



# Studio sperimentale della resistenza a spinotto di barre lisce nel calcestruzzo sottoposte ad azione combinata di taglio-trazione

Anthony Paderno<sup>a</sup>, Luca Cominoli<sup>a</sup>, Valentino Bolis<sup>a</sup>, Marco Preti<sup>a</sup>

<sup>a</sup> D.I.C.A.T.A.M. Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura,, Territorio, Ambiente e Matematica, University of Brescia, Via Branze 43, 25123 Brescia, Italy

*Keywords: RC Structures; smooth bar; interface; cracks, dowel action; sliding*

## ABSTRACT

L'articolo si focalizza sul comportamento a spinotto di barre di armature in acciaio all'interno del calcestruzzo, soggette ad azione combinata di taglio e trazione. Tale comportamento è tipico di barre di armatura longitudinali in zone critiche di elementi in calcestruzzo armato (c.a.) sottoposti ad azioni sismiche, dove il taglio nella barra per effetto spinotto è combinato allo sforzo assiale indotto dalla flessione o dalla trazione nell'elemento stesso. Il presente lavoro investiga sperimentalmente l'effetto di tale azione assiale nel ridurre la capacità resistente a taglio dello spinotto in termini di resistenza, associata al possibile snervamento della barra per sforzi assiali indotti dai cicli di flessione dell'elemento. Mentre il comportamento a taglio degli spinotti è ampiamente discusso in letteratura, pochi lavori risultano disponibili in merito all'interazione di tale comportamento con uno stato di sforzo di trazione e tali lavori fanno tipicamente riferimento al comportamento di barre nervate, per le quali il danneggiamento del calcestruzzo prodotto nel meccanismo di pull-out della barra gioca un ruolo fondamentale. In prima analisi, quindi, il presente lavoro si focalizza sul comportamento di barre lisce, tipologia molto ricorrente negli edifici costruiti in Italia prima degli anni '70, il cui comportamento risulta poco influenzato dal danneggiamento locale prodotto dal pull-out della barra. Diverse prove sperimentali sono state condotte su provini di barra inserita in blocchi di calcestruzzo ai quali è stata applicata una sollecitazione di taglio monotono lungo superfici di scorrimento preformate, in presenza di diversi livelli di azione nella barra, mantenuta costante durante la prova. I risultati hanno permesso di quantificare la riduzione di capacità resistente della barra per effetto spinotto al crescere dell'azione assiale imposta e hanno mostrato la stabilità della risposta anche per elevati livelli di scorrimento applicati. Infine, viene presentata un'interpretazione analitica dei risultati, ottenuta aggiornando un modello proposto in lavori precedenti in modo da tenere in considerazione l'azione combinata di taglio e trazione nella barra.

## 1 INTRODUZIONE

La sollecitazione sismica agente su di una struttura in calcestruzzo armato (CA) può generare un certo grado di danneggiamento, generalmente localizzato in corrispondenza delle zone in cui si attivano cerniere plastiche, le quali sono tipicamente chiamate a resistere ad un'azione combinata di taglio e flessione.

Come mostrato in (Fardis 2009), l'inversione del carico sollecitante, che si manifesta più volte durante un evento sismico, può generare fessure passanti (Figura 1), lungo la cui interfaccia si può attivare uno scorrimento indotto da azioni taglianti.

La resistenza nei confronti dello scorrimento lungo tale interfaccia è prevalentemente offerta da due contributi (Hofbeck et al. 1969); con

riferimento a Figura 2: (i) l'attrito o l'ingranamento degli inerti lungo la porzione compressa dell'interfaccia e (ii) il meccanismo a spinotto delle barre di armatura che attraversano la medesima.

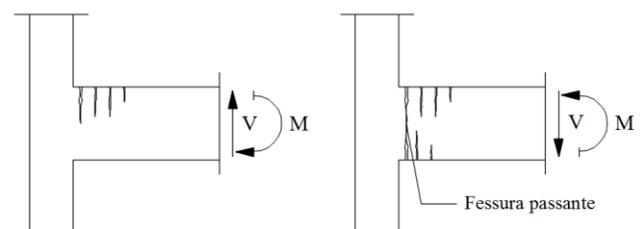


Figura 1. Fessurazione seguente sollecitazione ciclica della trave in zona di cerniera plastica, dettaglio per un nodo a 3 vie di un telaio piano.

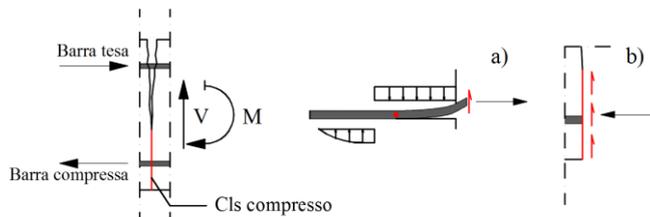


Figura 2. Identificazione del meccanismo resistente a spinotto (a) e attritivo (b) in una generica fessura.

Il primo meccanismo resistente è caratterizzato da una rigidità significativa e favorito dalla scabrezza tipica delle interfacce generate in seguito al fenomeno fessurativo. Qualora la fessura non risulti completamente aperta lungo la sezione trasversale, il meccanismo attritivo e d'ingranamento risultano quindi giocare un ruolo principale. La resistenza per effetto spinotto delle barre d'armatura è invece legata ad un meccanismo di natura flessionale e raggiunge il collasso in seguito alla formazione di una doppia cerniera plastica nei tratti di barra immersi nel calcestruzzo, a cavallo dell'interfaccia.

In presenza di cicli di deformazione in campo plastico (Fardis 2009), imposti dal sisma, il danneggiamento progressivo del calcestruzzo nell'intorno della fessura può ridurre la capacità del meccanismo attritivo della superficie di scorrimento; in queste situazioni la resistenza per meccanismo a spinotto assume un ruolo significativo. Qualora la fessura dovesse invece risultare completamente aperta, il contributo offerto dalle barre è l'unica fonte di resistenza nei confronti dello scorrimento.

Il comportamento a spinotto di barre d'armatura è un tema largamente studiato in letteratura (Friber 1940), (Dulacska 1972), (Paulay et al. 1974), (Mills 1975), (Vintzeleou and Tassios 1986), (Soroushian et al. 1986) e (Vintzeleou and Tassios 1987), sia mediante approcci sperimentali che analitici, tuttavia l'effetto dell'azione assiale sulla resistenza a taglio del meccanismo non è stato ancora completamente quantificato. Il presente articolo si pone quindi lo scopo di contribuire a quantificare tale effetto; l'approccio si può intendere come duale a quello sviluppato da (Maekawa and Qureshi 1996a) mediante una prova sperimentale, che ha messo in luce come una barra d'armatura, che attraversa un'interfaccia sottoposta a scorrimento, esibisce resistenze assiali degradanti al crescere dello scorrimento impresso.

Il lavoro è basato su una campagna sperimentale diretta all'osservazione di provini nei quali una barra in acciaio a superficie liscia, direttamente sottoposta a trazione, attraversa due interfacce, tra tre blocchi in calcestruzzo, lungo le quali viene imposto uno scorrimento relativo.

I risultati sperimentali ottenuti vengono in seguito confrontati con le previsioni fornite da formulazioni presenti in letteratura e con l'estensione del modello analitico di (Giuriani 2012), proposta con lo scopo di cogliere il fenomeno di interazione tra azione assiale e taglio.

Gli stessi risultati sono poi comparati anche con le formulazioni progettuali proposte nelle Norme Tecniche Italiane (NTC 2018) e nell'Eurocodice 8 (EC8 2005), per la verifica a taglio-scorrimento delle pareti sismoresistenti.

## 2 STATO DELL'ARTE

Fisicamente, il meccanismo a spinotto prevede che la barra, in opposizione allo scorrimento lungo l'interfaccia che attraversa, eserciti forti pressioni di rifollamento (Biolzi and Giuriani, 1990) sul calcestruzzo circostante. Tale meccanismo è influenzato dalla lunghezza dello spinotto; per spinotti sufficientemente lunghi, come nel caso di una barra d'armatura ben ancorata ai due lati della fessura e ad essa ortogonale, esso è governato dalla formazione di due cerniere plastiche flessionali, che attivano un meccanismo cinematicamente ammissibile. Matematicamente il fenomeno è descrivibile mediante la teoria di palo lungo caricato trasversalmente in un terreno coesivo (Broms 1965), oppure con un modello di trave su letto di molle alla Winkler. Con riferimento allo schema statico riportato in Figura 3, il problema è semplificabile grazie alla simmetria rispetto al piano dell'interfaccia ed è quindi possibile ricondursi ad una trave semi-infinita su di un letto di molle dal comportamento lineare o non lineare, (quest'ultimo qualora si voglia considerare il rifollamento del calcestruzzo). In questo schema, il carico concentrato rappresentante il taglio sull'interfaccia è applicato eccentricamente all'estremità, in corrispondenza del punto di flesso della deformata della barra. In letteratura sono disponibili diversi valori da attribuire alla rigidità del letto di molle, come riassunto in (Dei Poli et al. 1992); questi possono essere considerati costanti (Soroushian et al. 1987) oppure funzione del livello di danneggiamento del calcestruzzo (Brenna et al. 1990). Modelli più recenti (Maekawa and Qureshi 1996b, Soltani and Maekawa 2007) propongono legami non lineari, valutando in maniera analitica il grado di danneggiamento del calcestruzzo sottoposto ad elevate pressioni di rifollamento in una limitata zona adiacente l'interfaccia. In tutti i casi citati, la rigidità offerta dal calcestruzzo nel meccanismo resistente è funzione della sua resistenza a compressione e del diametro della barra; per

calcestruzzi e diametri ordinari i valori si attestano nel campo 100-300MPa/mm, come indicato dalle formulazioni riportate nei lavori sopra citati.

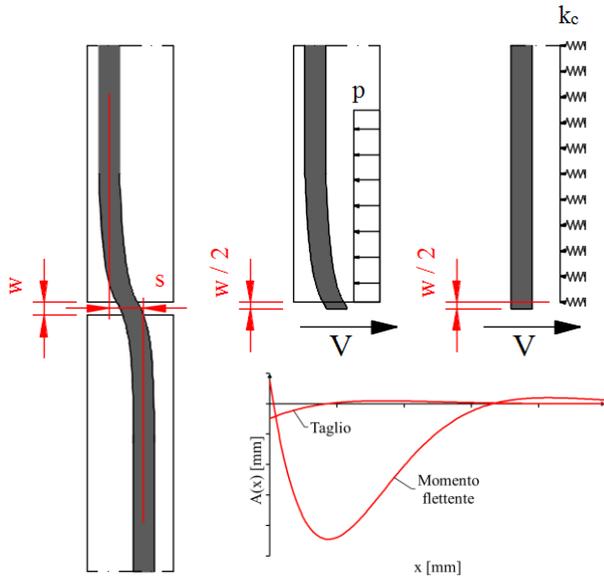


Figura 3. Schema di calcolo basato sulla teoria di trave su letto di molle ed andamento analitico delle azioni interne alla barra d'armatura.

Il modello di trave su letto di molle consente di calcolare le azioni sollecitanti in una specifica sezione della barra, da confrontare con la capacità resistente della stessa, definita secondo il criterio di snervamento adottato. In (Maekawa and Qureshi 1996b) viene proposta una tipologia di dominio in grado di valutare l'effetto combinato di azione assiale, taglio e momento flettente, agenti contemporaneamente in una generica sezione della barra. Tuttavia è opportuno osservare come la resistenza a taglio per effetto spinotto non possa essere valutata con riferimento ad una generica sezione; questa corrisponde infatti alla forza di taglio, misurata nel punto di flesso della barra in corrispondenza dell'interfaccia di scorrimento, che causa l'attivazione di un meccanismo cinematicamente ammissibile. Tale meccanismo prevede la plasticizzazione della barra per pressoflessione in due sezioni arretrate rispetto all'interfaccia (Gelfi e Giuriani 1987), (Giuriani 2012).

L'onere computazionale legato all'applicazione del modello di trave su letto di molle, associato ad un dominio di snervamento, risulta tuttavia significativo; per questo diversi autori hanno proposto formulazioni analitiche semplificate. (Dulacska 1972) propone la relazione (Eq. 1) per il calcolo della capacità ultima in presenza di sola azione tagliante.

$$V_u = 1.627 d_b^2 \sqrt{f_y f_c} \quad (1)$$

dove  $d_b$  è il diametro della barra considerata,  $f_c$  ed  $f_y$  sono la resistenza a compressione del calcestruzzo e la tensione di snervamento dell'acciaio.

(Vintzeleou and Tassios 1987) propongono una formulazione analoga (Eq. 2), basata sulla teoria dei pali lunghi in terreni coesivi soggetti a carichi trasversali (Broms 1965), e confermata sperimentalmente assumendo una resistenza a rifollamento del calcestruzzo di  $f_c^* = 5f_c$  (valore in accordo alle rilevanze sperimentali riportate in (Biolzi and Giuriani 1990)).

$$V_u = 1.300 d_b^2 \sqrt{f_y f_c} \quad (2)$$

Gli stessi autori hanno fornito anche una formulazione (Eq. 3) in grado di valutare il contributo dell'azione assiale, mediante un coefficiente correttivo che la rapporta a quella di snervamento  $\alpha = N/N_y$ .

$$V_u = 1.300 d_b^2 \sqrt{f_y f_c (1 - \alpha^2)} \quad (3)$$

(Gelfi e Giuriani 1987) propongono un modello costitutivo per le connessioni a piolo in travi miste, poi generalizzato nella proposta analitica di (Giuriani 2012), basata su uno schema equilibrato secondo il quale le tensioni di rifollamento del calcestruzzo sono in grado di equilibrare (Eq. 4) il taglio applicato in un tratto denominato Lunghezza Efficace ( $L_{eff}$ ), definita in (Eq. 5).

$$V_u = d_b f_c^* L_{eff} \quad (4)$$

$$L_{eff} = d_b \left[ -\frac{a}{d_b} + \sqrt{\left(\frac{a}{d_b}\right)^2 + \frac{1}{3} \frac{f_y}{f_c^*}} \right] \quad (5)$$

dove  $a$  indica l'eccentricità d'applicazione del carico (pari a  $w/2$  in Figura 3).

Si precisa che tutte le formulazioni riportate sono relative al collasso del meccanismo raggiunto per plasticizzazione della barra d'acciaio in presenza di calcestruzzo sottoposto a pressioni di rifollamento, non sono contemplate possibili rotture per splitting.

### 3 CAMPAGNA SPERIMENTALE

La campagna sperimentale qui presentata ha lo scopo di valutare il taglio resistente offerto dalla barra in acciaio per meccanismo a spinotto, in presenza di diversi valori di carico assiale di

trazione e di diversi livelli di scorrimento lungo l'interfaccia.

A tal fine è stato realizzato il provino riportato in Figura 4, costituito da tre blocchi di calcestruzzo di forma prismatica, divisi da due interfacce ed interamente attraversato da una barra d'armatura a superficie liscia.

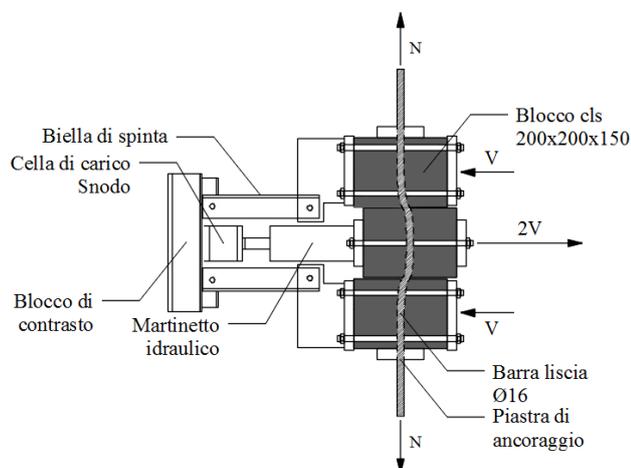


Figura 4. Schematizzazione del provino e del banco di carico.

Le prove sono state effettuate controllando il carico assiale della barra ed imprimendo lo scorrimento relativo tra il blocco centrale ed i due laterali. Sono stati testati 9 campioni sotto l'azione di un carico di taglio impresso in un solo verso, in presenza dei diversi valori di sforzo assiale scelti (Tabella 1) e mantenuti costanti durante le diverse prove.

Trattando un meccanismo di natura flessionale si prevede che la resistenza nei confronti dello scorrimento diminuisca al crescere del carico assiale imposto, il quale va a ridurre la risorsa disponibile per la resistenza a flessione della barra.

Tabella 1. Nomenclatura delle famiglie di provini, con indicazione del numero di campioni testati e l'azione di trazione di prova assoluta e normalizzata (rispetto alle capacità della barra).

Famiglia provini	Numero provini	Azione assiale	Azione ass. norm.
P00	3	00kN	00%
P60	2	40kN	60%
P90	2	60kN	90%
P98	2	65kN	98%

### 3.1 Concezione e geometria del provino

I prismi di calcestruzzo che compongono il provino presentano una sezione trasversale quadrata di 200x200mm e altezza pari a 150mm. L'ampiezza delle fessure che li separano è pari a 3mm; la barra è posizionata al centro della sezione retta del provino e attraversa ognuno dei tre volumi di calcestruzzo. Questi ultimi risultano confinati da una terna di staffe del diametro di 10mm,

realizzate con acciaio d'armatura ad aderenza migliorata B450C. Tale confinamento è destinato ad evitare rotture per splitting del provino, garantendo sovraresistenza e duttilità al calcestruzzo in cui è annessa la barra.

Lo spinotto investigato è costituito da una barra in acciaio a superficie liscia di diametro 16mm; tale scelta è giustificata dall'intento di limitare il danno da pull-out nel calcestruzzo, che si verificherebbe in presenza di scorrimento di una barra nervata in seguito all'applicazione di un carico di trazione. Tale danneggiamento porterebbe all'alterazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo circostante la barra, il quale gioca un ruolo principale nella definizione del meccanismo a spinotto. D'altro canto, il provino adottato risulta rappresentativo per le strutture in CA realizzate fino agli anni '70, nelle quali venivano prevalentemente impiegati acciai d'armatura a superficie liscia.

### 3.2 Caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati

I 9 provini testati sono stati realizzati con una sola tipologia di acciaio costituente la barra centrale, i cui parametri meccanici sono riportati in Tabella 2 in termini di valori di forze ( $N_y$ ,  $N_u$ ) e tensioni ( $f_y$ ,  $f_u$ ) di snervamento e rottura e di allungamento a rottura ( $A_{gt}$ ).

Tabella 2. Proprietà meccaniche della barra d'acciaio.

$N_y$ kN	$N_u$ kN	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	$A_{gt}$ %
66	98	329	490	19.90

La composizione della miscela di calcestruzzo è riportata in Tabella 3, il cemento utilizzato è un Portland di classe 42.5R, i diametri minimo e massimo per le tre classi di aggregato impiegato sono rispettivamente:  $D_1$  (0mm-4mm),  $D_2$  (4mm-10mm),  $D_3$  (8mm-20mm).

Tabella 3. Mix design del calcestruzzo.

Cemento Kg/m <sup>3</sup>	Acqua Kg/m <sup>3</sup>	$D_1$ Kg/m <sup>3</sup>	$D_2$ Kg/m <sup>3</sup>	$D_3$ Kg/m <sup>3</sup>
340	183	176	63	110

I primi 6 campioni sono stati realizzati in una fase di getto diversa rispetto ai restanti 3; la resistenza cilindrica media ottenuta dal primo getto è pari a 34.03MPa, la seconda a 33.35MPa. I valori di modulo elastico ottenuti per le due serie, secondo UNI EN 12390-13, sono rispettivamente pari a 34.03GPa e 32.55GPa. Data la minima differenza tra le proprietà meccaniche dei due

getti, di seguito si propone un confronto diretto tra i risultati delle prove sperimentali sui nove campioni testati.

### 3.3 Banco di carico ed organizzazione della prova

Lo sforzo di trazione nella barra è stato introdotto ammorstandola direttamente alle sue estremità, con l'ausilio di ganasce oleodinamiche che la vincolano per attrito. La superficie liscia della barra limita la nascita di sforzi d'aderenza tra la stessa ed il circostante calcestruzzo, quest'ultimo non gioca quindi ruolo nel trasferimento del carico assiale, ma solamente in quello del carico trasversale. Nel caso specifico la prova è stata effettuata mantenendo costante il carico assiale lungo l'intera durata d'applicazione della forza di taglio. I carichi ai quali sono state effettuate le prove corrispondono rispettivamente a 0% , 60%, 90% e 98% della forza che causa lo snervamento della barra, in dettaglio sono stati testati 3 provini in assenza di carico assiale e 2 per ognuno dei tre livelli di azione indicati (Tabella 1).

Il banco di taglio (Figura 4) è costituito da camicie d'acciaio in grado di abbracciare due delle quattro facce verticali di ognuno dei tre prismi, tra loro connesse, a coppie, mediante l'ausilio di barre filettate adiacenti alle facce libere del campione e parallele alla direzione di applicazione del taglio. Sulle piastre esterne è prevista una connessione per bielle in acciaio, la cui cerniera è allineata al baricentro del piano d'interfaccia tra i blocchi; tali elementi si collegano infine ad un contrasto, sul quale agisce un martinetto idraulico controllato da una pompa idraulica. La spinta esercitata dal martinetto consente lo scorrimento relativo del blocco centrale rispetto ai laterali. Il banco di carico è simmetrico, al fine di limitare eccentricità che possano produrre rotazioni dei blocchi, portando alla chiusura della fessura ed al conseguente trasferimento degli sforzi di taglio per meccanismi attritivi.

Sulla base delle previsioni di taglio resistente fornite dalla letteratura, in funzione del carico assiale, è stato possibile stimare la forza tagliante di snervamento nominale e determinare fasi intermedie di prova, a cui impostare cicli di carico e scarico preliminari al raggiungimento del carico limite (come visibile nell'esempio di Figura 7).

### 3.4 Strumentazione

Mediante la strumentazione riportata in Figura 5, durante la prova sono state monitorate sia deformazioni verticali (per controllare una possibile chiusura della fessura associata alla rotazione dei prismi) che orizzontali (scorrimenti).

L'attenzione è stata posta in particolare al legame taglio-scorrimento lungo le due interfacce.

Assialmente il provino è strumentato con quattro trasduttori di spostamento potenziometrici (V1-V4-V7-V9 e V2-V5-V8-V10) posizionati a cavallo di ciascuna interfaccia e con altri due fissati agli estremi dei prismi di calcestruzzo esterni, (V3 e V6). Lo scorrimento è invece monitorato mediante due estensimetri potenziometrici a molla, posizionati su ognuna delle due interfacce di scorrimento (S1 ed S3 per la superiore, S2 ed S4 per l'inferiore).

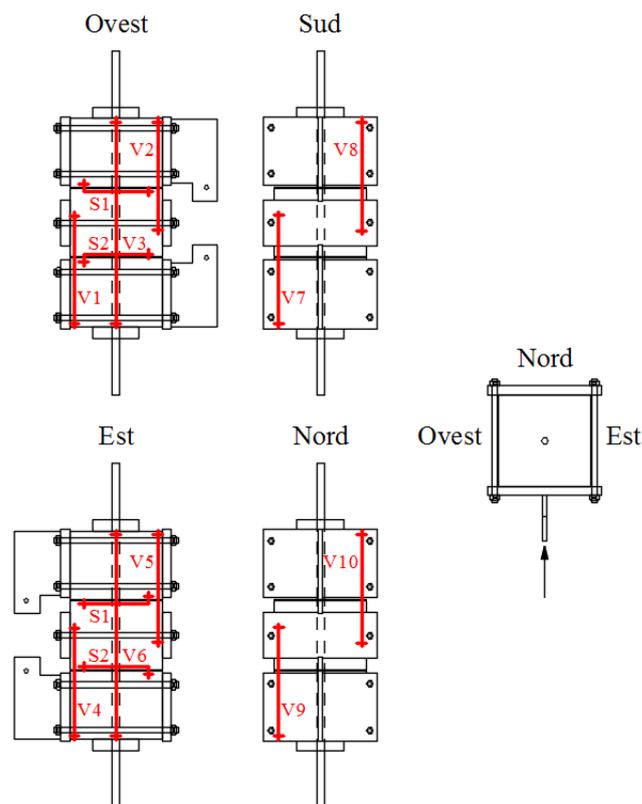


Figura 5. Disposizione della strumentazione sul provino.

La disposizione dei 14 strumenti è tale da poter mediare le rotazioni che nascono nel provino su tre piani tra di loro ortogonali; lo scorrimento lungo l'interfaccia viene dalla media dei due strumenti collocati su due dei suoi lembi, mentre le possibili rotazioni su assi orizzontali, che potrebbero portare alla chiusura di fessura, sono controllate dalla lettura dei quattro strumenti verticali predisposti.

Il carico assiale è controllato dalla stessa macchina di prova, mentre l'intensità del carico di taglio è monitorata mediante una cella di carico su cui il martinetto esercita la sua spinta.

## 4 RISULTATI SPERIMENTALI

Vengono riportate in questo capitolo le curve che rappresentano l'andamento del taglio

applicato su una singola interfaccia in funzione dello scorrimento letto sulla stessa, distinguendo i quattro diversi livelli di sforzo assiale impresso, rispettivamente pari a:  $0.00N_y$ ,  $0.60N_y$ ,  $0.90N_y$  e  $0.98N_y$ .

La simmetria del provino e del banco di carico a taglio fanno sì che la forza introdotta dal martinetto, che genera lo scorrimento del blocco centrale di calcestruzzo rispetto ai due estremi, si divida in eguale misura sulle due interfacce di scorrimento. Una volta raggiunto il carico di snervamento in una delle due interfacce, per formazione di una doppia cerniera plastica nella barra a cavallo della stessa (Figura 6), gli scorrimenti si concentrano prevalentemente su di essa. A causa di quanto osservato si specifica che l'elaborazione dei dati sperimentali è stata effettuata con riferimento alla sola interfaccia che esibisce per prima l'attivazione dello snervamento, ovvero un marcato cambio di pendenza nella relativa curva di risposta taglio ( $V_d$ ) scorrimento ( $s$ ).

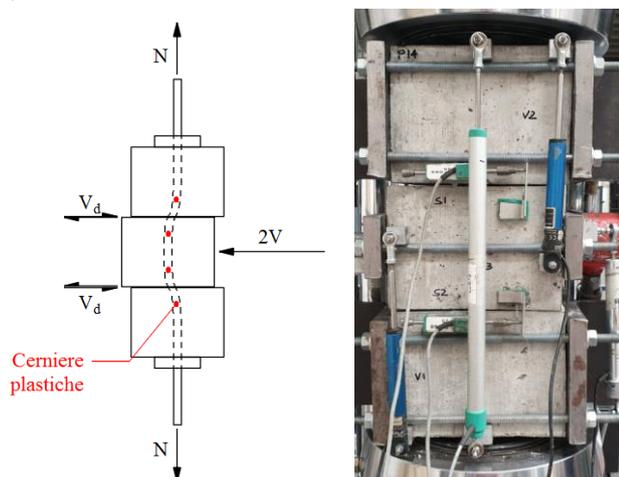


Figura 6. Formazione del meccanismo di collasso a spinotto: schema concettuale e provino reale.

#### 4.1 Curve Taglio-Scorrimento

Un esempio di curva ottenuta su di un'interfaccia di scorrimento, in assenza di azione assiale nella barra, è riportato in Figura 7. Nella successiva Figura 8 sono invece riportati gli involuipi dei diversi cicli di carico e scarico eseguiti, intesi come valori medi tra quelli ottenuti su diversi provini testati a parità di azione assiale. Per i provini P00 e P60, il legame forza scorrimento risulta ben approssimabile da un andamento bilineare; è quindi possibile definire un primo ramo elastico di risposta ed un successivo ramo caratterizzato da una rigidità minore, a seguito dello snervamento. Per i carichi assiali maggiori il comportamento bilineare è meno rappresentativo della risposta sperimentale, soprattutto per il caso P98 (azione assiale prossima

a quella di snervamento), il quale potrebbe essere meglio approssimato con un andamento lineare.

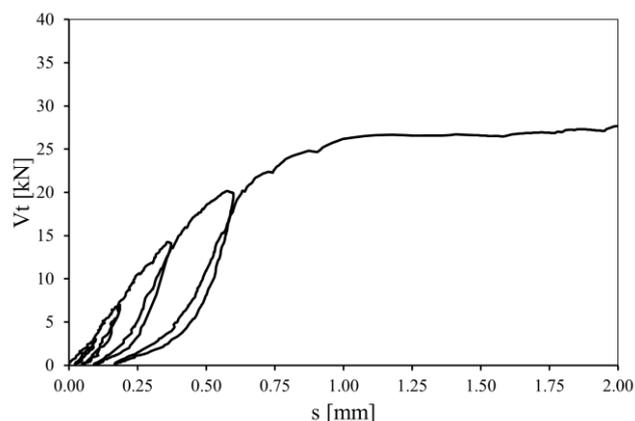


Figura 7. Esempio di cicli di carico e scarico per l'interfaccia di un provino in controllo di carico assiale nullo (P00).

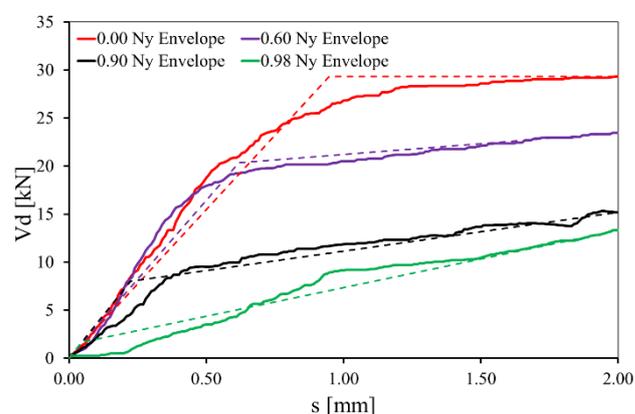


Figura 8. Curve medie di risposta per quattro diversi valori di azione assiale e relative bilinearizzazioni.

L'influenza dei diversi carichi assiali sulla risposta a taglio è ben visibile osservando il punto in cui cambia la pendenza delle curve sperimentali (Figura 8), associabile allo snervamento, e la pendenza del secondo ramo delle stesse curve. Aumentando l'intensità dell'azione assiale, le sezioni dell'intera barra sono soggette ad uno sforzo di trazione che limita le capacità flessionali delle stesse, le quali raggiungono lo snervamento in corrispondenza delle sezioni in cui si ha il massimo momento sollecitante legato al meccanismo in analisi. Questo fenomeno fa sì che le cerniere plastiche necessarie alla formazione del meccanismo cinematico, si sviluppino per sollecitazioni di taglio  $V_d$  inferiori, come ben visibile nelle curve riportate. A livelli di scorrimento superiori l'azione assiale offre invece un contributo resistente al taglio, che conferisce un carattere incrudente al secondo ramo della risposta  $V_d$ - $s$ ; tale contributo è noto in letteratura come effetto fune (Paulay et al. 1974) ed è schematizzato, con particolarizzazione al caso in esame, in Figura 9.

Con riferimento al tratto iniziale delle curve sperimentali è possibile concludere che i diversi carichi assiali non influenzano significativamente la rigidità iniziale del meccanismo, la quale resta prevalentemente legata al diametro della barra ed alle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo, come dimostrato in assenza di carico assiale in letteratura (Soroushan et al. 1987), (Dei Poli et al. 1992), (Soltani and Maekawa 2007). La risposta dei provini P98, soggetti al maggiore carico assiale, presenta invece una rigidità molto bassa già a partire dai piccoli livelli di scorrimento, a testimoniare che la risorsa disponibile nei confronti delle azioni trasversali per meccanismo a spinotto è molto limitata. La resistenza esibita a scorrimenti maggiori sembra infatti imputabile al solo effetto fune.

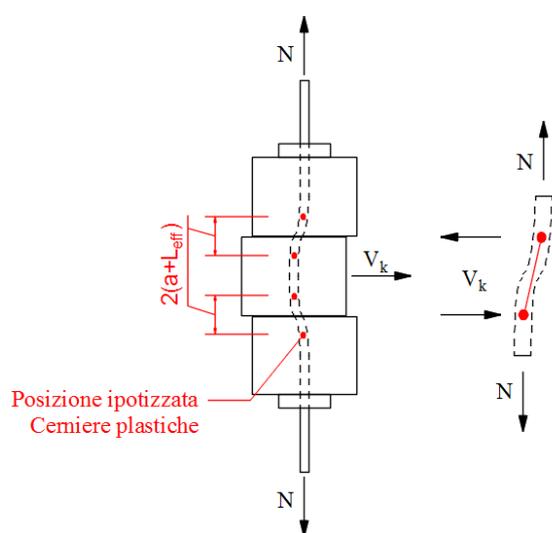


Figura 9. Interpretazione dell'effetto fune, con posizione delle cerniere plastiche dettata dalla lunghezza efficace prevista nel modello di (Giuriani 2012).

Per tutti i provini è stato osservato che, effettuando cicli di carico e scarico (Figura 7), a livelli di scorrimento precedenti lo snervamento della barra, gli spostamenti residui sono modesti. La curva di ricarico ripercorre quella di scarico, fino al raggiungimento del taglio di picco del ciclo precedente. Superato tale valore la curva di risposta manifesta una pendenza che va via via degradando al crescere dello scorrimento imposto.

Il sistema non ha mostrato danneggiamenti tali da causare perdite di carico, tanto che le curve  $V_d-s$  non mostrano rami degradanti, caratterizzati da pendenze negative.

## 5 MODELLI EMPIRICI ED ANALITICI

### 5.1 Bilinearizzazione delle curve sperimentali

Al fine di attribuire un valore al carico di snervamento associato al cambio di pendenza

esibito nelle curve sperimentali ed al relativo livello di scorrimento, è stata eseguita, in prima analisi, una procedura di bilinearizzazione delle curve. Tale scelta si è rivelata necessaria per poter confrontare i risultati sperimentali con le previsioni del carico limite disponibili in letteratura. La procedura è basata sull'uguaglianza delle energie dissipate, ovvero dall'uguaglianza delle aree sottese dalla curva sperimentale e dalla bilineare ideale, effettuata considerando un livello massimo di scorrimento arbitrariamente scelto pari a 2mm, indicativamente pari al doppio dello scorrimento registrato allo snervamento dei provini P00. Al fine di applicare la procedura in presenza di un comportamento incrudente (P60, P90 e P98) è necessario determinare una rigidità di riferimento pre o post-snervamento. In base a quanto osservato sulle curve sperimentali, si è deciso di calibrare il valore della rigidità pre-snervamento sui dati ottenuti in assenza di carico assiale e di usarli come riferimento anche per le restanti curve; per quest'ultime è stato poi sommato un contributo irrigidente legato all'azione dell'effetto fune, calcolato sullo schema riportato in Figura 9.

In Figura 8 è visibile come, per i provini P00 e P60, il primo ramo della bilineare equivalente sottostimi la rigidità iniziale del provino, mentre per valori di trazione superiori si ha un'evidente sovrastima. In questi ultimi casi l'effetto fune costituisce infatti gran parte della resistenza offerta dal meccanismo a spinotto. In corrispondenza del massimo carico assiale testato, prossimo a quello di snervamento della barra (98%  $N_y$ ), la curva bilineare risulta poco rappresentativa e fornisce un valore di resistenza convenzionale.

### 5.2 Estensione del modello analitico $V_d-s$ proposto da (Giuriani 2012)

Il confronto effettuato mostra come l'indicazione empirica semplificata (non considera eccentricità del carico) di (Vintzeleou and Tassios 1987) sovrastimi la capacità di resistenza a taglio per meccanismo a spinotto. Al contrario, una significativa sottostima è offerta dall'applicazione del complesso modello analitico di trave su suolo elastico, associato ad un dominio di snervamento.

Per ottenere una previsione più realistica della resistenza, viene qui proposta un'estensione del modello analitico proposto in (Giuriani 2012), la quale consente di considerare il ruolo dell'azione assiale presente nella barra attraverso le formulazioni (Eq. 6 - 7 - 8), dove  $N_s$  è l'azione

assiale sollecitante ed  $A_m(N_s)$  è la sezione disponibile per il trasferimento del momento flettente in presenza della medesima azione (Figura 10).

L'approccio proposto si basa su uno schema di calcolo del momento resistente della barra ( $M_y(N_s)$ ), associato ad un'area reagente ridotta per effetto della presenza di un'azione assiale che impegna parte della sezione. La riduzione del momento resistente comporta di conseguenza una riduzione della lunghezza efficace ( $L_{eff}(N_s)$ ), rispetto al caso di azione sollecitante di solo taglio (Eq.5). Di conseguenza anche il carico ultimo, valutato mediante l'Eq.4, risulta anch'esso ridotto. In conclusione, definite le grandezze geometriche riportate in Figura 10, è possibile valutare la resistenza a taglio del meccanismo in funzione di un determinato valore di carico assiale presente nella barra.

La previsione fornita dalla formulazione proposta è riportata in Tabella 4 (colonna  $V_g$ ) e nel dominio grafico riportato in Figura 11.

$$z = \frac{C[R^2 + (R - H)^3]}{3A_m(N_s)} \quad (6)$$

$$M_y(N_s) = A_m(N_s)f_yz \quad (7)$$

$$L_{eff}(N_s) = -a + \sqrt{a^2 + \frac{2M_y(N_s)}{2Rf_{cc}}} \quad (8)$$

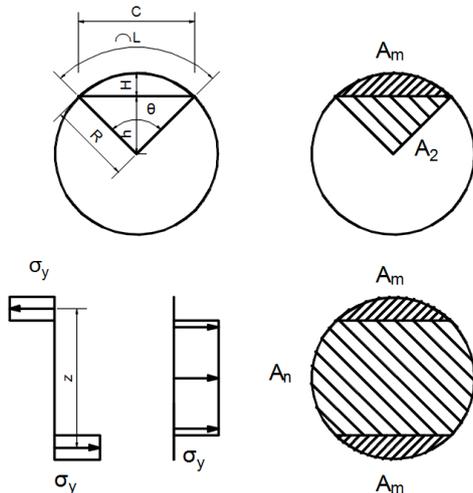


Figura 10. Distribuzione plastica di tensioni nella sezione retta circolare della barra d'armatura.

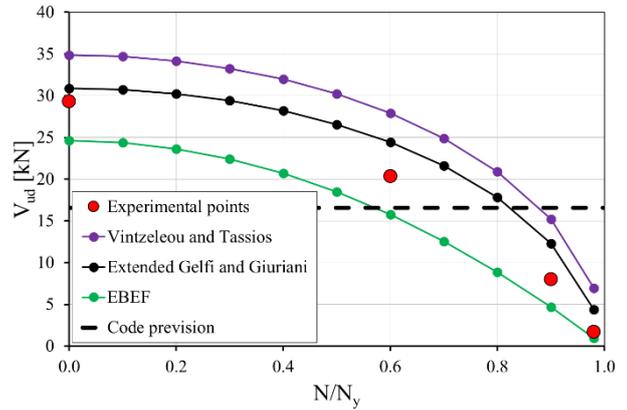


Figura 11. Dominio Taglio-Azione assiale per una barra d'armatura che attraversa un'interfaccia di scorrimento, particolarizzato alla geometria ed alle caratteristiche meccaniche del provino analizzato.

Tabella 4. Confronto tra il valore di carico limite sperimentale con le previsioni disponibili in letteratura.

$N$	$V_{bil}$	$V_{vt}$	$V_{ebef}$	$V_g$	$V_{0.2mm}$	$V_{code}$
$N_y$	KN	KN	KN	KN	KN	KN
0.00	29.33	34.88	24.63	30.87	18.36	
0.60	20.35	27.90	15.76	24.43	17.82	
0.90	8.03	15.20	4.68	12.30	9.55	16.50
0.98	1.69	6.94	0.98	4.39	3.47	

### 5.3 Confronto tra i risultati sperimentali e i modelli di letteratura

I risultati ottenuti dalla bilinearizzazione, in termini di carico di snervamento  $V_{bil}$ , sono riportati in Tabella 4, confrontati con le previsioni fornite da letteratura. Si specifica che la formulazione di (Vintzeleou and Tassios 1987)  $V_{vt}$  non prevede il contributo legato all'eccentricità del punto di applicazione del carico, considerato invece nel modello di trave su suolo elastico ( $V_{ebef}$ ) a cui è applicato il dominio di snervamento proposto da (Maekawa and Qureshi 1996b); per quest'ultimo modello è stata considerata la rigidità del letto di molle proposta da (Soltani and Maekawa 2007).

Nell'ultima colonna di Tabella 4 è inoltre possibile vedere la riduzione di resistenza, in corrispondenza dei diversi valori di azione assiale applicati, misurata in corrispondenza di un valore di scorrimento pari a 0.5mm ( $V_{0.5mm}$ ). Tale confronto conferma che l'influenza dell'azione assiale, sulla resistenza del meccanismo a spinotto, diviene significativo solo oltre una certa soglia. Ad esempio, la resistenza a taglio del provino P60 risulta pari al 97% di quella mostrata da P0, per il provino P90 la resistenza si riduce invece a circa il 50% di quella registrata in assenza di trazione (P0).

Per la verifica a taglio-scorrimento delle pareti sismoresistenti, il valore di resistenza associato al

meccanismo a spinotto delle barre longitudinali è quantificato dalle norme tecniche italiane NTC 2018) e dall'Eurocodice 8 (EC8 2005) mediante le due formulazioni riportate di seguito, che per il caso in esame forniscono valori pari a 27.40kN e 16.50kN.

$$V_{dd,1} = 1.30 \sum A_{sj} \sqrt{f_c f_y} \quad (9)$$

$$V_{dd,1} = 0.25 f_y \sum A_{sj} \quad (10)$$

Il valore progettuale (il minimo dei due calcolati) è riportato nel diagramma di Figura 11 e in Tabella 4 ( $V_{code}$ ). Tale valore tende a sovrastimare la resistenza di snervamento nominale per azioni assiali prossime allo snervamento per trazione della barra. Il valore di resistenza normativo può comunque essere raggiunto, grazie al contributo dell'effetto fune, a costo di scorrimenti superiori ai 2mm (2.52mm per P90 e 2.99mm per P98).

## 6 CONCLUSIONI

L'articolo presenta i risultati di una campagna sperimentale finalizzata a valutare l'effetto dell'azione assiale sulla resistenza a taglio per effetto spinotto di barre d'armatura a superficie liscia, che attraversano una fessura ortogonale soggetta a scorrimento. I risultati ottenuti hanno permesso di trarre le seguenti conclusioni:

1. Valori crescenti di carico assiale di trazione nella barra riducono progressivamente, fino ad annullare, la resistenza a taglio associata al meccanismo flessionale del comportamento a spinotto.
2. A grandi livelli di scorrimento l'azione assiale di trazione garantisce una risposta incrudente stabile, legata all'azione del cosiddetto "effetto fune".
3. L'estensione del modello analitico di (Giuriani 2012) al caso di barra sottoposta ad azione combinata di taglio-trazione, consente di interpretare il trend di riduzione della resistenza a taglio del meccanismo a spinotto, per effetto della presenza nella barra di un'azione di trazione.
4. All'aumentare dell'azione assiale la risposta sperimentale taglio-scorrimento si allontana da un comportamento idealmente elastoplastico: perde gradualmente di rilevanza il ramo pre-snervamento a favore del secondo ramo incrudente, governato dall'effetto fune.

La rilevanza dell'azione assiale suggerisce la messa a punto di formulazioni progettuali che ne considerino esplicitamente gli effetti, al fine di evitare la sovrastima della resistenza progettuale delle barre d'armatura per effetto spinotto.

Il presente studio si pone come primo step all'interno di un più articolato programma di ricerca inerente allo studio del comportamento a spinotto di barre soggette ad azione assiale. Futuri lavori saranno infatti indirizzati a cogliere il fenomeno in presenza di un'azione combinata ciclica di taglio ed azione assiale; ulteriori approfondimenti sperimentali saranno inoltre rivolti allo studio del fenomeno in presenza di barre ad aderenza migliorata, al fine di evidenziare il ruolo della nervatura nel danneggiamento del calcestruzzo circostante ad essa, per fenomeno di pull-out.

## BIBLIOGRAFIA

- Biolzi, L., Giuriani, E., 1990. Bearing Capacity of a Bar Under Transversal Loads, *Materials & Structures*, **23**,449-456.
- Brenna, A., Dei Poli, S., Di Prisco, M., 1990. Dowel Action: Some Experimental and Theoretical Results Regarding Special Concretes, *Studi e Ricerche, School of the Design of R/C Structures, Milan University of Technology*, V.11-89 pp. 321-380.
- Broms, B. B. 1965. Design of laterally loaded piles. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **91**(3),79-99.
- EC8. (2005). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings.
- Dei Poli, S., Di Prisco, M., Gambarova, P.G., 1992. Shear Response, Deformations, and Subgrade Stiffness of a Dowel Bar Embedded in Concrete, *ACI Structural Journal*, **89**, No. 6.
- Dulacska, H., 1972. Dowel Action of Reinforcement Crossing Cracks in Concrete, *ACI Journal, Proceedings* V. 69, No. 12.
- Fardis, M. N., 2009. *Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings*, Springer.
- Friberg, B. F., 1940. Design of dowels in transverse joints of concrete pavements, *Transactions, ASCE* 105:1076-1116.
- Gelfi, P. and Giuriani, E., 1987. *Modello Teorico del Legame Costitutivo per le Connessioni a Piolo*, Studi e Ricerche Vol. 9.
- Giuriani, E., 2012. *Consolidamento degli edifici storici*, UTET Scienze Tecniche.
- Hofbeck, J. A. Ibrahim, I. O. Mattock A. H., 1969. Shear Transfer in Reinforced Concrete, *ACI Journal*, **66**(2)-119-28.
- Maekawa, K. and Qureshi, J., 1996a. Embedded Bar Behavior in concrete under combined axial pullout and transverse displacement, *J. Materials, Conc. Struct., Pavements.*, **532**, V – 30, 183-195.
- Maekawa, K., Qureshi, J., 1996b. Computational Model for Reinforcing Bar Embedded in Concrete Under Combined Axial Pullout and Transverse Displacement, *J. Materials, Conc. Struct., Pavements.*, **538**, V – 31, 227-239.

- Mills, G. M., 1975. A partial kinking yield criterion for reinforced concrete slabs, Magazine of Concrete Research. Vol. 27, No. 90. pp. 13-22.
- NTC. (2008). Ministry Decree, January 14th, 2008. Nuove norme tecniche per le costruzioni (New technical codes for construction) [in Italian].
- Paulay T. Priestley M. J. N., 1992. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, John Wiley and Sons Inc.
- Paulay, T. Park, R. Phillips M. H., 1974. Horizontal construction joints in cast-in-place reinforced concrete, shear in reinforced concrete. ACI Special Publications, SP 42-27(2)599-616.
- Rasmussen, B. H., 1963. The carrying capacity of transversely loaded bolts and dowel embedded in concrete, Bygningstatiske Meddelelser. Vol 34, No. 2.
- Soltani, M., Maekawa, K., 2007. Path Dependent Mechanical Model for Deformed Reinforcing Bars at RC Interface Under Coupled Cyclic Shear and Pullout Tension, Engineering Structures, 30, 1079-1091.
- Soroushian, P., Obaseki, K., Rojas, M. C., 1987. Bearing Strength and Stiffness of Concrete under Reinforcing Bars, ACI Materials Journal, 84-M19.
- Soroushian, P., Obaseki, K., Rojas, M. C., Sim, J., 1986. Analysis of Dowel Bars Acting Against Concrete Core, ACI Materials Journal, 83-59.
- UNI EN 12390-13. Testing Hardened Concrete – Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression, ICS 91.100.30.
- Vintzeleou, E. N., Tassios, T. P., 1986. Mathematical models for dowel actions under monotonic and cyclic conditions, Magazine of Concrete Research. Vol. 38, No. 134,
- Vintzeleou, E. N., Tassios, T. P., 1987. Behaviour of Dowels Under Cyclic Deformations, ACI Structural Journal, 84, No. 1, 18-30.