



## Risposta fuori piano di tamponature robuste in laterizio

Riccardo R. Milanesi<sup>a\*</sup>, Paolo Morandi<sup>b</sup>, Sanja Hak<sup>c</sup>, Guido Magenes<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile ed Architettura, Università di Pavia, Italy

<sup>b</sup> Dipartimento di Strutture e Infrastrutture, EUCENTRE, Pavia, Italy

<sup>c</sup> Dipartimento di Structural Safety, Basler & Hofmann AG

\* corresponding author: riccardo.milanesi@unipv.it

*Keywords: tamponamenti in muratura; tamponamento robusto; comportamento fuori piano; prove sperimentali; criteri di verifica*

### ABSTRACT

Le NTC2018 sono piuttosto carenti sulle verifiche di sicurezza da adottare per le tamponature e le tramezze in muratura soggette ad azione sismica. In particolare, le suddette norme non riportano criteri per il calcolo della resistenza fuori piano delle tamponature e non considerano in alcun modo l'effetto negativo di un eventuale danneggiamento nel piano del pannello murario sulla resistenza e stabilità fuori piano. In letteratura, sono stati recentemente proposti alcuni modelli capaci di trattare questo aspetto, ma prevalentemente per murature "leggere", per esempio realizzate con blocchi in laterizio ad elevata foratura orizzontale di medio-piccolo spessore (8-12 cm). Quasi del tutto assenti sono invece studi e sperimentazioni che riguardano il comportamento "fuori piano" di murature più robuste, quali quelle in laterizio a foratura verticale di medio-alto spessore (30-35 cm), peraltro ampiamente utilizzate anche grazie alle buone prestazioni termo-acustiche.

In questo articolo si riporta uno studio riguardante la risposta fuori piano di tamponature "robuste" realizzate con murature in laterizio di 35 cm di spessore, sulla base dei risultati di una ricerca sperimentale condotta su tamponamenti in scala reale all'interno di un telaio in c.a. ad un piano ed una campata. L'obiettivo della ricerca è quella di stabilire dei criteri di verifica per tamponature robuste per quanto riguarda la valutazione della resistenza fuori piano.

### 1 INTRODUZIONE

Il comportamento sismico fuori dal piano di tamponamenti è stato oggetto di numerose ricerche sperimentali e numeriche condotte nel passato; siano esse, per esempio, volte a studiare la risposta sismica dei tamponamenti "leggeri" monostrato in laterizio (per es., Calvi e Bolognini, 1999), tamponamenti in mattoni pieni o blocchi in calcestruzzo (per es., Angel *et al.*, 1994) o il comportamento bidirezionale di una piastra assimilabile ad un tamponamento (Flanagan e Bennett, 1999).

I sopralluoghi successivi ai più recenti eventi sismici italiani (Ricci *et al.*, 2011; Manzini e Morandi, 2012; Fragomeli *et al.*, 2017) hanno tuttavia dimostrato come le tamponature, così come altri elementi non strutturali, presentano spesso un'elevata vulnerabilità che può tramutarsi

in rilevanti perdite economiche dovute al danneggiamento elevato delle stesse, o nel collasso delle tamponature, con conseguente rischio per l'incolumità delle persone.

Di conseguenza, nell'arco dell'ultimo decennio, sono state svolte numerose ricerche al fine di studiare diversi aspetti delle moderne tamponature come, per esempio, l'effetto delle condizioni di bordo (Di Domenico *et al.*, 2018), l'interazione tra il danneggiamento nel piano e la resistenza fuori piano (Morandi *et al.*, 2013, da Porto *et al.*, 2013), gli effetti locali (Milanesi *et al.*, 2018) o procedure semplificate per la progettazione di telai tamponati (Hak *et al.*, 2018).

Una parte consistente della ricerca più recente è stata volta anche allo studio di sistemi per migliorare la risposta sismica dei tamponamenti in muratura, siano esse tecniche per rinforzare il tamponamento (Calvi e Bolognini, 1999; Koutas *et al.*, 2013; Valluzzi *et al.*, 2014), per

disaccoppiare il tamponamento dal telaio (Butenweg e Marinkovic, 2018), o per rendere il pannello murario deformabile tramite l'inserimento di giunti deformabili o di scorrimento (Prete *et al.*, 2017; Morandi *et al.*, 2018a, Verlato *et al.*, 2016).

Il presente articolo, che si inserisce all'interno di una ricerca sperimentale più vasta in parte riportata in Morandi *et al.*, 2018b, tratta della risposta fuori piano di tamponature "robuste" in laterizio. Tali tipologie costruttive monostrato rappresentano la soluzione di tamponatura più utilizzata in caso di costruzione di nuovi tamponamenti. Le tamponature studiate, di spessore pari a 35 cm, sono state realizzate in aderenza con il telaio in c.a. e i provini, in scala reale, sono stati soggetti a prove cicliche pseudo statiche nel piano (Morandi *et al.*, 2018b) e prove pseudo-statiche fuori dal piano, sia cicliche che monotone.

Sebbene la risposta fuori piano di una tamponatura "robusta" monostrato in laterizio sia stata oggetto di studio, per esempio, da parte di Barbiero *et al.*, 2006 e Hak *et al.*, 2014, il comportamento a "piastra" di un tamponamento in scala reale è stato preso in considerazione raramente e, al fine di stabilire dei criteri di verifica per la valutazione della resistenza fuori piano di tamponature robuste, sono necessarie ulteriori indagini sperimentali.

## 2 DESCRIZIONE DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE

La campagna sperimentale svolta è costituita da prove cicliche nel piano seguite da prove cicliche fuori piano (TA1, TA2, TA3). Per la determinazione della resistenza fuori piano del tamponamento non danneggiato, sono state svolte due ulteriori test: uno ciclico fuori piano su una striscia verticale di tamponamento (TA5), e uno monotono fuori piano su un tamponamento pieno (TA6). Infine, è anche stata studiata una soluzione con un'apertura (TA4).

I provini testati sono dei telai in cemento armato in scala reale, ad un piano e ad una campata, progettati secondo l'Eurocodice 8 e le NTC 2008 (Figura 1); maggiori informazioni relative alla progettazione ed ai dettagli costruttivi sono riportati in Morandi *et al.*, 2018b. Tutti le proprietà dei materiali (calcestruzzo, acciaio, malta, blocchi in laterizio e muratura) sono state valutate tramite caratterizzazione meccanica (si veda la Tabella 2 e la Tabella 3); in seguito sono state svolte le prove sui telai tamponati, come riportato in Tabella 1.

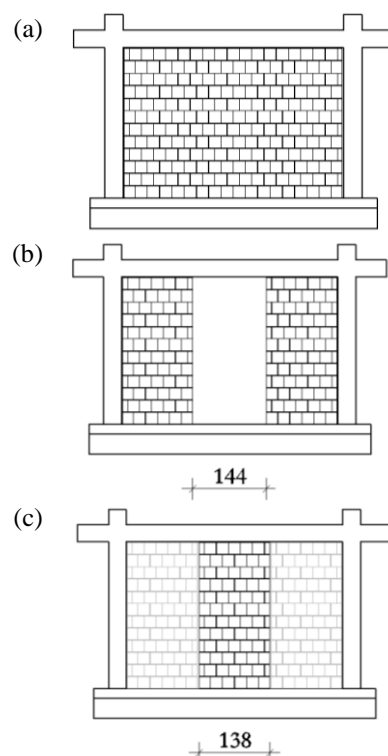
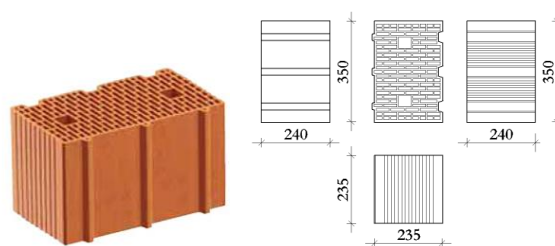


Figura 1. (a) Tamponamento pieno TA1, TA2, TA3, TA6; (b) Tamponamento con apertura TA4; (c) Striscia verticale di tamponamento TA5.

Tabella 1. Riassunto delle prove sperimentali effettuate e dettaglio del blocco in laterizio utilizzato per le tamponature.

Provino	Nel piano	Fuori piano	Configurazione
TNT	3.50%	---	Telaio nudo
TA1	1.50%	75 mm	Tamp. pieno
TA2	2.50%	75 mm	Tamp. pieno
TA3	1.00%	75 mm	Tamp. pieno
TA4	1.00%	75 mm	Tamp. apertura
TA5	---	75 mm	Striscia verticale
TA6	---	Forza max	Tamp. pieno



Le prove cicliche nel piano sono state effettuate su un telaio privo di tamponamento e su tre provini completamente tamponati (TA1, TA2 e TA3) fino al raggiungimento di tre diversi drift obiettivo, pari a 1.0%, 1.5% e 2.5%. In aggiunta, un telaio parzialmente tamponato, ovvero con una apertura a tutt'altezza di 1.44 m di larghezza (circa 1/3 della luce) è stato testato fino ad un drift massimo dell'1.0%. Le prove cicliche fuori piano dei provini TA1, TA2, TA3 e TA4 sono state svolte successivamente ai test nel piano. La

determinazione della resistenza fuori piano senza precedente danneggiamento nel piano è stata invece individuata interpretando i risultati della prova ciclica fuori piano sulla striscia muraria (TA5) e del test monotono fuori piano (TA6).

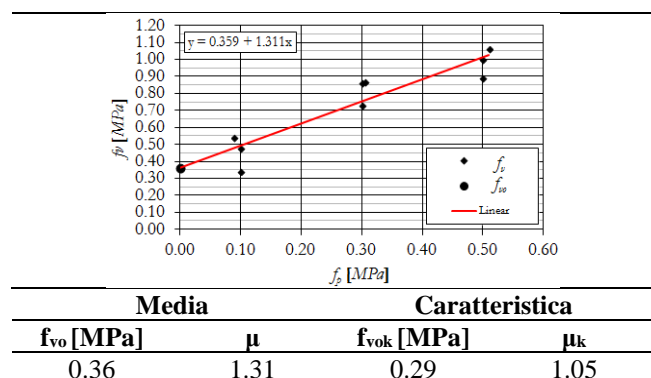
In tutti i casi, la tamponatura testata è costituita da una soluzione “robusta” monostrato di muratura tradizionale in laterizio di spessore pari a 35 cm, con blocchi (di dimensione 235x350x235 mm) con giunto verticale ad incastro e una percentuale volumetrica nominale di foratura pari al 50% in direzione verticale. I giunti orizzontali, di spessore pari a circa 10 mm, sono stati realizzati con una malta tradizionale di tipo M5. I tamponamenti, realizzati dopo la completa maturazione dei telai in c.a., sono stati costruiti in completa aderenza con gli elementi strutturali, al fine di rappresentare la soluzione di dettaglio costruttivo più comune nel costruito italiano.

Tutti i materiali utilizzati sono stati caratterizzati meccanicamente, come riportato da Morandi *et al.*, 2018c. I risultati medi ottenuti su sei provini relativi alla resistenza ed alla rigidezza verticale ed orizzontale della muratura (EN 1052-1, 2001) sono riportati in Tabella 2. In Tabella 3 sono invece riportati i risultati delle prove per la determinazione della resistenza a taglio iniziale della muratura sulla base della EN 1052-3 (2007).

Tabella 2. Risultati delle prove di resistenza a compressione verticale ed orizzontale della muratura.

Resistenza [MPa]	Verticale		Laterale	
	$f_{mv}$	$E_v$	$f_{mh}$	$E_h$
Media	4.64	5299	1.08	494
Dev. stand.	0.66	455	0.16	162
C.o.V.TA2	14%	9%	15%	33%
Caratteristica	3.86	---	0.85	---

Tabella 3. Risultati delle prove di resistenza a taglio iniziale della muratura.



### 3 PROVE FUORI-PIANO: DESCRIZIONE DEL SETUP, DELLA STRUMENTAZIONE E DEL PROTOCOLLO

I test sono stati svolti presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Architettura dell’Università di Pavia. Per le prove in direzione fuori dal piano, sono stati adottati due diversi setup e strumentazioni a seconda del protocollo di prova utilizzato. I 5 provini (TA1-TA5) sono stati soggetti a prove cicliche fuori piano in controllo di spostamento, mentre il TA6 è stato sottoposto ad una prova “di carico” monotona.

#### 3.1 Prove cicliche fuori-piano

Le prove cicliche sono state svolte in controllo di spostamento applicando una deformazione al tamponamento mediante un attuatore idraulico servocontrollato. Il setup sperimentale è composto da un telaio di riscontro in acciaio vincolato su una piastra di fondazione in c.a. di 35 cm di spessore. Il telaio in acciaio è costituito da una parte centrale di riscontro dell’attuatore e due parti laterali di vincolo (Figura 1Figura 2). Le tre parti sono collegate tra loro trasversalmente con una trave in acciaio dove è posto l’attuatore. Le parti laterali presentano anche delle mensole rigide in acciaio dove sono presenti due profili a “L” a contatto con la trave del provino con lo scopo di impedire lo spostamento fuori dal piano del telaio in c.a. e di poter considerare la forza applicata dall’attuatore agente solamente sulla tamponatura.

La forza imposta dall’attuatore viene suddivisa mediante un sistema di travi e piastre in acciaio opportunamente incernierate. Nel caso dei tamponamenti completamente tamponati (TA1, TA2 e TA3), la forza totale è stata quindi applicata sul tamponamento in due linee composte da otto piastre tali da produrre approssimativamente due carichi lineari a metà altezza del pannello (Figura 3). Per il provino con tamponamento con apertura (TA4) il carico è stato applicato mediante quattro piastre per ogni pannello, mentre per la striscia di tamponamento (TA5), la forza è stata suddivisa nelle otto piastre centrali al fine di riprodurre il comportamento ad arco verticale.

La strumentazione adottata, composta da potenziometri, è servita a controllare gli spostamenti in direzione fuori dal piano del pannello di tamponamento, oltre che di verificare eventuali spostamenti del telaio in c.a. o della fondazione. In totale, per provini TA1, TA2 e TA3 sono stati utilizzati 30 potenziometri, per il provino TA4, 38 e per il TA5, 28. Di questi, solo

alcuni hanno monitorato gli spostamenti del tamponamento (20 per i tamponamenti pieni (Figura 4a), 26 per il tamponamento con apertura e 18 per la striscia muraria (Figura 4b)).

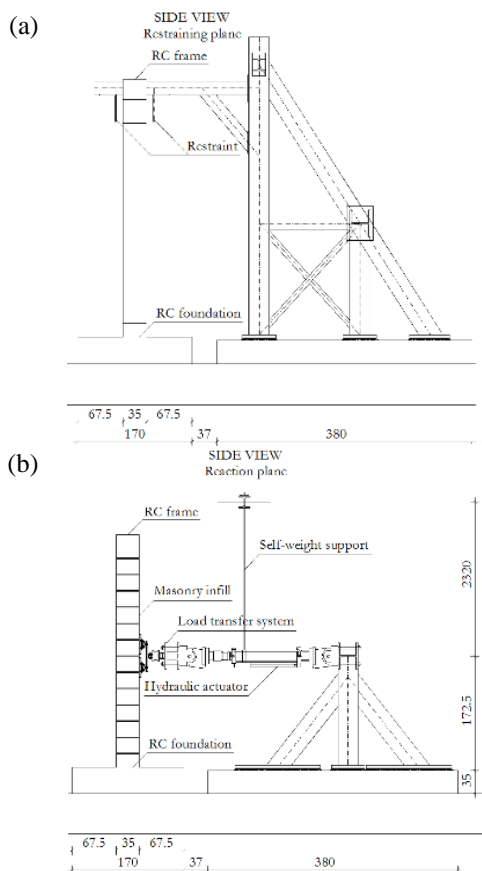


Figura 2. Layout the setup sperimentale per le prove cicliche fuori piano: (a) telaio laterale di vincolo; (b) telaio di riscontro centrale.

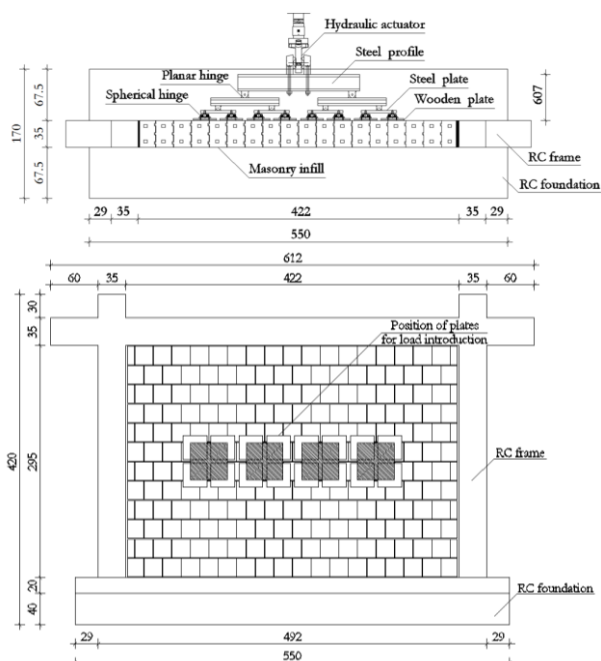


Figura 3. Sistema di trasferimento del carico fuori piano.

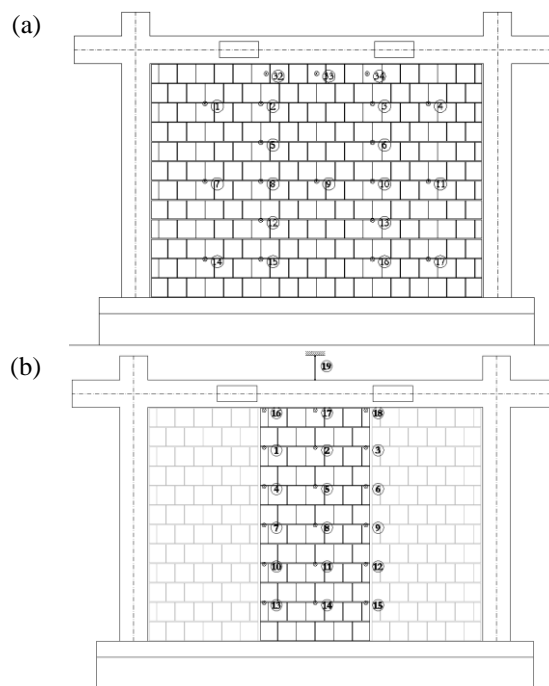


Figura 4. Layout della strumentazione adottata per: (a) i tamponamenti pieni TA1, TA2 e TA3; (b) la striscia muraria TA5.

All'inizio del test, l'attuatore ed i vincoli fuori piano sono stati messi in posizione ed il sistema di applicazione del carico è stato messo in contatto con la tamponatura. Il protocollo di prova è consistito nell'applicazione di un carico nella sola direzione di spinta fino al raggiungimento dello spostamento obiettivo, seguito da uno scarico fino ad una forza di circa  $5.0 \text{ kN}$  per garantire il contatto tra il pannello ed il setup di prova. Ogni ciclo di carico-scarico è stato ripetuto tre volte e la durata del ciclo è stata mantenuta pressoché costante.

### 3.2 Prova monotona fuori-piano

Il provino TA6 con tamponatura piena, è stato sottoposto ad una prova di carico, al fine di determinare la resistenza ultima fuori-piano del pannello pieno privo di precedente danneggiamento nel piano. Per lo svolgimento della prova, il provino è stato coricato in modo tale che la direzione di applicazione del carico fuori-piano coincidesse con quella di gravità. Il telaio in c.a. della tamponatura è stato sostenuto da masse in calcestruzzo con opportuni inspessimenti realizzati in lamiera di acciaio. In tal modo, si è costituito un vincolo verticale continuo, impedendo la deformazione laterale degli elementi in c.a.. La Figura 5 riporta alcune immagini del provino prima dell'inizio dello svolgimento della prova.

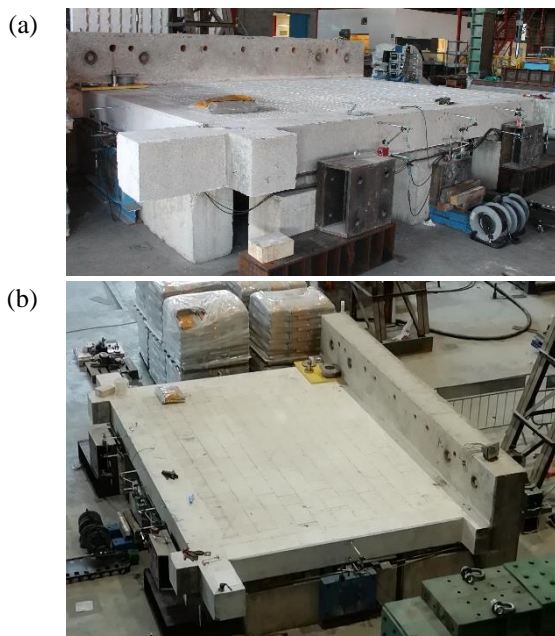


Figura 5. Vista del provino TA6 prima dello svolgimento della prova monotona fuori piano.

La strumentazione utilizzata durante la prova (Figura 6) è caratterizzata da un totale di 23 potenziometri, 13 dei quali hanno lo scopo di monitorare la deformazione del tamponamento, 6 che misurano la deformazione della trave in c.a., mentre i rimanenti 4 che controllano la deformazione a metà altezza delle colonne. I potenziometri sul tamponamento sono stati installati per misurare la deformazione in direzione verticale, mentre quelli posti sugli elementi in c.a. sono stati posti a coppie nella sezione interessata in modo da poter valutare anche eventuali rotazioni di tale sezione. Vista l'elevata rigidità della fondazione, non sono stati posti potenziometri sulla stessa.

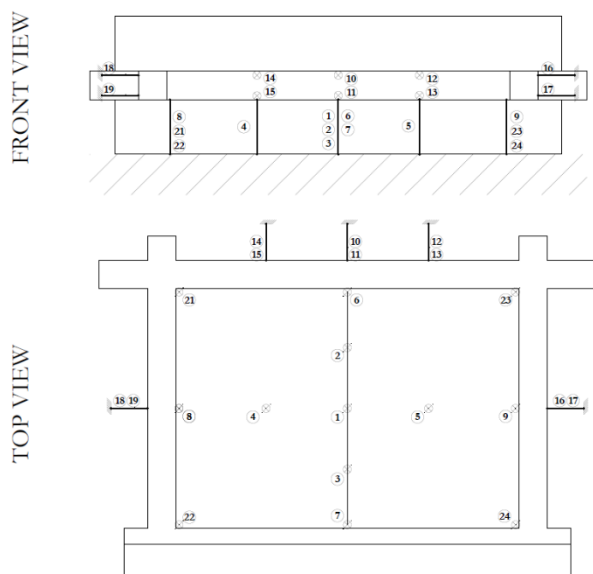


Figura 6. Layout della strumentazione adottata per il provino TA6.

Il protocollo sperimentale, simile ad una classica prova di carico, è costituito dal posizionamento di vari strati di sacchi di sabbia da 25 kg l'uno a coprire tutta la superficie della del pannello murario, fino al raggiungimento del collasso della parete. Al termine del posizionamento di ciascuno strato, sono stati monitorati eventuali danni e fessure; la strumentazione ha continuato invece ad acquisire i dati di spostamento durante tutto lo svolgimento del test.



Figura 7. Esempio di applicazione del carico per la prova monotona fuori piano sul provino TA6.

#### 4 INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI

I risultati sperimentali sono stati interpretati osservando sia la deformata del tamponamento durante le prove che le risposte in termini di curve forze-spostamento o pressione-spostamento, dove per spostamento di riferimento è stato considerato quello relativo al centro del pannello. Le differenze di protocollo di prova del TA6 rispetto alle altre tamponature, e della tipologia del provino TA5 rispetto a quelli completamente tamponati, obbligano ad individuare un preciso metodo interpretativo delle singole risposte sperimentali. Nei sotto-paragrafi successivi, in primo luogo vengono riportati e commentati i risultati sperimentali e, successivamente, viene fornita una prima interpretazione degli stessi al fine di individuare un criterio comune per la valutazione della resistenza fuori piano delle tamponature.

##### 4.1 Risultati sperimentali dei tamponamenti "pieni" precedentemente danneggiati nel piano (TA1, TA2, TA3)

In Figura 8, sono riportati i risultati sperimentali in termini di curve di inviluppo delle risposte cicliche forza-spostamento relativamente ai

provini TA1, TA2 e TA3. Le forze considerate sono quelle applicate dall'attuatore durante la sperimentazione.

I risultati mostrano chiaramente una riduzione significativa della rigidità e della resistenza fuori piano con il crescere del drift nel piano (e relativo danneggiamento) raggiunto precedentemente. I provini TA1 e TA3, che sono stati precedentemente sottoposti a prove nel piano fino a rispettivamente 1.0% e 1.5% drift, hanno restituito valori di resistenza di picco simili (163.9 kN e 168.5 kN), a fronte però di una riduzione di rigidità di circa il 40%. Il provino TA2, che è risultato essere il maggiormente danneggiato in quanto sottoposto ad una prova nel piano fino al 2.5% di drift, ha mostrato una sensibile riduzione sia in termini di rigidità (circa il 75% in meno rispetto al TA3) che di resistenza (102.7 kN).

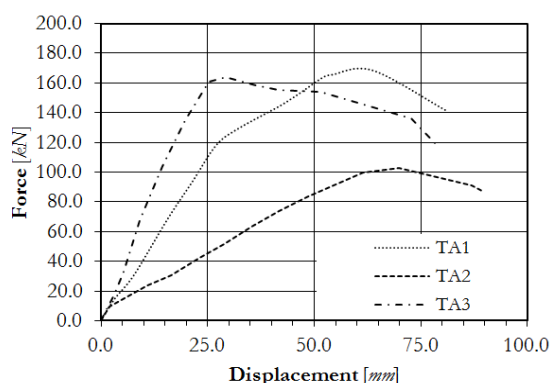


Figura 8. Confronto dell'involuppo delle curve forza-spostamento per i provini precedentemente danneggiati nel piano TA1, TA2 e TA3.

La strumentazione installata sui tamponamenti ha permesso di monitorare gli spostamenti fuori piano dei pannelli. In Figura 9 sono riportate le deformate del tamponamento corrispondenti al primo ciclo di carico a 50 mm (Figura 9a-b-c) e 75 mm (Figura 9d-e-f); per la ricostruzione delle deformate è stata effettuata un'interpolazione lineare tra i punti di misurazione noti.

In tutti i provini è stato osservato un meccanismo di collasso caratterizzato dalla creazione di una fessura orizzontale a metà altezza del centro del pannello e di fessure diagonali che partono dalla suddetta fessura centrale e finiscono agli angoli del tamponamento. Il meccanismo di danneggiamento descritto è assimilabile ad una resistenza a "doppio effetto ad arco", ovvero allo svilupparsi contemporaneamente sia di un arco verticale che di un arco orizzontale. Sono state riscontrate anche rotture locali di alcuni blocchi, sicuramente anche condizionate dal precedente danneggiamento imposto ai provini.

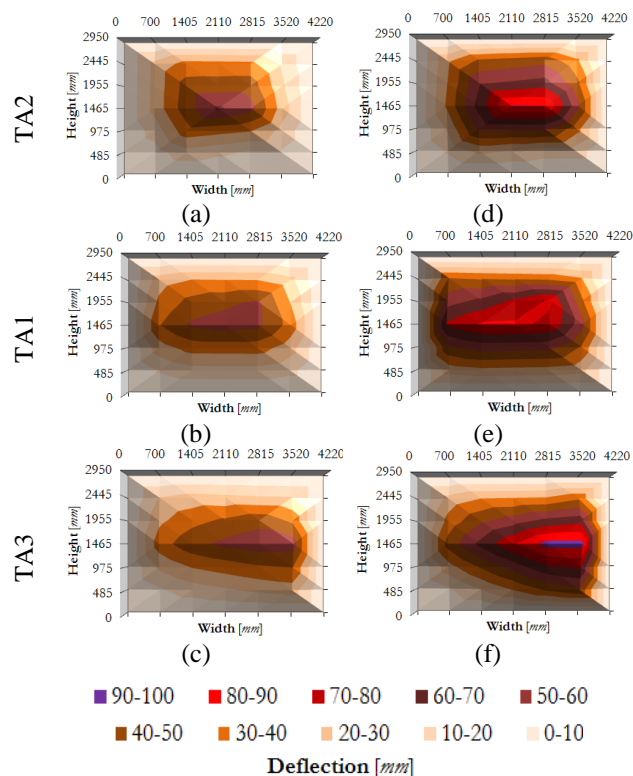


Figura 9. Deformata del tamponamento in direzione fuori dal piano ad uno spostamento obiettivo di 50 mm: (a) TA2; (b) TA1; (c) TA3; e a uno spostamento obiettivo di 75 mm: (d) TA2; (e) TA1; (f) TA3.

#### 4.2 Risultati sperimentali della striscia verticale di tamponamento non precedentemente danneggiato nel piano (TA5)

La risposta fuori piano dovuta al solo meccanismo resistente per via dell'arco verticale è stata studiata mediante la prova sul provino TA5, in cui il tamponamento è costituito da una striscia verticale di luce pari a circa 1/3 del tamponamento pieno.

Parimenti a quanto svolto per i provini TA1, TA2 e TA3, è stato possibile ricavare la curva forza-spostamento sperimentale ed il suo involuppo (Figura 10). La forza massima raggiunta è stata di 65.6 kN.

La creazione del meccanismo ad arco verticale è stata evidenziata dall'evoluzione della deformata (Figura 11).

Tramite un rapporto dimensionale è stato possibile stimare il contributo alla resistenza fuori piano del tamponamento pieno dovuto al solo arco verticale. Moltiplicando la resistenza massima fuori piano del TA5 per il rapporto di luce esistente tra i provini pieni e la striscia di tamponamento (4.22/1.38), si è ottenuta quindi una resistenza del tamponamento pieno di 200.5 kN. Tale valore tende però a sottostimare la resistenza del tamponamento pieno privo di danneggiamento, in

quanto trascura il comportamento bidirezionale a “doppio effetto ad arco” e potrebbe dunque essere considerato come un limite inferiore della capacità del pannello.

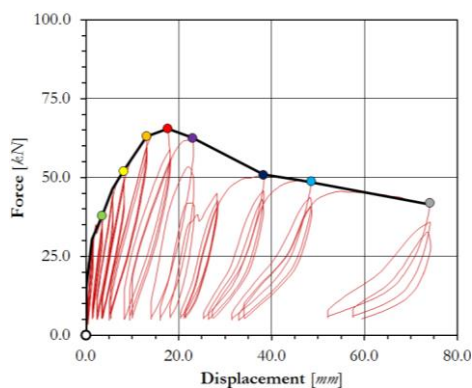


Figura 10. Curva forza-spostamento sperimentale del provino TA5 costituito dalla striscia verticale di tamponamento.

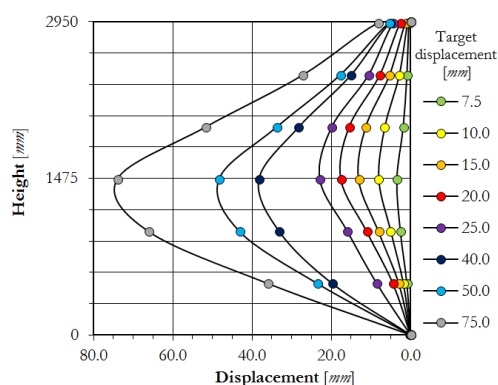


Figura 11. Deformazione lungo l'altezza del provino TA5.

#### 4.3 Risultati sperimentali del tamponamento “pieno” non precedentemente danneggiato nel piano (TA6)

La prova fuori-piano TA6 ha permesso di osservare il comportamento bidirezionale del pannello in muratura non danneggiato. La diversa applicazione del carico ha inoltre fornito la possibilità di interpretare l'eventuale influenza del protocollo di prova sul comportamento sul danneggiamento della tamponatura.

Coerentemente con quanto riscontrato durante i test trattati precedentemente, è stato osservato sia l'instaurarsi di fessurazioni orizzontali al centro del pannello dovuto al meccanismo ad arco verticale, che lo scorrimento del tamponamento all'interfaccia con la trave. Tale scorrimento è stato osservato anche durante la prova TA5 (Figura 11), mentre la creazione di una fessurazione orizzontale è stata riscontrata in ognuna delle cinque prove (TA1-TA5) trattate nel presente articolo.

La deformata in prossimità del collasso è stata ricostruita tramite interpolazione lineare dei dati disponibili dei potenziometri, ed ha mostrato un comportamento bidirezionale della tamponatura non perfettamente simmetrico, che pare conforme con quanto osservato anche durante le prove TA1, TA2 e TA3, come è anche possibile notare dal confronto tra la Figura 12 e la Figura 9.

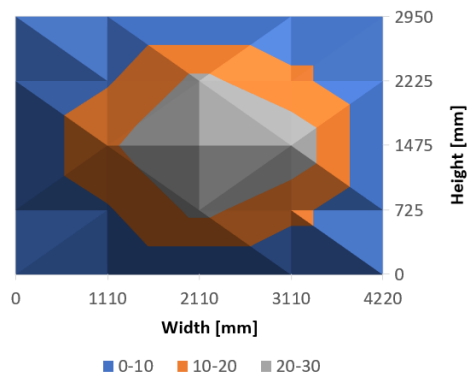


Figura 12. Deformata del tamponamento in direzione fuori-piano al picco in forza.

Il comportamento fuori piano del tamponamento TA6 è osservabile anche attraverso la curva pressione-spostamento, dove la pressione è la forza applicata tramite il protocollo di prova per unità di superficie, e lo spostamento di controllo è stato preso al centro del pannello, coerentemente con le prove precedenti. La Figura 13 riporta la curva pressione-spostamento relativa al provino TA6. Essendo una prova a carico crescente, il test TA6 non presenta un ramo di scarico come i precedenti test. La pressione massima raggiunta è stata di  $36.2 \text{ kN/m}^2$ .

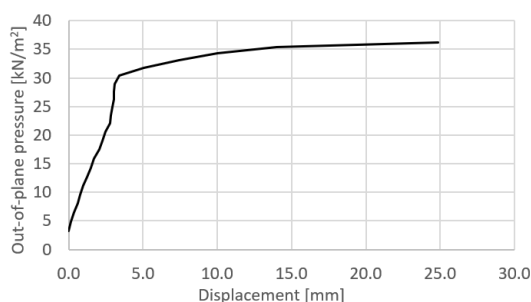


Figura 13. Curva pressione-spostamento sperimentale del provino TA6.

L'applicazione di un diverso protocollo di prova ha richiesto un'interpretazione nei riguardi del carico applicato. Infatti, al fine di poter confrontare direttamente i risultati di tutte le prove svolte, risulta necessario individuare quale sarebbe stata la massima forza applicata al TA6 nel caso si fosse applicato il protocollo sperimentale adottato per i provini TA1, TA2 e TA3. Tale forza

equivalente può essere ricavata sulla base di diverse ipotesi.

Vista la simile evoluzione del danneggiamento e dalla deformata dei tamponamenti, è possibile supporre che sia avvenuta l'attivazione e l'evoluzione dei medesimi meccanismi resistenti, e di conseguenza risulta possibile effettuare un confronto tra i risultati sperimentali.

La deformata (Figura 12) mostra il prevalere del meccanismo resistente ad arco verticale rispetto a quello orizzontale, i cui valori di spostamento sono risultati trascurabili rispetto a quelli dovuti all'arco verticale. Di conseguenza, è stato possibile, in primo luogo, non considerare esplicitamente il contributo dato dall'arco orizzontale, e stimare la forza equivalente solo sulla base del comportamento ad arco verticale.

La forza massima equivalente può essere, per esempio, calcolata tramite l'uguaglianza di momenti di una trave semplicemente appoggiata oppure, conoscendo lo spostamento massimo al centro del pannello ( $26.6 \text{ mm}$ ) e la resistenza verticale della muratura ( $4.64 \text{ MPa}$ ), calcolando la componente fuori piano del meccanismo ad arco sotto l'ipotesi dello spessore efficace dell'arco pari al 10% dello spessore effettivo della tamponatura (come riportato nell'Eurocodice 6). Con il metodo dell'uguaglianza dei momenti si ottiene una forza massima equivalente di  $256 \text{ kN}$ , mentre tramite il calcolo dell'arco verticale tale forza risulta pari a  $262 \text{ kN}$ .

Il principio di calcolo basato sull'uguaglianza dei momenti corrisponde a quanto riportato nelle seguenti equazione:

$$M_R = \frac{p_{max}^{TA6} \cdot h_w^2 \cdot L_w}{8} = \frac{F_{max,equiv} \cdot h^*}{2} \quad (1)$$

dove,  $p_{max}^{TA6}$  è la pressione massima raggiunta durante il test TA6,  $h_w$  e  $L_w$  sono l'altezza e la lunghezza del tamponamento,  $h^*$  è l'altezza di applicazione del carico nella configurazione di setup utilizzato per gli altri provini (pari a  $1.30 \text{ m}$ ),  $F_{max,equiv}$  è la forza equivalente che si vuole trovare.

Il calcolo basato sul meccanismo ad arco verticale individua la componente fuori piano sviluppato dal meccanismo ad arco come:

$$\frac{F_{max,equiv}}{2} = F_{arch} \cdot \sin \theta \quad (2)$$

dove  $F_{arch}$  è la massima forza che si sviluppa nel meccanismo ad arco:

$$F_{arch} = f_{mv} \cdot L_w \cdot (1 - \gamma) \cdot t_w \quad (3)$$

con  $\gamma$  pari a  $0.9$  come riportato nell'EC6.

L'angolo di inclinazione  $\theta$  (Figura 14) è calcolato sulla base di un triangolo i cui cateti sono pari a metà  $h_w$  e allo spessore efficace del tamponamento  $b$ , calcolato come nei meccanismi ad arco con "gap":

$$b = \gamma \cdot t_w - \Delta_0 \quad (4)$$

dove  $\Delta_0$ , in questo caso, corrisponde al massimo spostamento fuori piano della tamponatura.

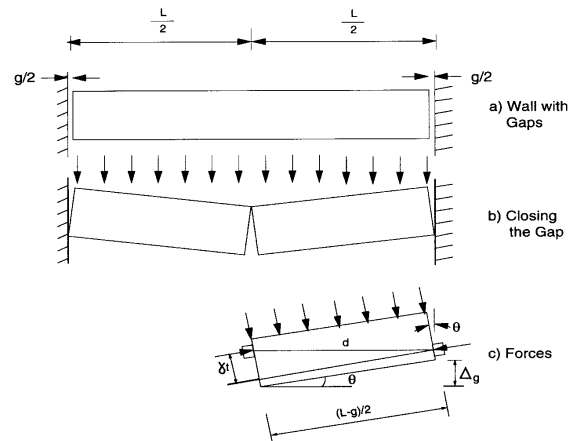


Figura 14. Schema del meccanismo ad arco resistente con gap.

Tuttavia, vista l'ipotesi iniziale di trascurare il meccanismo ad arco orizzontale, è lecito attendersi valori di forza equivalente leggermente diversi da quelli calcolati con i due approcci. Tali differenze sono infatti imputabili al contributo dell'arco orizzontale nel comportamento a piastra del tamponamento.

## 5 CONCLUSIONI

Sebbene nel passato il comportamento sismico in direzione fuori piano delle tamponature sia stato oggetto di molte ricerche, i sopralluoghi post-sismici hanno evidenziato come, in alcuni casi, sia necessario investigarne ulteriormente la risposta sismica al fine di migliorare le prestazioni ed i criteri di verifica.

Il presente articolo tratta la risposta fuori piano di tamponature "robuste" in laterizio, realizzate con murature mono-strato di elevato spessore ( $35 \text{ cm}$ ) che rappresentano una realtà recente, largamente diffusa ed utilizzata nelle aree mediterranee. I risultati presentati sono compresi all'interno di una campagna sperimentale più



ampia e già parzialmente discussa in Morandi *et al.*, 2018b.

Le prove fuori piano condotte hanno permesso di individuare la resistenza fuori piano di tamponamenti precedentemente danneggiati nel piano da prove cicliche condotte a spostamenti impressi crescenti. Inoltre, il comportamento fuori piano in assenza di precedente danneggiamento è stato studiato mediante due prove differenti: una ciclica in controllo di spostamento su una striscia verticale di tamponamento, ed una monotona in a carico crescente su un provino con un tamponamento pieno.

La formazione di un meccanismo resistente simile in tutti i provini ha permesso di poter effettuare una prima interpretazione dei risultati sperimentali scaturiti dalla prova fuori-piano recentemente condotta sul provino TA6. Poiché la prova TA6 è stata soggetta a un protocollo diverso rispetto alle altre prove, è stato necessario individuare la massima forza equivalente da applicare nel caso di utilizzo della procedura sperimentale adottata per gli altri test. Tale forza massima è stata ricavata tramite due approcci diversi: uno basato sull'uguaglianza dei momenti di una trave semplicemente appoggiata caricata in due modi diversi, e l'altro sulla componente fuori piano del meccanismo resistente ad arco. Entrambi i procedimenti trascurano il "doppio effetto ad arco", riferendosi al solo arco verticale.

Mentre la definizione della forza resistente dei pannelli danneggiati era stata ricavata direttamente dai risultati sperimentali, la definizione della forza resistente del tamponamento integro presenta ancora delle incertezze, che saranno oggetto di ulteriori approfondimenti e sviluppi futuri. In questo modo, sarà possibile anche valutare il degrado di resistenza fuori piano in funzione del drift (e del danneggiamento) nel piano in maniera congruente. Tuttavia, sulla base dei risultati sperimentali e delle analisi preliminari descritte nel presente lavoro, è possibile stabilire che la forza del pannello integro sia superiore alla resistenza derivante dalla prova TA5 (200.5 kN) e circa uguale a quella ricavata dalla prova TA6 (256 kN o 262 kN, a seconda dell'approccio).

## BIBLIOGRAFIA

Angel, R., Abrams, D., Shapiro, D., Izarski, J., Webster, M., 1994. *Behaviour of reinforced concrete frames with masonry infills*, University of Illinois, Urbana-Champaign, Illinois.

- Barbiero, E., Dalla Benetta, M., da Porto, F., Modena, C., 2006. Sperimentazione sul comportamento fuori piano di tamponamenti in muratura di laterizio, *L'industria dei Laterizi*, Novembre-Dicembre, **102**, 2-11.
- Butenweg, C., Marinkovic, M., 2018. Damage reduction system for masonry infill walls under seismic loading, *c/e papers*, **2**(4), 267-273.
- Calvi, G.M., Bolognini, D., 2001. Seismic response of RC frames infilled with weakly reinforced masonry panels, *Journal of Earthquake Engineering*, **5**(2), 153-185.
- CEN, 2004a. *Eurocode 6 – Design of masonry structures, Part 1-1: Common rules for reinforced and unreinforced masonry structures*, ECS, EN 1996-1-1, Brussels, Belgio.
- CEN, 2004b. *Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, ECS, EN 1998-1, Brussels, Belgio.
- da Porto, F., Guidi, G., Dalla Benetta, M., Verlato, N., 2013. Combined in-plane/out-of-plane experimental behaviour of reinforced and strengthened infill masonry walls. *12<sup>th</sup> Canadian Masonry Symposium*. June 2-5, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Di Domenico, M., Ricci, P., Verderame, G.M., 2018. Experimental assessment of the influence of boundary conditions on the out-of-plane response unreinforced masonry infill walls, *Journal of Earthquake Engineering*, 1-39.
- EN 1052-1, 2001. *Methods of tests for masonry – Determination of compressive strength*.
- EN 1052-3, 2007. *Methods of tests for masonry – Determination of initial shear strength*.
- Flanagan, R.D., Bennett, R.M., 1999. Bidirectional behaviour of structural clay tile infilled frames, *Journal of Structural Engineering*, **125**(3), 236-244.
- Fragomeli, A., Galasco, A., Graziotti, F., Guerrini, G., Kallioras, S., Magenes, G., Malomo, D., Mandirola, M., Manzini, C.F., Marchesi, B., Milanese, R.R., Morandi, P., Penna, A., Rossi, A., Rosti, A., Rota, M., Senaldi, I., Tomassetti, U., Cattari, S., de Porto, F., Sorrentino, L., 2017. Comportamento degli edifici in muratura nella sequenza sismica dell'Italia centrale del 2016 – Parte 1: Quadro generale, *Progettazione sismica*, **8**(2), 49-77.
- Hak, S., Morandi, P., Magenes, G., 2014. Out-of-plane experimental response of strong masonry infills. *2<sup>nd</sup> ECEES*. August 25-29, Istanbul, Turchia.
- Hak, S., Morandi, P., Magenes, G., 2018. Prediction of inter-storey drifts for regular RC structures with masonry infills based on bare frame modelling, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16**(1), 397-425.
- Koutas, L., Pitytzogia, A., Triantafillou, T.C., Bousias, S.N., 2013. Strengthening of infilled reinforced concrete frames with TRM: Study on the development and testing of textiled-based anchors, *Journal of Composites for Construction*, **18**(3).
- Manzini, C.F., Morandi, P., 2012. *Rapporto preliminare sulle prestazioni ed I danneggiamenti gli edifici in muratura portante moderni a seguito degli eventi sismici emiliani del 2012*, EUCENTRE, <http://www.eqclearinghouse.org/2012-05-20-italy/>
- Milanese, R.R., Morandi, P., Magenes, G., 2018. Local effects on RC frames induced by AAC masonry infills through FEM simulation of in-plane tests, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16**, 4053-4080.
- MIT, D.M. 14/01/2008, 2008. *Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC08)*, Gazzetta Ufficiale, n.29 14/02/2008 – Supplemento ordinario n.30, Roma, Italia.

- Morandi, P., Hak, S., Magenes, G., 2013. Simplified out-of-plane resistance verification for slender clay masonry infills in RC frames. *XV ANIDIS*. June 30-August 4, Padova, Italia.
- Morandi, P., Milanese, R.R., Magenes, G., 2018a. Innovative solution for seismic-resistant masonry infills with sliding joints: in-plane experimental performance, *Engineering Structures*, **176**, 719-733.
- Morandi, P., Hak, S., Magenes, G., 2018b. Performance-based interpretation of in-plane cyclic tests on RC frames with strong masonry infills, *Engineering Structures*, **156**, 503-521.
- Morandi, P., Hak, S., Magenes, G., 2018c. Mechanical characterization and force-displacement hysteretic curves from in-plane cyclic tests on strong masonry infills, *Data in Brief*, **16**, 886-904.
- Preti, M., Bolis, V., Stavridis, A., 2017. Seismic infill-frame interaction of masonry walls partitioned with horizontal sliding joints: analysis and simplified modelling, *Journal of Earthquake Engineering*, 1-27.
- Ricci, P., Manfredi, V., De Luca, F., Verderame, G.M., 2011. 6<sup>th</sup> April 2009 L'Aquila earthquake, Italy: reinforced concrete building performance, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **9**, 285-305.
- Valluzzi, M.R., da Porto, F., Garbin, E., Panizza, M., 2014. Out-of-plane behaviour of infill masonry panels strengthened with composite materials, *Materials and Structures*, **47**(12), 2131-2145.
- Verlato, N., Guidi, G., da Porto, F., Modena, C., 2016. Innovative systems for masonry infills walls based on the use of deformable joints: combined in-plane/out-of-plane tests. *16<sup>th</sup> IBMAC*. June 26-30, Padova, Italia.