

Comportamento meccanico di tamponamenti in blocchi di laterizio rettificati e giunti sottili

DI M.L. BECONCINI*, P. CROCE*, D. PELLEGRINI**

*UNIVERSITÀ DI PISA

**VINCITORE DEL CONCORSO ANDIL-ICERS 2006

Sono stati condotti studi su tamponamenti in laterizio innovativo eseguendo una ampia campagna di prove sperimentali e numeriche, finalizzate alla determinazione del comportamento strutturale di murature non portanti confezionate con blocchi di laterizio rettificati e giunti sottili di collante sintetico, messi in opera con il sistema per immersione. Sulla base dei modelli numerici, viene proposta una stima della sicurezza nei confronti delle azioni sismiche fuori piano per i pannelli di tamponamento degli edifici.

INTRODUZIONE

Negli edifici con struttura a telaio, in cemento armato o anche in acciaio, le chiusure perimetrali sono generalmente realizzate con pannelli di tamponamento in muratura di laterizio a cui non è affidata alcuna funzione portante. Le tipologie di muratura utilizzate sono svariate. Nelle costruzioni di recente realizzazione, si utilizzano tipologie di tamponamenti che abbinano qualità di isolamento termico ed economicità quali: soluzione a doppio strato formata da due pareti di forati e camera d'aria interposta, oppure parete monostrato realizzata con blocchi che, per forma e per tipo di materiale, presentano elevata coibenza termica.

Si è posta l'attenzione, anche in Italia, su un nuovo sistema costruttivo per la realizzazione di murature non portanti, basato sull'impiego di blocchi rettificati, tali da consentire l'esecuzione di letti "sottili" di malta dell'ordine di 1-3 mm di spessore [1]. Tale sistema si presta a ridurre drasticamente le quantità di malta ed i tempi di esecuzione della muratura, con vantaggi economici di rilievo [2,3]. Nel panorama europeo, la muratura realizzata con giunti sottili è riconosciuta dalla versione attualmente vigente dell'Eurocodice 6 ed è stata adottata, già da diversi anni, in alcuni paesi (Germania, Austria, Francia, Gran Bretagna) dove la conoscenza del comportamento meccanico di tali murature non è però ancora esaustiva, soprattutto in relazione all'influenza dei numerosi parametri che le caratterizzano. Pertanto sono in corso studi volti all'ap-

profondimento del comportamento fisico e meccanico ed al perfezionamento del sistema. Per quanto riguarda il comportamento meccanico di pannelli di muratura di tali tipologie, utilizzabili come pannelli di tamponamento o come tramezzature interne di edifici, non erano disponibili esperienze sufficienti a poterne prevedere la risposta alle azioni statiche e soprattutto in condizioni sismiche.

Al fine di determinare il comportamento sotto carico di elementi costruttivi realizzati con la tecnologia descritta, è stata intrapresa una campagna di ricerche, promossa dal Laterificio Pugliese S.p.A. con il supporto del MIUR e svolta dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa.

La ricerca si è incentrata, oltre che sullo studio del comportamento meccanico degli elementi costituenti - blocchi e collanti -, sulla valutazione della risposta di elementi strutturali di grandi dimensioni alle azioni sia complanari che fuori piano. I campioni e le modalità di prova sono stati concepiti in modo da riprodurre le diverse condizioni di sollecitazione delle pareti, sia nella funzione di pannelli di tamponamento che di tramezzature.

Lo studio è stato completato con la messa a punto di modelli agli elementi finiti capaci di descrivere il comportamento rilevato sperimentalmente e quindi utili per estendere i risultati ad elementi strutturali diversi, per forma e modalità di carico.

DESCRIZIONE DELLA TIPOLOGIA MURARIA

La ricerca ha avuto per oggetto una tipologia muraria per pareti non portanti che è attualmente in fase di perfezionamento, sia per quanto riguarda gli aspetti prestazionali che quelli produttivi.

La nuova tipologia utilizza un prototipo di blocco in laterizio che, grazie alla particolare trama della foratura, pur mantenendo le stesse prestazioni statiche dei prodotti in laterizio porizzato, presenta un migliore comportamento igro-termico ed acustico. Le particolari prestazioni del blocco derivano dalle peculiari caratteristiche sia della sua produzione che della sua concezione (in particolare l'elevata attenzione tecnologica nella lavorabilità dell'argilla e nello studio dell'organizzazione del reticolo interno), dalla conformazione geometrica delle cel-

le, dalla numerosità delle file di celle (ad esempio, il blocco di dimensioni 30 x 25 x 25 cm presenta 17 file di celle), dal sottile spessore dei setti interni (intorno a 5 mm).

La particolare architettura del blocco e la rettifica delle facce consentono la posa in opera con incastri verticali a secco e giunti orizzontali molto sottili delle pareti, consentendo tempi di posa notevolmente contenuti.

Le caratteristiche geometriche dei blocchi sperimentati sono riportate in tab. I. Per quanto riguarda le prescrizioni delle normative attuali, i prodotti testati sono classificabili come *forati* (con percentuale di foratura $\square > 55\%$) non portanti in relazione al D.M. 20/11/87 [9]; secondo l'Eurocodice 6 [10], essi rientrano nel Gruppo 3: pertanto, sia in base al D.M. 20/11/87 che all'Eurocodice 8 [11], possono essere utilizzati solo per murature non portanti.

Come noto, in zona sismica l'OPCM 3431/2005 impone la verifica anche dei pannelli murari non portanti per le azioni orizzontali definite all'art. 4.9; in alternativa, possono essere applicate sulle due facce delle pareti leggere reti di intonaco collegate fra loro a passo determinato. L'EC8, allo stesso proposito, consiglia l'adozione di provvedimenti costruttivi idonei, specialmente nei casi in cui i pannelli di muratura abbiano elevati rapporti di snellezza.

Uno degli scopi della ricerca era la verifica dell'idoneità del sistema costruttivo in studio ad essere impiegato per pannelli di tamponamento e tramezzature in edifici costruiti in zona sismica, senza la necessità di provvedimenti aggiuntivi, quali le reti da intonaco consigliate dalle normative. I campioni sottoposti a prove sono stati realizzati con giunti sottili (< 3 mm) di collante sintetico di normale presenza commerciale, con la tecnica per immersione della faccia di letto.

PROGRAMMA DI RICERCA SPERIMENTALE

Il programma delle attività di laboratorio è consistito nella realizzazione di campioni di muretti e nell'effettuazione di prove sperimentali fino a rottura in diverse condizioni di sollecitazione. La campagna di prove su pannelli murari ha riguardato campioni realizzati con blocchi non portanti, con foratura a nido d'ape, di spessori 20 e 30 cm, tutti privi di intonaco. Le prove sui muretti sono state progettate in modo da saggiare il comportamento delle pareti nelle situazioni di carico più comuni, nell'utilizzo come pannelli di tamponamento in edifici intelaiati o come tramezzature. Sono state quindi eseguite prove di compressione in direzione normale ai corsi, su muretti di dimensioni circa 1 m x 1 m.

Sono state, inoltre, effettuate prove su pannelli di parete, di larghezza circa 1 m, costruiti a contrasto fra pavimento e solaio molto rigidi, applicando forze orizzontali su una striscia parallela al pavimento, ad altezza circa 1,20 m rispetto a quest'ultimo, secondo le indicazioni per le verifiche a forze orizzontali distribuite contenute nel D.M. 16.1.96 relativo ai carichi sulle costruzioni. Sono state effettuate prove di compressione diagonale su campioni di circa 1 m x 1 m, tese a simulare il comportamento dei pannelli di tamponamento sollecitati dalle azioni trasmesse dai riquadri di telaio in fase sismica.

Infine, sono stati realizzati campioni della larghezza di 1,80 m e altezza 1,00 m, sostenuti da piatti metallici di dimensioni pari alla sezione dei muretti, su cui sono state effettuate prove di flessione nel piano dei pannelli stessi; ciò al fine di indagare il comportamento delle murature, poggiati su strutture dotate di rigidità flessionale paragonabile a quella di normali solai e sollecitate da carichi verticali applicati non uniformemente (carichi trasmessi da architravi, ecc.), sia nella si-

Tab. I - Caratteristiche nominali e misurate dei blocchi utilizzati nella sperimentazione.

Denominazione		Spessore [cm]	Larghezza [cm]	Altezza [cm]	% foratura	Peso [daN]	Massa vol. app. [daN/m ³]
nido d'ape s = 20		20	48	25	65,75	16,50	687
nido d'ape s = 30		30	25	25	63,25	12,0	640
valori misurati per il blocco s = 30	Media	29,76	23,58	23,61	58,31	12,1	680
	Coeff. var. %	0,1	0,8	0,2	2,2	1,3	1,7

tuazione in cui possa esplicarsi l'effetto arco per la presenza di ritegni atti a contrastarne la spinta, sia in assenza di tale effetto. A questo scopo, sono state eseguite prove su due serie di campioni, di cui alcuni costruiti in modo che gli scorrimenti fra piastra di base e muretto fossero molto contenuti ed altri lasciati liberi di variare. La tabella II riassume, per ciascun tipo di prova, il numero e le dimensioni dei campioni.

Precedentemente alla sperimentazione su campioni di parete, sono state effettuate prove sui componenti, blocchi e collanti, con il duplice scopo di caratterizzare i materiali e di disporre di dati sperimentali da utilizzare per i modelli numerici.

MATERIALI UTILIZZATI E CARATTERIZZAZIONE DI BASE

La prima fase della ricerca ha riguardato la verifica delle caratteristiche geometriche e meccaniche dei materiali utilizzati ed i controlli esecutivi in fase di realizzazione dei pannelli. Sui materiali impiegati, sono state effettuate le seguenti determinazioni:

- misure delle caratteristiche geometriche dei blocchi rettificati;
- determinazione della resistenza a compressione dei blocchi, sia in direzione dei fori che in direzione ortogonale ad essi;
- misure di fluidità delle malte impiegate per la realizzazione dei giunti sottili nei campioni murari;
- prove di flessione e di compressione su provini prismatici, confezionati con le stesse malte.

Poiché i blocchi utilizzati provenivano da una produzione non ancora corrente, si è rilevato uno scostamento non trascurabile delle caratteristiche dimensionali dai valori nominali (tab. I). In particolare, le misure di planarità, effettuate su numerosi blocchi, hanno fornito valori di scostamento dalla planarità fino a 2,5 mm, ampiamente superiori ai valori richiesti per la tipologia muraria in esame. Tali irregolarità dimensionali hanno

influenzato la geometria dei campioni murari costruiti e testati, che, in molti casi, presentavano difetti di fuori piombo e imperfetto riempimento dei giunti. I risultati ottenuti su tali campioni quindi possono essere considerati come valori limite inferiori, relativi ad una produzione ancora a carattere sperimentale e certamente suscettibile di perfezionamento.

PROVE DI COMPRESSIONE A ROTTURA SU BLOCCHI IN DIREZIONE DEI FORI

Le prove sono state eseguite secondo *UNI EN 772-1:2002*, su 20 blocchi del tipo $s = 30$. I blocchi contrassegnati da B1 ad B10 non hanno subito nessun adattamento particolare, mentre i blocchi da BC1 a BC10 sono stati rettificati con cappatura di malta cementizia. Tutti i blocchi sono stati condizionati per essiccazione all'aria, a temperatura $\geq 15^\circ\text{C}$ ed umidità relativa $< 65\%$ per almeno 14 giorni. I risultati delle prove sono riportati nella tabella III, in cui la resistenza del blocco F è ricavata come rapporto fra il carico di rottura e l'area lorda della sezione compressa; la resistenza a compressione normalizzata F_b rappresenta convenzionalmente la resistenza di elementi asciutti equivalenti di dimensioni della sezione compressa pari a 100 x 100 mm. Le figg. 1a-1b illustrano le modalità di rottura dei blocchi.

Dalla tabella III si nota come la resistenza a compressione dei blocchi non cappati sia notevolmente inferiore rispetto a quella dei blocchi spianati con cappatura di malta. Tale differenza è dovuta principalmente a due fattori:

- la cappatura di malta aderisce completamente alla superficie del blocco dando origine ad una distribuzione della tensione uniforme nel blocco stesso; nei blocchi non cappati invece il contatto fra piastra e superficie del blocco è puntiforme a causa della non perfetta planarità della superficie rettificata, con conseguente concentrazione di tensione e quindi rottura fragile più repenti-

Tab. II - Principali prove sperimentali eseguite su elementi di muratura e caratteristiche geometriche dei campioni testati.

Tipo di prova	Tipologia del blocco			
	nido d'ape $s = 20$		nido d'ape $s = 30$	
	n° campioni	Dimensioni [cm]	n° campioni	Dimensioni [cm]
compressione ortogonale ai corsi	5	100 x 100	5	100 x 100
flessione fuori piano	3	100 x 280	3	100 x 280
compressione diagonale	3	100 x 100	3	100 x 100
flessione con catena	3	180 x 100	3	180 x 100
flessione senza catena	3	180 x 100	3	180 x 100

Tab. III - Risultati delle prove di compressione a rottura.

Campione	Cappatura con malta	Carico di rottura [kN]	Resistenza a compressione F [MPa]	Resistenza a compressione normalizzata F_b [MPa]	Media F_b [MPa]	Dev. St. F_b [MPa]	Coeff. Var. %
B1		532	7,33	8,43			
B2		394	5,39	6,20			
B3		391	5,28	6,07			
B4		424	5,76	6,62			
B5	assente	534	7,40	8,51	7,44	1,19	16
B6		490	6,83	7,85			
B7		424	5,78	6,65			
B8		484	6,67	7,68			
B9		616	8,47	9,73			
B10		422	5,84	6,71			
BC1		814	10,64	12,24			
BC2		896	11,64	13,39			
BC3		698	9,15	10,52			
BC4		864	11,62	13,36			
BC5	presente	776	11,02	12,68	12,34	1,59	13
BC6		574	7,75	8,91			
BC7		933	12,07	13,88			
BC8		740	10,07	11,58			
BC9		852	11,75	13,51			
BC10		871	11,64	13,38			

na per valori di carico molto inferiori rispetto a quelli dei blocchi cappati;

- lo strato di malta offre un'azione cerchiante per le zone estreme delle cartelle del blocco innalzando pertanto il carico di rottura.

PROVE DI RESISTENZA A TRAZIONE PER TAGLIO SUI BLOCCHI

Sono state eseguite prove di resistenza a trazione indiretta secondo la *UNI 8942:1986*. Il carico è stato applicato sulle facce ortogonali ai fori, attraverso regoli di acciaio lunghi 32 cm e di sezione quadra-



Fig. 1a - Modalità di rottura dei blocchi senza cappatura.



Fig. 1b - Modalità di rottura dei blocchi con cappatura.



Fig. 2 - Prova di trazione per taglio: modalità di rottura del blocco.

ta con lato 2 cm. Per evitare problemi di incisione localizzata, fra regoli e facce dei blocchi è stato interposto un foglio di gomma dello spessore di 3 mm (fig. 2). Le prove sono state eseguite su 6 campioni $s = 30$ disponendo l'asse di carico parallelo ad uno dei lati e su altri 6 campioni $s = 30$ disponendo l'asse parallelo all'altro lato, preventivamente condizionati per essiccazione all'aria come previsto dalla UNI EN 772-1:2002. Nella tabella IV, oltre al carico massimo, è riportato il valore della resistenza a trazione indiretta f_v valutata secondo la UNI 8942:1986:

$$f_v = \frac{2t}{\pi bh} \quad \text{in cui } t \text{ è il carico totale di rottura in Newton.}$$

La fig. 2 illustra le modalità di rottura dei blocchi. Al termine della prova, si sono potuti calcolare i

due valori caratteristici per entrambe le direzioni di applicazione del carico, ossia parallela al lato corto, relativa al conseguente lesionamento entro lo spessore, ed al lato lungo, con conseguente lesionamento del lato in facciata. La resistenza caratteristica è stata determinata secondo la UNI 8942/3, mediante la relazione:

$$f_{vk} = f_v - ks$$

dove f_v è la resistenza media del blocco, $k = 2,33$ (coefficiente per 6 campioni) e s lo scarto quadratico medio, ottenendo valori di 0,54 e 0,68 MPa.

PROVE DI QUALIFICAZIONE DI MALTE E COLLANTI

Con i materiali utilizzati per i giunti e per lo strato di cattura sono stati confezionati dei campioni

Tab. IV - Risultati delle prove di trazione indiretta.

Campione	Modalità di carico	Area lorda della sezione di rottura [cm ²]	Carico di rottura t [kN]	Resistenza a trazione per taglio f_v [MPa]	Media f_v [MPa]	Dev. st. f_v [MPa]	Coeff. var. %
B1		736,56	74	0,64			
B2		721,24	77	0,68			
B3	carico parallelo al lato lungo	720,30	79	0,70	0,68	0,02	3,29
B4		720,30	79	0,70			
B4		725,20	78	0,69			
B5		724,68	78	0,69			
B6		600,25	64	0,68			
B7		597,78	64	0,68			
B8	carico parallelo al lato corto	597,80	64	0,68	0,68	0,006	0,93
B9		597,80	64	0,68			
B10		610,08	64	0,67			
B11		612,54	66	0,69			

su cui sono state eseguite prove di caratterizzazione meccanica, nelle stesse date in cui i relativi muretti sono stati sottoposti a prova. Le prove sono state condotte secondo la *UNI EN 1015-11:2001*. Inoltre, per caratterizzare in maniera completa il collante impiegato nella realizzazione dei campioni, sono state eseguite prove di distacco tese a determinare la resistenza a trazione del collante stesso su 3 provini costituiti da due blocchi, di dimensioni cm 47,5 x 20 x 25, con facce preventivamente rettificate a secco, uniti perpendicolarmente uno rispetto all'altro con giunto sottile di collante. Uno dei due blocchi è stato appoggiato su due supporti in modo tale che l'altro blocco risultasse appeso al precedente. Sul blocco appeso è stato esercitato un carico crescente attraverso un apposito dispositivo (figg. 3a÷c). Si riportano in tabella V i risultati ricavati dalle prove in termini di carico massimo di distacco, tensione massima e deformazione massima del giunto.

PROVE SU PANNELLI MURARI

Successivamente alla caratterizzazione dei materiali, è stata effettuata una campagna sperimentale su campioni di muratura realizzati utilizzando bloc-

chi dei tipi in precedenza testati $s = 30$ e $s = 20$, con giunti sottili. I campioni sono stati confezionati direttamente nei locali del Laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Strutturale, con l'ausilio di telai appositamente predisposti per la movimentazione e per l'esecuzione delle prove.

PROVE DI COMPRESSIONE ASSIALE

Le prove sono state eseguite secondo la *UNI 1052-1:2001* su 5 campioni delle dimensioni di circa 1 m x 1 m, confezionati su una base costituita da un profilato metallico con interposto uno strato di malta cementizia dello spessore di circa 1,5 cm. Analogo strato di malta cementizia è stato applicato alla faccia superiore del muretto, in modo da ottenere una superficie rettificata e quanto più possibile ortogonale al piano medio del muretto. Nella figura 4 è riportata un'immagine della prova e lo schema della strumentazione relativa. I risultati di tutte le prove, in termini di resistenza a compressione, modulo elastico a compressione e coefficiente di Poisson, sono riportati nelle tabelle VI e VII e rappresentati graficamente nei diagrammi delle figure 5 e 6. Confrontando i valori medi di resistenza a compressione ricavati



Fig. 3a - Inserimento del provino.
Fig. 3b - Dispositivo di trasmissione di carico.
Fig. 3c - Immagine della prova.

Tab. V - Risultati delle prove di trazione indiretta.

Campione	P_{max} [N]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max}
1R	9420	0,261	0,024
2R	9480	0,263	0,012
3R	12420	0,344	0,027
Valore medio	10440	0,289	0,021
Dev. standard	1715	0,047	0,008
Coeffic. var. %	16	16	38

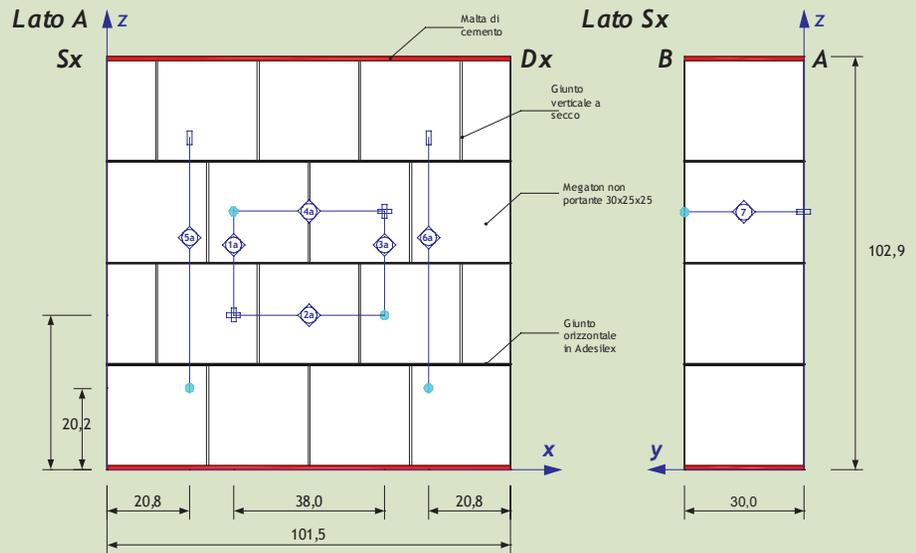


Fig. 4 - Immagine della prova e schema della strumentazione di misura (dimensioni in cm).

Tab. VI - Risultati delle prove di compressione su muretti confezionati con blocchi nido d'ape $s = 30$.

Campione	$P_{rottura}$ [kN]	f [MPa]	E [MPa]	ν
M1	869	2,89	7 300	--
M2	1 227	4,09	6 530	0,34
M3	840	2,67	5 910	0,21
M4	1 375	4,58	7 230	0,11
M5	995	3,18	5 500	--
media	1 061,20	3,48	6 494	0,22
dev. st.	232,49	0,82	794	0,12
coeff. var. %	21,9	23,5	12,2	52,4

Tab. VII - Risultati delle prove di compressione su muretti confezionati con blocchi nido d'ape $s = 20$.

Campione	$P_{rottura}$ [kN]	f [MPa]	E [MPa]	ν
M6	220,3	1,22	1 784	0,21
M7	491,2	2,65	6 562	0,11
M8	564,7	3,05	7 503	0,18
media	425,4	2,31	5 283	0,17
dev. st.	181,4	0,96	3 066	0,05
coeff. var. %	42,6	41,7	58,0	30,8

dalle prove sui singoli blocchi $s = 30$, con e senza cappatura (tab. III), ed i risultati delle prove su muretti (tab. VI), si nota che questi ultimi sono decisamente più bassi rispetto a quelli dei blocchi singoli; questo dipende essenzialmente da due fattori:

- nel muretto i blocchi sono disposti sfalsati da un corso all'altro; a questo consegue che le cartelle verticali che compongono i blocchi non si sovrappongono esattamente e quindi il contatto fra i blocchi avviene su superfici molto ridotte, con il conseguente aumento delle tensioni locali;
- in corrispondenza dei giunti verticali, non riempiti, nascono tensioni trasversali di trazione di valore elevato, responsabili delle precoci fratture verticali nei blocchi delle file adiacenti.

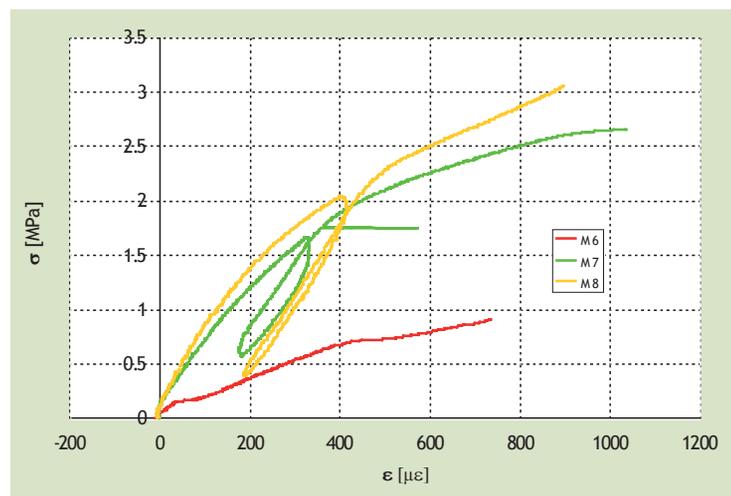


Fig. 5 - Diagrammi tensione-deformazione su muretti confezionati con nido d'ape $s = 20$.

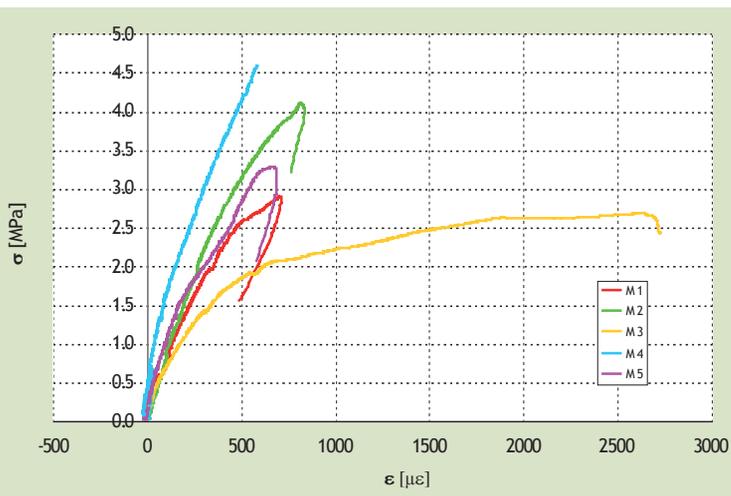


Fig. 6 - Diagrammi tensione-deformazione su muretti confezionati con nido d'ape $s = 30$.

PROVE DI COMPRESSIONE DIAGONALE

Le prove di compressione diagonale sono state eseguite su quattro campioni di dimensioni circa $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$

confezionati con blocchi $s = 30$ e su tre analoghi campioni confezionati con blocchi $s = 20$ (lo spessore dei campioni è pari allo spessore di un blocco). Tutti i campioni, eccetto quello contrassegnato con M4, sono stati confezionati seguendo le consuete modalità di riempimento dei giunti: giunti orizzontali per immersione e giunti verticali a secco; nel campione M4, invece, una volta completata la confezione del muretto secondo le stesse modalità, i giunti verticali sono stati "stuccati" con lo stesso collante impiegato per la realizzazione dei giunti sottili.

Le figg. 7÷9 illustrano, rispettivamente, l'apparato di prova su un campione costituito da blocchi $s = 30$, lo schema della strumentazione di misura impiegata, la tipica modalità di collasso. Tutti i campioni hanno mostrato un comportamento pressoché lineare fino al raggiungimento del carico massimo, in corrispondenza del quale si è avuto il distacco lungo i giunti disposti secondo la diagonale compressa. I risultati di tutte le prove, in termini di carico massimo e di corrispondente tensione media sulla sezione diagonale del campione, sono riportati nella tabella VIII. Nelle figg. 10 e 11 sono

Tab. VIII - Risultati delle prove di compressione diagonale.

Tipo di blocco	Campione	P_{\max} [kN]	f_v [MPa]	media	dev. st.	coeff. var. %
nido d'ape $s = 30$	M1	86	0,20			
	M2	63	0,15	0,15	0,06	39
	M3	37	0,09			
	M4	119	0,28	--	--	--
nido d'ape $s = 20$	M1	74	0,26			
	M2	67	0,23	0,25	0,01	5
	M3	72	0,25			



Fig. 7 - Prova di compressione diagonale.

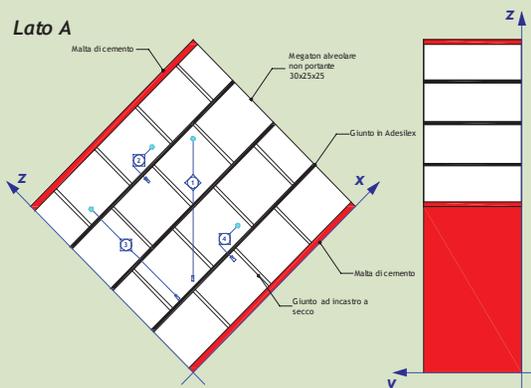


Fig. 8 - Schema della strumentazione di misura.

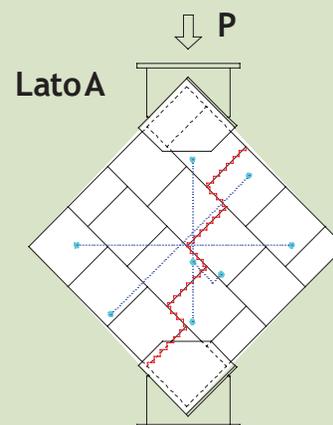


Fig. 9 - Modalità di collasso.

riportati i diagrammi τ - δ in cui τ è la tensione media sulla sezione diagonale del campione e δ è lo scorrimento relativo delle due facce della sezione di rottura.

PROVE DI FLESSIONE NEL PIANO

Le prove sono state eseguite su 6 campioni per ciascun tipo di blocco, di dimensioni 1,80 m di larghezza, 1,00 m di altezza per lo spessore di un blocco, confezionati su una base costituita da un profilato metallico e da uno strato di malta cementizia di circa 1,5 cm di spessore. Per tre dei campioni è stato interposto un foglio di nylon fra profilato e malta di allettamento, così che il campione fosse libero di scorrere rispetto al profilato. Per gli altri tre sono stati saldati spezzoni di barre di acciaio sull'anima del profilato di base e trasversalmente alla larghezza del muretto: in questo modo il campione era impedito di scorrere rispetto al profilato, venendo così a costituire una sorta di catena nel funzionamento a flessione del muretto.

I pannelli in prova sono stati posizionati su profilati di appoggio in metallo, vincolati alla traversa della macchina di prova; il carico è stato applicato sulla superficie di sommità del pannello attraverso uno o due ripartitori metallici. L'interasse degli appoggi e la posizione di applicazione del carico sono stati fatti variare da prova a prova per evidenziare l'influenza della disposizione dell'insieme, blocchi - appoggi - zona caricata, sul comportamento flessionale del pannello. I risultati delle prove sono riassunti nella tab. IX. Le diverse modalità di rottura riscontrate e la conseguente dispersione dei valori di momento massimo riscontrati durante le prove mostrano che il comportamento dei pannelli a questo tipo di carico dipende in misura essenziale dalla posizione delle zone vincolate e di applicazione del carico.

PROVE DI FLESSIONE FUORI PIANO

Le prove sono state eseguite su 3 campioni per ciascuna tipologia di blocco, di dimensioni 1 m di larghezza per circa 2,85 m di altezza, confezionati in un locale del Laboratorio, a contrasto fra pavimento e solaio. Sia il pavimento che il solaio, costituiti da elementi in cemento armato dotati di notevole rigidità per le azioni fuori piano, rappresentano, per la parete in prova, vincoli rigidi per gli spostamenti delle sezioni di estremità nella direzione dell'asse verticale della parete stessa. Il carico orizzontale di prova è stato applicato su una striscia di parete a quota 125 cm dal pavimento e di altezza 10 cm; il carico, fornito da un martinetto idraulico della portata di 200 kN, è stato applicato tramite un elemento ripartitore in acciaio con interposto strato di feltro (fig. 12). I risultati delle prove, in termini di spostamento orizzontale massimo della sezione di mezzzeria, di carico orizzontale massimo

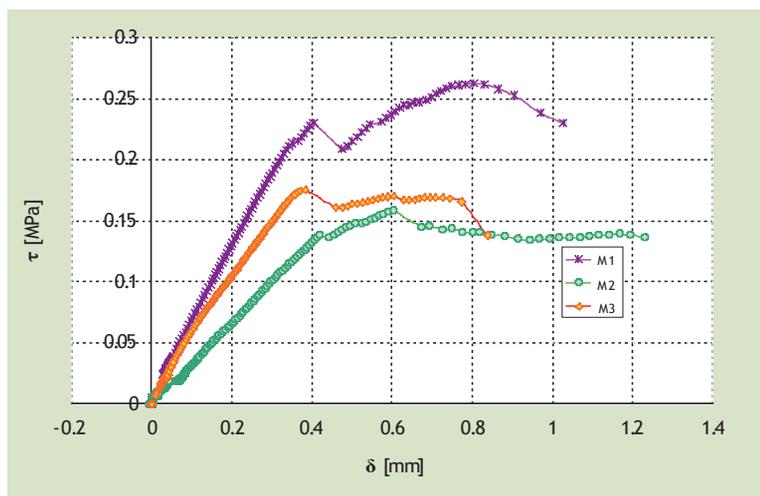


Fig. 10 - Diagrammi tensione-scorrimento relativo delle due facce della sezione di rottura (nido d'ape $s = 20$).

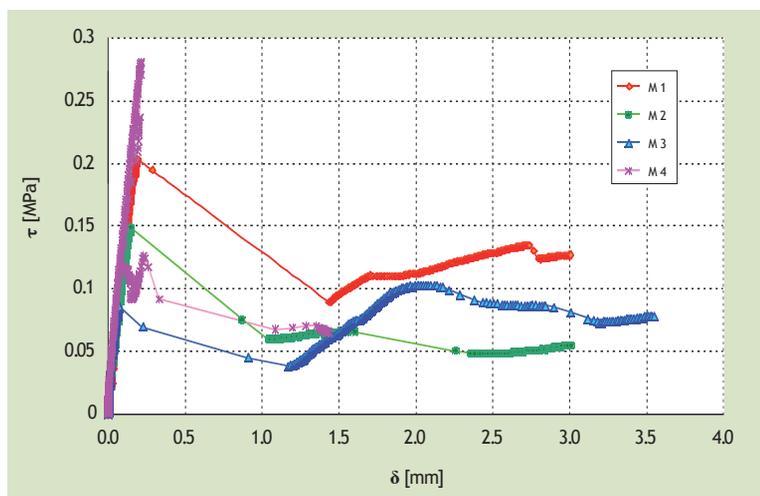


Fig. 11 - Diagrammi tensione-scorrimento relativo delle due facce della sezione di rottura (nido d'ape $s = 30$).

Tab. IX - Risultati delle prove di flessione nel piano.

Tipologia	Campione	M_{max} [kN·m]	media	dev. st.	coeff. var. %
nido d'ape $s = 30$	M1	12,38			
	senza catena M2	9,45	13,36	4,48	33
	M3	18,25			
	M4	22,00			
con catena	M5	45,45	27,50	15,93	58
	M6	15,05			
nido d'ape $s = 20$	M1	17,75			
	senza catena M2	8,65	11,60	5,32	46
	M3	8,40			
con catena	M4	27,80			
	M5	24,67	25,04	2,59	10
	M6	22,65			

e corrispondente tensione massima valutata sulla sezione interamente reagente, sono riassunti nella tab. X. Nelle figg. 13 e 14 sono riportati i diagrammi di comportamento delle pareti di spessore 20 e 30 cm.

ANALISI NUMERICHE DEL COMPORTAMENTO DI PARETI IN ZONA SISMICA

I pannelli di tamponamento e le tramezzature negli edifici intelaiati sono generalmente considerati elementi non strutturali; ciò nondimeno deve essere assicurata la loro stabilità nei confronti del collasso fuori piano, determinato da forze ortogonali al piano medio del pannello stesso. Il rischio di collasso è particolarmente elevato in caso di evento sismico, in special modo quando il pannello risultasse già lesionato a causa delle azioni sismiche complanari. Nelle normative tecniche attuali sono indicate le verifiche da effettuarsi su tali elementi costruttivi. In particolare l'OPCM 3431 [12] stabilisce che: "Tutti gli elementi costruttivi senza funzione strutturale, il cui danneggiamento può provocare danni a persone, dovranno in generale essere verificati all'azione sismica, insieme alle loro connessioni



Fig. 12 - Prova di flessione fuori piano.

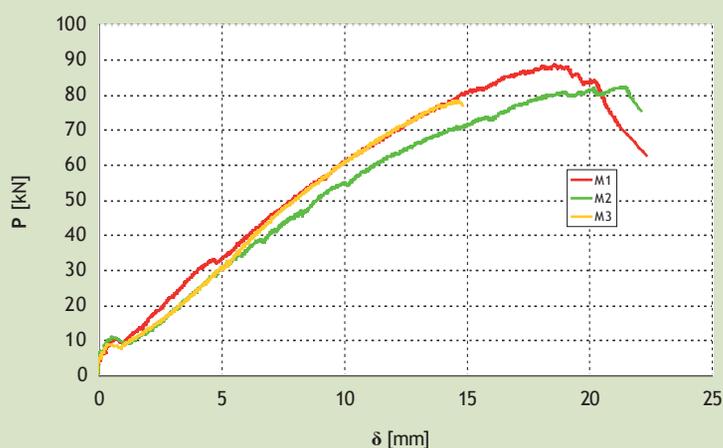


Fig. 13 - Diagrammi carico-deformazione laterale nelle prove di flessione fuori piano dei pannelli confezionati con nido d'ape $s = 20$.

alla struttura. L'effetto dell'azione sismica potrà essere valutato, salvo più accurate determinazioni, considerando un sistema di forze proporzionali alle masse (concentrate o distribuite) dell'elemento non strutturale, la cui forza risultante (F_a) valutata al baricentro dell'elemento non strutturale, è calcolata secondo la relazione seguente:

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

dove:

- W_a è il peso dell'elemento;
- γ_1 è il fattore di importanza della costruzione (punti 2.5 e 4.7);
- q_a è il fattore di struttura dell'elemento, da considerare pari ad 1 per elementi aggettanti a mensola (quali ad esempio camini e parapetti colle-

Tab. X - Risultati delle prove di flessione fuori piano.

Tipo di blocco	Campione	P_{max} [kN]	δ [mm]	f_o [MPa]	Media f_o	dev. st. f_o	coeff. var. % f_o
nido d'ape $s = 30$	M1	105,00	32	4,91	6,47	1,59	25
	M2	137,00	7,6	6,41			
	M3	173,00	11	8,09			
nido d'ape $s = 20$	M1	88,46	22	9,31	8,65	0,58	7
	M2	80,50	21	8,47			
	M3	77,78	15	8,19			

gati alla struttura solamente alla base) e pari a 2 negli altri casi (ad esempio per pannelli di tamponamento e controsoffitti);

- S_a è il coefficiente sismico da applicare agli elementi non strutturali di cui alla relazione seguente:

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

dove :

- $a_g S$ è l'accelerazione di progetto al terreno;
- Z è l'altezza del baricentro dell'elemento rispetto alla fondazione;
- H è l'altezza della struttura;
- g è l'accelerazione di gravità;
- T_a è il primo periodo di vibrazione dell'elemento non strutturale nella direzione considerata, valutato anche in modo approssimato;
- T_1 è il primo periodo di vibrazione della struttura nella direzione considerata".

Sempre all'interno della stessa normativa al punto 5.6.4 si dice:

"In zone sismiche 1, 2 e 3, oltre alle verifiche di cui al punto 4.9, dovranno essere adottate misure atte ad evitare collassi fragili e prematuri dei pannelli di tamponamento esterno e la possibile espulsione di elementi di muratura in direzione perpendicolare al piano del pannello. Le verifiche di cui al punto 4.9 si intendono soddisfatte 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, sia in direzione verticale, ovvero con l'inserimento di elementi di armatura orizzontale nei letti di malta, a distanza non superiore a 500 mm."

Queste indicazioni derivano da studi compiuti presso il Dipartimento di Meccanica Strutturale dell'Università di Pavia [8]. In tale ricerca sono state effettuate prove sperimentali su campioni in scala reale di telai in cemento armato dotati di pannelli di tamponamento di tre tipologie diverse:

- blocchi forati di dimensioni 24,50 x 11,50 cm con fori disposti orizzontalmente, giunti di malta orizzontale dello spessore di 1 cm e intonaco su entrambe le facce dello spessore di 1 cm;
- blocchi forati di dimensioni 24,50 x 11,50 cm con fori disposti orizzontalmente, giunti di malta orizzontale dello spessore di 1 cm, barre di acciaio del diametro di 5 o 6 mm disposte nei letti orizzontali di malta e intonaco su entrambe le facce dello spessore di 1 cm;
- blocchi forati di dimensioni 24,50 x 11,50 cm con fori disposti orizzontalmente, giunti di malta orizzontale dello spessore di 1 cm intonaco su entrambe le facce dello spessore di 1 cm all'interno del quale viene posta una rete elettrosaldada di acciaio.

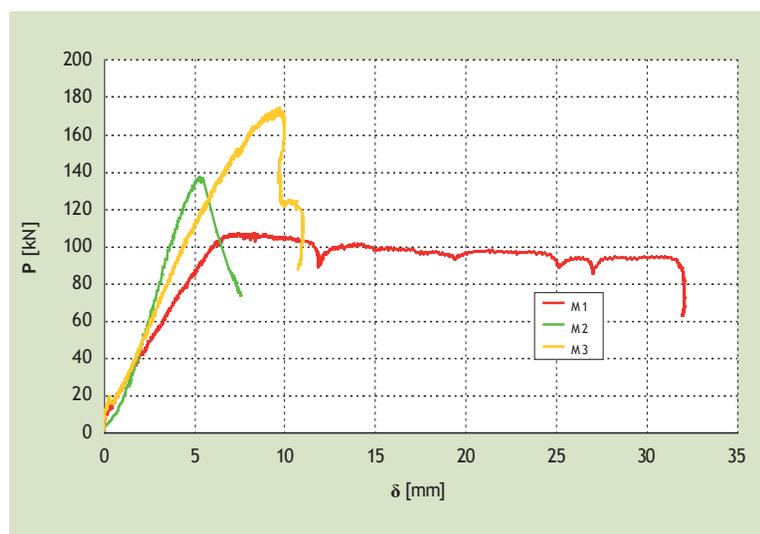


Fig. 14 - Diagrammi carico-deformazione laterale nelle prove di flessione fuori piano dei pannelli confezionati con nido d'ape $s = 30$.

Su ciascun campione sono state eseguite prove che prevedevano di:

- applicare alla struttura azioni taglianti nel piano del telaio;
- sottoporre le pareti così danneggiate all'azione di quattro carichi concentrati ortogonali al piano della parete stessa agenti ai terzi delle dimensioni del pannello fino al collasso di quest'ultimo.

Prendendo avvio dalle esperienze sopra descritte, la presente ricerca si è incentrata sullo studio del comportamento di un pannello di tamponamento di caratteristiche correnti soggetto dapprima ad un'azione agente nel proprio piano e poi successivamente ad un'azione ortogonale al piano del pannello stesso.

Utilizzando, quindi, i risultati ottenuti dalla calibrazione dei modelli delle varie prove eseguite su campioni di muratura, è stata condotta una sperimentazione numerica volta a ricavare il comportamento di un telaio in cemento armato in tutto analogo a quelli sperimentati presso l'Università di Pavia, dotato di un pannello di tamponamento realizzato con 11 file di blocchi rettificati, spessore 30 cm e giunti sottili dello spessore di 2 mm.

Sul modello è stata effettuata una analisi non lineare in controllo di spostamento per un'azione agente nel piano del pannello, fino ad ottenere uno spostamento interpiano dello 0,14%. Sul modello così danneggiato sono state applicate quattro forze concentrate ortogonali al piano del tamponamento ed è stata effettuata un'analisi elastica non lineare in controllo di spostamento. I risultati dello studio e la descrizione dei modelli realizzati sono riportati nei paragrafi seguenti.

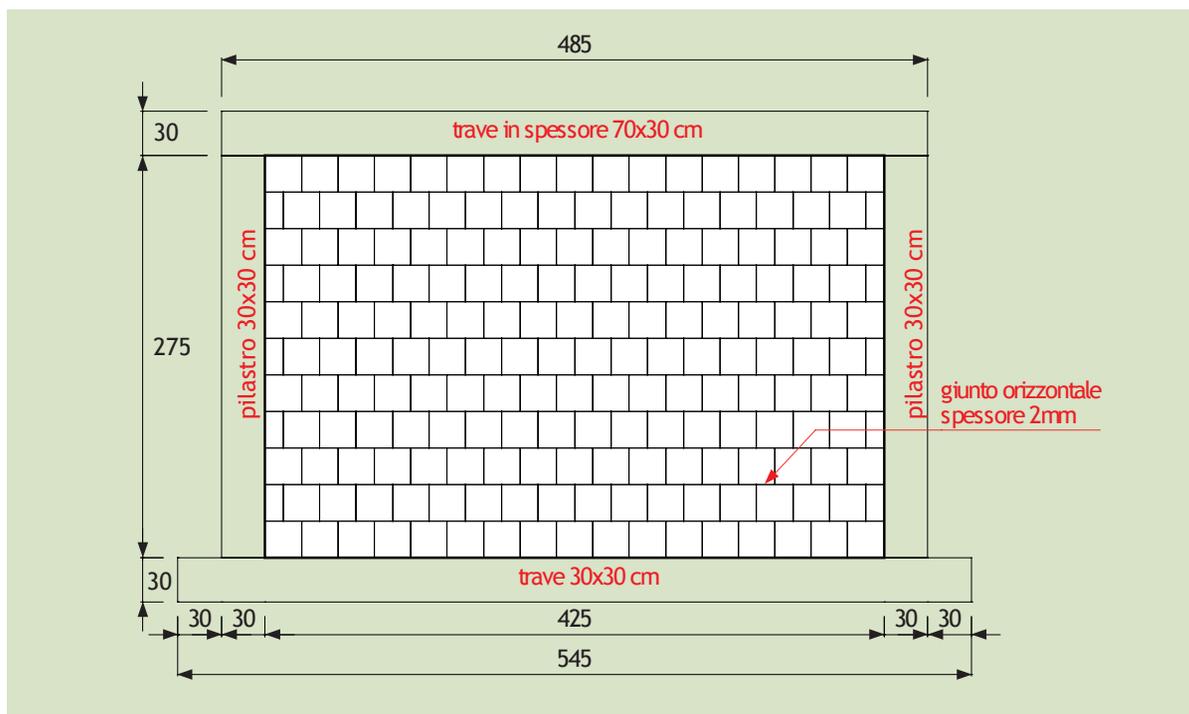


Fig. 15 - Dimensioni del telaio studiato.

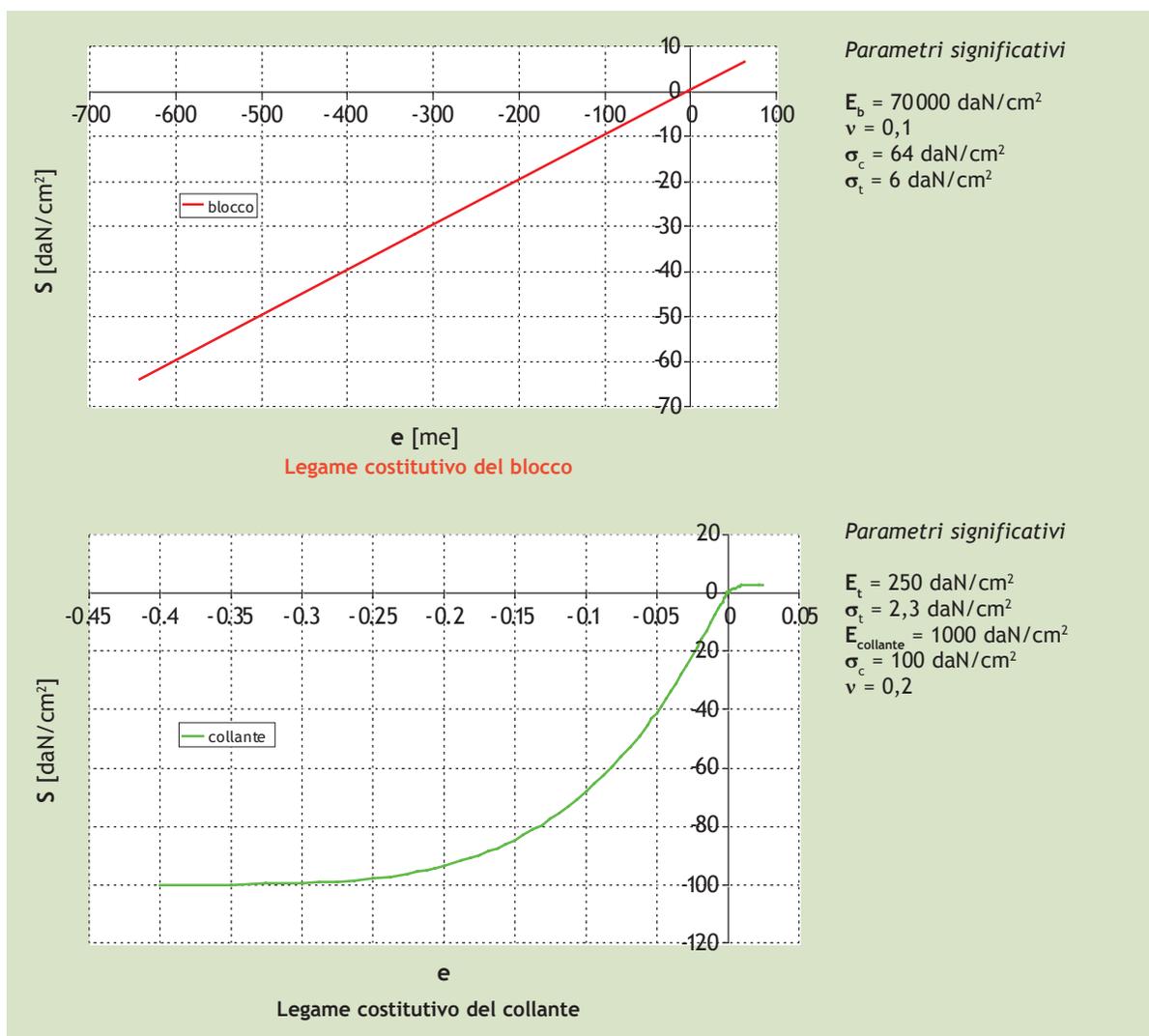


Fig. 16 - Legami costitutivi assunti per la modellazione del blocco e del collante.

ANALISI PER AZIONI COMPLANARI

Il modello su cui è stata condotta l'analisi per forze complanari al telaio (le cui dimensioni sono indicate in figura 15) è così conformato:

- ciascun blocco è modellato con 8 elementi shell 4T di dimensioni 6,125 x 12 cm e 2 elementi shell 4T di dimensioni 0,5 x 12 cm;
- i giunti di collante sono modellati con 340 elementi tipo shell di dimensioni 6,125 x 0,2 cm.

I legami costitutivi dei materiali impiegati per la modellazione dei blocchi e del collante sono riportati nella figura 16; accanto alle illustrazioni si indicano i valori delle principali caratteristiche che definiscono il comportamento dei materiali stessi. Per il cemento armato invece si è assunto un legame elastico lineare definito dai parametri indicati nel seguito:

- modulo di elasticità longitudinale $E = 33675 \text{ MPa}$
- modulo di Poisson $\nu = 0.15$.

Il contatto fra telaio e pannello è stato simulato ponendo, in corrispondenza dei nodi, degli elementi gap. Nella figura 17 viene riportato il diagramma carico-spostamento ottenuto dall'analisi piana del telaio fino ad un drift pari allo 0.14%.

ANALISI PER AZIONI FUORI PIANO

Partendo dai risultati ottenuti e descritti precedentemente si è realizzato un modello tridimensionale del telaio e del pannello di tamponamento con le seguenti caratteristiche:

- ciascun blocco è modellato con 20 elementi SOLID di dimensioni 6,125 x 6 x 25 cm e 6 elementi SOLID di dimensioni 0,5 x 6 x 25;
- i giunti di collante sono modellati con elementi SOLID di dimensioni 6,125 x 6 x 0,2.

Il contatto telaio-pannello di tamponamento è stato modellato ponendo in corrispondenza della superficie superiore e della superficie inferiore di quest'ultimo uno strato di malta dello spessore di 0,5 cm. La malta è stata modellata come un solido non reagente a trazione con elementi di tipo SOLID di dimensioni 6,125 x 6 x 0,5 cm.

Per semplicità, il pannello murario è stato considerato svincolato lateralmente dal telaio.

Analizzando il quadro fessurativo ottenuto dalla modellazione piana, si è riprodotto "il danneggiamento" nel modello tridimensionale eliminando gli elementi di collante rotti e sostituendoli con altrettanti elementi gap flessibili resistenti solo a compressione: questo per tenere conto del fatto che il collante rotto è ancora presente ed è comunque in grado di resistere a compressione.

Infine, fra un blocco e quello adiacente in corrispondenza della fessurazione sono stati disposti dei closed gap per tenere conto dell'incastro verticale a secco. La particolare conformazione del blocco fa sì che,

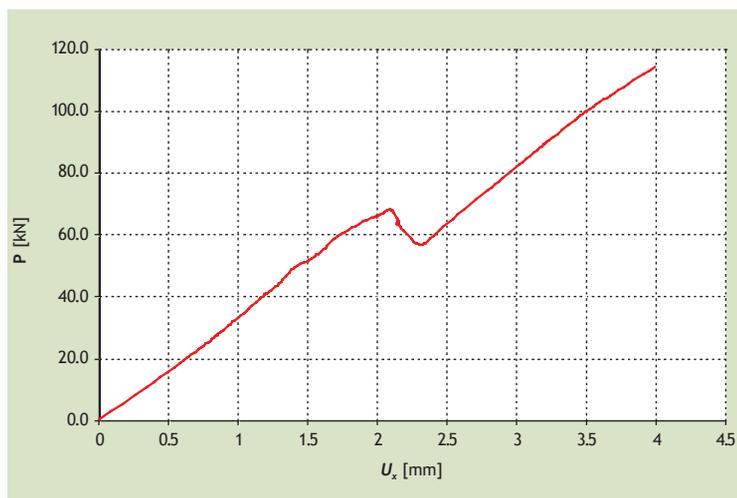


Fig. 17- Diagramma carico-spostamento del telaio con tamponamento.

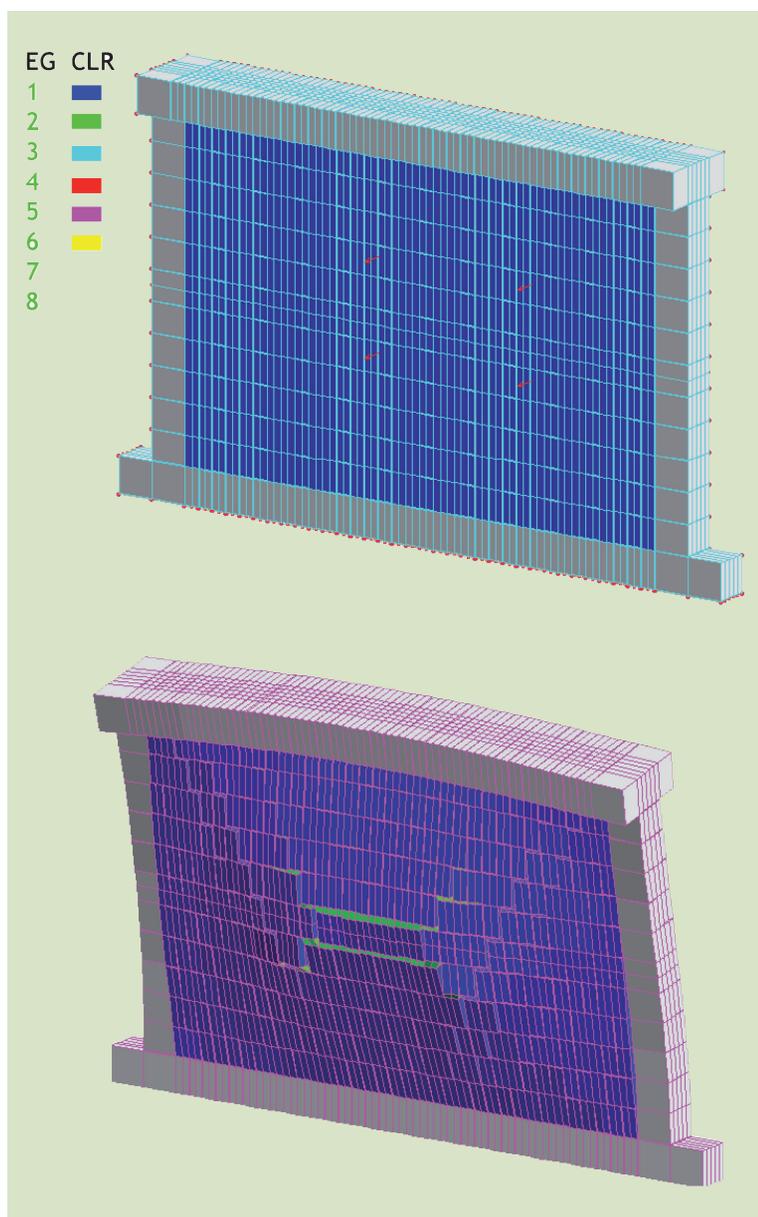


Fig. 18 - Immagine del modello agli elementi finiti e deformata del sistema ad analisi terminata.

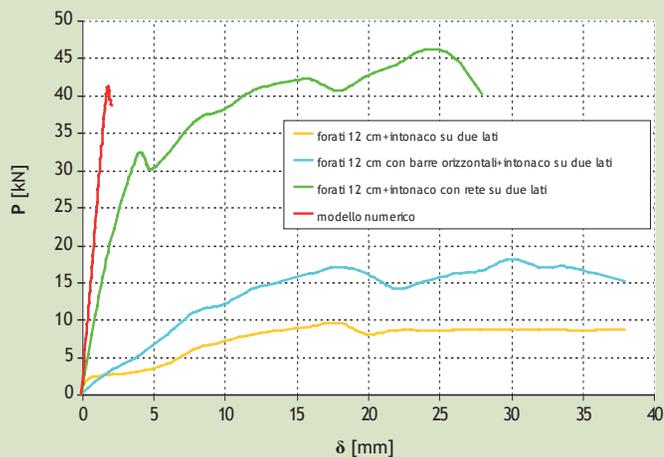


Fig. 19 - Diagrammi carico-deformazione orizzontale di pannelli di tamponamento per azioni fuori del piano.

se sottoposto ad un'azione ortogonale all'altezza, questo eserciti una pressione sul blocco adiacente il quale offre una certa rigidezza allo spostamento del blocco nella direzione della forza stessa. In figura 18 è riportata un'immagine del modello agli elementi finiti e la deformata ottenuta dall'analisi; in figura 19 è riportato un diagramma in cui sono confrontati i risultati ottenuti dalla simulazione numerica con quelli ottenuti dalla sperimentazione condotta presso l'Università di Pavia [8].

Si nota come il carico di collasso relativo al pannello in studio risulti maggiore rispetto a quello mostrato sia dalla parete in forati di spessore 12,50 cm, sia dalla stessa parete rinforzata con barre orizzontali poste nella malta; mentre risulta di poco inferiore a quello della parete dotata di intonaco e rete elettrosaldata. È utile qui notare che nella elaborazione agli elementi finiti non è stato possibile modellare in modo adeguato i giunti verticali, i quali nella realtà forniscono un contributo alla rigidità e resistenza del pannello. Nel seguito si valuta l'entità dell'azione sismica per cui andrebbe verificato il pannello, usando la relazione (1) fornita dalla normativa [12], da porre a confronto con la resistenza valutata per il pannello in studio. Ipotizzando le condizioni più sfavorevoli, si ha:

$$\begin{aligned}
 W_a &= 2244 \text{ daN} \\
 \gamma &= 1 \\
 q_a &= 2 \\
 a_s &= 0,35g \text{ (zona sismica 1)} \\
 S &= 1,25 \\
 Z/H &= 1 \\
 T_a/T_1 &= 0
 \end{aligned}$$

Si ottiene la forza a cui è soggetto il pannello di tamponamento delle caratteristiche studiate:

$$\begin{aligned}
 S_a &= 2,4 \\
 F &= 26,93 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Poiché la forza che porta al collasso il pannello risulta pari a 41 kN, la prestazione della parete sembra soddisfacente e la metodologia di calcolo promettente.

I risultati permettono di concludere che pannelli di tamponamento di dimensioni correnti realizzati con blocchi del tipo sperimentato di spessore 30 cm sono equivalenti, dal punto di vista della resistenza alle azioni sismiche, a pareti di forati dotate di intonaco armato su entrambe le facce, il cui utilizzo è consentito dalla normativa, e comunque rispettano le verifiche previste dalla stessa normativa per l'utilizzo in zona sismica anche di categoria 1.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A.F.L. Baratta, *Evoluzione e innovazione nelle mura-ture: il laterizio rettificato*, Costruire in Laterizio, n. 83 (2001).
- [2] V. Bacco, *L'esperienza italiana sul laterizio rettificato*, Tecnargilla 2004, Rimini (2004).
- [3] R. Sattler, *L'esperienza tedesca sul laterizio rettificato*, Tecnargilla 2004, Rimini (2004).
- [4] Z. Zeus, T. Popp, *Load capacity of masonry made of flat-bricks and cover up thin layer mortars*, Otto Graff Journal, Vol. 11 (2000).
- [5] M.R. Valluzzi, F. da Porto, C. Modena, *Murature rea-lizzate con blocchi rettificati e giunti sottili*, Co-struire in Laterizio, n. 87 (2002).
- [6] C. Modena, F. da Porto, M.R. Valluzzi, *Reinforced and rectified clay blocks masonry*, 6° Congr. Nacional de Sismologia e Engenharia Sismica, Guimares, Portugal (2004).
- [7] F. Da Porto, C. Modena, M.R. Valluzzi, *Failure modes for in plane loaded masonry walls made with thin layer mortar*, 10th Canadian Masonry Symposium, Banf, Alberta (2005).
- [8] G.M. Calvi, D. Bolognini, *Seismic response of rein-forced concrete frames infilled with weakly rein-forced panels*, Journ. of Earthquake Eng., Vol. 5 n° 2 (2001).
- [9] D.M. LL.PP. 20/11/1987, *Norme tecniche per la pro-gettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento*.
- [10] Eurocodice 6, *Progettazione delle strutture in mu-ratura - Parte 1-1: Regole comuni per strutture in muratura semplice e armata*.
- [11] Eurocodice 8, *Progettazione delle strutture in zona sismica - Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici*.
- [12] O.P.C.M. 3431/2005, *Norme tecniche per il proget-to, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici*.