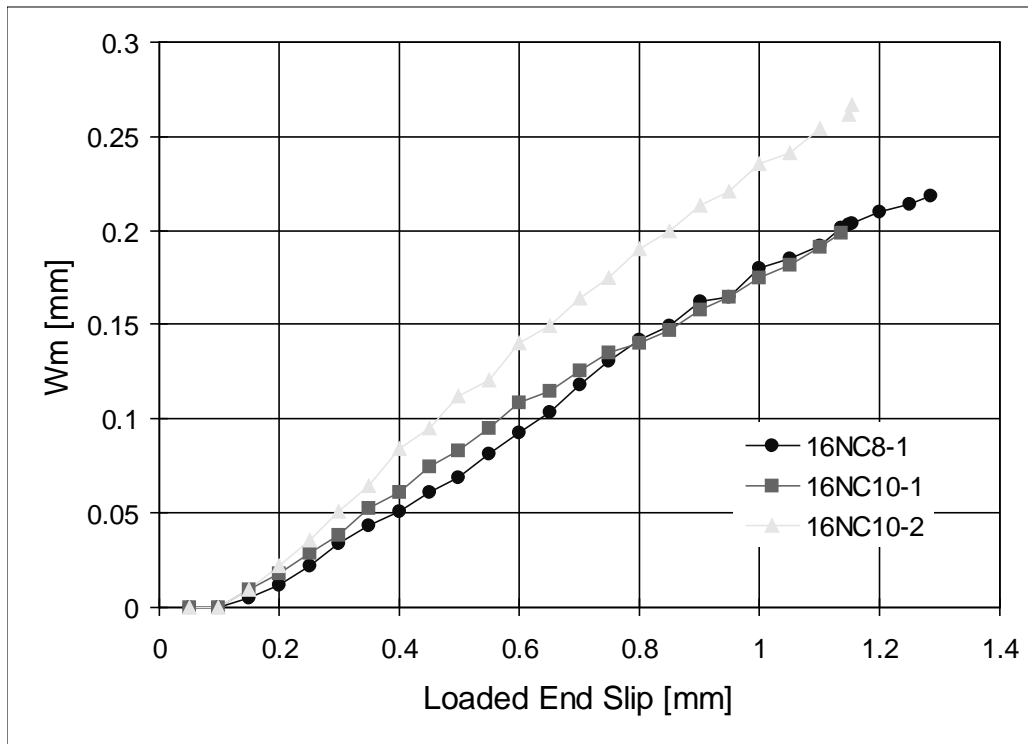


Fig.5.15 Curve “apertura fessura da spacco - scorrimento all’estremo caricato della barra”, relative alle prove con azione di contenimento controllata con barra  $\phi 16$ .

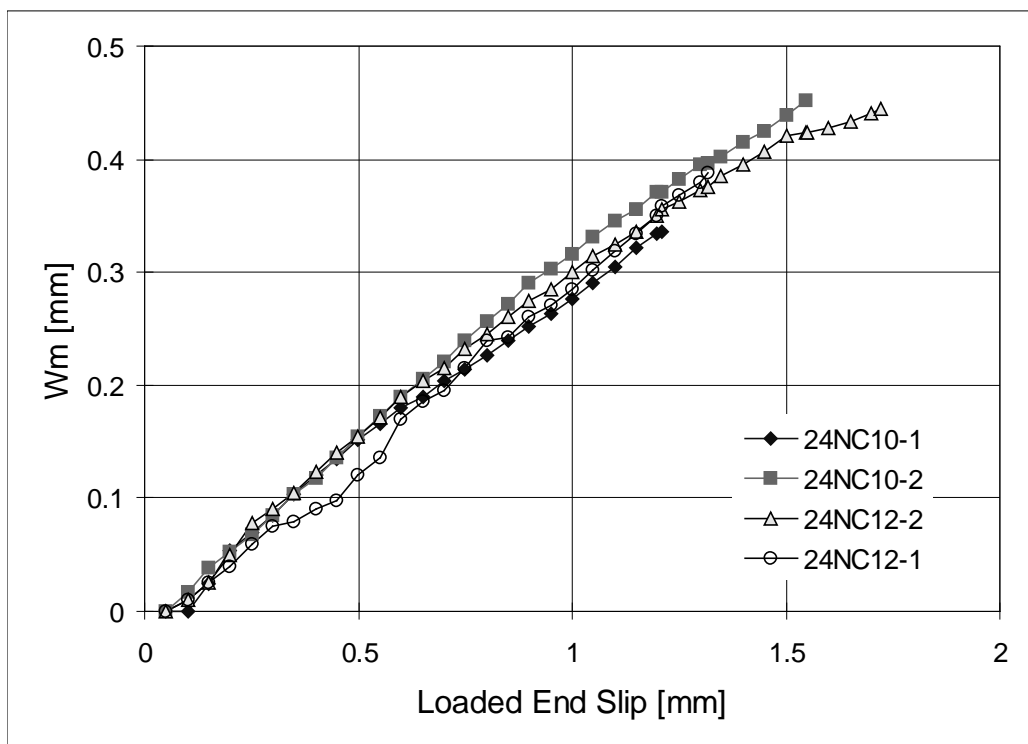


Fig.5.16 Curve “apertura fessura da spacco - scorrimento all’estremo caricato della barra”, relative alle prove con azione di contenimento controllata con barra  $\phi 24$ .

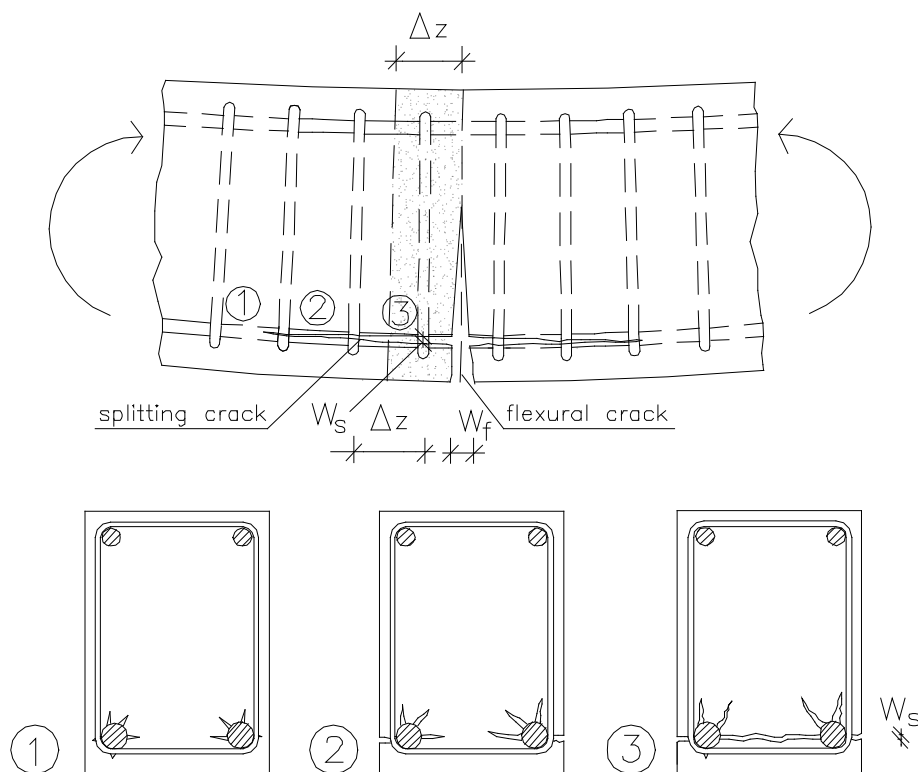


Fig.5.17 Particolare della propagazione delle fessure longitudinali da spacco in corrispondenza della fessura flessionale .

Le Figg.5.18 e 5.19 mostrano i valori del massimo sforzo di aderenza misurato in tutte le prove sperimentali con barre  $\phi 16$  e  $\phi 24$ , rapportati alla resistenza a compressione media del calcestruzzo, misurata su cubi al momento delle prove. In questi istogrammi di confronto non sono stati presi in considerazione i risultati delle prove della Normativa Inglese BS 4449-1988 in quanto, in queste prove di estrazione, si è raggiunto lo snervamento e la rottura della barra prima del collasso dell'ancoraggio. In questa serie di prove quindi, per effetto dell'elevato valore della lunghezza di ancoraggio sia nei provini con barra  $\phi 16$  che in quelli con barra  $\phi 24$ , non è stato possibile determinare lo sforzo di aderenza ultimo dell'ancoraggio.

I risultati relativi ai provini della Normativa Italiana, ottenuti facendo la media degli sforzi di aderenza massimi raggiunti sui due tratti ancorati di ciascun provino, evidenziano come gli sforzi di aderenza ultimi relativi alla barra  $\phi 24$ , siano decisamente inferiori a quelli misurati per la barra  $\phi 16$ . Come più volte specificato in precedenza, questo è certamente dovuto alle forti spinte radiali che le nervature della barra  $\phi 24$  esercitano sul calcestruzzo e che sono in grado di provocare, soprattutto nella fase avanzata della prova, delle notevoli fessure da spacco all'interno dei provini di calcestruzzo. In questi provini, il collasso dell'ancoraggio è sensibilmente anticipato e di conseguenza la resistenza ultima dell'aderenza si riduce. Infatti, il valore medio dello sforzo massimo di aderenza è risultato pari a 0.273 per la barra  $\phi 24$ , e pari a 0.396 per la barra  $\phi 16$ . Si osserva inoltre come, per ciascun diametro, si sono ottenuti dei valori abbastanza omogenei, segno che le velocità di prova adottate non hanno comportato variazioni significative della resistenza degli ancoraggi. Va inoltre ricordato che nei provini di

trave prescritti dalla CNR UNI 10020/71, l'armatura trasversale per le barre  $\phi 16$  e  $\phi 24$  è la stessa, e di conseguenza l'indice di contenimento delle staffe è minore nei provini con barra  $\phi 24$  (v.Par.2.7.2).

I valori relativi alle prove condotte secondo la Normativa Svizzera evidenziano una notevole dispersione sia per la barra  $\phi 16$  che  $\phi 24$ . La variabilità del punto di collasso dell'aderenza è molto probabilmente legata alla variabilità dell'azione di contenimento esercitata dalla forza di attrito sulla superficie di contatto tra il provino e la piastra di contrasto, in corrispondenza della quale è stato predisposto un sottile strato di malta cementizia. A causa delle irregolarità presenti sulle superfici di appoggio dei provini, probabilmente anche l'azione di contenimento provocata dall'attrito è stata diversa da prova a prova, e di conseguenza anche la resistenza di aderenza ultima degli ancoraggi, peraltro fortemente condizionata dall'entità dell'azione di contenimento, ne ha sensibilmente risentito. Inoltre, mentre per la barra  $\phi 24$  la velocità di applicazione del carico non sembra aver comportato sensibili variazioni dei risultati (0.252 valore medio per le prove veloci, 0.253 valore della prova lenta), per la barra  $\phi 16$  si è misurato uno sforzo massimo di aderenza leggermente superiore nelle prove di tipo lento (mediamente 0.3 nelle prove veloci e 0.374 in quelle lente). Il valore medio dello sforzo massimo di aderenza ottenuto dalle prove con barra  $\phi 24$ , pari a 0.252, è risultato decisamente inferiore al valore medio ottenuto da tutte quelle con barra  $\phi 16$ , pari a 0.337.

I valori ottenuti per le prove con azione di contenimento controllata sono invece risultati abbastanza omogenei fra di loro, sia per le barre  $\phi 16$  che per le barre  $\phi 24$ . Infatti, come già descritto nel Cap.4, la diversa percentuale di armatura trasversale presente nei provini non ha comportato apprezzabili variazioni dello sforzo massimo di aderenza, probabilmente a causa dell'elevata azione di contenimento offerta dall'armatura trasversale, caratterizzata da un indice  $\Omega$  sempre maggiore di 0.042. Anche per questa serie di prove, il valore medio dello sforzo di aderenza ultimo misurato per la barra  $\phi 24$ , pari a 0.237, è risultato inferiore a quello misurato per la barra  $\phi 16$  che è pari a 0.275. In questo caso i due valori medi ottenuti sono nettamente più vicini tra di loro, rispetto a quelli ottenuti nei provini della Normativa Italiana e Svizzera; ciò è anche dovuto al fatto che in questo prove è stato possibile controllare meglio l'azione di contenimento, eliminando o comunque riducendo sensibilmente il numero delle variabili difficilmente quantificabili, quale l'attrito che è sempre presente nelle prove di estrazione di barre da provini disposti su semplici piastre di contrasto. Le maggiori resistenze dell'aderenza per la barra  $\phi 16$  rispetto a quelle della barra  $\phi 24$  sono in parte dovute al fatto che nel primo tipo di provini l'area della sezione resistente di calcestruzzo, valutata in corrispondenza del piano AA di propagazione della fessura principale da spacco (Fig.2.13), è maggiore di quella dei provini con barra  $\phi 24$ . Ciò ha comportato un valore dell'Indice di Contenimento del Calcestruzzo B pari a 5.25 e a 3.17 per i provini con barra  $\phi 16$  e  $\phi 24$  rispettivamente, e di conseguenza una maggiore resistenza dell'ancoraggio nel primo tipo di provini. Un ulteriore parametro che va tenuto in conto nella fase di confronto dei risultati presentati è dato dal rapporto tra la lunghezza dell'ancoraggio ed il diametro della barra ancorata. È infatti noto che la resistenza dell'ancoraggio aumenta con l'aumentare di tale rapporto; nel nostro caso, mentre per la barra  $\phi 16$  tale rapporto è pari a 9.375, nella barra  $\phi 24$  è pari a 6.25; anche per questo motivo è lecito aspettarsi delle resistenze superiori nei provini con barra  $\phi 16$ .

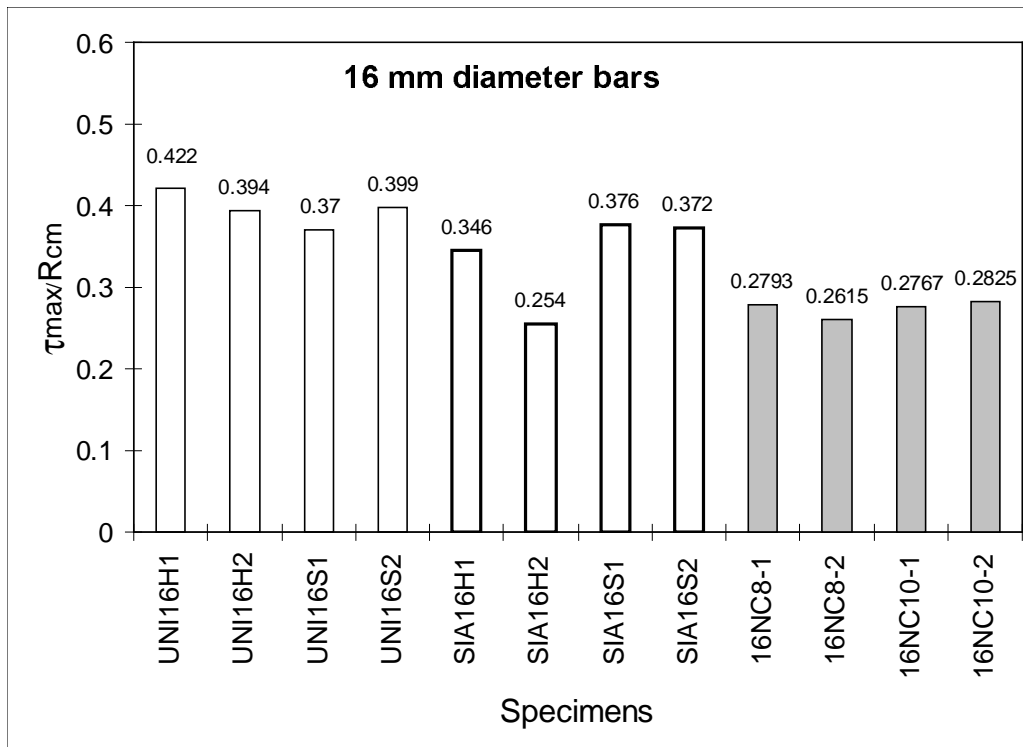


Fig.5.18 Valori del massimo sforzo di aderenza rapportati alla resistenza del calcestruzzo ottenuti dalle prove previste dalle diverse normative sulle barre  $\phi 16$ .

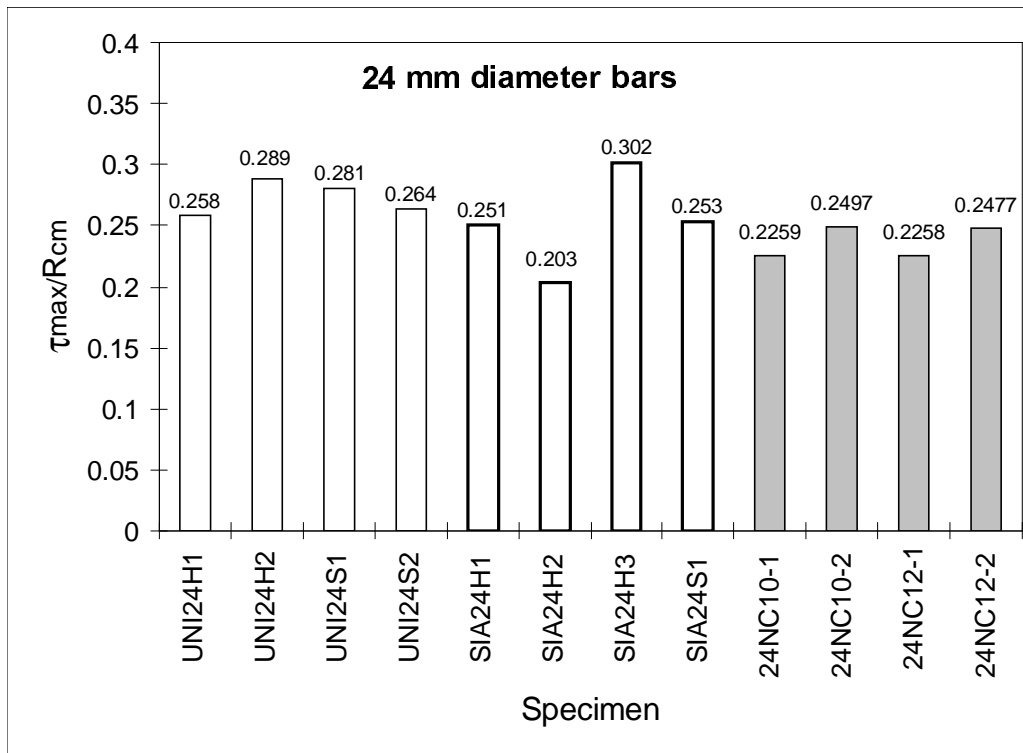


Fig.5.19 Valori del massimo sforzo di aderenza rapportati alla resistenza del calcestruzzo ottenuti dalle prove previste dalle diverse normative sulle barre  $\phi 24$ .

Negli istogrammi di Figg.5.20-5.21 vengono riassunti i valori degli sforzi di aderenza richiesti dalle diverse normative, rapportati ai valori nominali che secondo tali normative devono essere superati affinché le prove di aderenza abbiano esito positivo. Dalla Fig.5.21, relativa alla barra  $\phi 16$ , risulta evidente come tutte le prove di aderenza prescritte dalle normative europee considerate, siano decisamente superate con margini più o meno marcati. Viceversa la Fig.5.20 mostra che per alcune normative la barra  $\phi 24$  non ha superato (anche se per poco) la prova. Infatti, per tutti i provini con barra  $\phi 24$  della Normativa Italiana, il valore corretto dello sforzo di aderenza  $\tau_r$  non raggiunge il valore nominale minimo imposto. Lo stesso vale per i valori della  $\tau_{max}$  relativamente al caso della Normativa Austriaca. Come già specificato nel Cap.4, l'elevata resistenza del calcestruzzo al momento delle prove ha sicuramente penalizzato i risultati che si ottengono con la formula correttiva da applicare alla generica tensione di aderenza sperimentale. Diventa interessante effettuare un confronto fra la verifica dell'aderenza prevista dalla Normativa Italiana e quella prevista dalla Normativa Austriaca relativamente allo sforzo di aderenza  $\tau_m$  in quanto entrambe si basano sul *Beam-Test* e calcestruzzo con caratteristiche meccaniche simili. Poichè le modalità di carico, pur essendo leggermente differenti, non comportano significative variazioni dei risultati; a parità di materiale, i risultati ottenibili secondo le prescrizioni delle due normative sono praticamente gli stessi. Diversi sono invece i limiti minimi imposti dalle due normative; la Normativa Italiana prevede che sia verificata la seguente disuguaglianza:

$$\tau_{mc} = \tau_{md} - (R_{cm} - 27) \cdot 0.2 \geq \tau_{ml,I} = (8 - 0.12\phi)$$

che può essere riscritta come:

$$\tau_{md} \geq (8 - 0.12\phi) + (R_{cm} - 27) \cdot 0.2 = \tau_{ml,I}^*$$

La Normativa Austriaca prevede invece di verificare la seguente disuguaglianza:

$$\tau_{mc} = \tau_{md} \cdot \frac{30}{\beta_w} \geq \tau_{ml,A} = (8 - 0.10\phi)$$

che può essere riscritta come:

$$\tau_{md} \geq (8 - 0.10\phi) \frac{\beta_w}{30} = \tau_{ml,A}^*$$

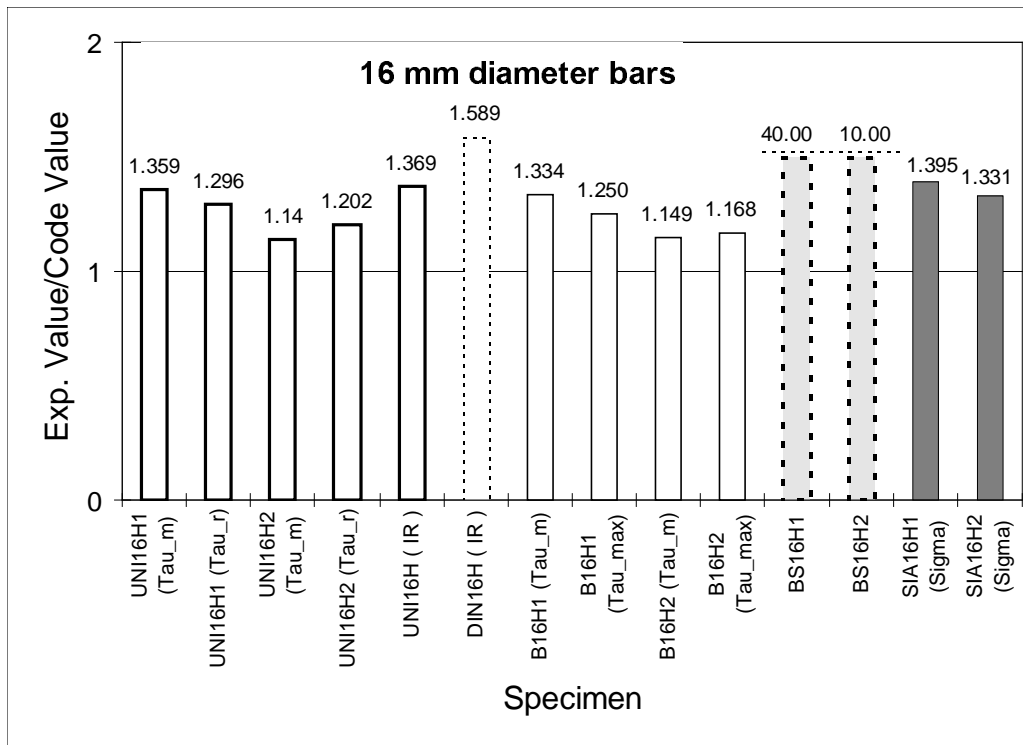


Fig.5.20 Valori del massimo sforzo di aderenza sperimentale rapportati alla resistenza prevista dalle diverse normative sulle barre  $\phi 16$ .

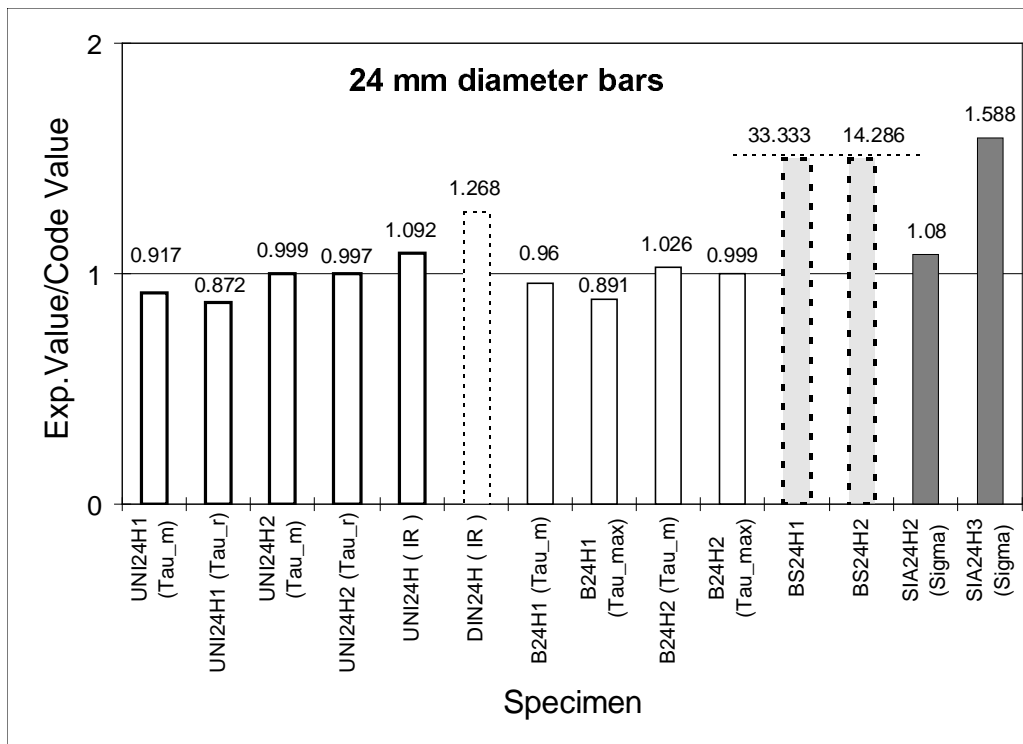


Fig.5.21 Valori del massimo sforzo di aderenza sperimentale rapportati alla resistenza prevista dalle diverse normative sulle barre  $\phi 24$ .

La seconda e la quarta disuguaglianza confrontano i valori sperimentali con i valori limite previsti dalla Normativa Italiana ed Austriaca; poichè i valori sperimentali sono simili tra di loro, essi possono essere confrontati. Il confronto è mostrato in Fig.5.22 relativamente alla  $\tau_m$  e per tre diversi valori della resistenza del calcestruzzo. Si può notare che la Normativa Austriaca è sempre meno severa di quella Italiana, in quanto presenta limiti minimi di accettabilità sempre inferiori per i diversi valori del diametro della barra e per le diverse resistenze del calcestruzzo considerate.

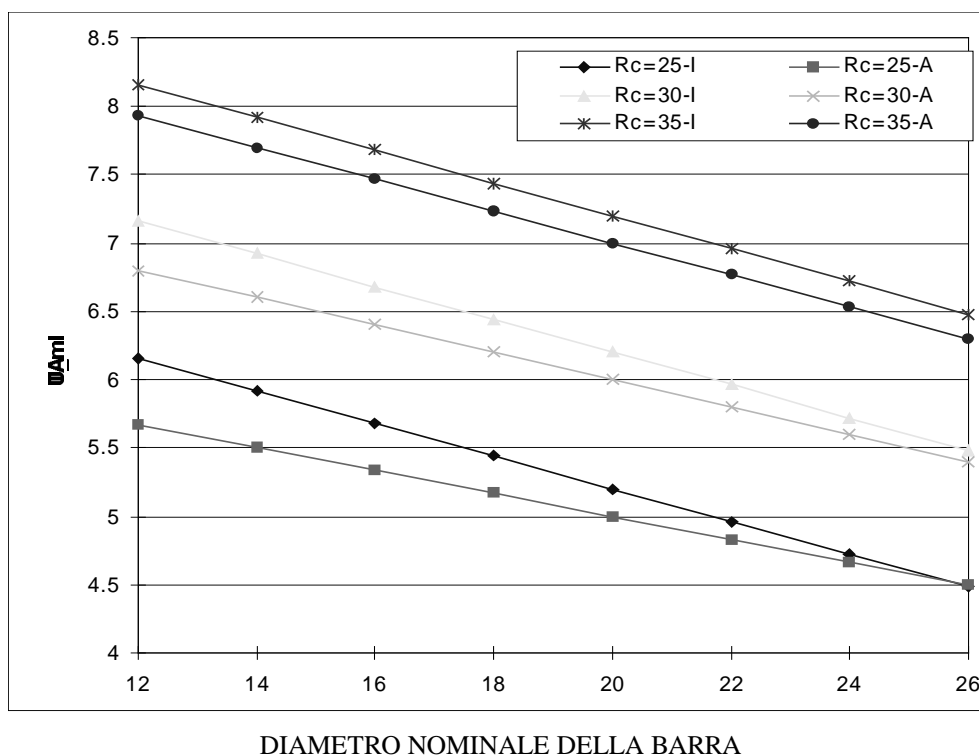


Fig.5.22 Confronto fra il valore nominale minimo  $\tau_m$  previsto dalle Normative Italiana e Austriaca.

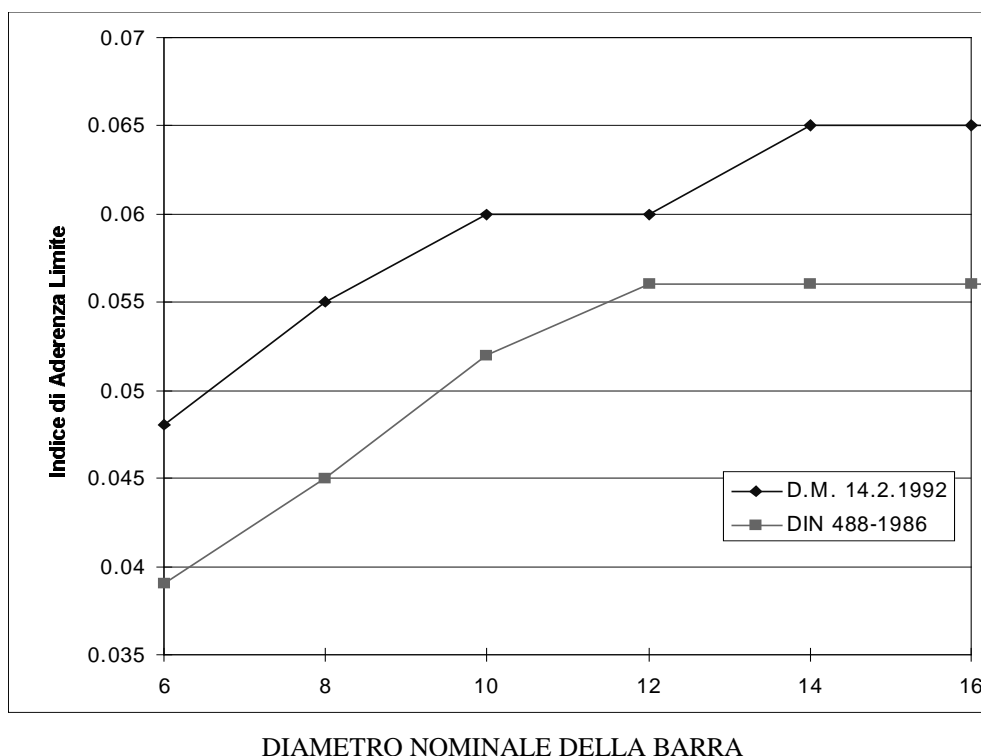
Va osservato che il controllo dell'Indice di aderenza IR per la verifica della geometria delle nervature secondo il D.M. 9.1.1996, per la barra  $\phi 24$  è stato superato con un margine del 9%. A tale proposito va rilevato che la Normativa Tedesca DIN 488-1986, che effettua il solo controllo della geometria della nervatura, ha limiti di accettabilità inferiori a quelli del D.M. 9.1.1996. Infatti, sempre per la barra  $\phi 24$  il test proposto dalla DIN 488-1986 è stato superato con un margine del 27%; ne deriva che, in generale, una certa barra potrebbe risultare accettabile per la Normativa Tedesca ma non esserlo per quella Italiana. La Fig.5.23 mostra il confronto delle curve limite dell'Indice di aderenza, relative al D.M. 9.1.1996 ed alla DIN 488-1986.

La Normativa Inglese che prevede che alla fine delle prove non venga superato lo scorrimento di 0.2 mm all'estremità libera della barra, fornisce per entrambi i diametri risultati che sono abbondantemente inferiori al limite massimo di scorrimento previsto.

Per entrambi i diametri, le prove condotte secondo le prescrizioni della Normativa Svizzera sono state superate; va però osservato che per la barra  $\phi 24$  si sono ottenuti risultati



con una maggiore dispersione. Inoltre, mentre per il provino SIA24H2 il margine di superamento della prova è solo dell'8%, per il provino SIA24H3 tale margine è pari a circa il 60%. Questo è dovuto al fatto che la barra  $\phi 24$  esercita una maggiore spinta radiale sul calcestruzzo e di conseguenza risulta maggiore l'influenza sui risultati sperimentali dell'attrito che, come detto in precedenza, rappresenta una variabile di difficile valutazione e controllo. Questa dispersione non si è verificata nei provini con barra  $\phi 16$ , dove, in presenza di un carico di estrazione decisamente ridotto, l'influenza dell'azione di contenimento dovuta all'attrito è meno sentita e di conseguenza i risultati sperimentali delle prove presentano margini di superamento più ravvicinati. (39% per la prova SIA16H1 e 33% per la prova SIA16H2).



*Fig.5.23 Confronto fra i valori minimi dell'indice di aderenza previsti dalle Normative Italiana e Tedesca.*



## 6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel presente lavoro sono state eseguite prove di aderenza su barre di acciaio saldabili per cemento armato, seguendo le prescrizioni fornite da alcune normative europee. Le prove sperimentali hanno fatto riferimento a due diversi diametri della barra, pari a 16 e 24 mm. Tale scelta è dovuta alla necessità di verificare l'influenza della fessura longitudinale da spacco, particolarmente importante per il comportamento dell'ancoraggio; infatti, mentre la barra  $\phi 24$  esercita elevate spinte radiali e facilita la formazione della fessura da spacco, la barra  $\phi 16$  esercita delle spinte radiali minori ed è caratterizzata da un diverso comportamento dell'ancoraggio.

Una prova di aderenza secondo normativa dovrebbe possedere i seguenti tre requisiti fondamentali:

1. essere di *semplice esecuzione*, in modo da poter essere effettuata da tutti;
2. consentire la *riproducibilità dei risultati sperimentali* ottenuti, in modo che tali risultati possano essere facilmente verificati con prove successive;
3. rappresentare una *situazione pratica* facilmente riscontrabile nella realtà progettuale, in modo da rendere utilizzabili i risultati sperimentali per la valutazione dell'effettivo valore del coefficiente di sicurezza di un ancoraggio impiegato nella pratica costruttiva.

Per quanto riguarda i tre requisiti descritti, sulla base delle prove sperimentali effettuate, si possono fare le seguenti considerazioni:

a) La Normativa Italiana richiede modalità di prova e provini di non semplice realizzazione, con conseguente aumento dei costi di prova. Nel contempo consente una buona riproducibilità dei risultati. Poichè l'armatura trasversale di contenimento è la stessa per le barre  $\phi 16$  e  $\phi 24$ , i risultati relativi alle due diverse armature risultano molto diversi fra di loro. Questo perchè la barra  $\phi 24$  esercita delle spinte radiali maggiori sul calcestruzzo e di conseguenza provoca la propagazione della fessura da spacco fin sulla superficie esterna del provino che comporta una riduzione della resistenza dell'aderenza. Il tipo di ancoraggio richiesto da questa normativa, anche se simula la situazione pratica tipica di una barra contenuta in una trave, è per sua natura difficilmente riscontrabile nelle strutture reali a causa della elevata concentrazione di staffe lungo l'ancoraggio, necessaria per evitare un anticipato collasso per taglio del provino.

b) La Normativa Inglese prescrive l'esecuzione di prove di estrazione su ancoraggi lunghi di barre in provini prismatici di calcestruzzo e semplici prove di estrazione. Le dimensioni dei provini richieste per le barre di grosso diametro, fan sì che il provino non sia facilmente trasportabile. I risultati sperimentali ottenuti sono abbastanza omogenei in quanto, a causa dell'elevata lunghezza di ancoraggio e dell'elevata azione di contenimento esercitata dall'armatura a spirale inserita nei provini, le barre raggiungono il limite di snervamento dell'acciaio prima di sfilarsi. Trattandosi poi di prove di estrazione a rottura relative ad ancoraggi lunghi, sulla testa del provino nascono delle rilevanti forze di compressione che trovano un difficile riscontro nella pratica progettuale. La scarsa corrispondenza con le

situazioni reali della pratica progettuale è anche dovuta alla forma e all'elevato quantitativo di armatura trasversale predisposta nel provino.

c) La Normativa Svizzera prevede l'esecuzione di semplici prove di estrazione su ancoraggi corti; i provini, privi di armatura di contenimento, sono dei semplici cubi di calcestruzzo. Proprio l'assenza di armatura secondaria fa sì che per questa normativa non sia possibile trovare un caso normalmente presente nella pratica progettuale. Inoltre, per effetto dell'azione di contenimento dovuta all'attrito in corrispondenza della piastra di contrasto, si osserva una notevole variabilità dei risultati; questa situazione è messa in maggior risalto per le prove con barra  $\phi 24$ , nelle quali, a causa delle maggiori spinte radiali esercitate dalle nervature della barra, l'azione della forza di attrito ha una forte influenza sul valore della resistenza ultima dell'aderenza.

È stata inoltre effettuata una serie di prove di estrazione definite "*con azione di contenimento controllata*", impiegando il banco di prova di Plizzari, Deldossi e Massimo (1996b). Queste prove prevedono la semplice estrazione di una barra ancorata, senza che vi sia l'influenza della forza di attrito sulle testate; i provini impiegati rappresentano un caso significativo per le applicazioni pratiche in quanto simulano il comportamento dell'ancoraggio nella zona di influenza di una singola armatura trasversale. Per entrambi i diametri impiegati nel presente lavoro si sono ottenuti risultati abbastanza omogenei; questo è legato al fatto che tutti i provini di questa serie erano caratterizzati da un elevato valore dell'Indice di contenimento dell'armatura trasversale  $\Omega$ . Tale valore, in accordo con quanto già precedentemente trovato da Plizzari, Deldossi e Massimo (1996a), rende i risultati indipendenti dal quantitativo di armatura trasversale presente.

I possibili sviluppi della presente ricerca possono essere rivolti sia all'esecuzione di un maggior numero di prove sperimentali, volte a confermare i risultati ottenuti, sia all'esecuzione di prove di estrazione su barre di diametro diverso, al fine di studiare l'effetto delle diverse spinte radiali sulla resistenza ultima dell'aderenza. L'esecuzione di ulteriori prove, condotte secondo le prescrizioni di altre normative, consentirebbe inoltre di allargare il confronto tra i risultati sperimentali ottenibili secondo le varie Normative Europee. Infine, l'esecuzione di nuove prove di aderenza con azione di confinamento controllata, consentirebbe di correlare meglio la resistenza ultima dell'ancoraggio all'armatura trasversale presente; tale aspetto è particolarmente importante per la valutazione dell'effettivo coefficiente di sicurezza nei confronti dello stato limite di aderenza.

## BIBLIOGRAFIA

BS 4449 (1988), “British Standard Specification for carbon steel bars for the reinforcement of concrete”, *British Standard Institution*.

Cairns J. e Abdullah R. (1995), “An evaluation of bond pullout tests and their relevance to structural performance”, *The Structural Engineer*, Vol. 73, No 11, pp.179-185.

CNR UNI 10020/71 (1971), “Prova di aderenza su barre di acciaio ad aderenza migliorata”.

Deldossi A.M., Massimo S., e Plizzari G.A. (1993), “Studio sperimentale su barre ancorate in elementi di cemento armato con armatura trasversale di contenimento”, Technical Report N. 5/93, *Università di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile*.

DIN 488 (1986), “Reinforcing steels; reinforcing bars; Testing”.

ENV 10080 (1994), “Steel for reinforcement of concrete weldable ribbed reinforcing steel B500 - Technical delivery conditions for bars, coils, and welded fabric”.

Eurocodice No. 2 (1989), “Design of concrete structures”, *Part. 1: General Rules and Rules For Buildings*.

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

Gambarova P.G., e Giuriani E. (1985), Discussion of “Study of the Transfer of Tensile Forces by Bond. by D. H. Jang, S. P. Shah, and A.T. Andonian.” *ACI Journal*, Vol. 82(3), pp. 381-383.

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

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

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

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

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

Giuriani E. e Ronca P. (1979), "Il metodo di Moirè per trasparenza per lo studio di travi inflesse in cemento armato", *Atti del VII Convegno Nazionale A.I.A.S.*, Cagliari, Settembre 26-29, pp.655-668.

Giuriani E. e Rosati G.P. (1987), "An Analytical Model for Study of Crack Propagation in Plain Elements under Bending", *Studi e Ricerche, Scuola di Specializzazione in Cemento Armato F.lli Pesenti, Politecnico di Milano*, Vol. 9, pp.107-126.

Hillerborg A., Modeer M., e Petersson P.E. (1976), "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means on fracture mechanics and finite elements." *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, pp.773-782.

Malvar R.J. (1991), "Bond of Reinforcement under Controlled Confinement", Technical Report 1883, Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California.

Ministero dei LL.PP. (1996), "Norme tecniche per le opere in cemento armato, in precompresso, in ferro", Decreto Ministeriale del 9.1.1996.

Modena C., Coltro T. e Rossaro G.P. (1988), "Studio dell'aderenza acciaio-calcestruzzo in presenza di fessure longitudinali da spacco: esperienza a contenimento assegnato." *Studi e Ricerche, Scuola di Specializzazione in Cemento Armato F.lli Pesenti, Politecnico di Milano*, Vol.10, pp.179-218.

Morita S. e Kaku T. (1979), "Splitting Bond Failures of Large Deformed Reinforcing Bars", *ACI Journal*, Vol 76(1), pp.93-110.

Plizzari G.A., Deldossi M. e Massimo S. (1996a) "Experimental study on Anchored bars in R.C. elements with transverse reinforcement", *RILEM Materials and Structures*, in corso di pubblicazione.

Plizzari G.A., Deldossi M. e Massimo S. (1996b) “Influenza dell’armatura trasversale sul comportamento di ancoraggi lunghi: risultati sperimentali”, Technical Report N. 5.8/96, *Università di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile*.

Plizzari G.A. e Marchina E. (1996), “Studio del collasso dell’aderenza in presenza di armatura trasversale”, Technical Report N. 5.8/96, *Università di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile*.

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

Plizzari G.A., Schumm C. e Giuriani E. (1987), “The effect of residual tensile strength of cracked concrete on the local bond-slip law after splitting”, *Studi e Ricerche, Scuola di Specializzazione in Cemento Armato F.lli Pesenti, Politecnico di Milano*, Vol. 9, pp.129-155.

Plizzari G.A., Marchina E. e Giuriani E. (1996), “Experimental study of splitting and flexural cracks in a R.C. beam with overlapped splices”, *RILEM Materials and Structures*, in corso di pubblicazione.

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

Reinhardt H.W. e Van der Veen C. (1990), “Splitting failure of a strain-softening material due to bond stresses”, Alberto Carpinteri Editor, *Applications of Fracture Mechanics to Reinforced Concrete*, Elsevier Applied Science, pp.333-346.

Rosati G.P. e Schumm C. (1992), “Modeling of local bar-to-concrete bond in R.C. beams”, CEB - Comité Euro International du Béton and RTU - Riga Technical University, *International Conference on: “Bond in Concrete: from Research to Practice”*, Riga, Latvia, October 15-17, Vol. 3, pp.12.34-12.43.

SIA 162/1 (1989), “Adhérence de l’acier d’armature Passive.”

Tassios T.P. e Koroneos E.G. (1984), “Local bond-slip by means of the Moirè method”, *ACI Journal*, Vol. 81(4), pp.27-34.

Tepfers R. (1973), “A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars”, PhD Thesis, *Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden*.

Tepfers R. (1979), “Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars”, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 31(106), pp.283-301.

Uninorm B 4200 (1987), "Massivbau Stahleinlagen".