

Francesca da Porto, Enrico Barbiero,  
Massimo Dalla Benetta, Claudio Modena

# Comportamento fuori piano di tamponamenti in muratura di laterizio

**La ricerca trae origine dall'entrata in vigore in Italia della nuova Ordinanza antisismica n. 3431 del 3/05/05, recante nuove disposizioni in merito alla verifica degli elementi non strutturali. In tale categoria rientrano anche i tamponamenti di muratura per strutture intelaiate. Nella 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. Nella seconda parte, i risultati ottenuti sono confrontati con la domanda sismica di progetto secondo la nuova Ordinanza antisismica**

**N**el 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 3/05/05 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. Esso, a sua volta, si ispira alle normative emanate dalla *Federal Emergency Management Agency*, 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'in-

serimento 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. 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 tamponamento 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, 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, con-

## 1 Tipologie di tamponamento sottoposte a prove.

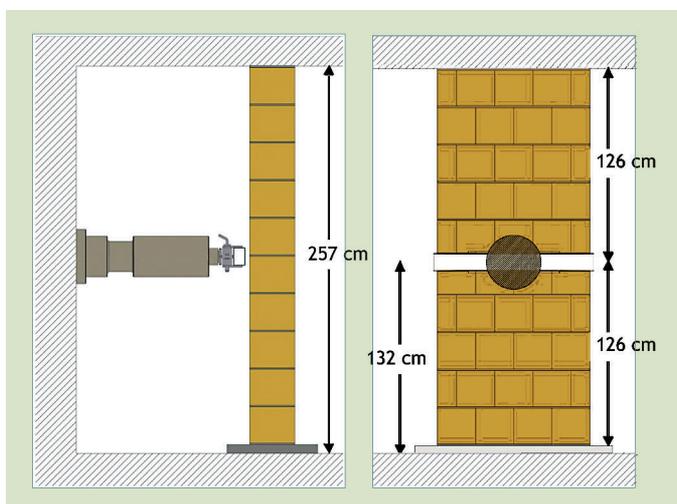
	FOA FO	FOB FO	FVC FV
Tipo di blocco			
Giunti verticali	Interrotto 4+4 cm 	Interrotto 1/3-1/3-1/3 	Interrotto 1/3-1/3-1/3 
Giunti orizzontali	Interrotto 1/3-1/3-1/3 	Pieno 	Interrotto 1/3-1/3-1/3 
Giunto superiore	Interrotto 1/3-1/3-1/3 con zeppe 	Pieno con zeppe 	Interrotto 1/3-1/3-1/3 con zeppe 
Giunto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

fezionati in blocchi di laterizio porizzato aventi 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. Nella prima parte dell'articolo, si presentano le differenti tipologie di tamponamento testate ed i risultati sperimentali ottenuti; nella seconda è, invece, effettuato il confronto diretto tra resistenza fuori piano misurata sperimentalmente e richiesta sismica di progetto secondo la nuova Ordinanza antisismica.

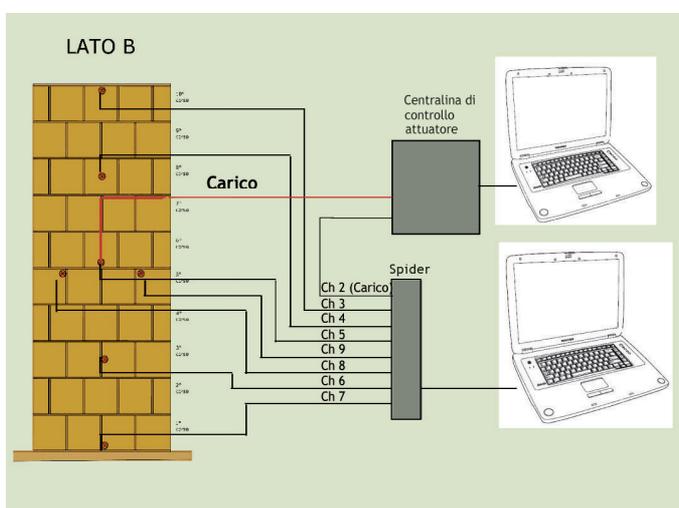
**Programma di ricerca** Il programma sperimentale condotto a termine presso l'Università di Padova è consistito nell'esecuzione di prove di carico fuori piano su nove campioni di pannelli di tamponamento in muratura di laterizio realizzati in scala reale. I nove campioni afferiscono a tre serie di pannelli di dimensioni pari a 100 cm (larghezza) per 30 cm (spessore) con altezza di 252 cm. 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 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 tabella I:

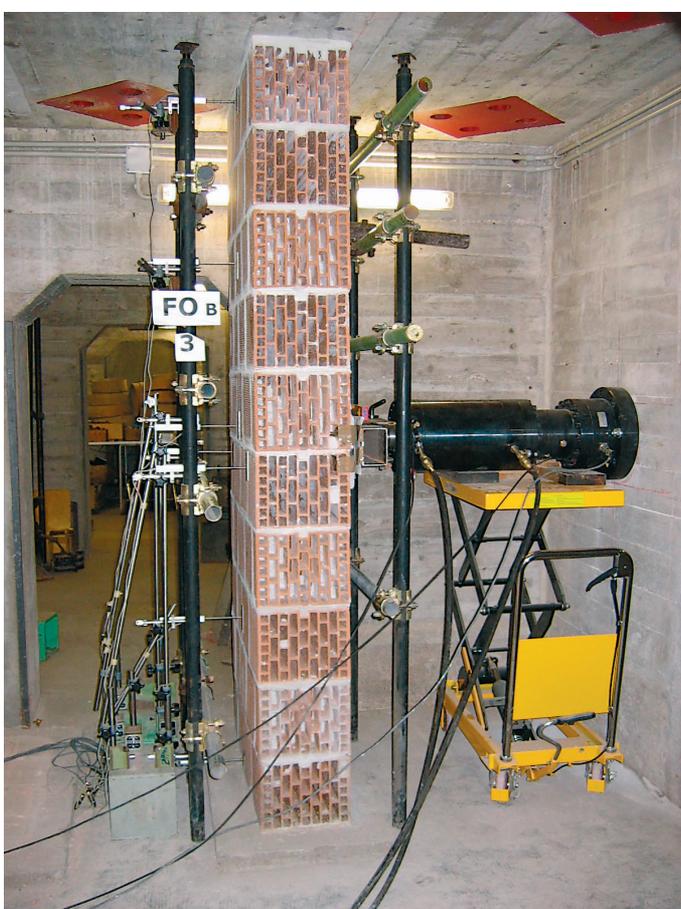
- *campioni FOA*: blocchi a fori orizzontali (FO), con giunti di tipo A, verticali interrotti realizzati con due strisce esterne di malta dello spessore ciascuna di 4 cm (4+4 cm) ed orizzontali interrotti con due strisce esterne di malta dello spessore pari ad un terzo dello spessore del blocco (1/3-1/3-1/3);
- *campioni FOB*: blocchi a fori orizzontali (FO), con giunti di



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



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

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

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).

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., 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.

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

## 2 Caratteristiche geometriche, fisiche e meccaniche dei materiali utilizzati.

Caratteristica	Blocchi tipo FO	Blocchi tipo FV	Malta
Dimensioni (ltxh) [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	3,38	0,10
Modalità di rottura nelle prove a compressione			

### 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 tabella II 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.

**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 tabella III, nella quale sono espressi anche i valori medi di carico a rottura, lo spostamento massimo della sezione di mezzeria del pannello e il tipo di meccanismo di rottura osservato in fase di prova. 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). 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 mezzeria della sezione, parallelo alle facce dei campioni, ovvero sia 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. 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 N/mm<sup>2</sup>) 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 N/mm<sup>2</sup>, 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



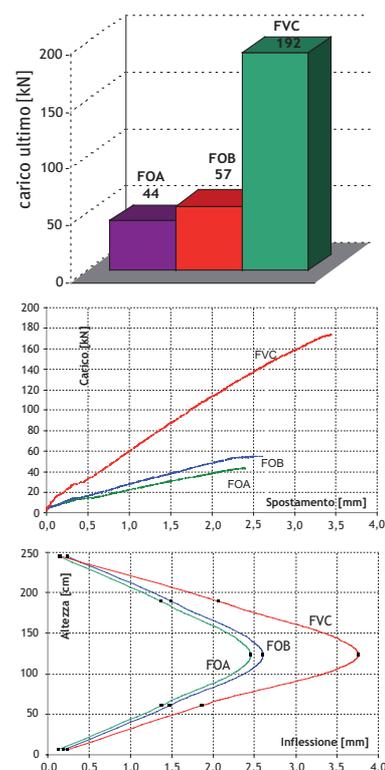
4. Rottura del corso inferiore nel campione FOA1 (sinistra); deformazione e rottura del corso superiore nel campione FOB2 (destra).

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). Nei diagrammi di figura 8 è mostrato il carico (limitato al valore massimo a rottura) e il corrispondente spostamento in mezzeria 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 in-

termedio, 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 po' 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 e 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 figura 9, che riportano

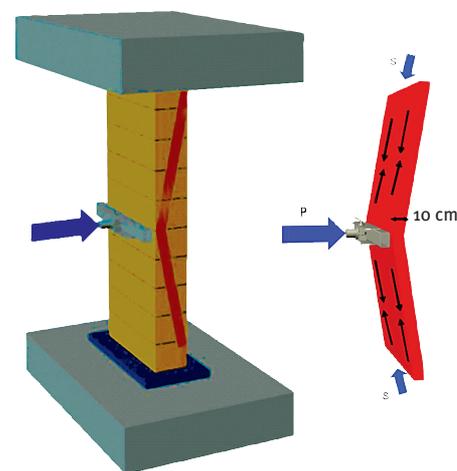
### 3 Sintesi dei risultati sperimentali sui campioni di tamponamento (ML=meccanismi locali, MG=meccanismo globale).

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 [kN]	43,17	43,75	45,06	63,93	55,29	58,00	174,06	192,73	179,18	
Valore medio per serie [kN]	43,99			57,09			181,99			
[kN]	LATO R    LATO L 			LATO R    LATO L 			LATO R    LATO L 			
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	





5. Lesione verticale in sezione: particolare (sinistra) e dopo la demolizione del campione FOA<sub>3</sub> (destra).



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

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 mezzzeria 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).

#### Confronto tra capacità sperimentale e domanda del sisma di progetto

Secondo l'OPCM n. 3431, l'effetto dell'azione sismica sugli elementi non strutturali può essere valutato considerando un sistema di forze proporzionali alle masse (concentrate o distribuite) degli elementi stessi, la cui risultante  $F_a$ , valutata in corrispondenza del baricentro, è calcolata secondo la seguente relazione:

$$F_a = W_a S_a \gamma_1 / q_a \quad (1)$$

dove:

$W_a$ : peso dell'elemento;

$\gamma_1$ : fattore di importanza della costruzione;

$q_a$ : fattore di struttura dell'elemento, da considerare pari ad 1

per elementi aggettanti a mensola (quali ad esempio camini e parapetti collegati alla struttura solamente alla base) e pari a 2 negli altri casi (ad esempio per pannelli di tamponamento e controsoffitti);

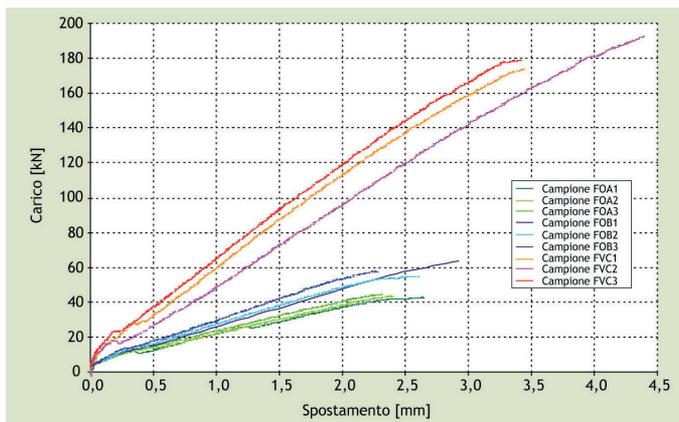
$S_a$ : coefficiente sismico da applicare agli elementi non strutturali, funzione di diversi fattori tra cui la zona sismica considerata, il tipo di terreno su cui si erge la costruzione mediante l'accelerazione di progetto al suolo  $S \cdot a_g$ , l'altezza dell'edificio H, l'altezza dell'interpiano ed il piano in considerazione, in relazione ai quali si fissa la quota del baricentro dell'elemento da verificare Z, il primo periodo di vibrazione dell'elemento non strutturale  $T_a$  e dell'intera struttura  $T_1$ :

$$S_a = \frac{a_g S}{g} \left[ \frac{3(1 + Z/H)}{1 + (1 - T_a/T_1)^2} - 0,5 \right] \geq \frac{a_g S}{a_g S} \quad (2)$$

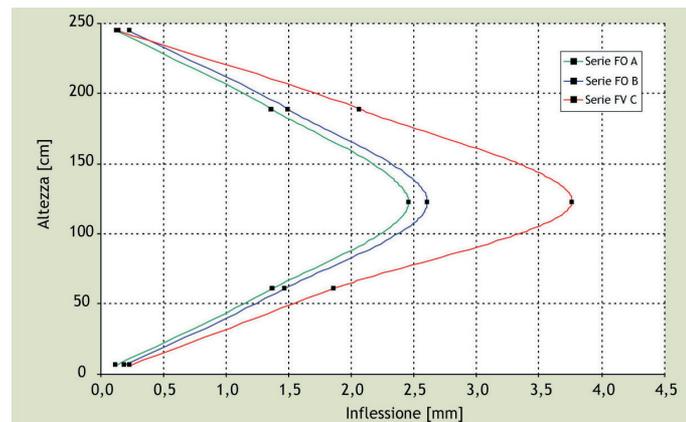
Sulla base di quanto prescritto nell'OPCM n. 3431, si è quindi effettuato un confronto fra i valori sperimentalmente ottenuti di resistenza fuori piano dei tamponamenti e la domanda del sisma di progetto per gli elementi non strutturali, prendendo in esame per l'analisi due edifici intelaiati ordinari e regolari in c.a. di 5 piani e di 10 piani, di altezza totale quindi pari rispet-



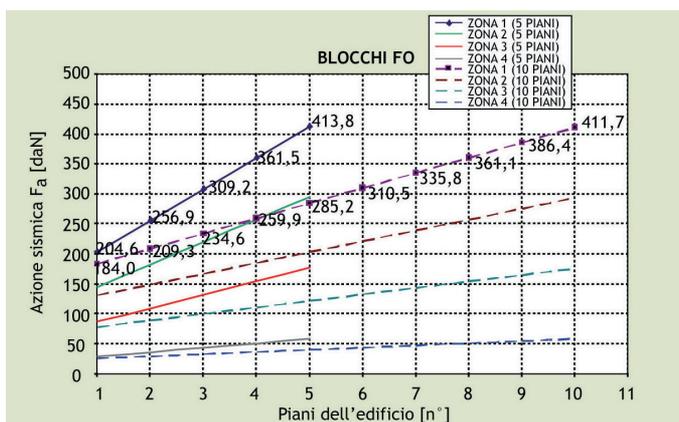
7. Rottura del campione FVC1: vista generale e dettagli.



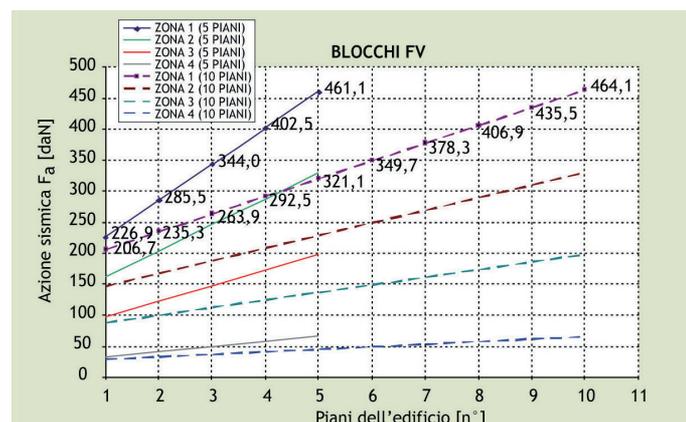
8. Diagramma carico-spostamento per tutti i campioni testati.



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



10. Azione sismica su tamponamenti di tipo FO ai diversi piani di un edificio a 5 e 10 piani, nelle diverse zone sismiche.



11. Azione sismica su tamponamenti di tipo FV ai diversi piani di un edificio a 5 e 10 piani, nelle diverse zone sismiche.

tivamente a 15 e 30 m, rappresentativi della prassi costruttiva usuale. Si è supposto che tali strutture siano tamponate con pannelli in muratura di laterizio di caratteristiche del tutto analoghe a quelle delle tipologie di pannelli testate e provvisti di intonaco. Per il calcolo della domanda del sisma di progetto si è quindi assunto:

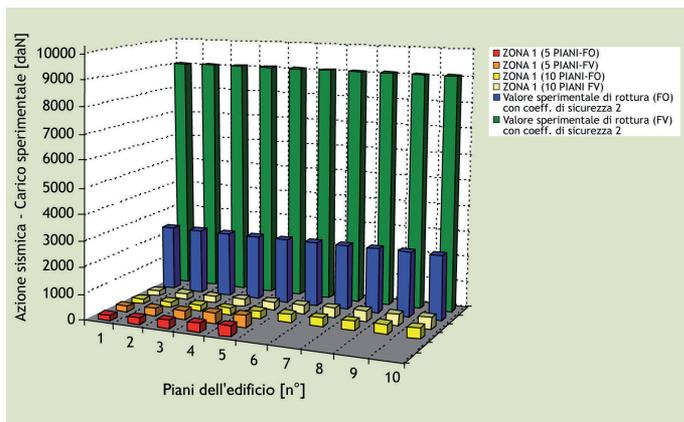
- fattore di importanza dell'edificio  $\gamma_I = 1$  (edificio ordinario);
- altezza del tamponamento: 270 cm;
- larghezza del tamponamento: 100 cm;
- spessore del tamponamento: 30 cm;
- altezza di interpiano: 300 cm;
- tamponamenti provvisti di intonaco sui due lati (1,5+1,5 cm, peso specifico  $\gamma_{\text{intonaco}} = 1800 \text{ kg/m}^3$ );
- confezionati con blocchi tipo FO o FV (peso specifico della muratura  $\gamma_{\text{FO}} = 660 \text{ kg/m}^3$ ,  $\gamma_{\text{FV}} = 780 \text{ kg/m}^3$ ).

Considerando nel calcolo la presenza dell'intonaco, si è operato a favore della sicurezza, essendo la forza sismica di calcolo proporzionale alla massa del tamponamento e la prova condotta senza l'effetto favorevole dell'intonaco. Ipotizzando, inoltre, un'altezza dei tamponamenti pari a 270 cm (contro i 252 cm di altezza dei campioni testati) si opera un'ulteriore sovrastima del valore dell'azione sismica a favore della sicurezza, per il valore più elevato che si ottiene dei primi periodi di vibrazione della struttura e dell'elemento, che compensa ampiamente l'eventuale minore capacità di un elemento di tamponamento di soli 18 cm più alto rispetto a quelli testati sperimentalmente.

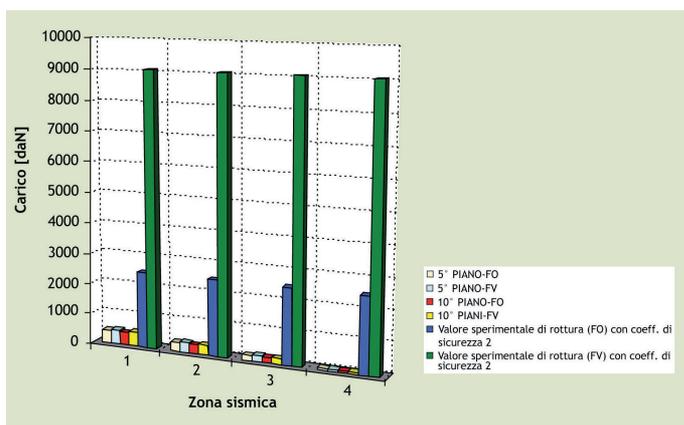
I risultati esposti nel seguito per due edifici di 5 e 10 piani, in termini di confronto tra valori sperimentali di capacità dei tamponamenti per azioni fuori piano e valori di azioni del sisma di progetto, sono stati verificati essere assolutamente analoghi conducendo il calcolo per costruzioni con interpiani ridotti atti a simulare la presenza di tamponamenti alti 252 cm.

I valori maggiori di azione sismica fuori piano si ottengono in corrispondenza dell'ultimo piano di un edificio in zona sismica 1 ( $a_{\text{gs}} = 0,35 \text{ g}$ ), le cui fondazioni insistano su un terreno classificato di tipo D ( $S = 1,35$ ) secondo l'OPCM n. 3431/05.

Nelle figure 10 e 11 sono riportati i valori della forza sismica di progetto, al variare delle zone sismiche su terreni di tipo D, per un edificio di 5 e 10 piani, i cui tamponamenti siano confezionati con blocchi in laterizio a fori orizzontali (tipo FO) e a fori verticali (tipo FV). Le differenze modeste nei valori di azione sismica massima al piano più alto dell'edificio di 5 o 10 piani sono dovute alla riduzione del periodo fondamentale di vibrazione dell'edificio al crescere della sua altezza totale e alla conseguente diminuzione della risposta della struttura. Le differenze nei valori di azione su pannelli di differente fattura, a parità di altre condizioni, sono invece dovute semplicemente al diverso peso specifico dei tamponamenti in esame. Per tale motivo non è significativa la distinzione, in questa sede, tra campioni di tipo FOA ed FOB, dato che tale parametro non si modifica significativamente sulla base del tipo di giunto orizzontale. Se si considera il carico a rottura medio ottenuto sperimentalmente sui



12. Confronto tra domanda ad ogni piano (zona sismica 1) e capacità sperimentale ridotta.



13. Confronto tra domanda massima (ultimo piano, zona sismica da 1 a 4) e capacità sperimentale ridotta.

sei campioni di tipo FOA ed FOB, pari a 50,5 kN, e sui tre campioni di tipo FOV, pari a 182 kN, e lo si confronta con la domanda sismica massima ottenuta per campioni di tipo FO, pari a 4,12 kN, e per campioni di tipo FV, pari a 4,64 kN, si evincono dei fattori di sicurezza, in termini di rapporto tra valori sperimentalmente ottenuti e azioni di progetto secondo la normativa corrente, molto elevati, pari rispettivamente a 12 e 39. Nelle figure 12 e 13 si mostra il confronto tra azione sismica fuori piano di progetto per i due edifici analizzati di 5 e 10 piani, posti in zona sismica 1 e su terreno di tipo D, con i valori di capacità sperimentali ottenuti su campioni di tipo FO (blu) ed FV (verde) ridotti per un fattore di sicurezza pari a 2, valore ipotizzabile nel caso di progettazione assistita dalla sperimentazione. È evidente come, per i pannelli di tamponamento delle due tipologie testate e nelle ipotesi sopra esposte, la domanda del sisma di progetto, valutata sulla base del valore dell'azione sismica agente nel centro di massa dell'elemento, è notevolmente inferiore al carico ultimo sperimentale rilevato, ridotto per un fattore di sicurezza pari a 2. È comunque necessario ricordare che le prove sono state eseguite in modalità di carico monotona e quasi statica, e su pannelli integri. Una più dettagliata analisi del comportamento fuori piano, che porti a valori dei fattori di sicurezza più realistici, richiederebbe l'esecuzione di prove in modalità dinamica e la valutazione dell'effetto del danneggiamento nel piano sul comportamento fuori piano.

**Considerazioni conclusive** Nella presente ricerca sperimentale sono state eseguite prove fuori piano su tre tipologie di pannelli di tamponamento, differenziate l'una dall'altra per il tipo di blocco utilizzato e per la modalità di esecuzione dei giunti orizzontali e verticali. I risultati sperimentali indicano che la variabile maggiormente influente, sul comportamento di tamponamenti di tali tipologie, risulta essere il tipo di blocco utilizzato in relazione alla sua resistenza a compressione e alla sua robustezza in generale. Infatti, pannelli confezionati con blocchi per muratura portante a fori verticali (FV) hanno dimostrato di arrivare al collasso sviluppando dei meccanismi resistenti di tipo globale, anziché locale, raggiungendo una resistenza, per azioni fuori piano, superiore da tre a quattro volte rispetto agli omologhi campioni confezionati con blocchi forati e fori disposti in orizzontale (FO). Di fondamentale importanza, a tale riguardo, è l'esecuzione a regola d'arte del giunto terminale superiore del tamponamento, a contatto con l'intradosso del solaio superiore, che permette l'effettivo innescamento dei meccanismi resistenti che coinvolgono la formazione di un arco resistente nello spessore del tamponamento. Per contro, l'influenza della variabilità della fattura dei giunti di malta sembra nel complesso essere più contenuta, anche se i pannelli realizzati con blocchi a fori orizzontali e con giunto orizzontale continuo hanno mostrato un valore di carico ultimo superiore del 30% circa rispetto ai pannelli confezionati con lo stesso tipo di blocco, ma con giunto orizzontale interrotto. In ogni caso, è da valutare il rapporto costi-benefici tra il miglioramento delle caratteristiche meccaniche apportato dall'utilizzo del giunto continuo e la maggiore onerosità rispetto ad un giunto orizzontale interrotto, in termini sia di materiali e tempo di esecuzione, sia di eventuali ridotte capacità di isolamento termo-acustico. È inoltre da evidenziare che, per la tipologia di prova che non prevede la realizzazione di vincoli sui bordi laterali dei pannelli, l'eventuale influenza della variabilità nel confezionamento del giunto verticale è chiamata in causa in maniera ridotta, dato che non possono instaurarsi meccanismi resistenti anche nella larghezza del campione in prova, come invece potrebbe avvenire in tamponamenti reali collegati anche lateralmente alla struttura portante.

Dal punto di vista del confronto con la domanda del sisma di progetto, calcolata secondo le disposizioni dell'OPCM n. 3431 per edifici di diversa altezza collocati in zone sismiche caratterizzate dai più alti valori di accelerazione al suolo, si è dimostrato che le tipologie di tamponamento testate presentano delle resistenze sperimentali superiori da 12 a 39 volte rispetto alle richieste di normativa. Nonostante tali rapporti non includano l'utilizzo di fattori di sicurezza e le prove non siano state condotte in modalità dinamica o previo danneggiamento del pannello nel proprio piano, si può comunque affermare che il comportamento di tamponamenti caratterizzati da basse snellezze e da un buon grado di vincolo con i telai portanti sembra essere soddisfacente. ¶