



## Sperimentazione sul comportamento fuori piano di tamponamenti in muratura di laterizio

Prima parte: indagine sperimentale

F. da Porto, E. Barbiero, M. Dalla Benetta, C. Modena (\*)

(\*) Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Università degli Studi di Padova

*La ricerca sperimentale qui illustrata trae origine dall'entrata in vigore in Italia della nuova Ordinanza antisismica n. 3431 del 03/05/05, recante nuove disposizioni in merito alla verifica degli elementi non strutturali. In tale categoria rientrano anche i tamponamenti di muratura per strutture intelaiate.*

*In questa prima parte del lavoro si presentano i risultati di una campagna di prove sperimentali sul comportamento fuori piano di tamponamenti in laterizio, effettuate su campioni confezionati secondo diverse tecniche costruttive. Tra questi rientrano anche tamponamenti in blocchi POROTON®, a fori verticali.*

### Introduzione

Nel testo integrato dell'allegato 2 "Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici" dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3431 del 03/05/05 [1] è stato introdotto, in modo più chiaro rispetto alle precedenti normative nazionali, il problema della **verifica per azioni fuori piano** di elementi non strutturali, quali i tamponamenti in muratura.

Per quanto attiene a questo particolare tema, nel caso degli edifici di nuova progettazione, l'Ordinanza sismica ha sostanzialmente recepito, modificandone solo alcuni aspetti, le direttive in merito contenute nell'Eurocodice 8 [2].

Esso, a sua volta, si ispira alle normative emanate dalla Federal Emergency Management Agency [3, 4], ente statunitense che per primo, e da tempo, ha trattato il problema della sicurezza connesso alla risposta sismica degli elementi non strutturali.

In generale, nell'Ordinanza si impone, per la prima volta in modo esplicito all'interno del panorama normativo nazionale, che tutti gli elementi costruttivi senza funzione strutturale, il cui danneggiamento può provocare danni a persone, siano verificati all'azione sismica insieme alle loro connessioni alla struttura.

In particolare, per i **tamponamenti**, oltre alla considerazione delle conseguenze della loro possibile disposizione irregolare in pianta od in altezza, e degli effetti locali dovuti all'interazione tra telai e tamponamenti, che non sono oggetto della presente ricerca, l'Ordinanza prescrive che nelle zone sismiche di categoria 1, 2 e 3 siano adottate misure atte ad evitare collassi fragili e prematuri dei pannelli di tamponamento esterno e la possibile espulsione di elementi di muratura in direzione ortogonale al piano del pannello stesso.

Nel caso dei tamponamenti, inoltre, le verifiche prescritte per gli elementi non strutturali si possono ritenere soddisfatte, senza eseguire alcun calcolo, con l'inserimento di leggere reti da intonaco sui due lati della muratura, collegate tra loro a distanza non superiore a 500 mm, sia in direzione orizzontale che in direzione verticale.

Una soluzione alternativa è rappresentata dall'inserimento di elementi di armatura orizzontale nei letti di malta, ad una distanza non superiore ai 500 mm [1].

Non viene però fatto cenno, all'interno dell'Ordinanza, né della possibilità che una limitazione di tali danni e la riduzione del rischio di espulsione fuori piano di porzioni di tamponamento possano venire anche dalla semplice adozione di tamponamenti caratterizzati da basse snellezze (grandi spessori degli elementi di laterizio), né a quale modello di calcolo fare riferimento per la valutazione della capacità portante dei tamponamenti, da confrontare con la domanda sismica di progetto. In questo senso, il confronto con le disposizioni date dall'Eurocodice 8 risulta significativo. Nell'Eurocodice 8, infatti, il problema della risposta nel piano e fuori piano dei pannelli di tamponamenti è trattato in modo sostanzialmente analogo all'Ordinanza e, benché gli accorgimenti costruttivi suggeriti al fine di limitare i danni ai tamponamenti siano simili a quelli riportati nell'Ordinanza, in esso si afferma che particolare attenzione va rivolta ai pannelli con un rapporto tra l'altezza e la minore dimensione tra la larghezza e/o lo spessore maggiore di 15 [2], definendo quindi, implicitamente, dei livelli di snellezza sotto ai quali la risposta del tamponamento può essere valutata come più affidabile.

Date le novità introdotte dall'Ordinanza, si è quindi approntato un programma di ricerca sperimentale presso il Dipartimento di Costruzioni e Trasporti dell'Università degli Studi di Padova in collaborazione con ANDIL Assolaterizi, volto a verificare meccanismi di rottura e capacità ultime per carichi fuori piano di tamponamenti in muratura, confezionati in blocchi di laterizio porizzato di spessore pari a 30 cm, assemblati con differenti tipologie di blocco e di giunto orizzontale e verticale, di uso comune nella pratica costruttiva in Italia.

In questa prima parte si presentano le differenti tipologie di tamponamento testate ed i risultati sperimentali ottenuti.

Nella seconda parte si illustrerà invece il confronto diretto tra resistenza fuori piano misurata sperimentalmente e richiesta sismica di progetto secondo la nuova Ordinanza antisismica.

## **Parte Prima: Indagine sperimentale sul comportamento fuori piano di tamponamenti in blocchi di laterizio alleggerito**

### **1. Programma di ricerca**

Il programma sperimentale condotto a termine presso l'Università di Padova è consistito nell'esecuzione di prove di carico fuori piano su nove campioni di pannelli di tamponamento in muratura di laterizio realizzati in scala reale.

I nove campioni afferiscono a tre serie di pannelli di dimensioni pari a 100 cm (larghezza) per 30 cm (spessore) per 252 cm (altezza).

Ciascuna delle serie è tipologicamente distinta dalle altre ed è costituita da tre campioni omogenei. Due di esse sono realizzate con blocchi forati (percentuale di foratura superiore al 45%) con posa a fori orizzontali (tipo FO); una serie di campioni è invece realizzata con blocchi semipieni, con posa a fori verticali (tipo FV).

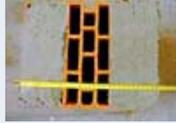
I tamponamenti sono costituiti da dieci corsi di blocchi ciascuno, con giunti di malta di 10 mm di spessore. Per l'esecuzione dei giunti si è utilizzata una malta premiscelata a base di calce idrata, cemento Portland e sabbie classificate, dichiarata di classe M3 secondo il D.M. 20/11/87 [5] dal produttore.

Per ogni serie di campioni si sono variate, oltre al tipo di blocco (a fori orizzontali FO e a fori verticali FV), le modalità di esecuzione dei giunti orizzontali e verticali, effettuando diverse combinazioni di riempimento dei giunti stessi.

Le combinazioni tra differenti tipologie di blocco e la fattura dei giunti, brevemente descritte qui di seguito ed indicate con gli acronimi FOA, FOB, FVC, sono riportate anche in tab. 1:

- **Campioni FOA:** blocchi a fori orizzontali (FO), con giunti di tipo A, verticali interrotti realizzati con due strisce esterne di malta dello spessore ciascuna di 4 cm (4+4 cm) ed orizzontali interrotti con due strisce esterne di malta dello spessore pari ad un terzo dello spessore del blocco (1/3-1/3-1/3);
- **Campioni FOB:** blocchi a fori orizzontali (FO), con giunti di tipo B, verticali interrotti realizzati con due strisce esterne di malta dello spessore pari ad un terzo dello spessore del blocco (1/3-1/3-1/3) e orizzontali continui su tutto lo spessore del blocco;
- **Campioni FVC:** blocchi a fori verticali (FV), con giunti di tipo C, verticali interrotti realizzati con due strisce esterne di malta dello spessore pari ad un terzo dello spessore del blocco (1/3-1/3-1/3) e orizzontali interrotti realizzati allo stesso modo (1/3-1/3-1/3).

Tab. 1 - Tipologie di tamponamento testate.

	FOA	FOB	FVC
<b>Tipo di blocco</b>	FO 	FO 	FV 
<b>Giunti verticali</b>	Interrotto 4 + 4 cm 	Interrotto 1/3-1/3-1/3 	Interrotto 1/3-1/3-1/3 
<b>Giunti orizzontali</b>	Interrotto 1/3-1/3-1/3 	Pieni 	Interrotto 1/3-1/3-1/3 
<b>Giunto superiore</b>	Interrotto 1/3-1/3-1/3 con zeppe 	Pieno con zeppe 	Interrotto 1/3-1/3-1/3 con zeppe 
<b>Giunto inferiore di allettamento</b>	Pieno 	Pieno 	Pieno 

L'unico metodo di prova normalizzato disponibile, per elementi di muratura testati fuori piano, è quello contenuto nella UNI EN 1052-2. Esso, comunque, è finalizzato a determinare la resistenza a flessione della muratura e non consente di valutare invece la capacità ultima di elementi caricati fuori piano, che sviluppino un meccanismo resistente dovuto alla presenza di vincoli d'estremità.

Metodi di prova sperimentali speciali dedicati a questo specifico problema consistono in set-up simili a quelli proposti dalla UNI EN 1052-2, ma con applicata anche una precompressione agli estremi del campione, oppure consistono nel testare pannelli di muratura costruiti entro telai in c.a. (vedasi ad esempio Calvi et al. [6]), oppure ancora nel simulare la presenza del telaio in c.a. realizzando i campioni direttamente nel laboratorio, vincolati tra pavimento e soffitto delle stanze di prova (vedasi ad esempio Beconcini, [7] - cfr. anche Newsletter POROTON® N. 14 - Maggio 2004).

Si è quindi optato per quest'ultima soluzione, mediante la costruzione dei campioni direttamente tra pavimento e soffitto delle stanze di prova al piano seminterrato del laboratorio, al fine di simulare le condizioni di vincolo derivanti dalla costruzione tra trave inferiore e superiore di un telaio tamponato. Il giunto inferiore di allettamento del campione sul pavimento delle stanze di prova è stato realizzato con uno strato continuo ed uniforme di malta, mentre il giunto superiore di accoppiamento al soffitto delle stanze di prova è stato realizzato interrotto con due strisce di malta di spessore pari ad un terzo dello spessore del blocco (campioni FOA ed FVC) o continuo (campioni FOB).

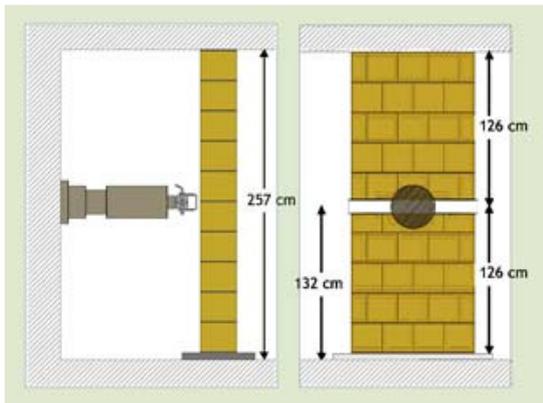


Fig. 1 - Schema di prova: sezione trasversale e vista frontale.

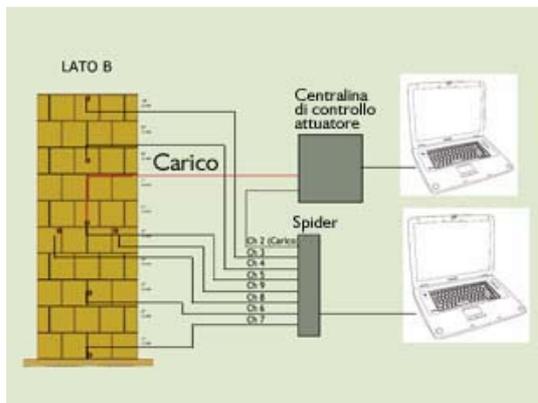


Fig. 2 - Schema dei collegamenti e della posizione dei trasduttori del lato di carico.

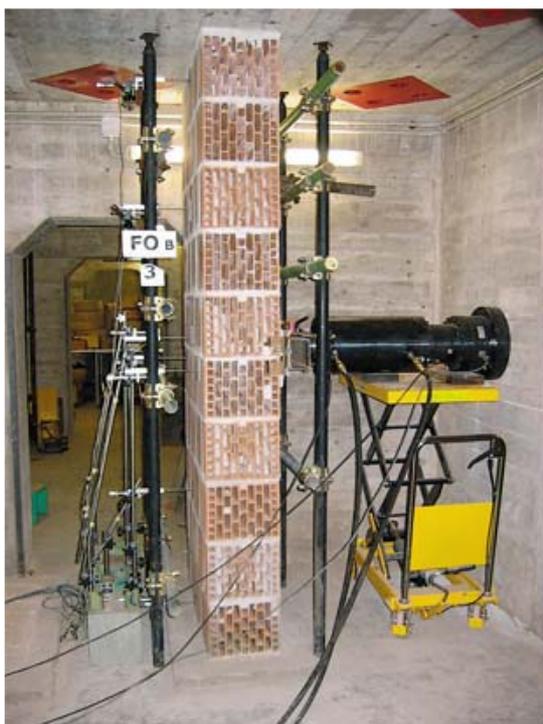


Fig. 3 - Vista del set-up sperimentale: campione strumentato ad inizio prova.

Il perfetto riempimento del giunto d'estremità, effettuato al fine di simulare un tamponamento realizzato a regola d'arte, è stato ottenuto mediante l'utilizzo di zeppe di rinforzo (scaglie di laterizio). Dopo 28 giorni dalla costruzione, i campioni sono stati sottoposti ad un carico agente fuori piano, applicato nella sezione in corrispondenza della semialtezza di ciascun pannello e ripartito linearmente per mezzo di una trave. Il carico è stato trasmesso in modalità monotona e in controllo di spostamento (0,01 mm/sec), fino a rottura del campione, per mezzo di un martinetto idraulico servocontrollato della portata massima di  $\pm 560$  kN.

La fig. 1 riporta uno schema dei campioni e del sistema di prova. In tempo reale sono stati acquisiti e registrati il carico applicato e le corrispondenti deformazioni fuori piano lungo l'asse verticale del campione, rilevate mediante sette trasduttori di spostamento disposti sul lato libero del pannello secondo lo schema di fig. 2 (due strumenti alle estremità del campione, due ai quarti in altezza, tre in mezzeria).

La fig. 3 mostra una vista generale del set-up effettivo adottato per la prova.

## 2. Risultati sperimentali

### Prove di caratterizzazione dei materiali

Preliminarmente all'esecuzione delle prove sperimentali sui pannelli di tamponamento, anche i blocchi in laterizio e la malta cementizia utilizzati per il confezionamento dei campioni in muratura sono stati testati al fine di valutarne le caratteristiche fisiche e meccaniche. Sono state effettuate prove per la misura del modulo elastico (UNI 8942-3) e della resistenza a compressione (UNI EN 772-1) sui blocchi in laterizio e per la determinazione del modulo elastico (UNI 6556) e della resistenza a compressione e a flessione (UNI EN 1015-11) su prismi di malta indurita.

I blocchi di laterizio sono stati caratterizzati a compressione nella direzione normale al piano di posa in opera, vale a dire ortogonalmente ai fori nel caso dei blocchi di tipo FO e parallelamente agli stessi nel caso degli FV.

In tab. 2 sono riportate le caratteristiche medie dei materiali testati, nonché un'immagine dei campioni alla fine della prova di compressione, dalla quale risulta evidente il diverso comportamento a rottura delle due tipologie di blocco esaminate.

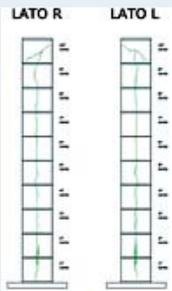
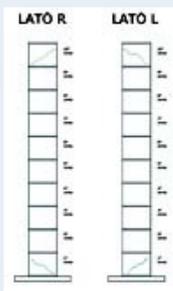
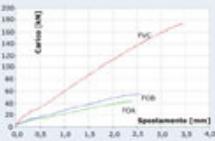
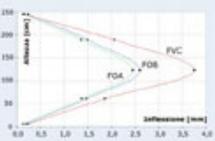
Tab. 2 - Caratteristiche geometriche, fisiche e meccaniche dei materiali utilizzati.

Caratteristica	Blocchi tipo FO	Blocchi tipo FV	Malta
Dimensioni (l x t x h) [mm]	249 x 298 x 241	244 x 291 x 252	/
Peso [kg]	10,6	12,9	/
Resistenza a compressione [N/mm <sup>2</sup> ]	5,94	18,26	9,22
Resistenza a flessione [N/mm <sup>2</sup> ]	/	/	4,28
Modulo di elasticità [N/mm <sup>2</sup> ]	3,547	7,368	9,984
Coefficiente di Poisson (-)	0,21	0,38	0,10
Modalità di rottura nelle prove a compressione	Pieno 	Pieno 	Pieno 

### Prove fuori piano su campioni di tamponamento

Una sintesi dei risultati sperimentali ottenuti nelle prove fuori piano sulle tre tipologie di tamponamento è riportata nella tab. 3, nella quale sono espressi anche i valori medi di carico a rottura, lo spostamento massimo della sezione di mezzzeria del pannello e il tipo di meccanismo di rottura osservato in fase di prova.

Tab. 3 - Sintesi dei risultati sperimentali sui campioni di tamponamento (ML=meccanismi locali, MG=meccanismo globale).

N°	FOA			FOB			FVC			Carichi a rottura Carico/inflessione Altezza/inflessione
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Cod. Prova	001	002	003	004	005	006	007	008	009	
Carico a rottura [k/N]	43,17	43,75	45,06	63,93	55,29	58,00	174,06	192,73	179,18	
Valore medio per serie [k/N]	43,99			57,09			181,99			
Quadro fessurativo rappresentativo in sezione										
Spostamento max a rottura [mm]	2,266	2,400	2,310	2,918	2,608	2,286	3,445	4,398	3,434	
Valore medio per serie [mm]	2,325			2,604			3,759			
Tipo di rottura	ML	ML	ML	ML	ML	ML	MG	MG	MG	

I campioni realizzati con blocchi a fori orizzontali, FOA e FOB, hanno fatto rilevare dei carichi medi a rottura pari rispettivamente a 44 kN e 57 kN. Si può quindi osservare, dato che le due serie di campioni sono realizzate con lo stesso tipo di blocco e di malta, un'influenza della modalità d'esecuzione del giunto (in particolare orizzontale) sulla capacità portante ultima.

I campioni FOB, con giunto orizzontale continuo e giunto verticale interrotto ad 1/3-1/3-1/3, infatti, hanno fatto rilevare una resistenza circa il 30% superiore rispetto ai corrispondenti campioni FOA con giunto orizzontale interrotto ad 1/3-1/3-1/3 e giunto verticale interrotto 4+4 cm.

In entrambe le serie FO, i campioni giungono a collasso sviluppando dei meccanismi locali di rottura in corrispondenza del primo e/o dell'ultimo corso di blocchi, dovuti al raggiungimento di uno stato tensionale limite negli stessi.

In fase di prova si osserva una progressiva deformazione nella direzione diagonale dei blocchi, con il successivo collasso

dei setti interni disposti in tale direzione [fig. 4].

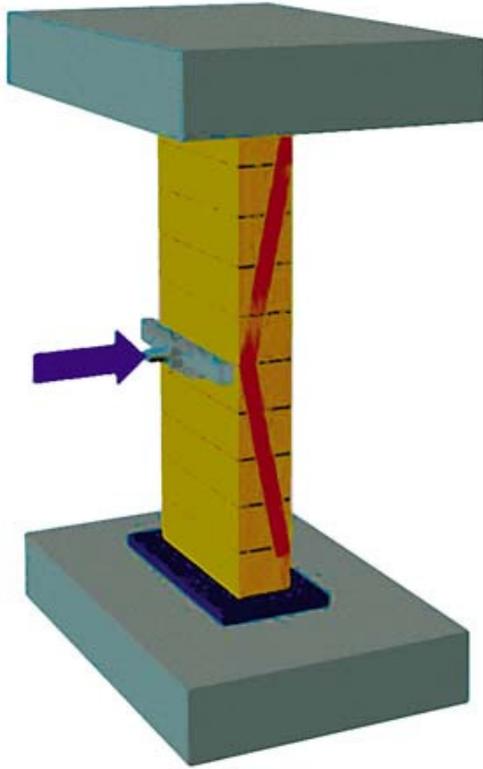


Fig. 4 - Rottura del corso inferiore nel campione FOA1 (a); deformazione e rottura del corso superiore nel campione FOB2 (b).

La scarsa resistenza dei blocchi nella direzione normale alla direzione dei fori caratterizza quindi la rottura dell'intero campione soggetto ad azioni fuori piano. Inoltre, i pannelli della serie FOA, nella quale sia il giunto orizzontale che quello verticale sono interrotti, hanno presentato una significativa fessurazione in corrispondenza del piano verticale di mezzzeria della sezione, parallelo alle facce dei campioni, ovverosia della sezione dove è completamente assente il giunto [fig. 5]. Tale lesione, che anticipa ulteriormente la rottura ed è presente lungo tutta l'altezza del pannello, non si manifesta invece nei campioni FOB.



Fig. 5 - Lesione verticale in sezione: particolare (a) e dopo la demolizione del campione FOA3 (b).



*Fig. 6 - Schema del meccanismo resistente ad arco sviluppato nei campioni di tipo FVC.*

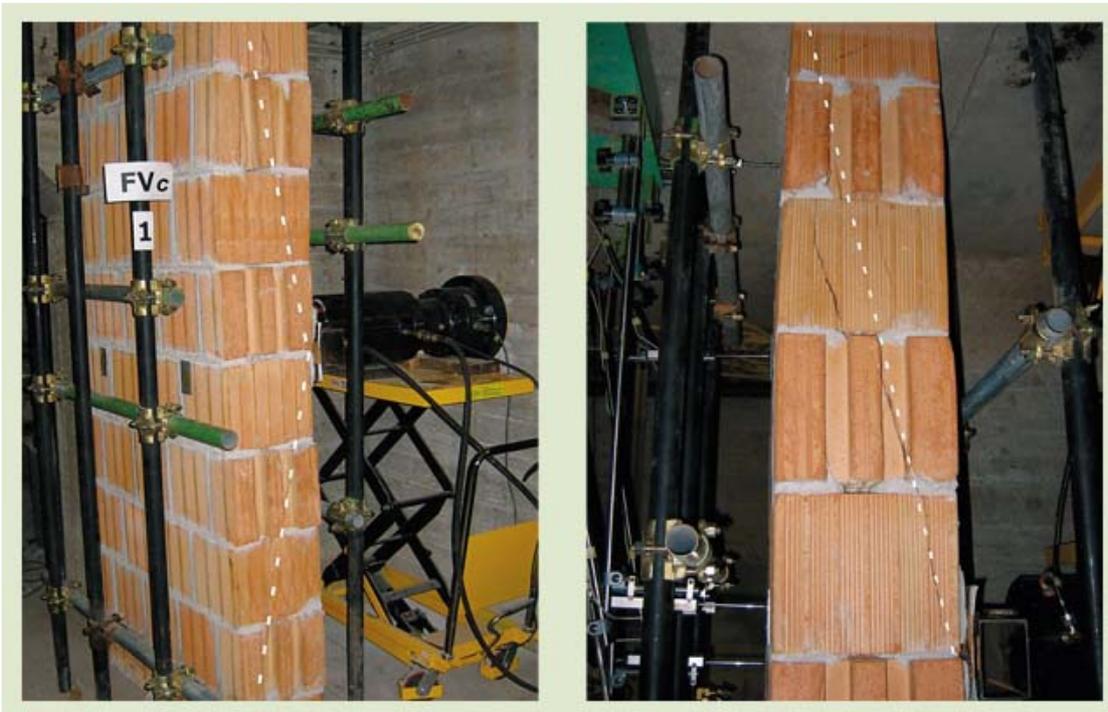
Il carico di rottura medio per la serie di tamponamenti realizzati con i blocchi a fori verticali FVC, pari a 182 kN, è da tre a quattro volte superiore rispetto a quelli ottenuti nelle prove sui campioni realizzati con blocchi a fori orizzontali.

La consistente differenza nel carico ultimo raggiunto può essere messa in relazione con l'elevata resistenza a compressione dei blocchi FV nella direzione dei fori ( $18,26 \text{ N/mm}^2$ ) e la conseguente elevata resistenza a compressione della muratura stessa.

Il rapporto tra tale resistenza e la resistenza media a compressione dei blocchi di tipo FO, pari a  $5,94 \text{ N/mm}^2$ , si riflette, infatti, sul rapporto percentuale tra i carichi ultimi raggiunti con le due tipologie di tamponamento, con blocchi a fori verticali e con blocchi a fori orizzontali.

Tale miglioramento nelle proprietà meccaniche della muratura che compone il tamponamento influenza anche la modalità di rottura. Data la realizzazione di vincoli d'estremità a regola d'arte, infatti, e la maggiore qualità della muratura, i campioni sono in grado di sviluppare un meccanismo di rottura globale anziché locale, basato sulla formazione di un arco resistente all'interno dello spessore della muratura stessa [fig. 6].

Il collasso dei campioni della serie FVC coincide, quindi, con la crisi dei puntoni compressi che si vengono a formare nello spessore del pannello. La fessurazione che caratterizza la rottura dei puntoni diagonali interessa una fascia solida di spessore pari a circa 10-12 cm, che risulta essere quindi la porzione di muratura interessata dal meccanismo resistente descritto, il cui cedimento porta a collasso il tamponamento stesso [fig. 7].



*Fig. 7 - Rottura del campione FVC1: vista generale e dettagli.*

Nei diagrammi di fig. 8 è mostrato il carico (limitato al valore massimo a rottura) e il corrispondente spostamento in mezzera dei nove campioni testati. Per tutte e tre le serie di campioni, la fase di carico denota una sostanziale linearità fino alla rottura, con una variazione di rigidità puntuale occorrente in corrispondenza della fessurazione del giunto orizzontale intermedio, nelle fasi iniziali di prova.

Il comportamento per tutte e tre le serie di tamponamenti è quindi sostanzialmente elasto-fragile, con una fase post-picco, non riportata nelle figure, caratterizzata da una perdita di resistenza drastica per i campioni a fori verticali FV ed un pò più graduale per i campioni con blocchi a fori orizzontali FO, ma legata anche alla modalità di prova e non solo alla tipologia di tamponamento.

Da tali diagrammi appare evidente ancora la ridotta resistenza delle serie di tamponamenti FOA e FOB, rispettivamente pari al 24 ed al 31% della resistenza della serie FVC.

Tale serie è inoltre caratterizzata da una rigidità circa doppia rispetto a quella delle altre due serie di tamponamenti. Analoghe considerazioni possono essere tratte dall'analisi dei diagrammi di fig. 9, che riportano gli spostamenti rilevati lungo tutto lo sviluppo in altezza dei campioni al raggiungimento del carico massimo (diagrammi altezza-inflessione).

Si può osservare come il comportamento deformativo dei campioni di tipologia FOA e FOB sia pressoché simile, con valori di spostamento in mezzera della serie FOB (in media 2,6 mm) maggiori della serie FOA (in media 2,3 mm) di circa il 10%, mentre essi risultano rispettivamente pari al 69 ed al 61% degli spostamenti a rottura della serie FVC (in media 3,76 mm).

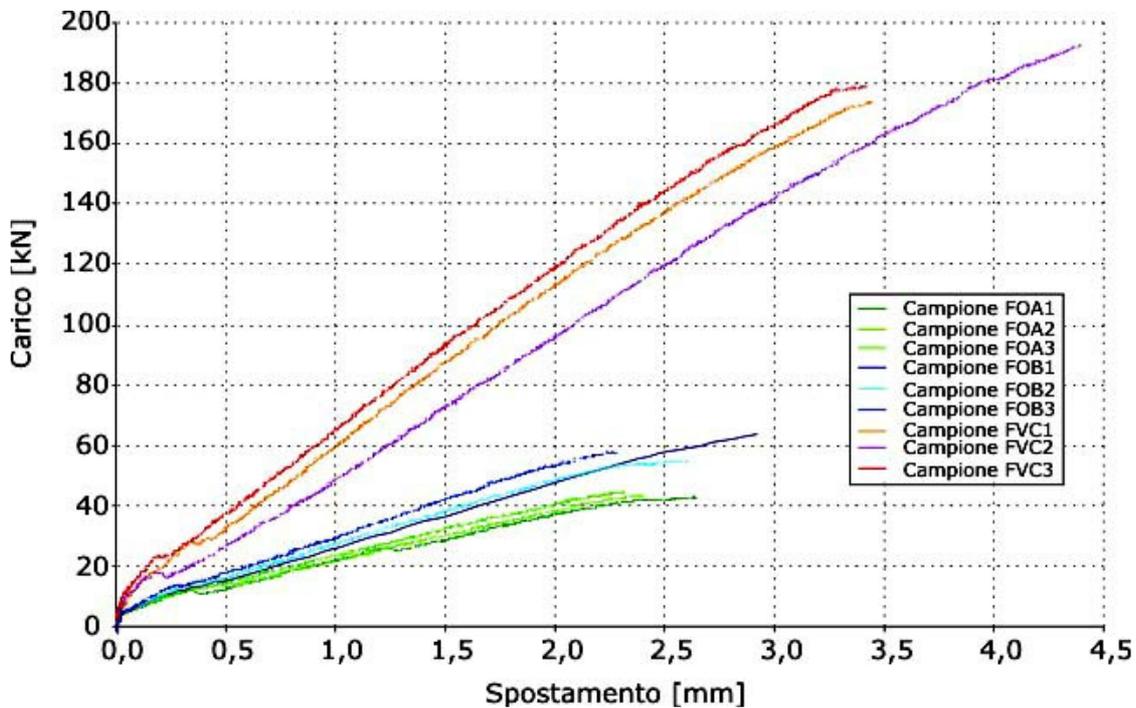


Fig. 8 - Diagramma carico-spostamento per tutti i campioni testati.

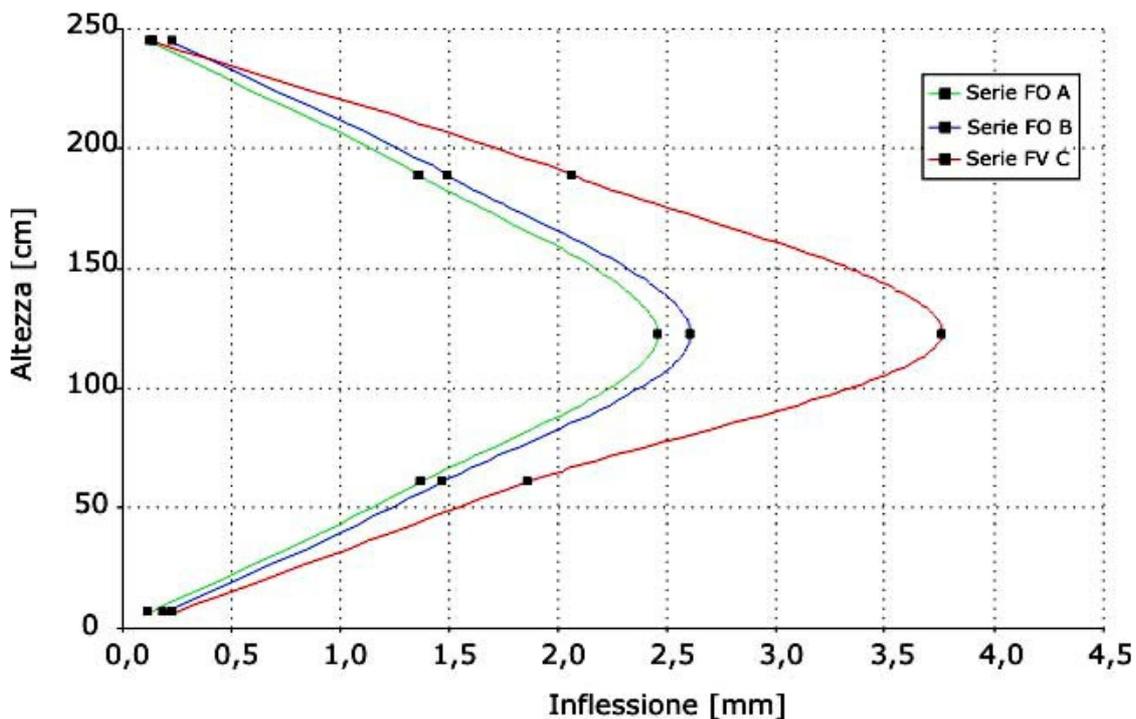


Fig. 9 - Diagrammi altezza-inflessione medi al carico massimo per le tre serie testate.

La sperimentazione descritta nel presente articolo è stata condotta nell'ambito di una convenzione di ricerca tra ANDIL, Associazione Nazionale dei Produttori di Laterizio, e Università di Padova.

Le prove sperimentali sono state effettuate presso il Laboratorio Prove su Materiali Strutturali del Dipartimento di Costruzioni e Trasporti dell'Università di Padova.

#### Bibliografia

- [1] OPCM n. 3431, 03/05/05, Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici.
- [2] UNI EN 1998-1, Eurocodice 8, Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici, 2005.
- [3] Federal Emergency Management Agency, FEMA 74/1994, Reducing Risk of Nonstructural Earthquake Damage: A practical guide, Washington D.C.
- [4] Federal Emergency Management Agency, FEMA ASCE 356/2000, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building, Washington D.C.
- [5] D.M. 20/11/1987, Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro

consolidamento, Ministero dei Lavori Pubblici, 1987.

[6] Calvi G.M., Bolognini D., Risposta sismica di telai in c.a. tamponati con pannelli in muratura debolmente armati, Costruire in Laterizio 80, 2001, pp. 64-71.

[7] Beconcini M.L., Sulla resistenza a forze orizzontali di pareti in elementi forati in laterizio, Costruire in laterizio 55, 1997, pp. 60-69.

[8] EN1990, Eurocode 1, Basis of Structural Design, aprile 2002.