



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BERGAMO

Centro di servizio di Ateneo LABORATORIO DI INGEGNERIA

LABORATORIO PROVE MATERIALI

Via Galvani 2, 24044 DALMINE

Tel. 035/2052347/383/339 Fax 035/2052090

P.IVA 01612800167 C.F.80004350163

## Prove su connettori per il collegamento tra parete muraria e soletta in c.a. per rinforzo strutturale e sismico

Rapporto n. 465

Dalmine, 22 dicembre 2017

Revisione n. 1 del 20 febbraio 2018

Il direttore del laboratorio

*Prof. Ing. Paolo Riva*

Il supervisore

*Prof. Ing. Alessandra Marini*

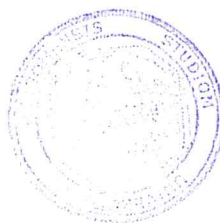
I collaboratori

Davide Sirtoli

Elena Casprini

Il tecnico

*Daniele Di Marco*







## INDICE

INDICE .....	3
1. INTRODUZIONE .....	4
2. CAMPIONI DI PROVA.....	4
2.1. Prova ciclica a taglio.....	4
2.2. Prova di pull-out .....	6
2.3. Caratteristiche dei materiali.....	6
3. DESCRIZIONE DEL SET-UP DI PROVA.....	8
3.1. Prova ciclica a taglio.....	8
3.2. Prova di pull-out .....	10
4. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA E PROCEDURA DI PROVA .....	12
4.1. Prova ciclica a taglio.....	12
4.2. Prova di pull-out .....	12
5. RISULTATI SPERIMENTALI.....	14
6. RISULTATI .....	15
6.1. Prova ciclica a taglio.....	15
6.1.1. Livello 1 .....	15
6.1.2. Livello 2 .....	17
6.1.3. Livello 3 .....	19
6.2. Prova di pull-out .....	21
7. INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI.....	22
7.1. Prova ciclica a taglio.....	22
7.2. Prova di pull-out .....	24
8. APPENDICE A – CARATTERISTICHE MATERIALI .....	26



## 1. INTRODUZIONE

Il presente rapporto riporta i risultati dello studio sperimentale condotto per la caratterizzazione meccanica di speciali connettori in acciaio, i "connettori perimetrali centro storico", progettati con funzione di tirante-spinotto e forniti da Laterlite S.p.a., impiegati negli interventi di adeguamento/miglioramento sismico per il collegamento tra diaframmi sottili in c.a. e le pareti perimetrali. I campioni sperimentali e i banchi di prova sono stati progettati in modo da riprodurre le condizioni di carico e di vincolo delle connessioni all'interno di applicazioni strutturali reali.

La prima tipologia di prova consiste in una prova ciclica a taglio della connessione, per verificarne il funzionamento a spinotto. La prova è definita in modo tale da ottenere dei diagrammi forza-spostamento descrittivi il comportamento della connessione che trasferisce l'azione sismica di competenza del diaframma alle pareti sismo-resistenti. La seconda fase sperimentale, invece, prevede l'esecuzione di prove di pull-out del singolo connettore e del sistema completo di connessione, per studiarne il funzionamento a tirante che trasferisce le azioni inerziali delle pareti caricate nella direzione trasversale al diaframma di piano.

Nel caso della prova ciclica a taglio sono state testate tre coppie di connettori, mentre nelle prove di pull-out sono stati testati tre connettori singoli infissi nella muratura e tre sistemi completi di connessione, comprensivi della porzione di diaframma.

## 2. CAMPIONI DI PROVA

### 2.1. Prova ciclica a taglio

In Figura 1 sono riportate la geometria e le dimensioni della parete muraria, con indicazione di massima della posizione di ciascuna connessione. Le caratteristiche dimensionali del connettore e del prisma di base sono invece riportate in Figura 2.

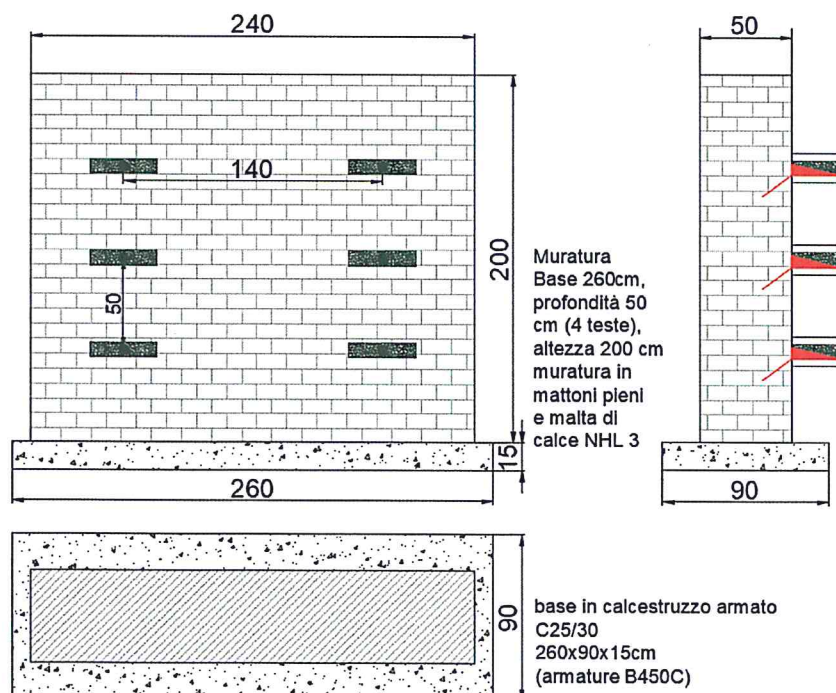


Figura 1 – Dimensioni muratura e disposizione dei connettori al suo interno

Per la realizzazione del sistema di connessione sono stati effettuati 6 fori di 16 mm di diametro, inclinati di  $135^\circ$  rispetto alla verticale, per una profondità di 25 cm all'interno del muro. Questi fori sono stati predisposti in modo tale da evitare interferenze tra due connessioni adiacenti. Una volta realizzati, questi sono stati riempiti con ancorante chimico "centro storico" a rapido indurimento per poi inserirvi il tirante-spinotto fino alla profondità richiesta. In questa fase la connessione si presenta con l'estremità filettata del tirante-spinotto sporgente dal filo esterno del muro; a questa è stata collegata al prisma di base, serrata successivamente tramite bullone (Figura 3a). La presenza della soletta in c.a. è stata simulata tramite un elemento di dimensioni ridotte ( $40 \times 30 \times 8$  cm) realizzato in corrispondenza di ogni connettore; nell'elemento in calcestruzzo è stato preventivamente posizionato un troncone di rete elettrosaldata (Figura 3b). I getti sono stati lasciati maturare per 7 giorni in ambiente protetto dagli agenti atmosferici ma a condizioni non controllate (locale tecnico), senza l'effettuazione di alcuna maturazione umida (Figura 3c), per rappresentare le condizioni di presa e maturazione in cantiere. Terminata la maturazione, i casseri in legno sono stati rimossi senza interferire con l'elemento realizzato. La situazione generale alla fine delle operazioni di realizzazione delle connessioni è riportata in Figura 3d.

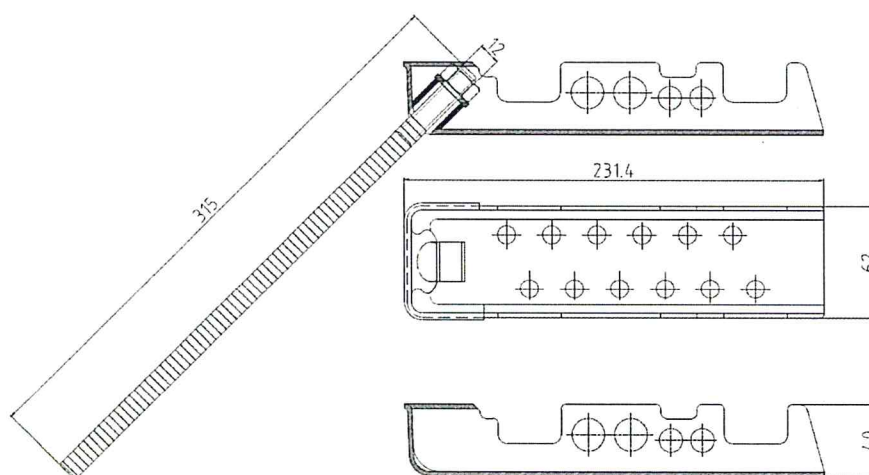


Figura 2 – Caratteristiche geometriche di massima del sistema di connessione



(a)



(b)

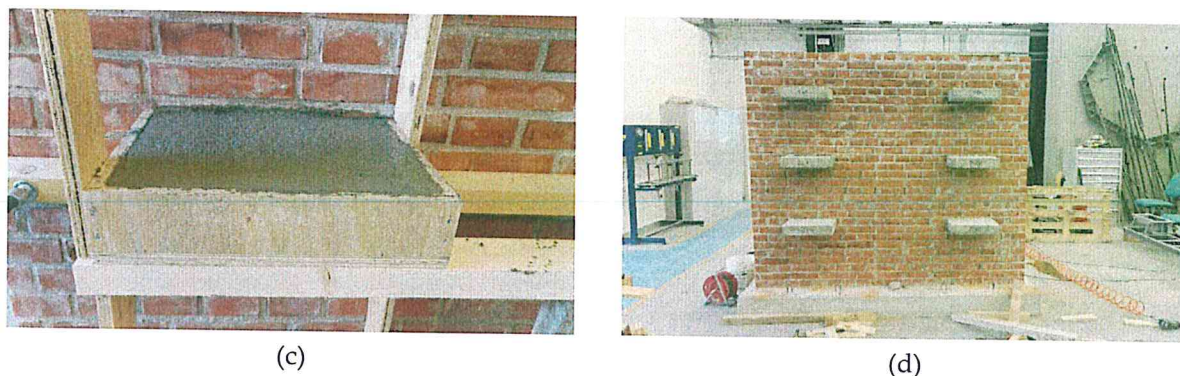


Figura 3 – Fasi di realizzazione della connessione

## 2.2. Prova di pull-out

Per le prove di estrazione dei soli tirante-spinotto è stata utilizzata la parte posteriore della muratura, mentre per quelle sull'intero sistema di connessione sono state utilizzate le stesse cartelle in calcestruzzo realizzate per le prove cicliche a taglio. Lo spessore di 50 cm della parete muraria ha consentito di effettuare le prove su entrambe le facciate senza che le connessioni interferissero tra loro. I connettori sono stati inseriti all'interno della muratura seguendo la stessa procedura descritta nel paragrafo precedente per la realizzazione delle mensole. Tuttavia, la loro predisposizione spaziale è stata variata in modo da evitare ogni possibile interferenza. Lo schema secondo cui sono stati distribuiti i connettori sulla parete muraria è riportato in Figura 4.

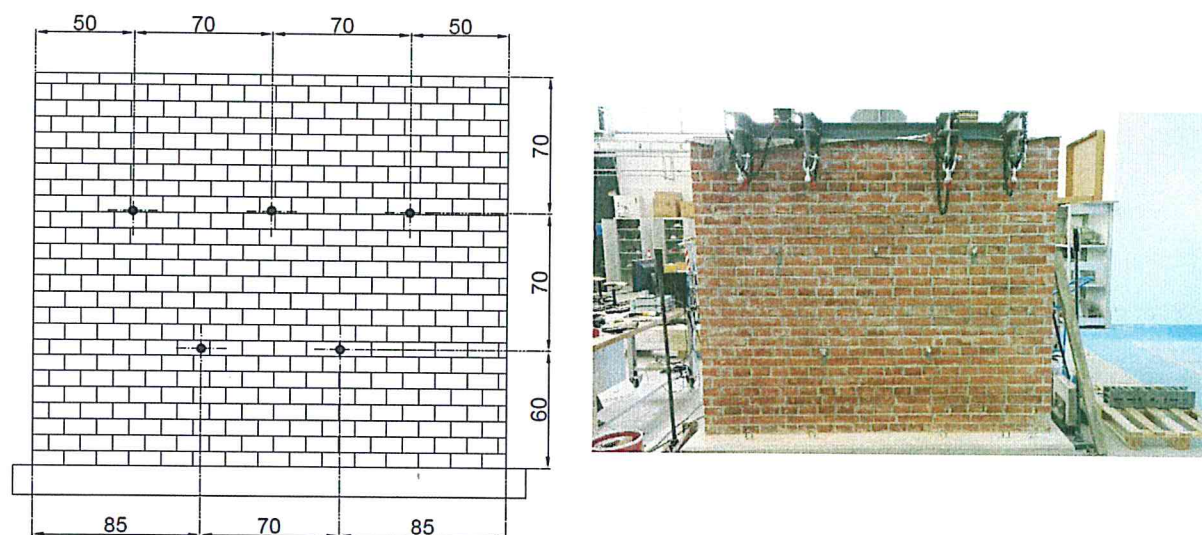


Figura 4 – Inquadramento dei connettori all'interno della muratura per le prove di pull-out

## 2.3. Caratteristiche dei materiali

La parete muraria è realizzata con mattoni pieni di dimensioni 25x12x6 cm con resistenza media a compressione nella direzione dei carichi verticali e ortogonale ai carichi verticali rispettivamente pari a 18 N/mm<sup>2</sup> e 2.2 N/mm<sup>2</sup>. Per i giunti si utilizza la malta Palladio BM 55, malta strutturale M5. Per la realizzazione degli elementi in c.a. viene utilizzato un calcestruzzo leggero premiscelato, tipo "Leca CLS 1400, " LC 20/22 secondo UNI EN 206-1 e modulo elastico E=15000 N/mm<sup>2</sup>; per il basamento in



c.a. si utilizza calcestruzzo fibrato di classe C25/30. Per il tirante-spinotto si utilizza acciaio B450C secondo NTC08.

Le schede tecniche relative ai diversi materiali impiegati per la realizzazione del provino sono allegate alla fine del presente report (Allegato A) come documentazione conoscitiva integrativa.

---



### 3. DESCRIZIONE DEL SET-UP DI PROVA

#### 3.1. Prova ciclica a taglio

##### Parete muraria

La parete è stata sottoposta ad un carico verticale di precompressione in modo da richiamare le reali condizioni di esercizio. Per simulare il carico uniformemente distribuito è stato predisposto un elemento in acciaio in sommità della parete, vincolato, tramite barre in acciaio poste lateralmente alla muratura, alla pavimentazione in c.a. del laboratorio (Figura 5). Queste barre sono state successivamente tensionate tramite due martinetti idraulici in modo da applicare due carichi verticali concentrati di 48 kN ciascuno, per avere una precompressione totale sull'elemento murario di 40 kN/m, atta a simulare il peso di circa un ulteriore piano di muratura.

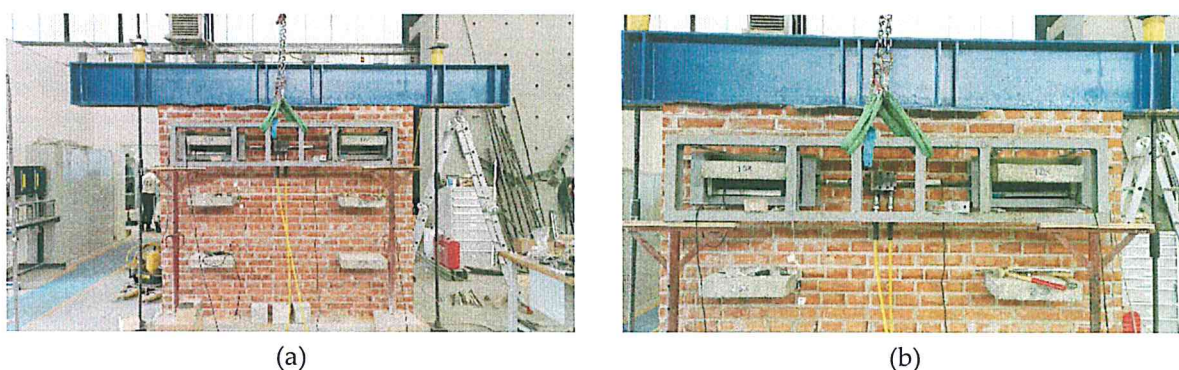


Figura 5 – Set-up di prova; predisposizione della precompressione (a) e particolare del sistema di applicazione della forza di taglio (b)

##### Banco prova

L'azione di taglio è stata trasmessa ai connettori tirante-spinotto mediante il telaio in acciaio mostrato in Figura 6. Il telaio è formato da due elementi, denominati "BLOCCO 1", che contengono le due mensole in c.a.; questi sono collegati all'elemento "BLOCCO 2" tramite delle bielle in acciaio. Tale sistema ha la funzione di rendere solidale il telaio ed evitare rotazioni fuori piano degli elementi "BLOCCO 1", lasciando, tuttavia, libertà di movimento in direzione orizzontale. Il telaio è stato posizionato con gli elementi "BLOCCO 1" a contrasto con la muratura. L'intero sistema è stato sorretto da un carroponete tramite catene collegate nella mezzzeria dell'elemento "BLOCCO 2", così da evitare effetti flessionali nello spinotto.

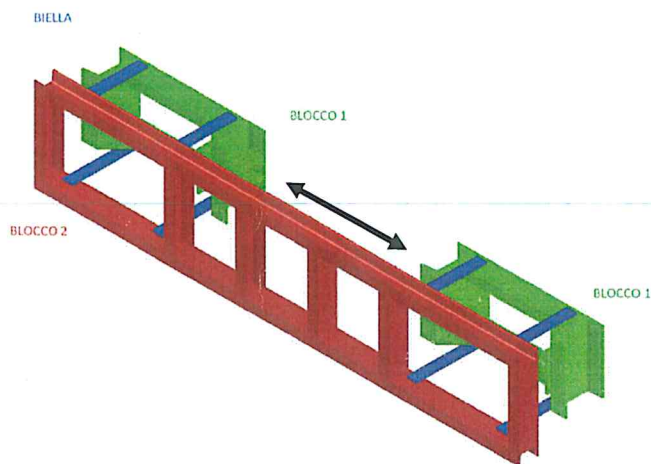


Figura 6 – Telaio in acciaio per l'applicazione della forza di taglio

#### Applicazione della forza di taglio

La forza orizzontale agente sulle mensole è stata applicata tramite un martinetto idraulico a doppio effetto, il quale ha consentito l'applicazione simultanea della forza a entrambe le mensole in c.a. presenti sullo stesso livello. Il martinetto ha una capacità di tiro di 7 tonnellate e di compressione di 14 tonnellate. La pressione necessaria al suo funzionamento è stata fornita da una pompa agente in entrambe le direzioni. L'azione del martinetto viene trasmessa alle due mensole in c.a. tramite gli elementi "BLOCCO 1" del telaio in acciaio, ai quali vengono imbullonate le due estremità dello stesso martinetto. Il punto di applicazione della forza (posizione della testa del martinetto) si trova in mezzzeria del lato corto del "BLOCCO 1", in prossimità della base di appoggio alla parete muraria. Questo ha lo scopo di ridurre al minimo il momento parassita conseguente l'eccentricità del carico, così da approssimare un'azione di taglio puro per i connettori tirante-spinotto ancorati alla parete. La forza così applicata consente sia di ridurre le azioni flessionali (secondo il piano perpendicolare alla parete) sul sistema di connessione che di evitare rotazioni dell'intero sistema secondo l'asse longitudinale del tirante-spinotto. Per evitare tale rotazione e assicurare il contatto tra la mensola e il telaio è stato necessario utilizzare un sistema di contrasto: sono state posizionate delle piastre di acciaio nello spazio compreso tra i profili laterali dell'elemento "BLOCCO 1" e la cartella in calcestruzzo e un elemento in acciaio sotto la mensola tra le piastre laterali. L'intero sistema è mostrato in Figura 7.



Figura 7 – Sistema di contrasto per la mensola

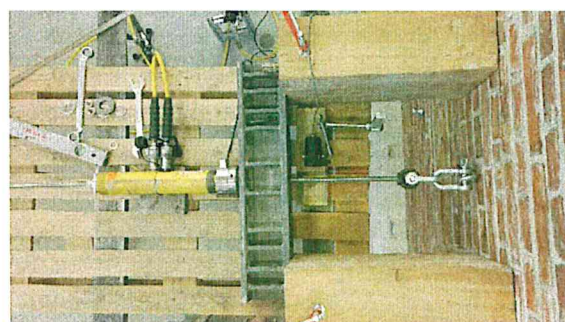
### 3.2. Prova di pull-out

La prova di pull-out è stata definita in funzione delle condizioni operative del sistema di connessione all'interno di applicazioni reali, in particolare quando il connettore lavora come tirante che raccoglie le azioni sismiche fuori piano agenti sulle pareti e le trasferisce al diaframma. Sono state eseguite prove di estrazione del solo tirante - spinotto inghisato e prove di trazione sul sistema completo diaframma - elemento prisma di base - spinotto/tirante inghisato al fine di identificare l'elemento debole della connessione.

Nel caso della prova sui soli connettori tirante-spinotto posizionati sul lato posteriore della parete muraria, questi sono stati predisposti a 135° rispetto alla verticale mentre la forza di estrazione è stata applicata perpendicolarmente alla facciata, in corrispondenza dell'estremità filettata del tirante-spinotto. Su quest'ultima sono stati predisposti dei golfari femmina a occhio circolare per l'applicazione del carico di estrazione al provino. La forza è stata applicata tramite una barra filettata Ø16 collegata al tirante-spinotto tramite un sistema formato da un golfare femmina a occhio circolare, posto all'estremità della barra stessa, e due grilli metallici (Figura 8a). La forza di estrazione è stata ottenuta tramite l'utilizzo di due martinetti idraulici di capacità massima di 123 kN ciascuno, posti in asse con la barra filettata. A contrastare la loro azione è presente, da una parte, un profilo metallico ad elevata rigidità, il quale fornisce la base di appoggio del sistema di carico; dall'altra, un bullone avvitato alla barra che trasmette la forza dei martinetti direttamente alla barra stessa. Il profilo metallico ad elevata rigidità è reso solidale alla muratura grazie a due profili in legno utilizzati come appoggio del sistema di applicazione della forza. Questi due profili in legno distano dal connettore 25 cm ciascuno, così da evitare che influiscano sulla formazione del cono di rottura del connettore. Il sistema completo di applicazione della forza è mostrato in Figura 8b.



(a)



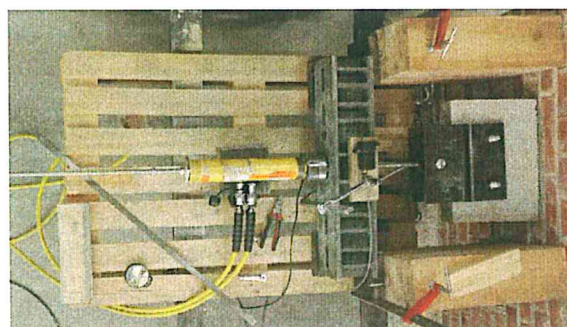
(b)

Figura 8 – Sistema di applicazione della forza per le prove di pull-out sul singolo tirante-spinotto

Nel caso dell'estrazione dell'intero sistema di connessione, le prove sono state eseguite direttamente sulle mensole utilizzate per le prove cicliche a taglio. Sono stati effettuati due fori passanti la cartella in calcestruzzo così da potervi ancorare due piastre metalliche tramite due bulloni M16; si è poi inserito un perno  $\varnothing 20$  all'estremità libera delle due piastre (Figura 9a) in modo da avere un aggancio del provino al sistema di applicazione della forza. Questo è stato gestito con le medesime modalità seguite nelle prove di estrazione dei soli connettori tirante-spinotto. L'unico accorgimento tenuto in questo caso riguarda la distanza tra il profilo metallico ad elevata rigidezza e le piastre di collegamento della mensola. Questi due elementi sono stati tenuti ad una distanza di circa 15 cm per consentire lo sviluppo del meccanismo di rottura. A tal fine, degli spessori metallici sono stati aggiunti all'estremità dei profili in legno così da regolare il gioco della prova. Anche in questo caso è stato predisposto uno strumento a filo per l'analisi degli spostamenti di estrazione. Lo strumento è stato posto in sommità al profilo metallico ad elevata rigidezza, collegato ad una delle estremità sporgenti dei bulloni utilizzati per l'ancoraggio della cartella in calcestruzzo (Figura 9b).



(a)



(b)

Figura 9 – Sistema di applicazione della forza per le prove di pull-out sul sistema di connessione completo



## 4. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA E PROCEDURA DI PROVA

### 4.1. Prova ciclica a taglio

La prova viene inizialmente eseguita in controllo di forza con applicazione ciclica del carico; vengono testate due connessioni per volta. La strumentazione utilizzata per la misura dello spostamento consiste di due LVTDs con capacità 50 mm ciascuno. Questi vengono posizionati sotto le mensole e resi solidali con la parete. Gli spostamenti relativi tra parete e connettore vengono registrati grazie all'applicazione di una squadretta di contrasto metallica incollata direttamente sull'elemento prisma di base solidale al tirante - spinotto (Figura 10).



Figura 10 – Strumentazione utilizzata per il monitoraggio dello spostamento del connettore

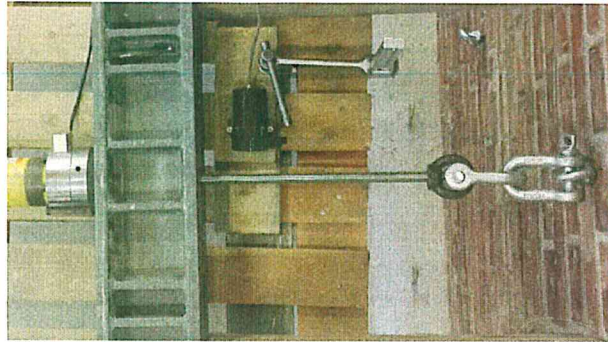
Per ogni livello di carico si stabiliscono delle soglie da raggiungere e si eseguono tre cicli di carico-scarico per ogni soglia considerata. Ai cicli intermedi di carico si adotta un sistema di controllo misto in forza e in spostamento al fine di monitorare il danneggiamento progressivo della connessione. Tale danneggiamento comporta l'incremento della deformazione nei cicli successivi eseguiti allo stesso livello di carico e si manifesta con la microfessurazione iniziale e successivi disgregazione e distacco della malta di collegamento sottoposta alle azioni concentrate trasferite dal tirante spinotto.

Nella fase finale della prova, una volta registrata la plasticizzazione parziale o totale della connessione, si passa in controllo di spostamento fino alla rottura della connessione più debole.

### 4.2. Prova di pull-out

Il fine ultimo delle prove di pull-out è stato quello di determinare il carico massimo di estrazione del tirante-spinotto dalla parete muraria, rappresentativo della massima azione trasferita dalla parete caricata fuori piano al diaframma nelle applicazioni reali. Il carico è stato applicato tramite l'aumento di pressione nei martinetti controllato con una pompa a mano. In queste condizioni non è stato possibile gestire il gradiente di carico in modo accurato, il quale, invece, è stato gestito in tempo reale monitorando i dati ottenuti dal sistema di acquisizione. L'intensità della forza è stata monitorata tramite una cella di carico da 25 kN (Figura 11) posta tra i martinetti e il profilo metallico ad elevata rigidità. Un ulteriore strumento a filo (Figura 11) è stato predisposto longitudinalmente alla barra di applicazione del carico per il monitoraggio dello spostamento del tirante-spinotto durante l'estrazione. Questo strumento aggiuntivo ha permesso l'individuazione delle fasi principali caratterizzanti il comportamento resistente del tirante-spinotto all'estrazione. Tuttavia, tale studio ha una sola valenza indicativa in quanto, durante la prova, il tirante-spinotto subisce, oltre all'estrazione orizzontale, anche un abbassamento verticale, dovuto alla posizione inclinata di ancoraggio del

tirante-spinotto alla muratura, e conseguente il tentativo di “raddrizzamento” della connessione con l’allineamento del tirante inghisato con l’asse di carico.



*Figura 11 – Strumentazione utilizzata nelle prove di pull-out*

## 5. RISULTATI SPERIMENTALI

Si riporta in Figura 12 la rappresentazione grafica dei risultati sperimentali descritti nelle tabelle seguenti per le prove cicliche a taglio:  $s_i$  indica lo spostamento massimo raggiunto al ciclo  $i$ -esimo,  $\Delta s_i$  rappresenta invece la differenza tra due spostamenti massimi consecutivi raggiunti a parità di carico ( $s_{i+1} - s_i$ ), ed è quindi funzione del danno accumulato durante la prova. Per quanto riguarda gli spostamenti, il segno positivo e negativo indica gli spostamenti raggiunti rispettivamente in corrispondenza del carico considerato positivo e negativo. Per quanto riguarda la prova di pull-out, vengono forniti i risultati in termini di carico massimo raggiunto durante la prova in funzione dell'elemento considerato, seguiti da un resoconto grafico del comportamento forza-spostamento registrato durante le prove. In Figura 13 viene mostrata la nomenclatura adottata per i vari livelli delle connessioni e delle mensole in c.a., per entrambe le prove effettuate, così da avere una maggiore chiarezza nell'esposizione dei risultati. I dati forniti riguardano tre prove cicliche a taglio, eseguite su tre diversi livelli della parete, tre prove di pull-out dell'intero sistema di connessione e tre per l'estrazione dei soli pioli.

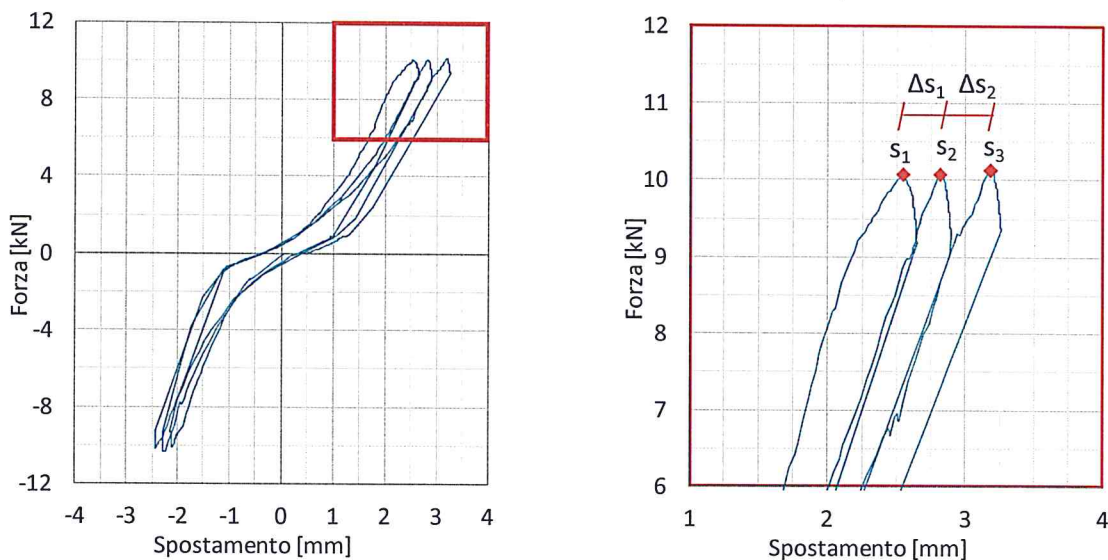


Figura 12 – Rappresentazione dei risultati analitici per un ciclo generico

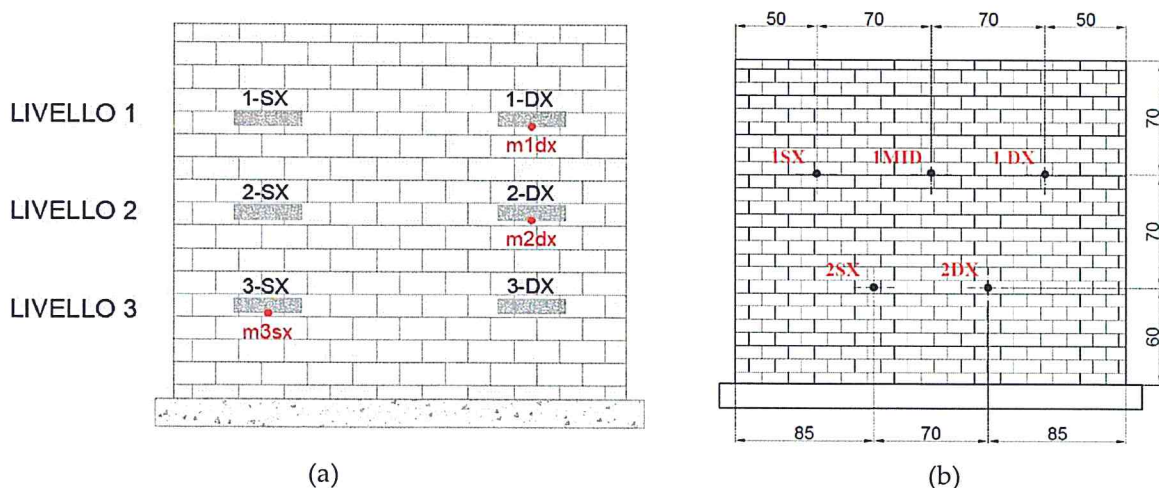


Figura 13 – Simbologia utilizzata per l'espressione dei risultati nelle prove cicliche (a) e in quelle di pull-out (b)



## 6. RISULTATI

### 6.1. Prova ciclica a taglio

#### 6.1.1. Livello 1

Di seguito si riportano i risultati principali in termini di forza e spostamento massimi per i tre livelli analizzati. Per ogni livello della parete, i risultati vengono rappresentati inizialmente in forma analitica in una tabella riassuntiva (Tabella 1-6). Successivamente viene riportato il grafico forza-spostamento (Figura 9-14).

Tabella 1 - Risultati analitici Livello 1

LIVELLO 1	1-SX					1-DX				
Livello di carico [kN]	S <sub>max</sub> [mm]			danno [mm]		S <sub>max</sub> [mm]			danno [mm]	
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	ΔS <sub>1</sub>	ΔS <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	ΔS <sub>1</sub>	ΔS <sub>2</sub>
-2.5	-0.38	-0.40	-0.42	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0	0
+2.5	0.40	0.39		0		0.00	0.00		0	
+5.0	0.80	0.79	0.84	0	0.05	0.00	0.00	0.00	0	0
-5.0	-0.88	-0.91	-0.95	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0	0
-7.5	-1.57	-1.62	-1.75	0.05	0.13	-0.01	-0.01	-0.01	0	0
+7.5	1.79	1.86	1.92	0.07	0.06	0.00	0.00	0.00	0	0
-10.0	-2.09	-2.28	-2.42	0.19	0.14	-0.01	-0.01	-0.01	0	0
+10.0	2.55	2.81	3.21	0.26	0.40	0.01	0.01	0.01	0	0
-12.5	-3.22	-5.03	-6.01	1.81	0.98	-0.01	-0.99	-1.19	0.98	0.20

Tabella 2 - Risultati in termini di spostamento

LIVELLO 1	1-SX			1-DX		
S <sub>max</sub> [mm]	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
Controllo spostamento (6 mm)	5.86	6.41	6.26	0.57	0.58	0.56
F effettiva [kN]	11.4	10.3	9.0	11.1	11.1	11.1

Per quanto riguarda i tre cicli con livello di carico prefissato pari a +12.5 kN, si osserva che lo spostamento dell'elemento 1-SX registrato aumenta notevolmente quindi si passa al controllo dello spostamento imponendo come limite  $\pm 6$  mm. Si osserva infatti che a parità di spostamento imposto la forza decresce all'aumentare dei cicli.

Nel livello superiore (livello 1) la pressione media verticale è pari a:  $\sigma_{01}=0.10$  MPa. Si registra una rigidità media iniziale, al netto della ripresa delle tolleranze iniziali, di circa  $K_{i1}=7.5$  kN/mm; il carico ultimo, considerato come taglio resistente a 2mm di spostamento, raggiunto con parziale plasticizzazione del connettore e disgregazione della malta di iniezione sotto le elevate pressioni di plasticizzazione esercitate dal tirante-spinotto, è pari a circa  $V_{n2,1}=9.5$  kN.



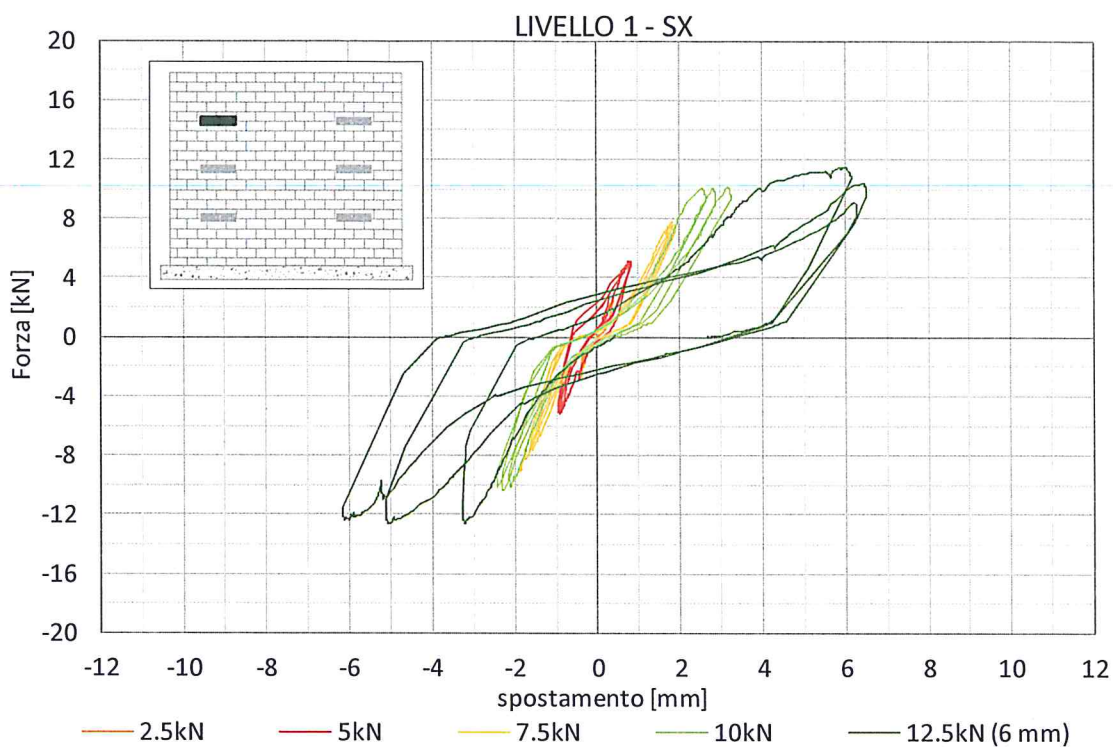


Figura 14 – Prova ciclica a taglio: legame forza-spostamento per l'elemento 1\_SX

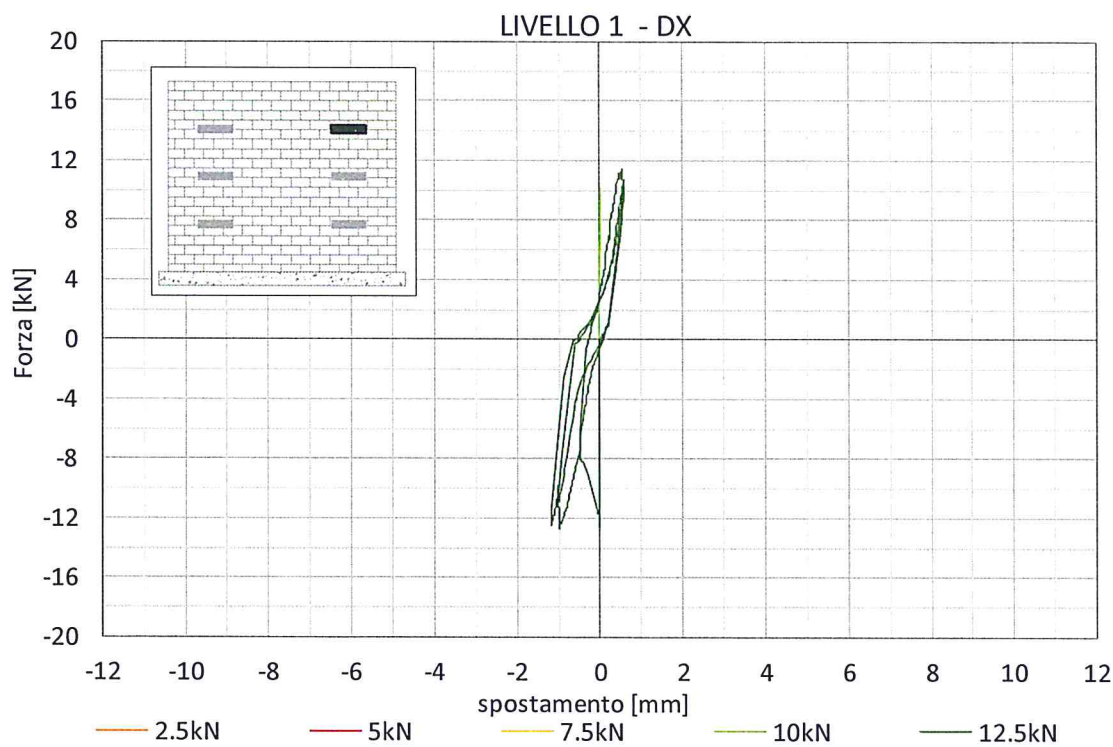


Figura 15 – Prova ciclica a taglio: legame forza-spostamento per l'elemento 1\_DX



### 6.1.2. Livello 2

Tabella 3 - Risultati analitici Livello 2

LIVELLO 2 Livello di carico [kN]	2-SX					2-DX				
	S <sub>max</sub> [mm]			danno [mm]		S <sub>max</sub> [mm]			danno [mm]	
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	ΔS <sub>1</sub>	ΔS <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	ΔS <sub>1</sub>	ΔS <sub>2</sub>
-2.5	-0.19	-0.22	-0.23	0.03	0.01	-0.24	-0.28	-0.30	0.04	0.02
+2.5	0.15	0.15	0.15	0	0	0.12	0.12	0.12	0	0
-5.0	-0.38	-0.43	-0.49	0.05	0.06	-0.45	-0.48	-0.53	0.03	0.05
+5.0	0.32	0.35	0.35	0.03	0	0.28	0.31	0.33	0.03	0.02
-7.5	-0.70	-0.81	-0.86	0.11	0.05	-0.71	-0.76	-0.78	0.05	0.02
+7.5	0.59	0.62	0.68	0.03	0.06	0.52	0.55	0.58	0.03	0.03
-10.0	-1.09	-1.26	-1.34	0.17	0.08	-0.93	-1.04	-1.09	0.11	0.05
+10.0	1.03	1.13	1.15	0.10	0.02	0.80	0.87	0.93	0.07	0.06
-12.5	-1.71	-1.98	-2.32	0.27	0.34	-1.33	-1.49	-1.62	0.14	0.13
+12.5	1.65	1.80	1.93	0.15	0.13	1.25	1.42	1.53	0.17	0.11
-15.0	-3.76	-5.11	-6.23	1.35	1.12	-2.04	-2.25	-2.59	0.21	0.34
+15.0	3.28	4.34	5.50	1.06	1.16	1.95	2.22	2.54	0.27	0.32

Tabella 4 - Risultati in termini di spostamento

LIVELLO 2	2-SX		2-DX	
Controllo spostamento (10 mm)	-10	+10	-5.41	4.62
F [kN]	15.0	14.8	14.4	14.9

Nel livello intermedio (livello 2) la pressione media verticale è pari a:  $\sigma_{02}=0.11$  MPa. La rigidità media iniziale, al netto della ripresa delle tolleranze iniziali, è pari a circa  $K_{12}=13$  kN/mm; il carico ultimo, considerato come taglio resistente a 2mm di spostamento, raggiunto con evidente plasticizzazione del connettore e disgregazione della malta di iniezione sotto le elevate pressioni di plasticizzazione esercitate dal tirante-spinotto, è pari a circa  $V_{n2,2}=13$  kN.



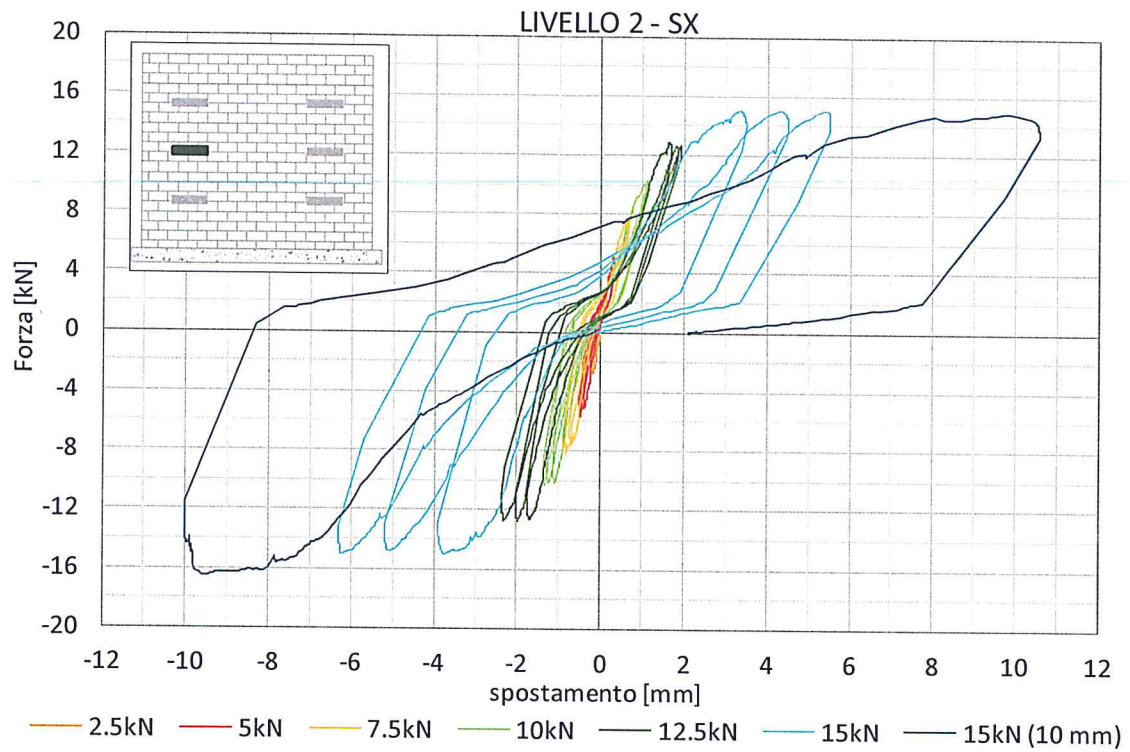


Figura 16 – Prova ciclica a taglio: legame forza-spostamento per l'elemento 2\_SX

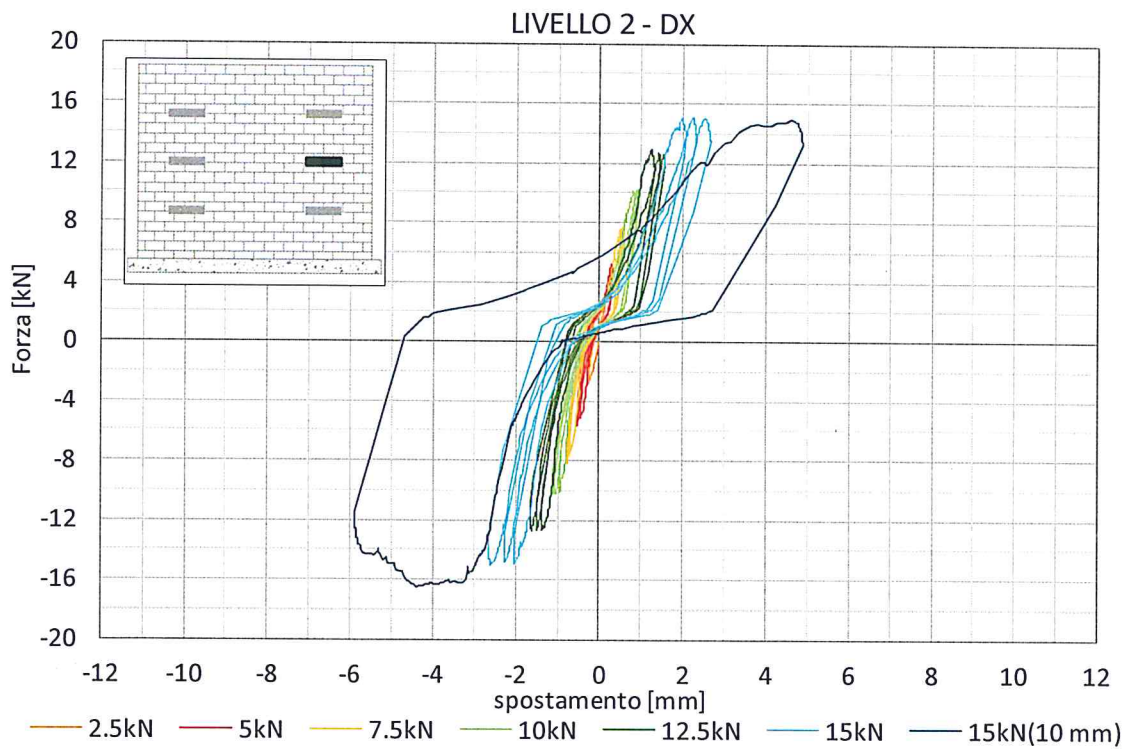


Figura 17 – Prova ciclica a taglio: legame forza-spostamento per l'elemento 2\_DX

## 6.1.3. Livello 3

Tabella 5 - Risultati analitici Livello 3

LIVELLO 3	3-SX					3-DX				
Livello di carico [kN]	S <sub>max</sub> [mm]			danno [mm]		S <sub>max</sub> [mm]			danno [mm]	
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	ΔS <sub>1</sub>	ΔS <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	ΔS <sub>1</sub>	ΔS <sub>2</sub>
-2.5	-0.05	-0.06	-0.07	0.01	0.01	-0.10	-0.11	-0.11	0.01	0
+2.5	0.01	0.02	0.02	0.01	0	0.08	0.09	0.09	0.01	0
-5.0	-0.18	-0.18	-0.19	0	0.01	-0.19	-0.20	-0.21	0.01	0.01
+5.0	0.10	0.11	0.12	0.01	0.01	0.25	0.28	0.30	0.03	0.02
-7.5	-0.30	-0.34	-0.38	0.04	0.04	-0.30	-0.32	-0.33	0.02	0.01
+7.5	0.23	0.26	0.28	0.03	0.02	0.45	0.49	0.51	0.04	0.02
-10.0	-0.49	-0.59	-0.63	0.1	0.04	-0.43	-0.47	-0.49	0.04	0.02
+10.0	0.41	0.45	0.48	0.04	0.03	0.68	0.72	0.78	0.04	0.06
-12.5	-0.78	-0.87	-0.94	0.09	0.07	-0.58	-0.64	-0.65	0.06	0.01
+12.5	0.63	0.72	0.77	0.09	0.05	0.97	1.09	1.14	0.12	0.05
-15.0	-1.12	-1.21	-1.42	0.09	0.21	-0.75	-0.80	-0.87	0.05	0.07
+15.0	0.95	1.06	1.14	0.11	0.08	1.36	1.50	1.61	0.14	0.11
-17.5	-1.72	-2.00	-2.29	0.28	0.29	-1.06	-1.41	-2.32	0.35	0.91
+17.5	1.48	1.65	1.76	0.17	0.11	2.45	5.15	6.27	2.70	1.12

Tabella 6 - Risultati in termini di spostamento

LIVELLO 3	3-SX						3-DX					
spostamento (10mm)	-4.3	2.4	-3.4	2.1	-3.4	1.9	-10	10	-10.5	10.4	-10.7	9.9
F [kN]	-17.5	18.5	-13.5	14.5	-12.4	12.1	-17.4	18.5	-13.5	14.4	-12.3	12.2

Nel livello inferiore la pressione media verticale è pari a:  $\sigma_{03}=0.12$  MPa. La rigidezza media iniziale, al netto della ripresa delle tolleranze iniziali, è pari a circa  $K_{i3}=15$  kN/mm; il carico ultimo, considerato come taglio resistente a 2mm di spostamento, raggiunto con totale plasticizzazione del connettore e disgregazione della malta di iniezione sotto le elevate pressioni di plasticizzazione esercitate dal tirante-spinotto, è pari a circa  $V_{n2,3}=17.5$  kN.

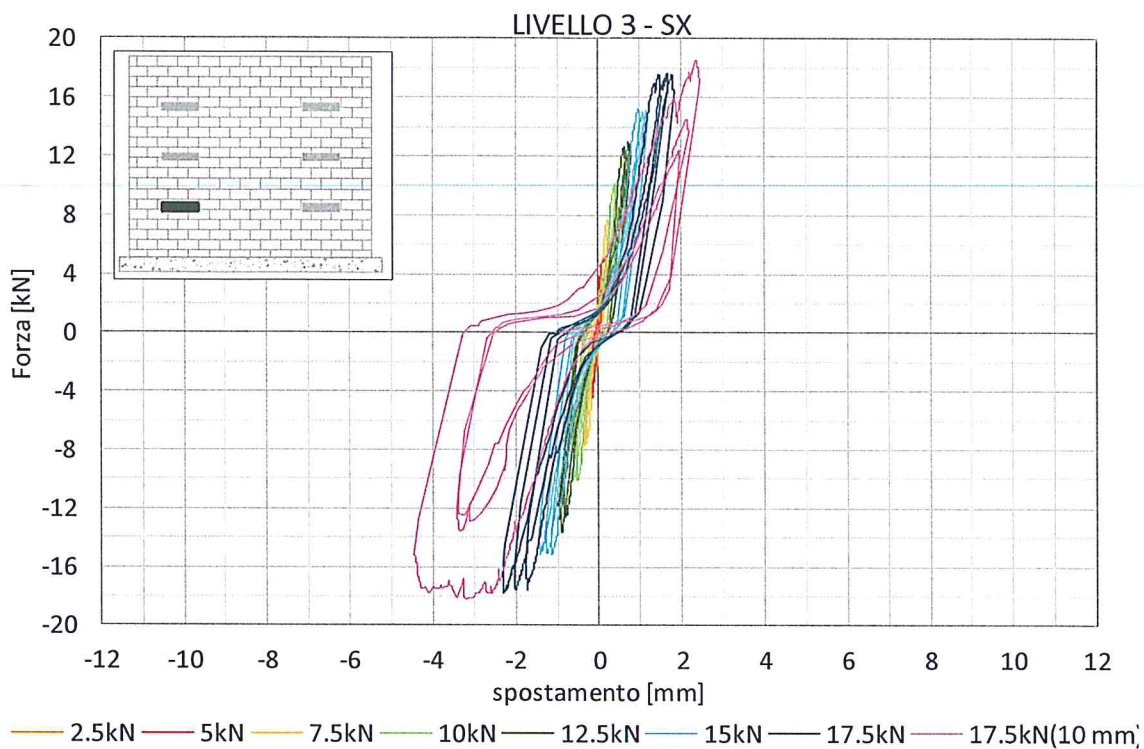


Figura 18 – Prova ciclica a taglio: legame forza-spostamento per l'elemento 3\_SX

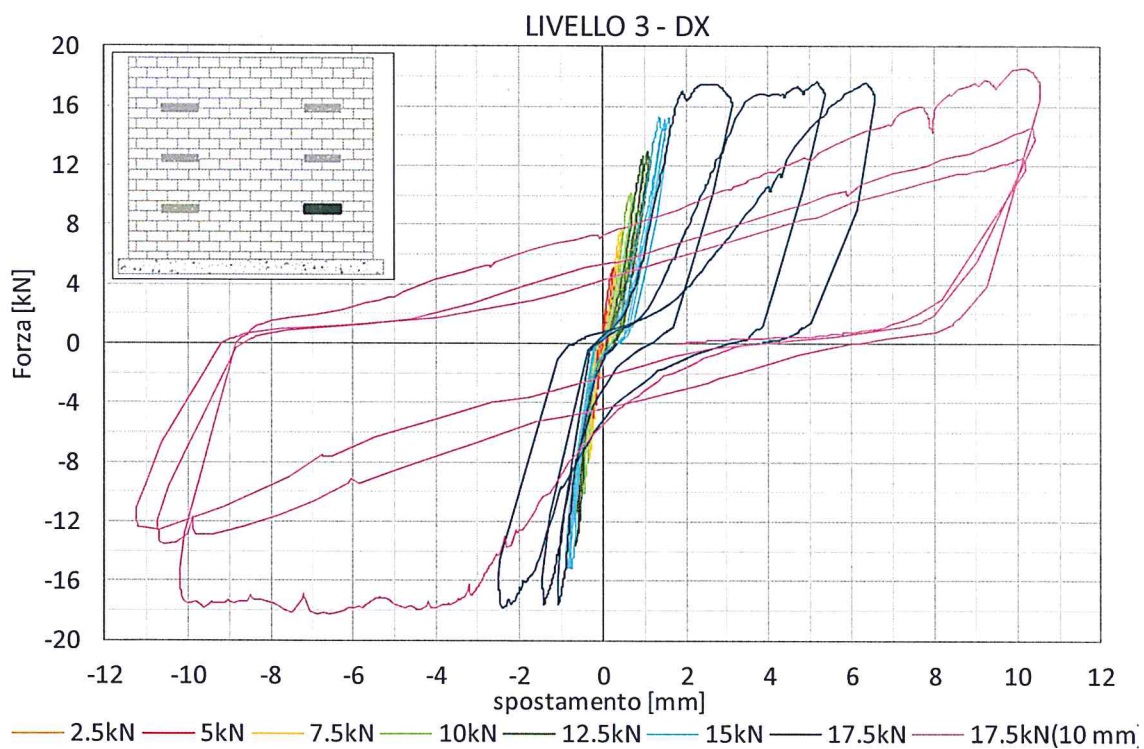


Figura 19 – Prova ciclica a taglio: legame forza-spostamento per l'elemento 3\_DX

## 6.2. Prova di pull-out

In Tabella 7 vengono riportati i risultati ottenuti nelle prove di pull-out in termini di forza massima  $f_{max}$  mentre in Figura 20 e Figura 21 vengono rispettivamente riportate le loro curve forza-spostamento per il solo tirante-spinotto inghisato e per il sistema completo. Le curve tratteggiate rappresentano le prove in cui è avvenuto il collasso del tirante-spinotto prima di una sua completa estrazione.

Tabella 7 – Forza massima registrata nelle prove di pull-out

TIRANTE- SPINOTTO	$f_{max}$	CONNESSIONE	$f_{max}$
	[kN]		[kN]
1 SX	22.94	m 1DX	17.11
1 MID	28.80	m 2DX	16.92
2 SX	31.33	m 3SX	24.34
	$27.69 \pm 4.30$		$19.46 \pm 4.23$

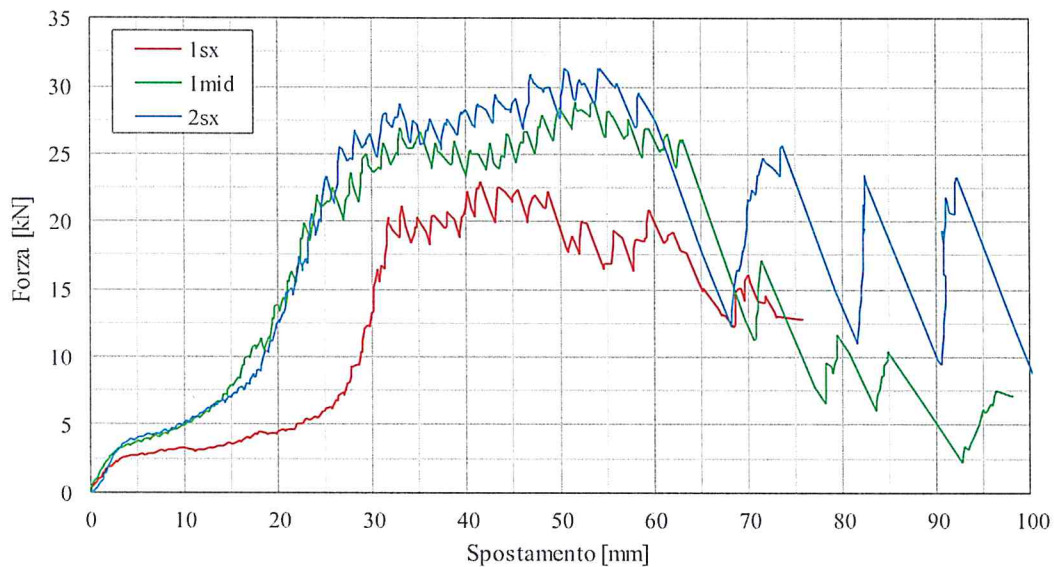


Figura 20 – Diagrammi forza-spostamento per le prove di pull-out dei tirante-spinotto singoli

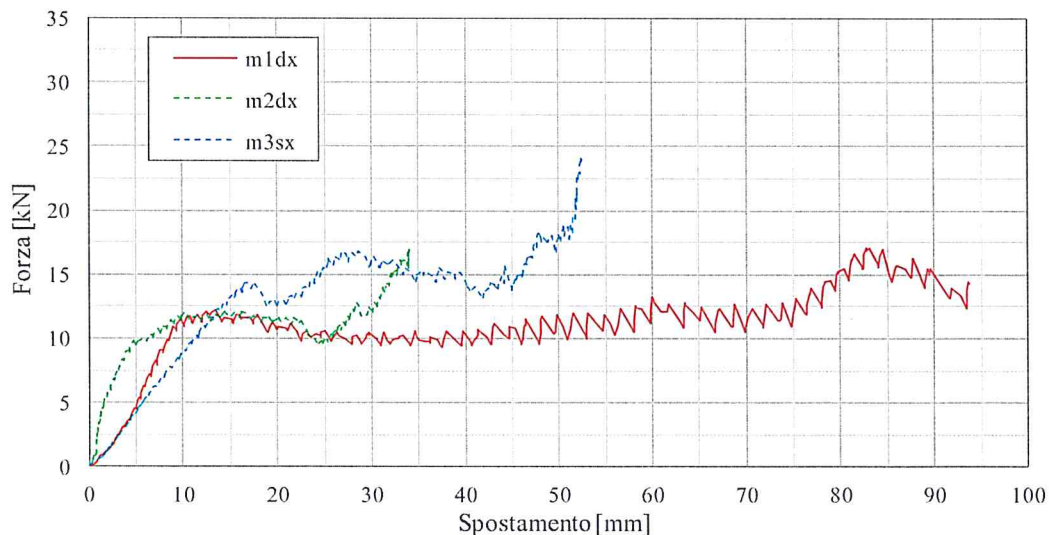


Figura 21 – Diagrammi forza-spostamento per le prove di pull-out delle connessioni complete



## 7. INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

Le prove hanno la finalità di individuare la resistenza meccanica a taglio e trazione del connettore in esame. Due prove sono state identificate per la caratterizzazione del sistema di connessione: una prova ciclica a taglio sul tirante-spinotto e una prova di pull-out effettuata sul sistema di connessione completo e sul solo tirante-spinotto, inserendo quest'ultimo nella muratura seguendo lo schema operativo previsto da Laterlite, con tirante-spinotto inclinato di 135° rispetto alla verticale.

I risultati ottenuti per il sistema di connessione sono funzione di diversi aspetti, tra i quali: le caratteristiche meccaniche del connettore, del prisma di base e della muratura, nonché le procedure seguite per la realizzazione dei provini ed il set-up di prova.

Mentre nel caso della caratterizzazione dei singoli componenti (tirante-spinotto, elemento prisma di base, ancorante chimico "centro storico", materiale impiegato per la formazione del diaframma) le prestazioni possono risultare ripetibili ed affidabili, nello studio del comportamento meccanico del sistema composito connessione-muratura queste risultano altamente influenzabili dalla qualità della muratura e dall'interazione tra i componenti. In particolare, la muratura è un materiale fortemente eterogeneo, caratterizzato da prestazioni altamente variabili e difficilmente misurabili, specialmente nel caso di murature in pietrame di edifici antichi; si evidenzia inoltre che la muratura utilizzata nella presente sperimentazione presenta un'elevata qualità. **Per questa ragione i risultati ottenuti nella presente campagna sono da ritenersi caratterizzanti il solo comportamento del collegamento connettore perimetrale "centro storico"-parete muraria impiegati nella sperimentazione, e pertanto non sono generalizzabili rispetto ad altre applicazioni, in particolare in presenza di murature di differente qualità, consistenza, e tessitura.**

Alla luce delle considerazioni sopra esposte si evidenzia la necessità di eseguire **prove di cantierabilità**, che consentano di verificare preliminarmente la fattibilità dell'intervento, nonché forniscano un valore indicativo di resistenza del connettore nella muratura particolare del manufatto oggetto di studio. Nel caso delle murature, particolare attenzione andrebbe posta alla tecnica realizzativa, alla tessitura, con particolare riferimento alla regolarità e alla dimensione degli elementi, allo spessore dei giunti di malta, all'efficace ingranamento tra i paramenti esterni mediante diatoni di collegamento, ad eventuali danni locali e a tutte quelle caratteristiche che possano compromettere la collaborazione tra l'elemento murario e il connettore metallico e le prestazioni meccaniche della connessione.

Nella presente campagna prove **non sono stati riscontrati problemi di scorrimento tra il prisma di base e il getto della cappa in calcestruzzo**, altro elemento collaborante con il connettore metallico; tuttavia, una sua esecuzione non a regola d'arte o l'utilizzo di un calcestruzzo con aggregato grosso potrebbero influenzarne negativamente l'ingranamento e la collaborazione, creando problemi di trasferimento delle forze.

Si consiglia, dunque, di porre particolare attenzione sia alla caratterizzazione dell'elemento in muratura su cui si innesteranno i connettori con funzione di tirante-spinotto che all'esecuzione del getto della cappa in calcestruzzo nella zona circostante il prisma di base.

### 7.1. Prova ciclica a taglio

Nelle prove cicliche a taglio il **sistema di connessione ha mostrato un comportamento elasto-plastico**. Questo è messo in evidenza nelle curve di inviluppo illustrate in Figura 22, ottenute selezionando i punti forza-spostamento massimi e minimi registrati durante il primo ciclo di carico per ciascun

livello di carico. Si osserva inoltre un incremento della capacità della connessione nei livelli alle quote più basse della parete, dovuto all'effetto benefico del confinamento aggiuntivo dato dal peso della muratura sovrastante. Per quanto riguarda la curva relativa al 1° livello, la prova è stata interrotta in corrispondenza di uno spostamento ritenuto non compatibile con le applicazioni della connessione nelle strutture reali; la curva tratteggiata rappresenta quindi l'involuppo che si sarebbe ottenuto proseguendo la prova oltre tale limite. Con riferimento ai legami forza-spostamento rappresentati nelle Figure 14-19, si osserva un comportamento inizialmente elastico-lineare con danneggiamento quasi nullo per i primi cicli, seguito da un'evoluzione in campo non-lineare che si manifesta quando le pressioni del connettore sull'ancorante chimico "centro storico" eccedono la resistenza a rifollamento. Si osserva una limitata dissipazione di energia nel solo ciclo precedente a quello in cui il carico massimo viene raggiunto. La connessione mostra un comportamento duttile fino al collasso. Infine, è essenziale sottolineare come il comportamento osservato sia strettamente legato alla muratura impiegata nella sperimentazione: la qualità della parete utilizzata nella prova, in quanto costruita in laboratorio, è molto buona, mentre una muratura scadente avrebbe probabilmente portato ad un comportamento fragile del sistema, con crisi anticipata a taglio-trazione della muratura stessa.

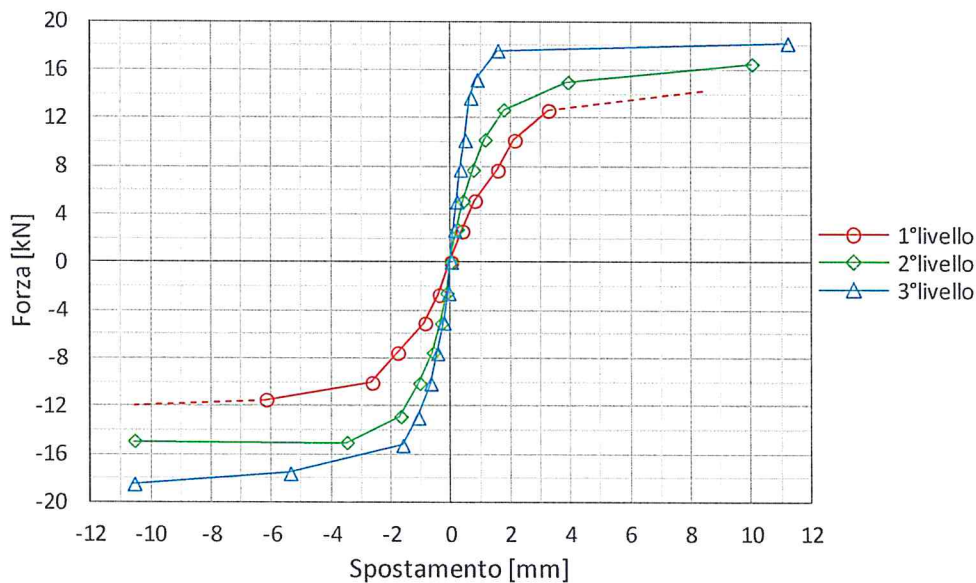


Figura 22 – Forza e spostamento massimi e minimi raggiunti nel primo ciclo di ogni tripletta

In sintesi, si riportano in Tabella 8 i valori medi di rigidezza delle connessioni, a meno delle tolleranze iniziali, considerando il ciclo di carico di 5kN. Inoltre, visti gli spostamenti raggiunti nelle prove, superiori a quelli compatibili per l'utilizzo nelle strutture reali, si riporta il valore del taglio come quello raggiunto in corrispondenza di uno spostamento di 2 mm ( $V_{n,2}$ ).

Tabella 8 – Valori di rigidezza media e taglio resistente per le connessioni ai diversi livelli

	1°lvl	2°lvl	3°lvl
$V_n +2mm$	9.5	13	17.5
$V_n -2mm$	-8.2	-13.2	-15.5
$K +5kN$	7.5	17.3	28.1
$K -5kN$	7.5	11.9	30.4

## 7.2. Prova di pull-out

Nel caso delle prove di estrazione, particolare attenzione va posta alla variabilità di questi valori. In generale, i soli connettori tirante-spinotto hanno resistito maggiormente rispetto alle connessioni complete. Tuttavia, è da considerare che le connessioni complete si presentavano già plasticizzate al momento del test di estrazione in quanto precedentemente sottoposte alla prova ciclica a taglio. Questo danneggiamento preesistente è messo in evidenza anche dal fatto che due connessioni su tre sono collassate per rottura del connettore, senza raggiungere la completa estrazione.

Tale modalità di rottura evidenzia come la sollecitazione mista taglio (V) e trazione (N) comporti una penalizzazione delle prestazioni ottenibili in caso di sollecitazione monoassiale Per il progetto e la verifica del connettore tirante-spinotto è dunque necessario fare riferimento ad un dominio resistente (N-V), che andrebbe opportunamente definito, piuttosto che riferirsi alle sole capacità ultime rispetto a sollecitazioni monoassiali.

Dall'analisi del danneggiamento degli elementi a fine prova, mostrato in Figura 23, si evince la forte dipendenza di questi risultati dall'accuratezza tecnica di realizzazione e dalla cura dei dettagli, nonché, ancora una volta, dalla qualità della muratura. Il cono di carico generato dall'adesione tra connessione e muratura ha mostrato dimensioni differenti.

Uno degli elementi in comune tra le varie connessioni è stata la formazione di un cono di rottura tendente verso il basso, conseguenza dell'inserimento del tirante-spinotto nella muratura con un angolo di inclinazione di  $135^\circ$  rispetto alla verticale. Durante le prove l'area sottostante la testa del piolo si è fessurata sotto gli sforzi concentrati a taglio-trazione generati lungo le interfacce barra-ancorante chimico "centro storico" e ancorante chimico "centro storico"-muratura a carichi relativamente bassi (circa 5kN). In particolare la componente tagliante non trova efficace contrasto nel modesto ricoprimento di muratura e "spinge a vuoto". Tale porzione di muratura viene espulsa per piccoli incrementi di carico (circa a 10kN) dalla deformazione del tirante-spinotto, che tende a raddrizzarsi per allinearsi lungo l'asse di carico. Uno schema esemplificativo della distribuzione degli sforzi in questa fase è riportato in Figura 24. Una volta danneggiata la muratura sottostante la testa del connettore, gli sforzi taglianti trovano contrasto nella muratura, e nella prova si registra un incremento della forza di estrazione. Questo è il momento in cui si è registrata la più alta variabilità in quanto, in funzione della qualità delle operazioni di realizzazione del provino, della collaborazione tra malta di iniezione e muratura e delle condizioni stesse della muratura, si sono registrati sia elevati incrementi di carico (fino al doppio del valore raggiunto fino a quel momento) sia danneggiamenti costanti (con limitati incrementi di carico), fino al raggiungimento del collasso della connessione.

1MID



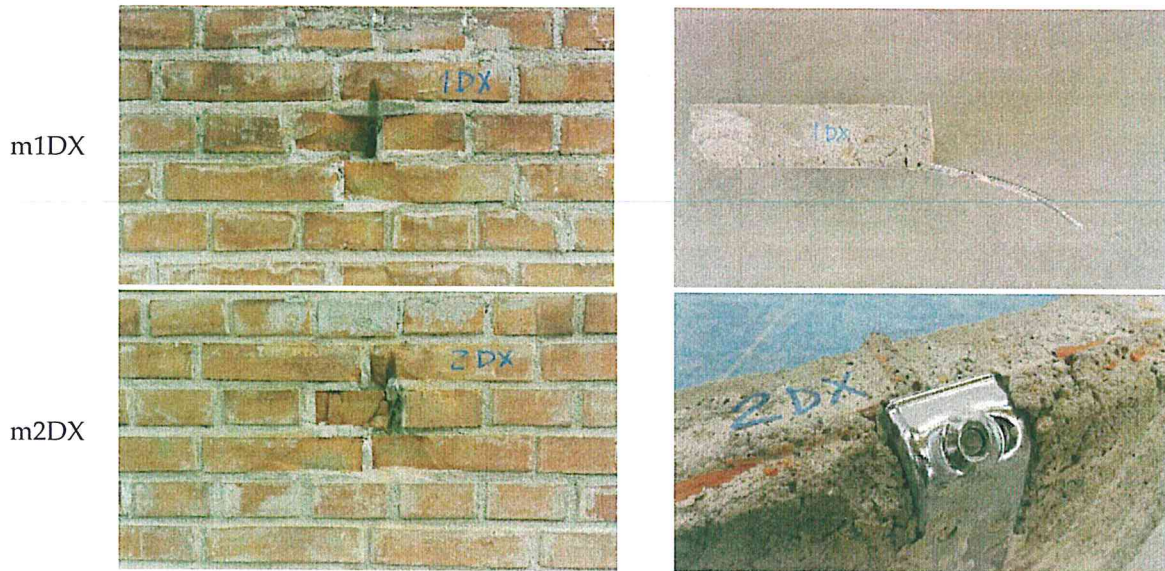


Figura 23 – Condizioni dei provini alla fine delle prove di pull-out

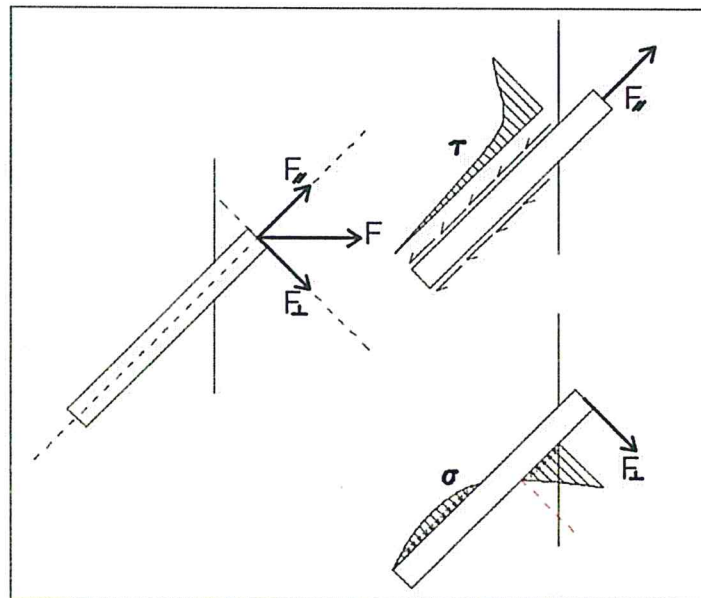


Figura 24 - Distribuzione degli sforzi durante la prova di pull-out



## 8. APPENDICE A – CARATTERISTICHE MATERIALI

Nella presente appendice vengono riportati degli estratti delle schede tecniche dei materiali utilizzati nella presente campagna riguardanti le loro caratteristiche meccaniche.

### *Calcestruzzo Leggero Strutturale Premiscelato tipo Leca CLS 1400*

Densità in confezione	circa 1150 Kg/m <sup>3</sup>
Densità (UNI EN 206-1)	circa 1400 Kg/m <sup>3</sup> (classe D 1,5)
Classe di resistenza (UNI EN 206-1)	LC 20/22
Classe di esposizione (UNI EN 206-1)	X0-XC1
Tempo di applicazione (a 20°C)	20 minuti
Temperatura di applicazione	da + 5 °C a + 35 °C
Pedonabilità	6 ore dalla posa
Conducibilità termica dichiarata (UNI 10351)	$\lambda = 0,42$ W/mK
Conducibilità termica di calcolo (UNI EN ISO 10456)	$\lambda = 0,46$ W/mK
Resa in opera (in funzione del grado di compattazione)	ca. 0,74 sacchi/m <sup>2</sup> per sp. 1 cm - 1,35 m <sup>2</sup> /sacco per sp. 1 cm
Resistenza meccanica a compressione (laboratorio)	$R_{cm}$ (2h) > 8 MPa   $R_{cm}$ (8h) > 15 MPa   $R_{cm}$ (24h) > 20 MPa $R_{ct}$ = 25 N/mm <sup>2</sup> (cubica a 28 gg.)   $f_{ct}$ = 22,5 N/mm <sup>2</sup> (cilindrica a 28 gg.)
Modulo elastico	$E = 15.000$ N/mm <sup>2</sup>
Fattore di resistenza al vapore d'acqua (UNI EN ISO 10456)	$\mu=6$ (campo umido)
Permeabilità al vapore (UNI 10351)	$\delta=1,9 \cdot 10^{-12}$ kg/msPa
Capacità termica specifica Cp [J/(kgK)]	1000
Reazione al fuoco (D.M. 10/03/2005)	Euroclasse A1 (Incombustibile)
Confezione	bancale in legno a perdere con 84 sacchi da 16 litri/cad. pari a 1,34 m <sup>3</sup> di prodotto sfuso.
Condizioni di Conservazione (D.M. 10 Maggio 2004)	In imballi originali, luogo coperto, fresco, asciutto ed in assenza di ventilazione
Durata (D.M. 10 Maggio 2004)	massimo dodici (12) mesi dalla data di confezionamento
Scheda di Sicurezza	disponibile on-line sul sito <a href="http://www.centrostorico.eu">www.centrostorico.eu</a> #
Conformità	D.M. 14/01/2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni). Circolare 02/02/2009 (Istruzioni alle NTC). Norma UNI EN 206-1.

### Calcestruzzo Fibrato predosato Gras Calce per formazione del basamento

DATI TECNICI	
ACQUA D'IMPASTO	circa 1,5-2 litri per sacco
MASSA VOLUMICA (indurita)	2.300 - 2.400 kg/m <sup>3</sup>
RESISTENZA A COMPRESSIONE (a 28 gg)	$R_{ck}$ 30 N/mm <sup>2</sup> Classe C 25/30
CLASSI DI ESPOSIZIONE	Vedi tabella
CLASSE DI CONSISTENZA	S4 (fluida)
DIAMETRO MAX DELL'AGGREGATO DMAX	10 mm
TEMPI DI PRESA	IP = 5 ore / FP = 7 ore (inizio presa/fine presa)
DOSAGGIO DI CEMENTO	370 kg/m <sup>3</sup>
RAPPORTO A/C	0,60
CONSUMO	circa 84 sacchi/m <sup>3</sup> di impasto
CONFEZIONE	SACCHI in polietilene da 25 kg



### Mattone pieno UNI 21.6.25

Caratteristiche generali		
Lunghezza		25 cm
Larghezza		12 cm
Altezza		6 cm
Pezzi per pacco		176
Peso dell'elemento		3 Kg
Peso pacco		532 Kg
Spessore muratura	12 cm	25 cm
Pezzi al m <sup>2</sup>	58	118
Pezzi al m <sup>3</sup>	484	470
Caratteristiche strutturali		
Resistenza media a compressione nella direzione dei carichi verticali		18 N/mm <sup>2</sup>
Resistenza media a compressione nella direzione ortogonale ai carichi verticali		2,2 N/mm <sup>2</sup>
Campo d'impiego: Muratura portante in zona sismica (spessore 25 cm) - Muratura di tamponamento		

### Malta Palladio BM 55

#### **Dati tecnici secondo norma UNI EN 998-2**

Peso specifico	1550 kg/m <sup>3</sup> deter.in caduta libera
Diametro massimo	3 mm
Tempo d'impiego	2 h
Acqua d'impasto	17% circa
Spessore minimo di applicazione	0,5 cm
Res. mecc. a flessione a 28 gg	> 2,0 N/mm <sup>2</sup>
Res. mecc. a compr. a 28 gg (M5)	> 6 N/mm <sup>2</sup>
Contenuto di cloruri	< 0,01%
Resistenza a taglio iniziale	0,15 N/mm <sup>2</sup> (valore tabulato)
Permeabilità al vapore acqueo $\mu$	15/35 (valore tabulato)
Reazione al fuoco	classe A1
Conducibilità termica $\lambda$	0,92 W/mK

### Acciaio dell'elemento "prisma di base"





EUSIDER S.P.A.

AZIENDA CON SISTEMA DI GESTIONE  
PER LA QUALITA' CERTIFICATO DA DNV  
" " UNI EN ISO 9001:2008 " "

CERTIFICATO DI ANALISI 2.2 UNI EN 10204		T.A. TRANCERIA ATTREZZERIA S.R.L. / VIA L. DA VINCI 23 / 26854 PIEVE FISSIRAGA LO				Nr. 0100197435		Data: 28/09/2017							
Identificazione Prodotto		1706743384													
Coil (colata)		1706673938													
Qualità: S235 JR		Norma di rif.: UNI EN 10025-2		N° Ordine Cliente: 0532/2017		Cod. mat. Cliente: A1250X25001									
Spessore (mm): 2.500		Larghezza (mm): 1.250.00		Lunghezza (mm): 2.500,00		Peso (t): 7.510									
Caratteristiche meccaniche	Caratteristiche norma	Test	Unità dimensionali	Note tecniche:	Caratteristiche meccaniche	Test	Unità dimensionali								
Rm		381,0	N/mm <sup>2</sup>		Perdita Magnetica Specifica Max	/	10/50 W/kg 15/50 W/kg								
Re		297,0	N/mm <sup>2</sup>		Resilienza	/ /	-20 / 0 / +20 °C (J)								
A		29,2	%		HRB/T	/	kg/mm <sup>2</sup>								
Composizione chimica(%)															
C%	Si%	S%	P%	Mn%	Ni%	Cr%	Mo%	V%	Cu%	Ti%	Al%	Pb%	B%	Nb%	Fe%
0,0650	0,0140	0,0100	0,0280	0,3280											
Note: DDT 80460973 21/09/2017 Ordine di vendita: 138841		Note:			Prodotto conforme ai requisiti dell'ordine e condizioni secondo norma Posizione Prova: TRASVERSALE										
Resp. Cliente: SALVATORE VENTURINI EUSIDER spa		Responsabile Tecnico: LUCA PLACIDA EUSIDER spa			Addetto alla Verifica: FAUSTO CAROZZI EUSIDER spa										
Mod. 861-17	Rev. 3	Data 03/01/2011	Emis. Comm.		Visto ASQ		Visto D.G.								

Società a socio unico soggetta a direzione e coordinamento della Eusider Fratelli Spa  
Sede Legale: 20174 MILANO - Via Veltro Bresani, 20  
Sece Amministrativa e Deposito: 23845 COSSIMASOLA  
Via per Ruggino / Fraz. Branno della Torre  
tel. 031/87.11 - fax 031/87.91.95 - email: eusider@eui.it  
Capitale sociale euro 5.836.000 i.v.

Acciaio del tirante-spinotto

Colata Cast Schmelze Coulée	Ø mm	CARATTERISTICHE MECCANICHE						
		Mechanical properties Mechanische kennwerte Caracteristics mecaniques						
		Toll. Sez. Deviation From	Snervamento Yield stress	Rottura Tensile strenght	Rapporto Ratio	Allungamento Elongation	fR	Bend and rebend
		%	Reh (Mpa)	Rm (Mpa)	Rm/Reh	Recl/ Renom	Agf (%)	fR
33358	12,00	-0,20	543	640	1,18	1,21	11,2	0,066 +
33511	12,00	0,50	530	625	1,18	1,18	10,9	0,072 +
33512	12,00	0,30	533	629	1,18	1,19	11,2	0,067 +
33326	16,00	1,10	538	640	1,19	1,20	10,9	0,074 +
63412	22,00	-1,20	520	610	1,18	1,16	12,9	0,074 +