



# Setup sperimentale innovativo per prove accoppiate di taglio-compressione su pannelli murari

Francesca Ferretti<sup>a</sup>, Luca Pozza<sup>a</sup>, Claudio Mazzotti<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italy

*Keywords: Muratura; prove di taglio-compressione; setup sperimentale; modellazione numerica.*

## ABSTRACT

Le modalità di rottura di pannelli murari in presenza di azioni orizzontali sono riconducibili, come è noto, a tre diversi meccanismi: rottura per scorrimento, rottura per fessurazione diagonale, rottura per pressoflessione (rocking). Con l'obiettivo di studiare il comportamento accoppiato a taglio-compressione di pannelli in muratura, si è messo a punto un innovativo setup sperimentale per l'esecuzione di prove monotone e cicliche su pannelli murari in scala reale. In particolare, il setup è stato progettato in modo da poter applicare un carico verticale di compressione e di modularlo, al crescere dello sforzo di taglio, al fine di impedire le rotazioni della sezione superiore del pannello e, quindi, riprodurre una condizione di vincolo del tipo incastro-incastro scorrevole, tipicamente riscontrata nei pannelli murari di edifici reali soggetti all'azione sismica. Nel presente lavoro sono illustrati i risultati di diverse simulazioni numeriche con l'obiettivo di analizzare le potenzialità del sistema di prova. L'intero setup e il pannello murario sono stati modellati tramite un software a elementi finiti, considerando la muratura come materiale omogeneo, e sono state eseguite analisi non lineari per investigare le differenti modalità di rottura. Inoltre, sono state condotte analisi parametriche al fine di ottenere risultati predittivi di future prove sperimentali, variando le proprietà meccaniche della muratura. I risultati delle simulazioni numeriche hanno permesso di confermare la capacità del setup di prova di riprodurre la condizione di vincolo desiderata e quindi di analizzare la modalità di rottura per fessurazione diagonale, che tipicamente si riscontra in pannelli murari sollecitati a taglio.

## 1 INTRODUZIONE

Le modalità di rottura di pannelli murari in presenza di azioni orizzontali sono riconducibili, come è noto, a tre diversi meccanismi: rottura per scorrimento, rottura per fessurazione diagonale, rottura per pressoflessione (rocking). Il manifestarsi di un meccanismo rispetto agli altri dipende da numerosi aspetti, quali la geometria dell'elemento strutturale, l'entità degli sforzi verticali e orizzontali applicati, le condizioni al contorno, i parametri meccanici dei materiali costituenti la muratura (Magenes e Calvi 1997, Calderini et al. 2009, Ferretti et al. 2019).

Nello studiare il comportamento a taglio nel piano di un maschio murario, e con riferimento particolare alle condizioni di vincolo tipicamente riscontrabili in edifici esistenti, è possibile considerare le seguenti condizioni: (i) incastro alla base e rotazione libera in sommità; (ii) incastro alla base e rotazione impedita in sommità. I fattori che maggiormente influenzano il comportamento di

una parete in muratura, determinando il verificarsi di una delle condizioni sopra descritte, sono: la tipologia degli orizzontamenti e l'efficacia del loro collegamento con le pareti verticali, la presenza di cordoli e la qualità delle fasce di piano (deboli o forti). In questa ricerca si farà riferimento alla seconda condizione descritta, che trova riscontro, nella pratica, in edifici caratterizzati principalmente dalla presenza di cordoli in calcestruzzo armato, che realizzano un buon collegamento tra pareti e orizzontamenti e garantiscono un comportamento scatolare dell'edificio, o di fasce di piano in grado di fornire un adeguato grado di accoppiamento tra i maschi murari (Scotta et al. 2018, Ongaretto et al. 2016).

Numerose ricerche, in passato, hanno avuto l'obiettivo di studiare il comportamento a taglio nel piano delle murature tramite l'esecuzione di prove sperimentali. In questi lavori, i setup di prova utilizzati differiscono tra loro principalmente per le condizioni di vincolo, per la

presenza o meno del carico di compressione verticale e per la modalità di applicazione del carico orizzontale (van Vliet 2004). In particolare, la forza orizzontale viene spesso applicata al pannello murario per mezzo di una trave rigida atta a redistribuire lo sforzo di taglio sull'intera sezione del campione. Inoltre, viene introdotto uno stato di compressione verticale per ridurre le tensioni di trazione alla base della parete e, cosa più importante, per prevenire la rotazione della sezione di sommità, dovuta all'applicazione del carico orizzontale, e poter quindi applicare lo stato di sforzo desiderato (Ganz 1984, Woodward e Rankin 1985, Epperson e Abrams 1990). Questa condizione viene raggiunta introducendo un grado di vincolo nella sezione superiore del campione. La variabilità dei setup di prova riportati nelle ricerche citate evidenzia la necessità di porre particolare attenzione alla progettazione di tali sistemi, che devono essere in grado di riprodurre il comportamento a taglio desiderato.

Nel seguito verranno descritti il progetto e la validazione numerica di un setup sperimentale innovativo per l'esecuzione di prove accoppiate di taglio-compressione su pannelli murari in vera grandezza, cercando di riprodurre la condizione di vincolo del tipo incastro-incastro scorrevole. Gli elementi di novità sono rappresentati dalla possibilità di modulare il carico verticale durante la prova, dalla presenza di una traversa rigida orizzontale su pattini che contribuisce nel mantenere orizzontale la sezione superiore del pannello murario, e dall'applicazione dello sforzo di taglio in corrispondenza della mezzeria del pannello.

## 2 SETUP SPERIMENTALE

Nel presente lavoro, si è messo a punto un setup sperimentale innovativo per l'esecuzione di prove accoppiate di taglio-compressione di tipo monotono e ciclico su pannelli murari in scala reale. In particolare, il setup è stato progettato in modo da poter riprodurre al meglio una condizione di vincolo esterno del pannello murario del tipo incastro-incastro scorrevole. Inoltre, per facilitare lo sviluppo di una modalità di rottura a taglio per fessurazione diagonale del pannello murario, il setup consente la variazione del punto di applicazione dello sforzo normale di compressione al crescere dello spostamento orizzontale imposto (i.e. sforzo di taglio), al fine di impedire/limitare le rotazioni della sezione superiore del pannello murario e quindi riprodurre più fedelmente la condizione di vincolo del tipo incastro-incastro

scorrevole. I dettagli del setup proposto sono riportati in Figura 1 e Figura 2.

### 2.1 Descrizione del setup sperimentale

In Figura 1 è riportata una vista d'insieme del setup di prova che risulta composto sostanzialmente dai seguenti componenti, che assolvono differenti funzioni: torrette verticali, traversa rigida orizzontale su pattini scorrevoli, sistema di stabilizzazione laterale, sistema di applicazione e modulazione del carico verticale, sistema di applicazione dello spostamento in sommità al pannello murario, campione di prova. Si riporta di seguito una breve descrizione di ciascun componente del setup.

Torrette verticali: sono posizionate ai lati del pannello murario (considerando il suo piano medio) da testare e realizzate con elementi cavi in cemento armato opportunamente fissati allo strong floor del laboratorio. Costituiscono il sistema di appoggio della traversa superiore rigida e del sistema di pattini di scorrimento (Figura 1). Sono caratterizzate da un'elevata rigidità assiale, in modo da subire deformazioni trascurabili durante la prova e quindi non indurre tensioni parassite al pannello murario da testare. Le torrette costituiscono anche la base di fissaggio del sistema di stabilizzazione laterale.

Traversa rigida orizzontale su pattini scorrevoli: realizzata in profilo HEB300 ed installata su pattini scorrevoli, la traversa orizzontale costituisce il vincolo di incastro scorrevole di sommità al pannello murario. La traversa è dotata di 4 mensole di estremità che consentono il fissaggio con il sistema di scorrimento a pattini solidale alle torrette. La conformazione geometrica delle mensole laterali della traversa è stata opportunamente studiata per limitare la localizzazione degli sforzi sui pattini scorrevoli di bordo. La traversa funge anche da elemento rigido di distribuzione del carico verticale.

Sistema di stabilizzazione laterale: è realizzato da n. 2 traverse laterali in profilo HEB 140 fissate solidamente alle torrette verticali. Le traverse sono equipaggiate con una coppia di rulli che consentono lo scorrimento orizzontale del provino ma allo stesso tempo lo stabilizzano nei confronti delle azioni fuori piano che possono nascere durante la prova.

Sistema di applicazione e modulazione del carico verticale: il carico verticale viene introdotto nel pannello murario attraverso una coppia di martinetti idraulici con capacità di 50t che

agiscono a contrasto tra la traversa rigida superiore e degli elementi rigidi solidarizzati alla fondazione del provino mediante tiranti verticali articolati realizzati con barre diwydag. Il sistema di applicazione del carico verticale (i.e. sforzo normale sul muro) risulta pertanto auto equilibrato (Figura 1). Il sistema a bielle verticali consente di mantenere invariato il carico verticale per il range di spostamenti orizzontali della traversa superiore previsto in fase di prova. La variazione del punto di applicazione della risultante del carico verticale viene realizzata agendo in maniera disaccoppiata sulla pressione locale di ciascuno dei due martinetti (uno in decremento ed uno in aumento a seconda della direzione dello spostamento orizzontale imposta alla sommità).

Sistema di applicazione dello spostamento in sommità al pannello murario: è costituito da un attuatore MTS servoidraulico con capacità di 100t.

L'attuatore è fissato ad un muro di contrasto rigido ed è equipaggiato con LVDT interno per il controllo dello spostamento imposto ed una cella di carico per la misura della forza applicata. L'applicazione dello spostamento in testa al campione viene realizzata mediante un elemento metallico a forcella fissato da un lato alla testa dell'attuatore in modo rigido e dall'altro alla mezzeria del cordolo sommitale del pannello murario mediante un perno metallico di grosso spessore (Figura 1). I fenomeni di danneggiamento locale dovuto al contatto perno-calcestruzzo sono evitati da un inserto metallico preventivamente annesso in fase di getto sul cordolo che diffonde gli sforzi. Per evitare ogni gioco durante la prova, i nodi perno-forcella e perno-inserto sono realizzati con lavorazioni meccaniche di precisione.

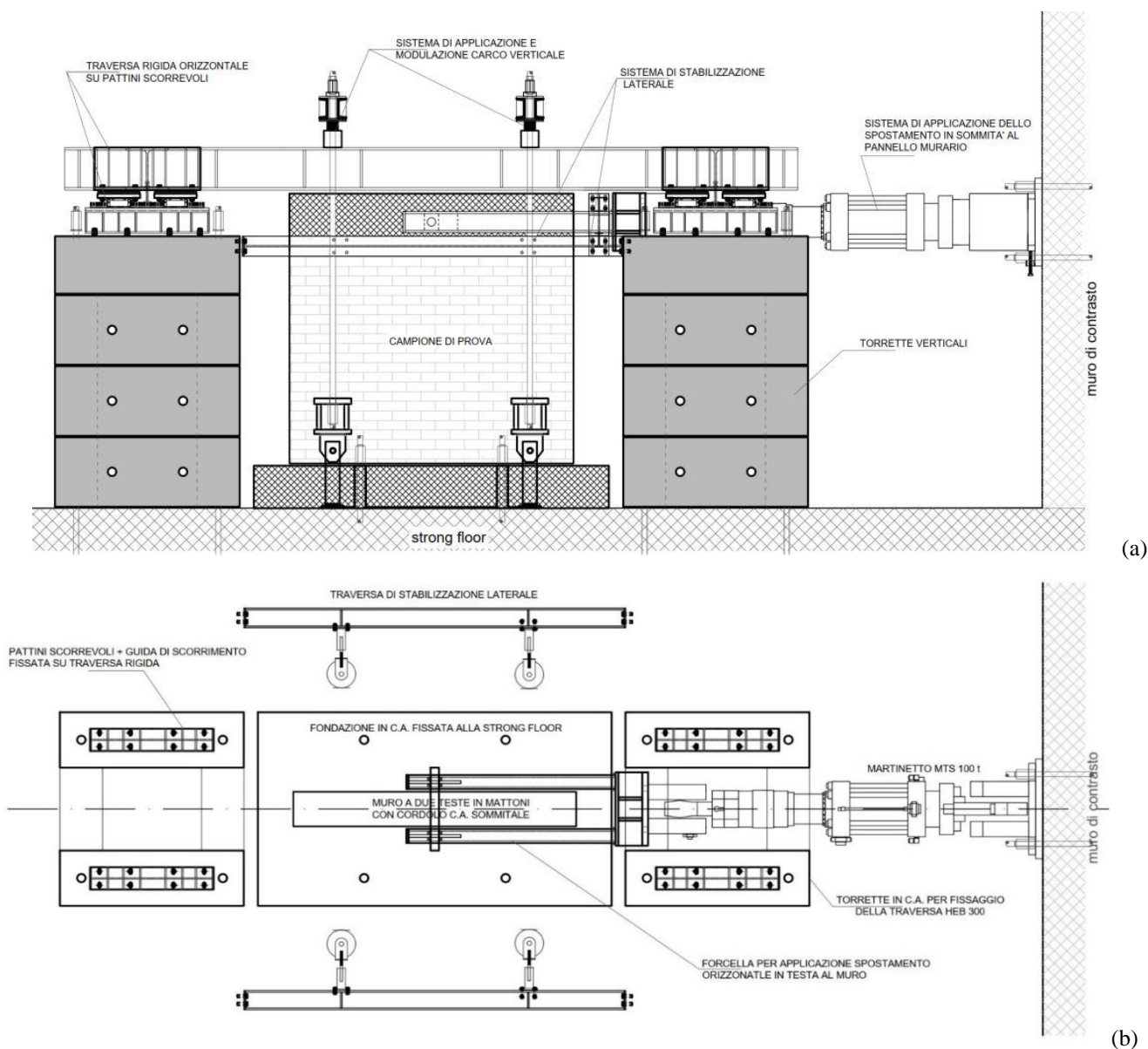
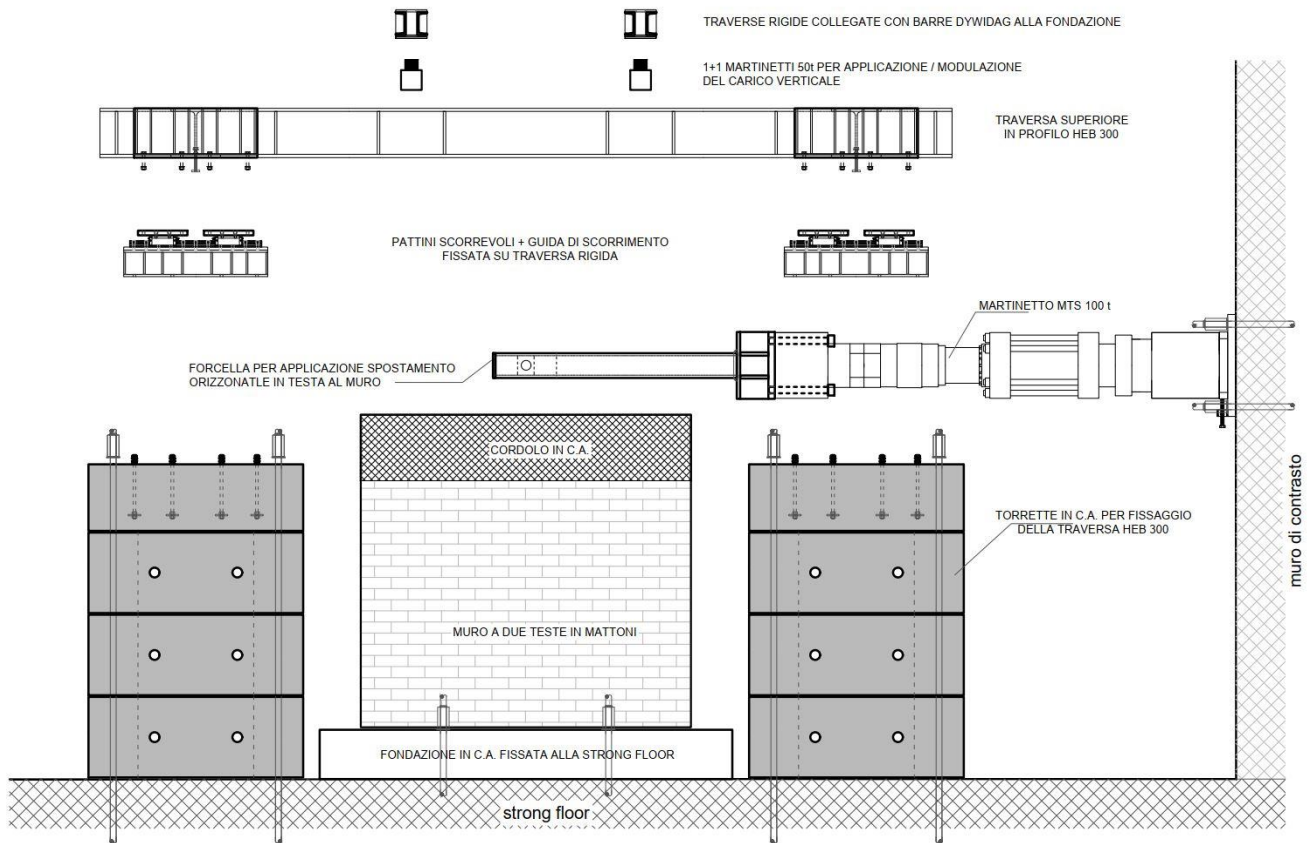
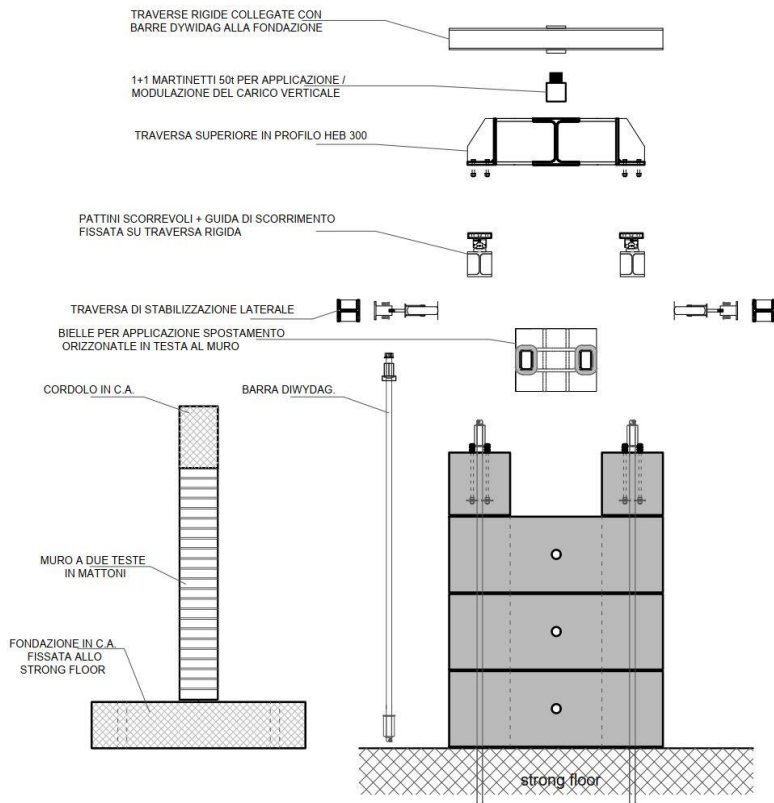


Figura 1. Setup sperimentale per prove accoppiate di taglio-compressione: (a) vista d'insieme; (b) esploso dei componenti in pianta.



(a)



(b)

Figura 2. Setup sperimentale per prove accoppiate di taglio-compressione: (a) esploso dei componenti in vista frontale; (b) esploso dei componenti in vista laterale.



Campione di prova: si compone di tre elementi: la fondazione, il pannello murario e il cordolo sommitale. La fondazione di base è un blocco monolitico in calcestruzzo armato. Viene solidarizzata allo strong floor del laboratorio mediante barre dywidag. È equipaggiata con 4 piastre per il fissaggio delle bielle verticali che permettono l'applicazione del carico verticale.

Il pannello murario ha dimensioni indicative di 2.0 m di base x 1.5 m di altezza. Viene realizzato al di sopra della fondazione e coronato con un cordolo in calcestruzzo armato che consente sia la diffusione del carico verticale sul muro che l'introduzione dello spostamento orizzontale sommitale. I singoli componenti del setup sono rappresentati negli esplosi di Figura 1 e Figura 2.

## 2.2 Descrizione della procedura di prova

La procedura di prova è schematizzata in Figura 3 ed è composta dalle seguenti fasi.

**FASE 1:** Applicazione del carico verticale sul campione in maniera uniforme. Durante questa fase si incrementa gradualmente il carico verticale sul provino agendo in maniera simmetrica sui martinetti verticali fino al raggiungimento del carico target di prova.

**FASE 2:** Attivazione del sistema di scorrimento orizzontale a pattini. In questa fase si attiva il sistema di scorrimento orizzontale della traversa superiore che in FASE 1 era svincolato dal sistema di prova per evitare eventuali migrazioni del carico verticale applicato dal pannello murario ai pattini scorrevoli.

**FASE 3:** Applicazione dello spostamento orizzontale mediante l'attuatore e modulazione dello sforzo normale sui martinetti idraulici. Durante questa fase si impone lo spostamento orizzontale (in modo monotono o ciclico) alla sommità del campione, dove la traversa mobile in acciaio limita le sue rotazioni. Per garantire una condizione di vincolo prossima a quella di incastro-incastro scorrevole e limitare pertanto la rotazione della sezione sommitale del muro (i.e. limitare la lunghezza di distacco del cordolo dalla traversa superiore) si prevede di modulare il carico verticale agente sui martinetti. In particolare, attraverso la modulazione si introduce una asimmetria nei livelli di carico applicati dai martinetti verticali, avendo però cura di assicurare sempre il medesimo valore di carico totale applicato al campione. La modulazione si realizza incrementando il livello di carico del martinetto posto sul lato della sezione del campione che, per effetto della rotazione sommitale, tende a

sollevarsi rispetto alla condizione orizzontale e, viceversa, riducendo il livello di carico del martinetto posto sul lato che tende ad abbassarsi. Chiaramente la massima modulazione applicabile prevede l'annullamento del carico sul martinetto posto sul lato della sezione sommitale che tende ad abbassarsi e la massimizzazione del livello di carico sul martinetto localizzato sul lato opposto (che applicherà per intero lo sforzo normale sul campione).

La modulazione del carico verticale in funzione del livello di spostamento (carico) orizzontale imposto viene eseguita con specifiche leggi calibrate sulla base delle simulazioni numeriche esposte nei successivi paragrafi.

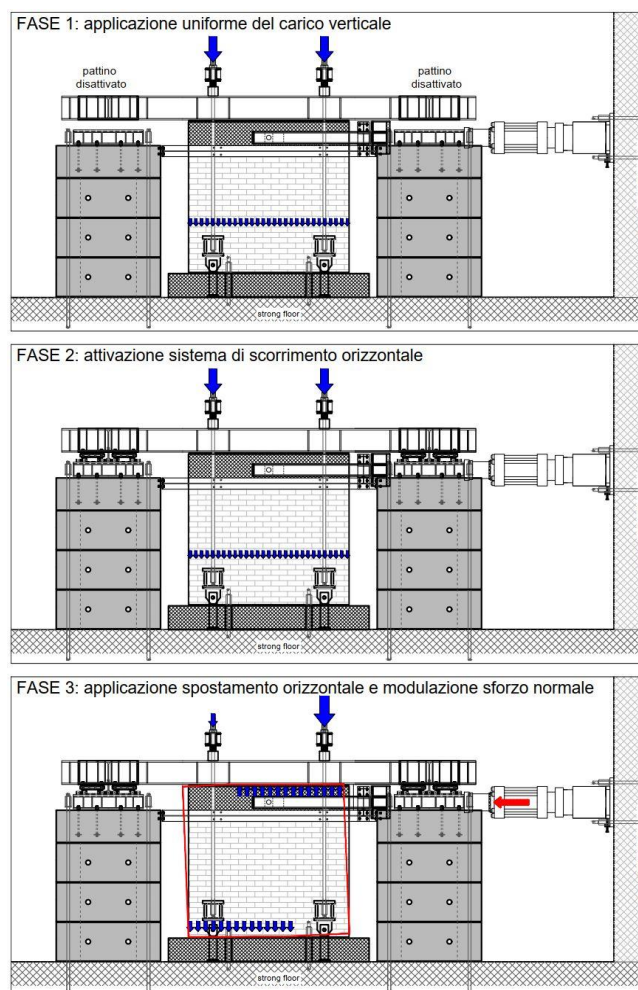


Figura 3. Schema delle fasi della procedura di prova.

## 3 VALIDAZIONE ANALITICA DEL SETUP SPERIMENTALE

In fase di progettazione del setup sperimentale, è stato necessario definire, oltre che la condizione di vincolo già discussa in precedenza, la geometria del campione e l'intervallo di lavoro per la compressione media verticale applicata al pannello murario con l'obiettivo di riprodurre una

modalità di rottura per fessurazione diagonale. Si è quindi scelto di sottoporre a prova pannelli murari piuttosto tozzi, aventi dimensioni  $200 \times 150 \times 25 \text{ cm}^3$  ( $B \times H \times t$ ).

Come intervallo di lavoro della tensione media verticale si è scelto di operare tra 0.2 e 0.5 MPa. Tale intervallo risulta infatti adeguato sia per riprodurre lo stato tensionale, tipicamente non elevato, agente su maschi murari di edifici esistenti, sia per ottenere la modalità di rottura a taglio desiderata.

Al fine di validare dal punto di vista analitico le scelte fatte riguardanti la geometria del campione e l'intervallo per la compressione media verticale, sono state analizzate le tre principali modalità di rottura per un pannello murario sollecitato a taglio nel piano. In particolare, con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 17/01/18, Circolare 21/01/19), si sono considerati i seguenti modelli, relativi alle modalità di collasso per trazione diagonale, per fessurazione diagonale con rottura "a scaletta" e per pressoflessione, rispettivamente definiti dalle seguenti Equazioni:

$$\tau = \frac{1.5\tau_0}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma}{1.5\tau_0}} = \frac{f_t}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma}{f_t}} \quad (1)$$

$$\tau = \tilde{f}_{v0} + \tilde{\mu}\sigma = \frac{f_{v0}}{1 + \mu\phi} + \frac{\mu}{1 + \mu\phi} \sigma \quad (2)$$

$$\tau = \frac{B}{H_0} \cdot \frac{\sigma}{2} \left( 1 - \frac{\sigma}{0.85f_c} \right), \quad (3)$$

dove  $\sigma$  è la tensione media di compressione sulla sezione del pannello e  $\tau$  la tensione tangenziale media, calcolata considerando l'intera sezione del pannello murario. Per quanto riguarda il criterio di rottura per trazione diagonale (Equazione 1),  $\tau_0$  è la resistenza a taglio di riferimento della muratura,  $f_t$  è la resistenza a trazione per fessurazione diagonale e  $b$  è un coefficiente correttivo, assunto pari a 1, legato alla distribuzione degli sforzi sulla sezione e dipendente dalla snellezza del pannello. Relativamente al criterio di rottura con fessurazione diagonale "a scaletta" (Equazione 2),  $\tilde{f}_{v0}$  e  $\tilde{\mu}$  sono la resistenza a taglio e il coefficiente di attrito della muratura equivalenti. Queste grandezze sono funzione dei parametri di resistenza locale del giunto, quali la resistenza al taglio in assenza di tensioni normali  $f_{v0}$  e il coefficiente di attrito  $\mu$ , e della tessitura, attraverso il coefficiente di ingranamento murario  $\phi$ , definito come rapporto tra l'altezza di un mattone e la

lunghezza di sovrapposizione minima con i mattoni dei corsi superiore e inferiore. Nel criterio di rottura per pressoflessione (Equazione 3),  $B$  è la larghezza del pannello,  $H_0$  è la distanza della base dalla sezione di momento nullo, calcolata come  $0.5 \times H$  per lo schema di vincolo considerato, dove  $H$  è l'altezza totale del campione, e  $f_c$  è la resistenza a compressione della muratura.

I criteri di rottura qui descritti sono stati determinati per il caso in esame e riportati in Figura 4. In particolare, si sono considerate le dimensioni geometriche scelte per il campione e i valori massimi e minimi delle proprietà meccaniche per muratura esistente in mattoni pieni e malta di calce, riportati nella Tabella C8.5.I della Circolare 21/01/19, amplificati per tenere conto di un'efficace connessione trasversale tra i paramenti del campione sottoposto a prova (Tabella C8.5.II, Circolare 21/01/19).

Dalla Figura 4 risulta piuttosto evidente come sia effettivamente possibile, per gran parte dell'intervallo di compressione verticale scelto (0.2-0.5 MPa), ottenere una rottura a taglio per fessurazione diagonale (trazione diagonale o rottura "a scaletta"), evitando la rottura per pressoflessione. Tuttavia, occorre prestare particolare attenzione per bassi livelli di carico dal momento che in corrispondenza di tensioni verticali medie inferiori a 0.3 MPa potrebbe innescarsi, a seconda delle caratteristiche meccaniche del pannello sottoposto a prova, il meccanismo di rottura per pressoflessione.

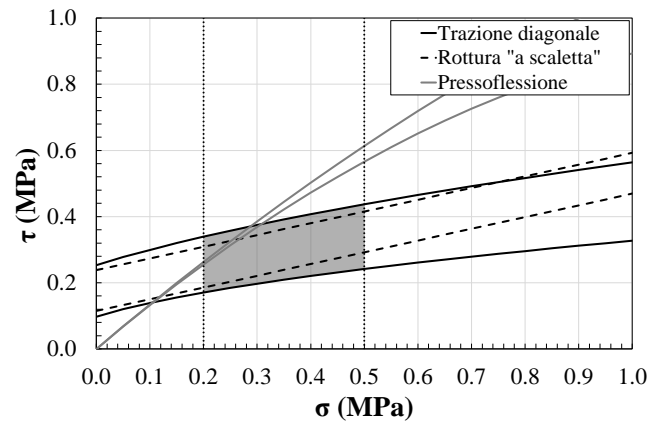


Figura 4. Criteri di rottura per pannelli murari secondo le NTC 2018.

#### 4 ANALISI NUMERICA

Al fine di verificare il corretto funzionamento del setup di prova, sono state eseguite diverse simulazioni numeriche tramite il software a elementi finiti Straus7. Attraverso la creazione di

un modello 2D semplificato, si sono analizzate le modalità di rottura per taglio e pressoflessione precedentemente introdotte.

Tra i componenti del setup sperimentale descritti al paragrafo 2.1, sono stati modellati la traversa orizzontale su pattini scorrevoli e il campione di prova, a cui sono stati poi applicati il carico verticale e lo spostamento orizzontale in sommità.

La traversa orizzontale e le mensole di estremità previste per il collegamento con il sistema di scorrimento a pattini sono state modellate tramite elementi “*beam*” ai quali è stato assegnato un comportamento elastico lineare. Per realizzare il collegamento tra le mensole e i pattini scorrevoli, sono stati utilizzati elementi “*truss*” con elevata rigidezza assiale, vincolati per mezzo di appoggi all’estremità inferiore.

Il pannello murario e il cordolo in calcestruzzo armato sono stati modellati utilizzando elementi bidimensionali triangolari e quadrangolari tipo “*plate*”. Si assume un comportamento elastico lineare per il cordolo in c.a., mentre la muratura viene modellata come materiale omogeneo e isotropo con comportamento elasto-plastico, utilizzando un criterio di rottura del tipo Mohr-Coulomb. La modellazione non lineare della muratura non è in questo caso lo scopo principale dello studio ma serve a cogliere con realismo il comportamento del sistema dopo le prime fessurazioni. Per la modellazione del meccanismo di rottura per pressoflessione, il collegamento superiore tra il cordolo in c.a. e la traversa rigida orizzontale e il collegamento inferiore tra il pannello murario e la fondazione sono modellati utilizzando elementi tipo “*cutoff bar*”, aventi proprietà diverse a seconda del collegamento modellato per tenere in considerazione il differente comportamento delle interfacce muratura-fondazione e cordolo-traversa superiore. In particolare, per quanto riguarda il collegamento inferiore, gli elementi sono caratterizzati da valori di rigidezza assiale, resistenza a trazione e resistenza a compressione pari a quelli della muratura, mentre per il collegamento superiore, i parametri di rigidezza e resistenza sono stati opportunamente calibrati per considerare possibili fenomeni di distacco della traversa dal cordolo. Il numero degli elementi “*cutoff*” introdotti coincide con il numero dei nodi degli elementi “*plate*” del cordolo e del pannello murario. L’utilizzo di questa tipologia di elementi permette di modellare adeguatamente il fenomeno del “*rocking*” a

pressoflessione. Infatti, il raggiungimento della resistenza a trazione negli elementi “*cutoff*” provoca un distacco, corrispondente alla parzializzazione delle sezioni. Le proprietà meccaniche dei materiali utilizzate nelle analisi sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1. Parametri meccanici usati nella modellazione.

Elemento	Proprietà	Unit à	Valore
Beam –	Modulo elastico	MPa	206000
Traversa rigida	Coeff. Poisson	-	0.3
Truss - Pattini	Modulo elastico	MPa	200000
Plate - Cordolo	Modulo elastico	MPa	27460
	Coeff. Poisson	-	0.2
Plate - Muratura	Modulo elastico	MPa	5000
	Coeff. Poisson	-	0.2
	Res. taglio ( $\sigma=0$ )	MPa	0.2
	Coeff. d’attrito	-	0.4
Cutoff bar, inf.	Modulo elastico	MPa	5000
	Res. compressione	MPa	5.0
	Res. trazione	MPa	0.4
Cutoff bar, sup.	Modulo elastico	MPa	10000
	Res. compressione	MPa	5.0
	Res. trazione	MPa	0.13

La simulazione numerica viene eseguita per fasi, riproducendo la procedura di prova descritta al paragrafo 2.2. Pertanto, in prima fase, viene applicato un carico verticale, mantenendo svincolati gli elementi “*truss*”, usati per modellare le guide scorrevoli (Figura 5a). La tensione di compressione media  $\sigma$  applicata al pannello, per mezzo di due forze laterali in corrispondenza dei martinetti idraulici, è pari a 0.5 MPa. In seconda fase, vengono attivati i vincoli corrispondenti al sistema di scorrimento a pattini e, successivamente, in terza fase, viene applicato lo spostamento orizzontale, sia in corrispondenza della mezzeria del cordolo in c.a. che in corrispondenza delle mensole della traversa rigida (Figura 5b). Durante l’analisi lo spostamento viene incrementato in modo monotono fino ad un valore di drift limite del 2.3‰ (3.5 mm). Allo stesso tempo, vengono modulate le forze verticali applicate per limitare la rotazione della sezione sommitale del pannello.

In Figura 6 è riportato l’andamento dei moltiplicatori dei carichi verticali, per la forza destra ( $\lambda_{dx}$ ) e per la forza sinistra ( $\lambda_{sx}$ ), rispettivamente. La modulazione dei carichi verticali è stata eseguita utilizzando una funzione a gradini che incrementa il livello di carico sul lato del pannello murario che tende a sollevarsi e che riduce il livello di carico sul lato opposto che tende a distaccarsi dalla traversa. Chiaramente, istante

per istante, la somma dei carichi verticali deve essere uguale al carico totale applicato inizialmente. La scelta di una funzione a gradini, anziché di una funzione complessa che moduli istantaneamente i carichi verticali in relazione alla rotazione della sommità del pannello murario, è stata dettata da esigenze sperimentali. In ogni caso, la calibrazione di detta funzione è stata eseguita ottimizzando l'effetto di limitazione della rotazione della testa del pannello murario, anche in relazione all'intera durata della prova.

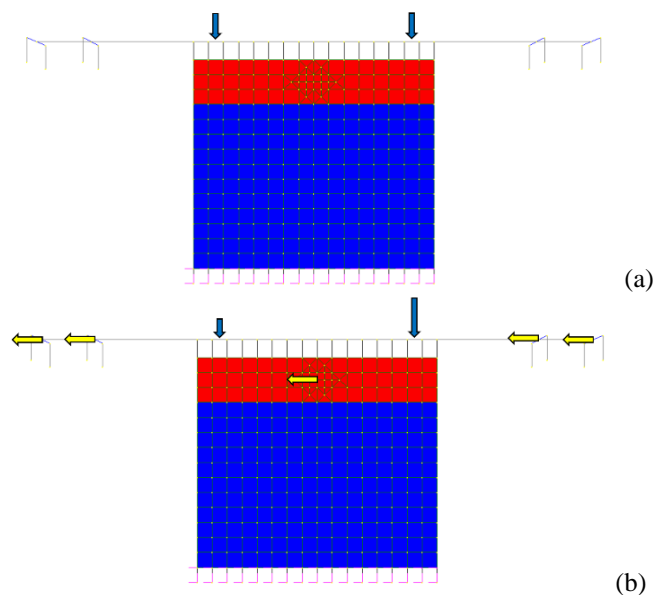


Figura 5. Modello a elementi finiti: (a) Fase 1; (b) Fase 3.

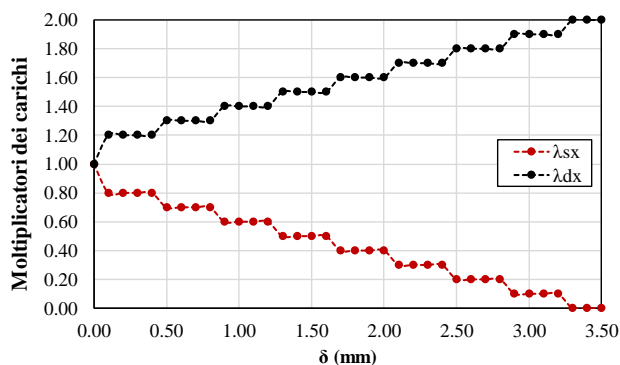


Figura 6. Andamento dei moltiplicatori dei carichi verticali.

Si riportano nel seguito i principali risultati dell'analisi non lineare che dimostrano la capacità del setup di prova di riprodurre una condizione di vincolo del tipo incastro-incastro scorrevole.

Dalla configurazione deformata del pannello murario, mostrata in Figura 7 per un drift dell'1‰ (1.5 mm), si può notare come la sezione di sommità si mantenga sostanzialmente orizzontale e come la deformazione della muratura sia prevalentemente di tipo tagliante. A titolo esemplificativo, per lo stesso valore di drift, si riporta in Figura 8 l'andamento delle tensioni

principali, da cui si può chiaramente osservare l'attivazione di un puntone lungo la diagonale compressa del provino.

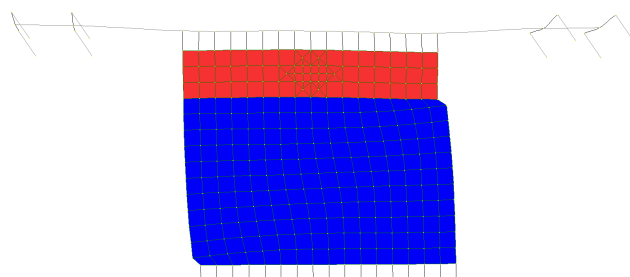


Figura 7. Deformata del pannello murario in corrispondenza di un drift dell'1‰ (1.5 mm).

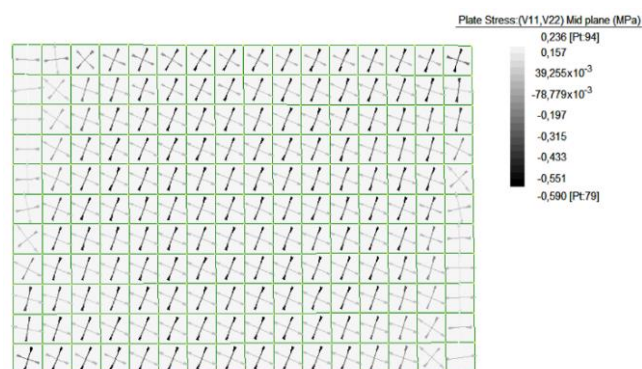


Figura 8. Andamento delle tensioni principali in corrispondenza di un drift dell'1‰ (1.5 mm).

In Figura 9 è riportato il grafico forza  $F$  vs spostamento  $\delta$ . In Figura 10 sono invece raffigurate le lunghezze di distacco al progredire dell'analisi, corrispondenti al raggiungimento della resistenza a trazione assegnata agli elementi "cutoff" e, conseguentemente, alla parzializzazione delle sezioni di base e di sommità. Per quest'ultima si registrano lunghezze di distacco maggiori, coerentemente con le proprietà di interfaccia assegnate tra cordolo in c.a. e traversa rigida. Si registra un considerevole e progressivo aumento delle lunghezze di distacco in corrispondenza di un drift imposto dell'1‰ (1.5 mm), punto in cui il pannello murario ha già sostanzialmente raggiunto la sua capacità massima (Figura 9). Inoltre, si noti che il distacco non interessa mai tutta la larghezza delle sezioni. Il valore della forza orizzontale massima ottenuto dall'analisi risulta in buon accordo con quello desumibile dal dominio di rottura definito in Figura 4, considerando in maniera opportuna la parzializzazione della sezione (Figura 10).

L'effetto combinato della modulazione del carico verticale e della deformabilità intrinseca della traversa orizzontale comportano una variazione del livello di compressione durante la prova con una parziale migrazione del carico



verticale dal pannello murario alle guide a pattino scorrevole laterali. Attraverso le analisi numeriche è stata verificata l'entità di tale variazione (riduzione) di compressione sul pannello murario che risulta comunque modesta e può essere efficacemente ridotta mediante la correzione del carico verticale applicato. Nell'ambito di questo lavoro si considera di correggere la riduzione dello sforzo di compressione sul muro mediante l'adozione di una funzione lineare di incremento del carico verticale con lo spostamento imposto in sommità al pannello stesso ( $\delta$ ) valutata sui risultati ottenuti dall'analisi numerica precedentemente esposti e tenendo in considerazione che anche la quota di incremento di carico si redistribuisce, attraverso la traversa superiore, tra il pannello murario e le guide scorrevoli laterali.

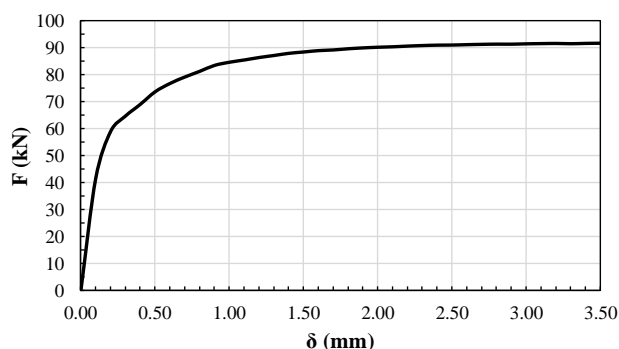


Figura 9. Curva forza – spostamento ( $\sigma = 0.5$  MPa).

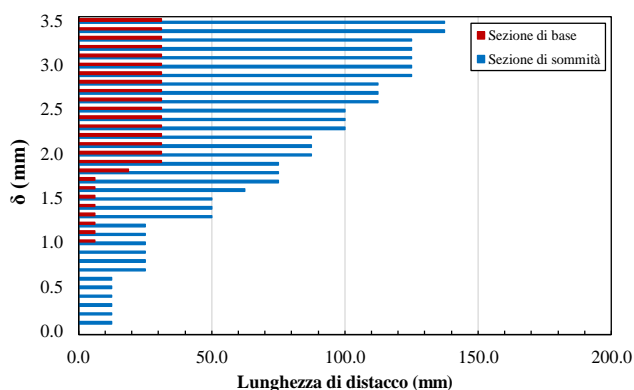


Figura 10. Lunghezze di distacco.

Per meglio analizzare l'effetto della modulazione del carico verticale sulla risposta del pannello murario, è stata anche eseguita una simulazione numerica mantenendo costanti, e pari all'unità, i moltiplicatori dei carichi verticali. Il confronto tra il modello appena analizzato e il modello senza modulazione del carico verticale è riportato in Figura 11 in termini di spostamento verticale in corrispondenza di un drift pari all'1% (1.5 mm). Dal confronto tra le due configurazioni deformate risulta evidente che la sezione di sommità subisce una rotazione significativamente

più marcata nel caso in cui non sia introdotta la modulazione dei carichi verticali per mezzo dei moltiplicatori di carico, come descritto in precedenza, ad ulteriore conferma della correttezza della procedura di prova ipotizzata.

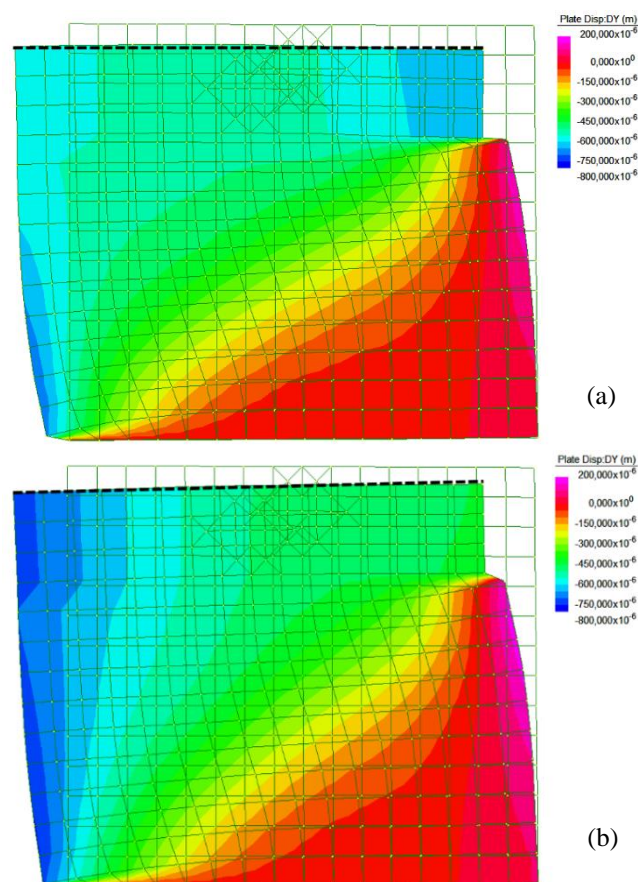


Figura 11. Spostamenti verticali in corrispondenza di un drift dell'1% per modelli (a) con modulazione del carico verticale e (b) senza modulazione del carico verticale.

#### 4.1 Analisi parametriche

Con l'obiettivo di studiare nel dettaglio come alcune variazioni dei principali parametri meccanici possano influenzare la risposta del pannello murario, sono state eseguite alcune analisi parametriche, variando i valori del modulo elastico  $E$  della muratura e della resistenza al taglio in assenza di sforzo normale  $f_{v0}$ , come definito in Tabella 2. I risultati di tali analisi sono presentati in Figura 12 in termini di grafico forza  $F$  vs spostamento  $\delta$ .

Tabella 2. Definizione delle analisi parametriche effettuate.

Identificativo analisi	$\sigma$ (MPa)	$E$ (MPa)	$f_{v0}$ (MPa)
NLA_A1	0.5	5000	0.2
NLA_A2	0.5	5000	0.1
NLA_A3	0.5	3200	0.2
NLA_A4	0.5	3200	0.1

Come previsto, si nota che una diminuzione del valore della resistenza a taglio in assenza di sforzo

normale ( $f_{v0}$ ) influisce sulla capacità a taglio del pannello murario ( $F_{max}$ ), che risulta pressoché dimezzata rispetto al modello analizzato in precedenza (NLA\_A1). Il valore di taglio massimo che si ottiene è inferiore al valore atteso per il livello di compressione applicato ma coerente con la maggiore parzializzazione che si registra per la sezione di sommità del pannello.

L'effetto della riduzione del modulo elastico non incide sul valore del taglio ultimo ma determina una riduzione di rigidità nella prima parte della prova, maggiormente evidente per l'analisi NLA\_A3, dove è utilizzato un valore più alto della resistenza al taglio in assenza di sforzo normale.

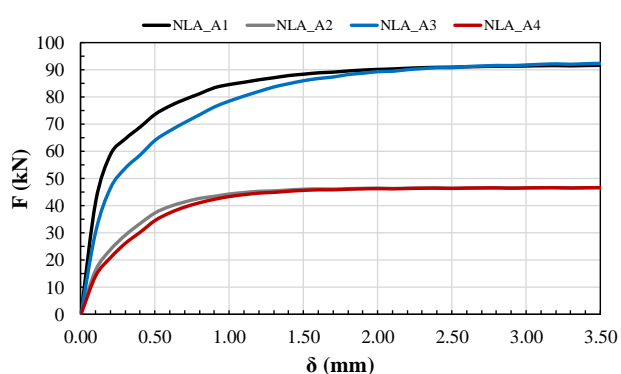


Figura 12. Analisi parametriche: curve forza – spostamento.

## 5 CONCLUSIONI

Nel presente lavoro, è stato descritto un setup sperimentale innovativo per l'esecuzione di prove accoppiate di taglio-compressione. Il sistema di prova è stato progettato per permettere di simulare una condizione di vincolo del tipo incastro-incastro scorrevole, ottenuta tramite la presenza di una traversa orizzontale rigida su pattini scorrevoli e tramite la possibilità di modulare i carichi verticali all'aumentare dello spostamento orizzontale imposto al campione.

La geometria del pannello murario da sottoporre a prova e l'intervallo di lavoro per la compressione media verticale sono stati scelti al fine di ottenere una rottura a taglio per fessurazione diagonale, condizione confermata da una preliminare validazione analitica del setup sperimentale.

La validazione del sistema e della procedura di prova è stata inoltre ottenuta tramite analisi non lineari eseguite con un software a elementi finiti. Le simulazioni numeriche delle prove di taglio, in cui sono state indagate le modalità di rottura per fessurazione diagonale con rottura “a scaletta” e

per pressoflessione, hanno confermato la capacità del setup di limitare la rotazione nella sezione di sommità del campione e, quindi, di riprodurre la modalità di rottura per fessurazione diagonale desiderata. Tramite alcune analisi parametriche, si è inoltre analizzato l'effetto della variazione dei valori delle proprietà meccaniche della muratura sulla risposta a taglio del pannello murario.

## 6 RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Dipartimento di Protezione Civile (Progetto Reluis 2019 – Materiali innovativi) per il supporto finanziario alla ricerca.

## REFERENCES

- Calderini, C., Cattari, S., Lagomarsino, S., 2009. In-plane strength of unreinforced masonry piers. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **38**, 243-267.
- Circolare 21/01/19. Istruzioni per l'applicazione dell'“Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni”, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.
- D.M. 17/01/18. Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.
- Epperson, G.S., Abrams, D.P., 1990. Evaluating lateral strength of existing unreinforced brick piers in the laboratory. *5<sup>th</sup> North American Masonry Conference*. June 3-6 1990, Urbana-Champaign, Illinois.
- Ferretti, F., Ferracuti, B., Mazzotti, C., Savoia, M., 2019. Destructive and minor destructive tests on masonry buildings: experimental results and comparison between shear failure criteria. *Construction and Building Materials*, **199**, 12-29.
- Ganz, H., 1984. Versuche an Mauerwerksscheiben unter Normalkraft und Querkraft, Bericht nr. 7502-4, Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zurich.
- Magenes, G., Calvi, M., 1997. In-plane seismic response of brick masonry walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **26**, 1091-1112.
- Ongaretto, E., Pozza, L., Savoia, M., 2016. Wood-based solutions to improve quality and safety against seismic events in conservation of historical buildings. *International Journal for Quality Research*, **10**(1), 17-46.
- Scotta, R., Truttali, D., Marchi, L., Pozza, L., 2018. Seismic performance of URM buildings with in-plane non-stiffened and stiffened timber floors. *Engineering Structures*, **167**, 683-694.
- van Vliet, M.R.A., 2004. TNO report 2004-CI-R0171: Shear tests on masonry panels; Literature survey and proposal for experiments, TNO Building and Construction Research.
- Woodward, K., Rankin, F., 1985. Shear resistance of unreinforced hollow concrete block masonry walls. *3<sup>rd</sup> North American Masonry Conference*. June 3-5, Arlington, Texas.