



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA - FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE

VIA BRANZE, 38

25123 BRESCIA

Ferriera Valsabbia

Odolo (BS)

Studio sperimentale sull'aderenza di barre unte

(Versione preliminare)

Prof. Ing. Giovanni Plizzari

Brescia, 21 dicembre 2000

1. INTRODUZIONE

La Ferriera Valsabbia S.p.A. ha finanziato una ricerca al Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Brescia per lo studio sperimentale dell'aderenza di barre nervate sporche d'olio.

Le diverse normative europee prescrivono di determinare l'aderenza di una barra ad aderenza migliorata con prove di estrazione (pull-out) o con un beam test (Plizzari e Franchi, 1996). Entrambe le modalità di prova erano state previste dalle raccomandazioni delle associazioni internazionali Rilem, CEB e FIP (Rilem/CEB/FIB, 1979).

Il comportamento dell'aderenza di barre sporche d'olio è stato studiato per mezzo di prove di estrazione utilizzando uno speciale banco di prova che, pur essendo una prova di laboratorio, consente di simulare una situazione più vicina alla realtà (Giuriani e Plizzari, 1991).

2. DESCRIZIONE DEI PROVINI

I provini sperimentali hanno lo scopo di simulare il comportamento della barra ancorata in una trave, nella zona di influenza (Δz) di una staffa a due bracci (Fig. 1); il blocco di calcestruzzo è stato semplificato posizionando le barre ancorate nel piano di simmetria AA del provino (Fig. 2).

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). Le nervature della barra ancorata sono disposte in modo da esercitare la massima spinta radiale nella direzione dei blocchi C1 e C2 del provino e formare quindi la fessura da spacco principale nel piano AA, non contrastata dalle piastre inferiori del banco (Fig. 2). La formazione della fessura in tale piano è stata favorita anche dalla presenza di due angolari di acciaio posizionati alle estremità del provino. Tali angolari hanno anche lo scopo di ridistribuire le forti compressioni che si verificano nel calcestruzzo.

Le prove di aderenza sono state effettuate su barre con diametro di 16 e di 20 mm.

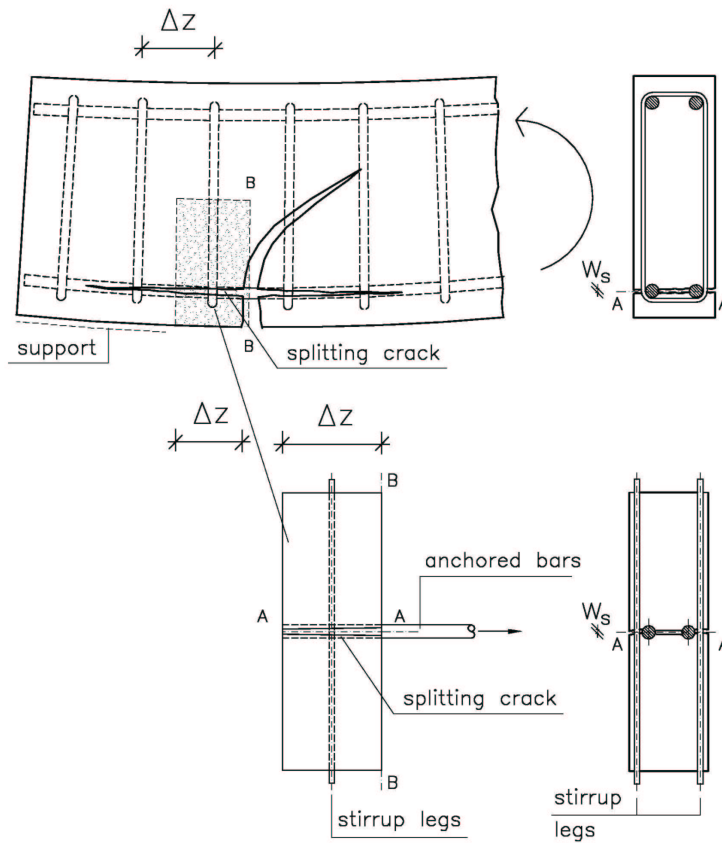


Figura 1. Schema del caso di ancoraggio reale e del provino sperimentale.

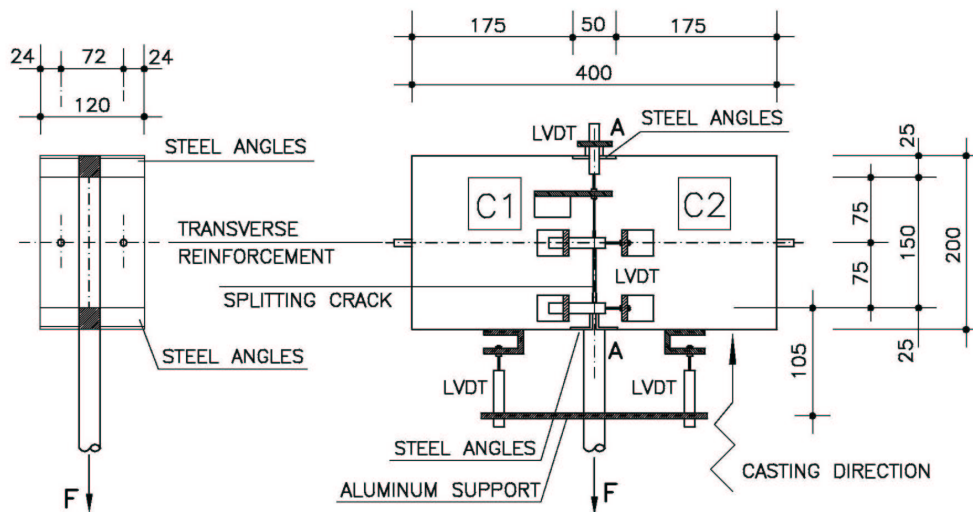


Figura 2. Caratteristiche geometriche dei provini per le prove con azione di contenimento controllata.

Analogamente alle prove di aderenza col *beam test* (CNR-UNI 10070/??), la lunghezza del tratto ancorato è stata scelta di circa 10 diametri e precisamente pari a 150 mm e 200 mm per le barre $\phi 16$ e $\phi 20$ rispettivamente.

Le armature trasversali di contenimento sono costituite da due barre disposte ortogonalmente al piano AA di formazione della fessura da spacco principale in modo che subiscano la massima sollecitazione provocata dalle spinte radiali delle nervature delle barre ancorate (Fig. 1 e 2). Le armature trasversali sono lunghe quanto il prisma in modo da poter essere considerate illimitate nei confronti dello scollamento che si verifica in corrispondenza della fessura (Fig. 2). Le loro nervature sono state orientate in modo da non creare spinte verso la superficie esterna del provino.

La larghezza di tutti i provini è stata scelta in modo da avere un copriferro pari a due volte in diametro della barra ancorata, valore rappresentativo delle situazioni reali.

Quando si progettano ancoraggi di armature ad aderenza migliorata, si deve fare riferimento a due parametri particolarmente significativi (Giuriani et al., 1991).

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

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

dove n_p e ϕ_p sono rispettivamente il numero e il diametro delle barre principali; n_{st} e A_{st} sono rispettivamente il numero e l'area delle staffe nella zona di lunghezza Δz (Fig. 3). Tale indice è particolarmente indicato per rappresentare l'azione di contenimento delle armature trasversali in quanto rappresenta il rapporto tra l'armatura trasversale totale e l'armatura ancorata nella zona di influenza di una staffa. L'area dell'armatura ancorata è valutata sulla base di una sezione longitudinale passante per il suo centro per essere maggiormente rappresentativa della spinta radiale esercitata dalle nervature (Giuriani et al., 1991).

➤ Il secondo è l'*Indice di Contenimento del Calcestruzzo*, definito come:

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

dove b è la larghezza della trave (Fig. 3). Tale indice é particolarmente indicato per rappresentare l'azione di contenimento del calcestruzzo in quanto rappresenta il rapporto tra l'area del calcestruzzo nel piano della fessura principale da spacco e l'area dell'armatura longitudinale.

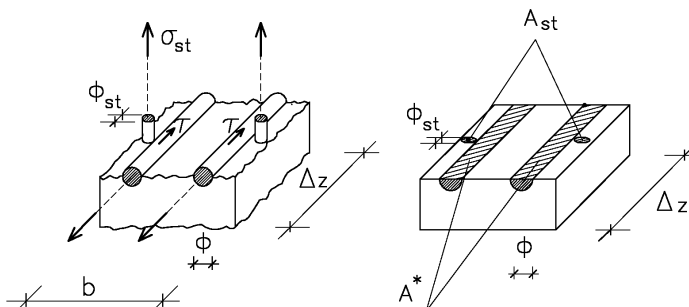


Figura 3. ??.

La Tabella 1 riporta il diametro dell'armatura principale (ϕ_p), il diametro dell'armatura trasversale (ϕ_{st}), la larghezza (b) e gli indici di contenimento delle staffe (Ω) e del calcestruzzo (B) di tutti i provini. Si può notare che, per ogni tipo di provino, sono stati sottoposti a prova quattro esemplari identici, due dei quali con barre unte (*Greasy*). Si può inoltre notare che le dimensioni dei provini sono state scelte in modo da avere lo stesso indice di contenimento del calcestruzzo ($B=4$) e da avere lo stesso indice di contenimento delle staffe tra i provini con barre $\phi 16$ ed un tipo di provini con barre $\phi 20$. Il secondo tipo di provini con barre $\phi 20$ aveva un valore di Ω maggiore e quindi un maggior contenimento dell'armatura trasversale.

Specimen	ϕ_p [mm]	ϕ_{st} [mm]	b [mm]	Ω	B	Surface
C10P2S0A	20	10	100	0.0395	4	Greasy
C10P2S0B	20	10	100	0.0395	4	Greasy
C10P2S0C	20	10	100	0.0395	4	Clean
C10P2S0D	20	10	100	0.0395	4	Clean
C10P2S8A	20	8	100	0.0250	4	Greasy
C10P2S8B	20	8	100	0.0250	4	Greasy
C10P2S8C	20	8	100	0.0250	4	Clean
C10P2S8D	20	8	100	0.0250	4	Clean
C16P2S6A	16	6	80	0.0233	4	Greasy
C16P2S6A	16	6	80	0.0233	4	Greasy
C16P2S6A	16	6	80	0.0233	4	Clean
C16P2S6A	16	6	80	0.0233	4	Clean

Tabella 1: Caratteristiche geometriche dei provini.

Il getto é stato effettuato nella stessa direzione delle armature principali e nel verso opposto a quello della forza di estrazione (F), in modo da garantire un migliore comportamento del calcestruzzo durante la prova (Rehm, 1961; Fig. 2).

3. STRUMENTAZIONE

La strumentazione impiegata ha permesso di misurare la forza di estrazione applicata alla barra, gli scorrimenti della barra all'estremo caricato (nel seguito definito anche "di testa") ed a quello scarico (nel seguito definito anche "di coda") e l'apertura della fessura da spacco (misurata in corrispondenza sia dell'estremo caricato che delle barre trasversali).

Per la misura dello spostamento (δ) all'estremo caricato di ogni barra ancorata, sono stati impiegati due trasduttori di spostamento induttivi (*Linear Variable Differential Transformers*), al fine di depurare eventuali rotazioni della barra (Fig. 2). I contrasti degli LVDT sono stati posizionati sulla faccia del provino a contatto con la piastra di contrasto. Lo scorrimento di testa (δ_L) é stato determinato depurando dallo spostamento misurato (δ), la deformazione elastica della barra nella zona tra il punto di applicazione degli LVDT e l'inizio del tratto ancorato, pari a circa ?? mm (Fig. 2).

La misura dello scorrimento dell'estremo libero é stata effettuata impiegando un trasduttore di spostamento (LVDT), posizionato nelle immediate vicinanze della barra (Fig. 2).

L'apertura delle fessure da spacco é stata rilevata sempre per mezzo di LVDT; la misura del trasduttore praticamente coincide con l'apertura della fessura da spacco in quanto la deformazione elastica del calcestruzzo in tale zona può essere ritenuta trascurabile (Fig. 2).

La forza di estrazione applicata alla singola barra ancorata é stata misurata per mezzo della cella di carico da 500 kN della Instron 1274.

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

La formazione e la propagazione della fessura da spacco é stata evidenziata applicando sulla faccia del provino, in corrispondenza della zona della fessura, un sottile strato di gesso.

La posizione dell'apice della fessura da spacco durante la sua propagazione lungo il provino è stato rilevato per mezzo di una lente di ingrandimento (6x).

4. DESCRIZIONE DEL BANCO

Le prove di estrazione sono però normalmente influenzate dall'azione di contenimento che si ottiene per l'attrito fra la superficie di testa dei provini e le piastre di contrasto che, al contrario dell'azione di contenimento dovuta all'armatura trasversale ed al calcestruzzo, è legata solamente alla prova sperimentale e non è presente in barra ancorata in una struttura reale. Per evitare il disturbo dovuto all'attrito fra la superficie di testa dei provini e le piastre di contrasto, non presente in barra ancorata in una struttura reale, le prove sono state eseguite utilizzando il banco realizzato da Plizzari, Deldossi e Massimo (1998) che consente la libera apertura della fessura da spacco principale, attraverso un contrasto costituito da due piastre separate lungo il piano dalla fessura stessa (Fig. 4). Tali piastre, dallo spessore di 60 mm, sono collegate ai contrasti superiori per mezzo di barre in acciaio bullonate che, comportandosi come bielle, non esercitano alcuna azione di contenimento sul provino. La possibilità di spostamento relativo tra i due blocchi di calcestruzzo C1 e C2 comporta che l'aderenza venga a dipendere dal contenimento delle staffe e del calcestruzzo di ricoprimento, in modo da meglio rappresentare la situazione di una barra ancorata in una trave di calcestruzzo. La fessura da spacco nasce per effetto delle spinte radiali esercitate dalle nervature della barra e si forma inizialmente fra i due blocchi di calcestruzzo C1 e C2 che, come precedentemente sottolineato, possono allontanarsi mettendo in trazione le staffe (Fig. 5).

Il banco di prova costituisce un sistema di contrasto da inserire nella macchina di prova Instron 1274 ed è collegato direttamente al morsetto superiore della Instron rispetto al quale può ruotare per mezzo di uno snodo (Fig. 4).

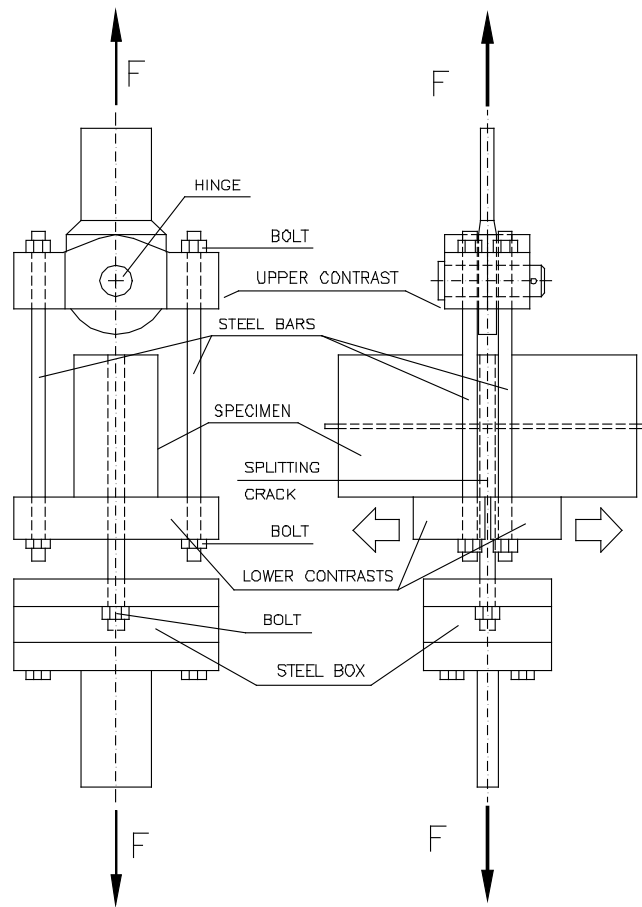


Figura 4. Caratteristiche geometriche del banco di prova.

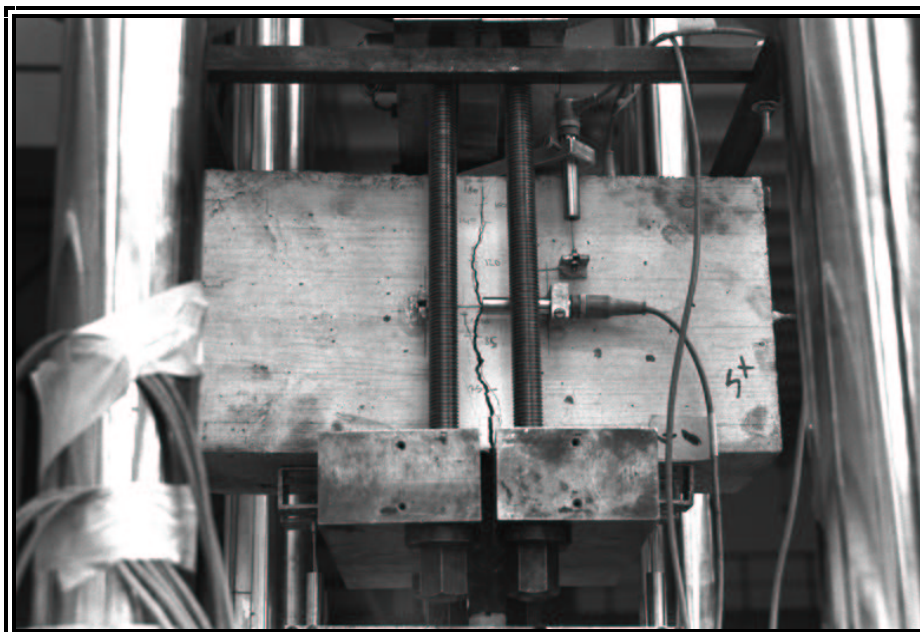


Figura 5: Fotografia di un provino a fine prova con evidenziata la fessura di splitting.

5. MATERIALI

5.1 Calcestruzzo

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

- cemento Portland Tipo II 32.5R A/L-R: 325 kg/m³;
- acqua: 175 l/m³ (rapporto acqua/cemento = 0.54);
- aggregati tondeggianti di natura silicea: 1853 kg/m³;
- superfluidificante 3,3 l/m³.

Gli aggregati utilizzati per il confezionamento del calcestruzzo sono di origine fluviale e natura silicea con forma tondeggiate. Le classi granulometriche e la distribuzione degli aggregati utilizzati é riportata in Tabella 2; si può notare alcune leggere sovrapposizioni nei diametri caratterizzanti le diverse pezzature degli aggregati utilizzati. La distribuzione granulometrica degli aggregati viene riportata nella Tabella 2 evidenziando, per ogni singola pezzatura, il diametro nominale, la percentuale passante al setaccio e il peso relativo al volume unitario di calcestruzzo. I provini sono stati confezionati con uno stesso getto.

Classe granulometrica	Diametro nominale	Passante	Massa
[mm]	[mm]	[%]	[kg/m ³]
0-0,35	0,35	9,74	176,90
0,35-0,45	0,45	11,92	39,60
0,4-0,6	0,60	14,77	51,80
0,6-1,5	1,50	27,15	224,80
1,5-2,5	2,50	36,96	178,00
2,5-3,5	4,00	48,48	209,20
4,0-6,0	6,00	60,84	224,50
7,0-12,0	10,00	80,45	356,00
10,0-15,0	15,00	100,00	355,00
Totale			1815,80

Tabella 2: Distribuzione granulometrica degli aggregati.

Questa distribuzione granulometrica è stata però ottimizzata, sulla base del dosaggio di cemento e del rapporto acqua/cemento mirati ad ottenere una lavorabilità ed una resistenza prefissata, adeguandola alla curva di Bolomey. L'equazione caratterizzante detta curva è la seguente:

$$p\% = \left[A - C\% + (100 - A) \cdot \sqrt{\frac{d_{\text{nom}}}{D_{\text{max}}}} \right] \cdot \frac{100}{100 - C\%} \quad (\text{Eq. 1})$$

dove:

$p\%$ è la percentuale di passante al diametro d_{nom} ;

D_{max} (15 mm) è il diametro massimo dell'aggregato;

A è un parametro scelto sulla base delle indicazioni della Tab. 3.2 (per il calcestruzzo utilizzato e stato scelto $A=11,32?$);

$C\%$ è la percentuale del cemento rispetto al peso di tutti i solidi presenti nell'impasto (aggregati + cemento):

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

Contemporaneamente al getto dei provini sono stati confezionati sei cilindri di calcestruzzo ($\phi=80$ mm, $l=300$ mm), e ?? cubetti di calcestruzzo ($l=150$ mm).

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

La scasseratura è stata eseguita dopo 72 ore dal getto. I provini, i cubetti ed i cilindri di calcestruzzo sono stati fatti maturare nella stanza con umidità controllata ($T=20\pm^{\circ}\text{C}$; $\text{RH} > 90\%$) fino a due settimane dalla prova; successivamente i provini hanno proseguito la maturazione in laboratorio, con umidità relativa pari a circa il 70 %. Sui cilindri di calcestruzzo, dopo 28 gg. di maturazione, sono state effettuate prove per la determinazione del modulo elastico secante (E_c), della resistenza a compressione (f_c) e della resistenza a trazione diretta (f_{ct}); i risultati ottenuti sono riportati in Tabella 3. I provini cubici sono stati impiegati per la determi-

nazione della resistenza a compressione ($f_{c,cub}$) al momento della prova (determinata su due cubetti). I risultati ottenuti sono raccolti in Tabella 3.

$E_{c,28}$ [MPa]	$f_{c,28}$ [MPa]	$f_{ct,28}$ [MPa]	$f_{c,cub}$ [MPa]
			31.?

Tabella 3: caratteristiche meccaniche del calcestruzzo.

5.1 Acciaio

L'acciaio delle barre utilizzate nelle prove é di tipo Tempcore[®] Fe B 44 k ad aderenza migliorata. Nella Tabella 4 sono riportati i valori dei parametri geometrici e meccanici delle barre impiegate.

Alcune barre, prima del getto, sono state immerse completamente in olio e lasciate sgocciolare in modo che le superfici rimanessero unte ma senza olio in eccesso.

6. MODALITÀ DI PROVA

La barra viene estratta dal provino di calcestruzzo controllando lo spostamento dell'estremo caricato della barra. Il servocontrollo della macchina é stato realizzato attraverso la corsa del pistone. La velocità di spostamento imposta alla macchina di prova é stata pari a 0.002 mm/min fino al raggiungimento del carico di picco?, oltre il quale la velocità veniva aumentata gradualmente. In realtà, la velocità di scorrimento effettiva dell'estremo caricato della barra é risultata ben inferiore a quella imposta dalla macchina di prova a causa dei giochi presenti nelle unioni bullonate e della deformabilità elastica del banco. La velocità dello scorrimento all'estremo caricato della barra é risultata mediamente di 0.0005 mm/min fino al raggiungimento del carico di picco, ed é aumentata fino a 0.025 mm/min nella fase finale della prova. La Figura ?? mostra il tipico andamento dello scorrimento all'estremo caricato della barra in funzione del tempo, ottenuto dal provino ??.

La velocità di spostamento imposta consente di considerare la prova di tipo quasi statico.

Le prove sono state condotte fino ad uno scorrimento massimo di 10 mm, pari a circa la distanza fra le nervature.

7. RISULTATI SPERIMENTALI

Le Figure 6-8 mostrano i risultati sperimentali, espressi in termini di sforzo di aderenza (Bond Stress) in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra. Lo sforzo di aderenza è stato ipotizzato uniformemente distribuito lungo la barra e quindi è stato determinato come:

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot \phi \cdot l}$$

avendo indicato con:

F la forza di estrazione applicata alla barra,

ϕ il diametro della barra ancorata,

l la lunghezza del tratto ancorato (pari a circa 10 volte il diametro della barra).

Le barre con lo strato d'olio in superficie sono evidenziate in legenda con la scritta "Greasy".

Si può notare che per tutte e tre le tipologie di provino, non si notano sensibili differenze di comportamento tra la barra unta e la barra non unta. Tale comportamento è giustificabile considerando che l'aderenza delle barre ad aderenza migliorata è data prevalentemente dall'interazione meccanica tra le nervature ed il calcestruzzo circostante. Lo strato d'olio sulla superficie riduce (o elimina completamente) l'adesione chimica tra la barra ed il calcestruzzo che influenza solo in modo marginale il comportamento della barra.

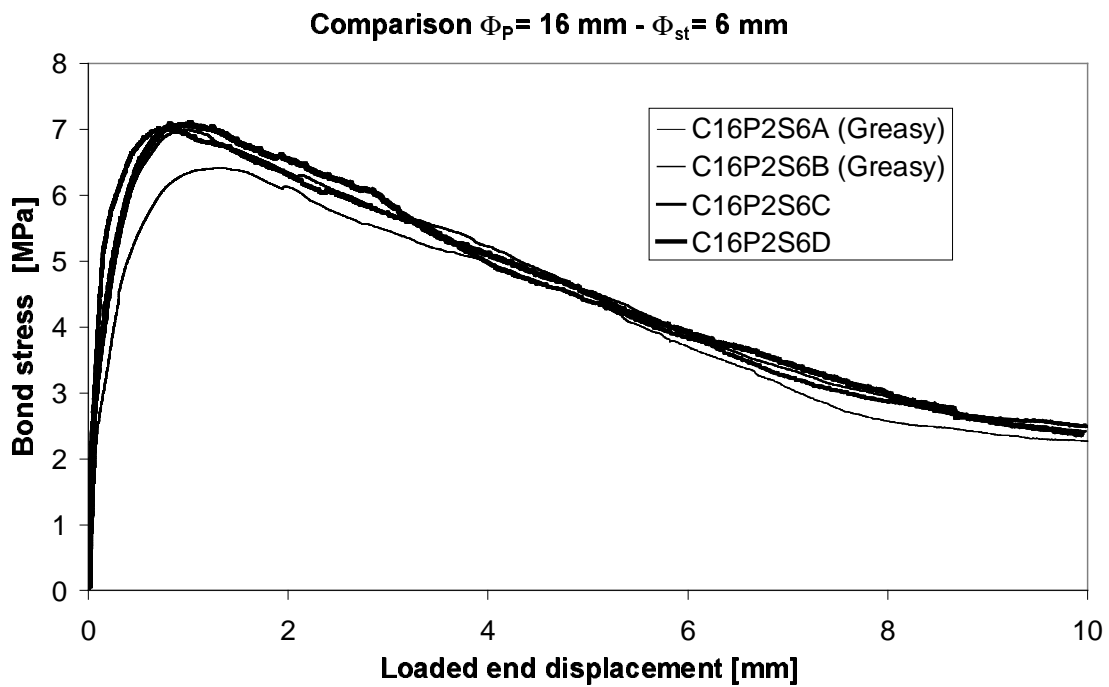


Figura 5. Diagramma dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra rilevato dai provini con armatura principale $\phi 16$ e staffe $\phi 6$.

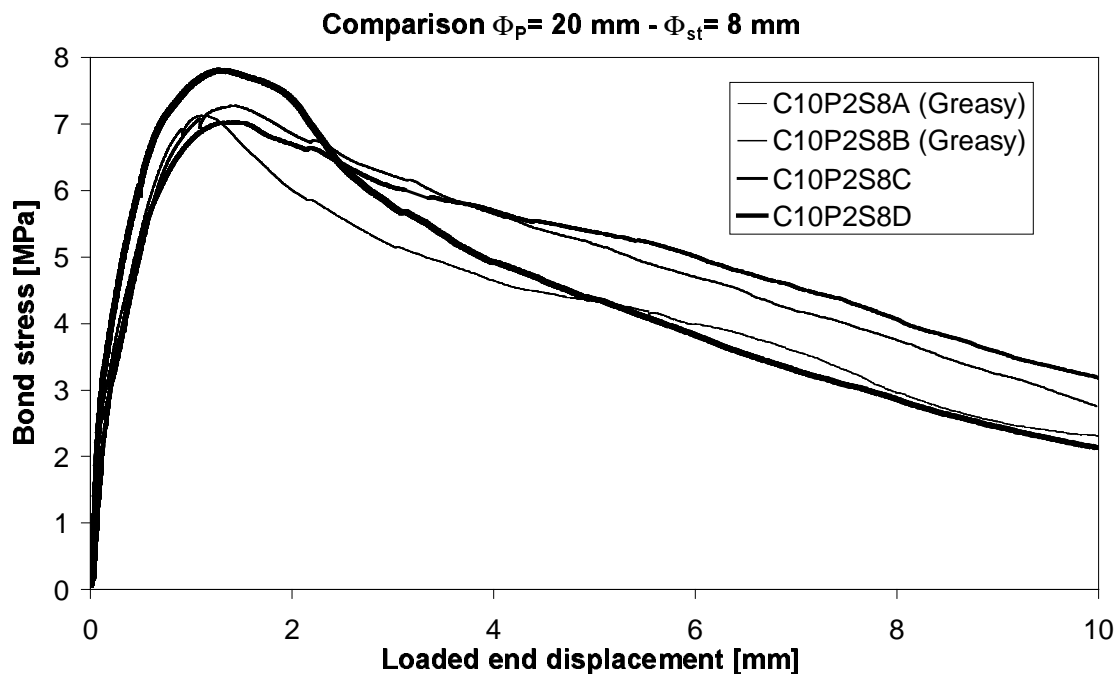


Figura 6. Diagramma dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra rilevato dai provini con armatura principale $\phi 20$ e staffe $\phi 8$.

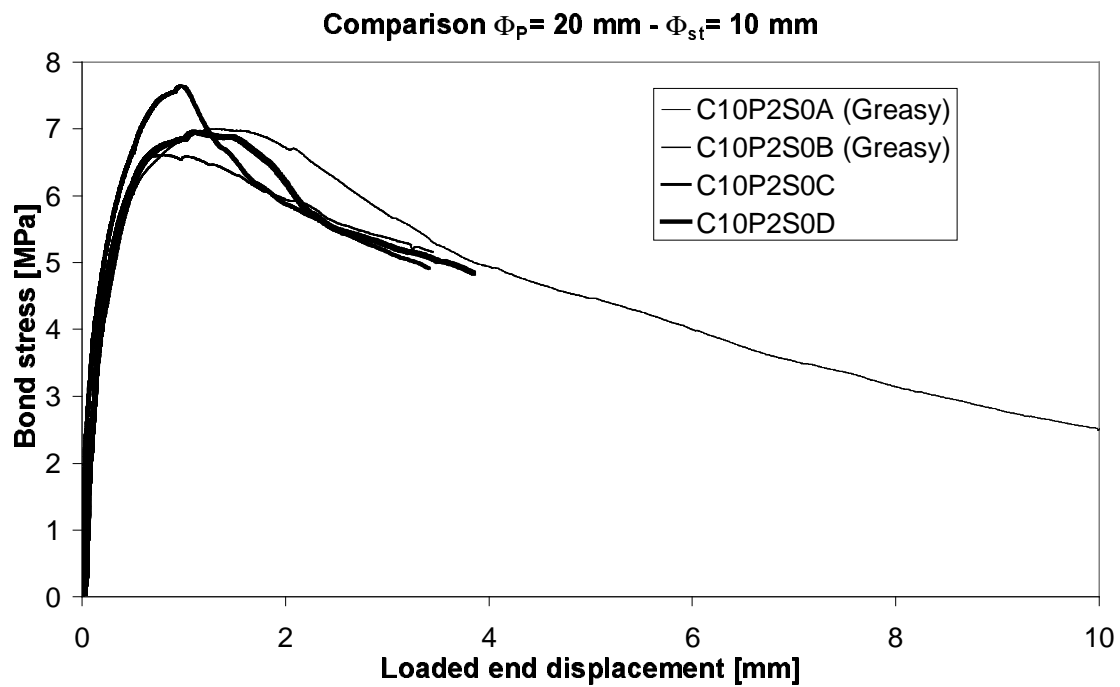


Figura 7. Diagramma dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento all'estremo caricato della barra rilevato dai provini con armatura principale $\phi 20$ e staffe $\phi 10$.

La Figura 8 riassume i valori della resistenza dell'aderenza misurata da tutti i provini testati. Si può notare che la differenza tra le barre unte e non è sempre molto modesta e spesso inferiore allo scarto evidenziato nelle figure precedenti tra le coppie di provini identici.

La resistenza dell'aderenza rilevata da tutti i provini testati, rappresentativi di situazioni reali con barre ancorate, è risultata sempre abbondantemente superiore al valore di esercizio ed ultimo fornito dalla Normativa Italiana (D.M. 9.1.1996) e dall'Eurocodice 2 per il calcestruzzo con resistenza cubica a compressione pari a circa 30 MPa.

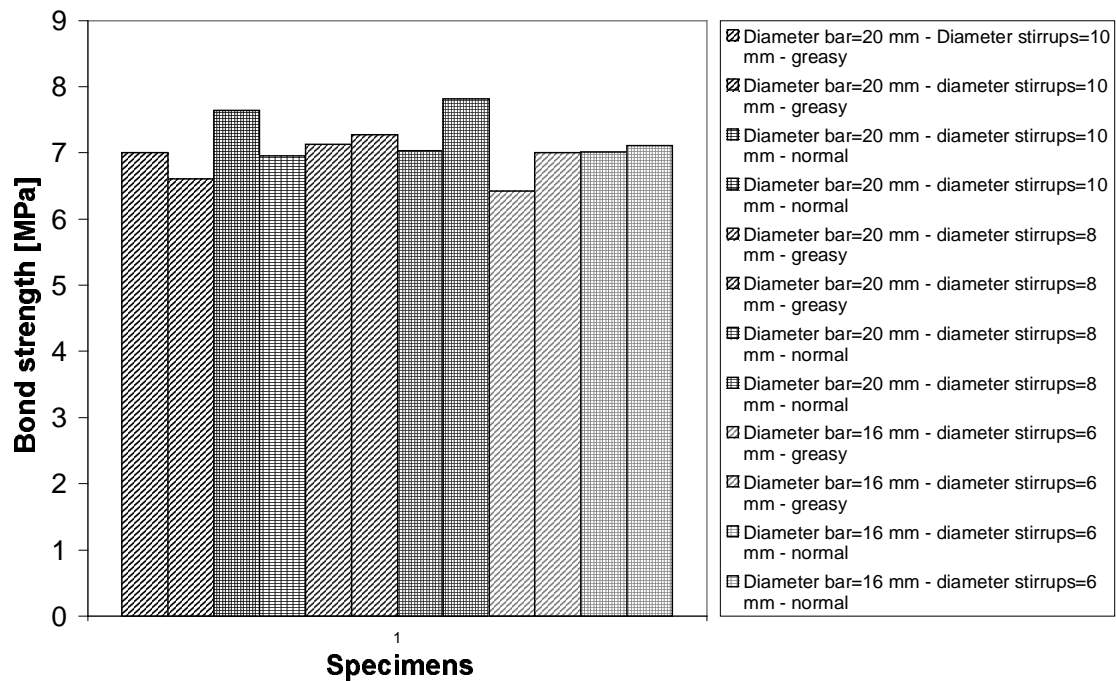


Figura 8. Resistenza dell'aderenza misurata da tutti i provini.

8. BIBLIOGRAFIA

Rilem/CEB/FIP recommendation (1979): Bond test for reinforcing steel - 1. Beam test (RC5) - 2. Pull-out test (RC6).

M.LL.PP., Decreto Ministeriale 9.1.1996, "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche".

ENV 1992-1-1: Eurocodice 2 "Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings", European Prestandard, Dicembre 1991.

Il Responsabile della ricerca

Prof. Ing. Giovanni Plizzari