

# Prove di compressione e taglio in sito su pannelli in muratura: la tecnica dei maschi murari contrapposti.

Luca Angelini, Maria Luisa Beconcini, Mauro Sassu.

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale – Università di Pisa - via Diotisalvi, 2, 56126 Pisa.*

*Keywords: murature, prove di taglio-compressione*

## ABSTRACT:

Si sono compiute prove di compressione e taglio-compressione di tipo statico, in sito, su campioni di muratura isolati da un pannello di sottofinestra di un edificio scolastico costruito negli anni '30 in Pisa; le prove sono state eseguite sui pannelli allo stato originale ed in seguito ad un intervento di ripristino e consolidamento mediante intonaco armato e diatoni in barre di acciaio.

La tessitura muraria, molto diffusa nella zona e tipica del periodo di costruzione, si basa sull'utilizzo di pietra calcarea non squadrata di elevata resistenza, intervallata da ricorsi orizzontali di mattoni pieni in laterizio; il tutto collegato da copiosi giunti di malta, prevalentemente di calce aerea, di scarsa qualità. La resistenza della muratura è piuttosto bassa, così che non è stato possibile prelevare campioni per effettuarne la caratterizzazione in laboratorio.

La favorevole circostanza di disporre di pannelli di sottofinestra con le medesime caratteristiche costruttive delle restanti murature portanti e di conveniente rapporto larghezza-altezza, ha consentito l'individuazione di due pannelli contrapposti, di dimensioni circa 100x100cm, sufficienti a compiere test distruttivi su un campione di muratura adeguato, senza disturbare l'assetto statico della costruzione.

Le prove sperimentali sono state effettuate utilizzando martinetti oleodinamici per l'applicazione dei carichi verticali, indipendenti da quelli orizzontali, cosicché i due pannelli gemelli sono stati sollecitati con azioni verticali fra loro diverse e con identico carico orizzontale, variabile fino a raggiungere il collasso di uno dei due campioni. Le prove sono state ripetute dopo aver eseguito la riparazione e il consolidamento del pannello danneggiato, con lastra in c.a. e diatoni trasversali.

## 1 INTRODUZIONE

La sempre maggiore attenzione rivolta al recupero e all'adeguamento sismico del costruito, in particolare degli edifici in muratura, di cui l'Italia possiede un vastissimo ed articolato patrimonio, ha messo in evidenza l'opportunità di condurre approfondite indagini conoscitive delle modalità costruttive dei manufatti, delle tipologie murarie e del loro comportamento meccanico a fronte di azioni sia verticali che taglianti, su cui basare le verifiche di sicurezza ed una corretta progettazione degli interventi di consolidamento.

In merito, la normativa tecnica relativa agli interventi di consolidamento degli edifici situati in zona sismica, emanata con l'OPCM 3431/2005 /15/, fornisce indicazioni per la valutazione dei parametri di resistenza e di elasticità delle murature, che può avvenire, o in base alla individuazione della tipologia costruttiva ed utilizzando i valori di riferimento con-

tenuti nella tabella 11.D.1, oppure attraverso prove sperimentali da condurre in situ.

Allo stato attuale, entrambe le metodologie presentano aspetti di onerosità e di incertezza. Da una parte, i parametri meccanici contenuti nella tabella, essendo ricavati da prove eseguite su un campione non sufficientemente ampio e rappresentativo della varietà di tipologie esistenti, possono non essere adeguati a descrivere il reale comportamento della specifica tipologia muraria. In più, l'utilizzo dei valori tabulati senza alcuna conferma sperimentale, obbliga ad adottare fattori di confidenza elevati, con la conseguenza che i valori di progetto delle resistenze possono risultare estremamente bassi, e gli interventi di consolidamento eccessivamente pesanti.

D'altro lato, l'esecuzione di prove sperimentali in situ può risultare onerosa e di notevole impatto sulla costruzione /7/, /11/, oltre che comportare incertezze nell'interpretazione e nel corretto utilizzo dei risultati delle prove ai fini delle verifiche di resistenza degli edifici /2/, /9/.

Al fine di migliorare la situazione in questo campo, due sono le strategie da seguire: effettuare un'ampia sperimentazione su campioni rappresentativi delle diverse tipologie murarie ricorrenti sul territorio nazionale, in modo da disporre di un data-base di valori di riferimento dei parametri meccanici, sufficientemente articolato e affidabile; parallelamente, curare la messa a punto e la calibrazione di metodologie di prova in situ di diversa natura e applicabilità, così da poter adottare, caso per caso, quella di minor impatto: ciò per disporre di valori di riferimento affidabili, da confermare tramite ulteriori prove poco invasive. Per quanto riguarda il primo aspetto, anche in ottemperanza alle indicazioni contenute nell'OPCM 3431/2005, le Regioni si sono attivate per promuovere campagne di indagini sperimentali su campioni di murature delle diverse tipologie presenti sul loro territorio, /6/, /7/. Contestualmente, dall'applicazione estensiva delle metodologie di prova fin qui sperimentate, potrebbero derivare informazioni utili per la messa a punto di convincenti modalità di interpretazione dei risultati.

Per quanto riguarda le metodologie di prova, le più utilizzate finora sono quelle che vanno sotto il nome di "prova di Sheppard - PS" /13/, "prova di taglio-compressione - PTC" /8/ e "prova di compressione diagonale - PCD" /14/; tutte queste prove sono alquanto invasive, in quanto comportano di sollecitare fino al collasso pannelli murari di dimensioni superiori ad 1m x 1m per l'intero spessore della parete.

Il presente lavoro descrive la sperimentazione di una diversa metodologia di prova, che può essere in taluni casi vantaggiosamente impiegata, risultando meno invasiva di altre e fornendo risultati comparabili con quelli delle prove di taglio-compressione.

## 2 DESCRIZIONE DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE

La campagna sperimentale ha interessato l'edificio principale del complesso edilizio che ospita l'Istituto Tecnico Industriale Statale, I.T.I.S. "Leonardo da Vinci" a Pisa.

L'edificio, risalente agli anni trenta, è costituito da due piani: l'orizzontamento a piano terra poggia direttamente su un vespaio, il primo orizzontamento e la copertura piana sono costituiti da solai laterocementizi con luci notevoli (circa 7 m). Le strutture portanti verticali sono in muratura, con ampie aperture; le altezze di interpiano sono di circa 5 metri.

In tempi recenti, la struttura è stata interessata da alcuni dissesti, dipendenti da fenomeni di compattazione del terreno, che attualmente ne limitano l'esercizio, obbligando l'Amministrazione Provinciale a prossime opere di consolidamento.

Il dissesto si è manifestato con vistosi avvallamenti nell'orizzontamento a piano terra e la formazione di lesioni inclinate nei maschi murari periferici (vedi Figura 1).



Figura 1. Esempio di lesioni.

Ad oggi, l'ala ovest dell'edificio, in parte inagibile, è oggetto di una campagna di rilievi ed indagini conoscitive, preliminari alla progettazione degli interventi di consolidamento.

Le murature di cui sono costituite le pareti portanti del fabbricato, presentano tessitura molto irregolare, con blocchi di pietra, provenienti presumibilmente dalle cave dei Monti Pisani, irregolari o appena sbozzati, di pezzatura 10 - 40 cm, all'apparenza di buone caratteristiche meccaniche. La malta, di calce presumibilmente aerea, si presenta di qualità scarsa, sia per quanto riguarda le proprietà meccaniche, come rilevato tramite PNT-G /10/, sia per quanto riguarda la capacità di aderire ai blocchi; inoltre all'interno dei pannelli murari, si sono rilevate cavità e taluni vuoti di dimensioni importanti (vedi fig. 2).



Figura 2. Foto e rilievo della tessitura muraria.

Le murature presentano ricorsi orizzontali a tutto spessore (listature) a passo di circa 1m, costituiti da due file di mattoni pieni; sono rivestite, su entrambe le facce, da intonaco, che si presenta, specialmente sul lato esterno, di notevole spessore e di buona qualità. Gli spessori dei muri portanti sono compresi fra i 40 e i 60 cm. Le pareti perimetrali presentano finestre di ampiezza circa 3m; le murature dei sottofinestra sono della stessa tipologia e dello stesso spessore dei maschi murari.

Questa caratteristica ha suggerito di effettuare prove per la caratterizzazione meccanica delle murature proprio sui pannelli di sottofinestra: infatti, seppure in condizioni diverse in ordine al sovraccarico verticale, si potevano comunque ritenere rappresentativi delle murature presenti; del resto, il disturbo all'edificio causato dalle prove in questo caso è minimo, considerato che i carichi di prova impegnano i soli pannelli, in quanto autocontrastanti alle azioni orizzontali.

Le prove penetrometriche, compiute con penetrometro PNT-G, hanno permesso di determinare la resistenza a compressione della malta in sito,  $W_m$ , tramite la correlazione dello strumento con l'energia dissipata per compiere una piccola cavità di dimensioni assegnate. Si è avuta l'accortezza di effettuare i test penetrometrici sia sulle superfici dei giunti di malta in vista sulle pareti dell'aula interessata dalle prove (Tabella 1) e sulle pareti dell'aula adiacente, sia sui letti di malta di campioni estratti dalle murature della palestra costruita nello stesso periodo (Tabella 2). In questo modo si è verificata la consistenza della malta all'interno e sulla superficie della parete; tali controlli comparati sono stati altresì effettuati su alcuni campioni estratti durante la formazione dei pannelli per le prove di taglio-compressione.

Una volta eseguite le prove di compressione semplice sui due pannelli e le prove di taglio-compressione fino al collasso di uno dei due pannelli, si è proceduto alla riparazione di quest'ultimo mediante l'applicazione, sulla faccia esterna, di una rete elettrosaldata  $\phi 5$ , maglia 10\*10 cm, ancorata al pannello murario mediante 4 barre  $\phi 10$  di acciaio FeB 44k, inserite per una profondità di circa 30cm in fori trapanati e successivamente iniettati con boiaccia di cemento.

Sulla superficie è stato poi applicato uno strato di circa 3cm, di malta cementizia di tipo tixotropico fibrorinforzata; sulla faccia interna è stato applicato uno strato di circa 1cm della medesima malta, senza alcuna armatura.

Successivamente alla riparazione, si sono ripetute prove analoghe di taglio-compressione, onde ap-

prezzare il miglioramento indotto dalla tecnica di consolidamento adottata.

Tabella 1. Prove penetrometriche su giunti di malta effettuate sulla superficie di due pareti delle aule

Punto di misura	Parete 1		Parete 2	
	lettura	$W_m$ [daN/cm <sup>2</sup> ]	lettura	$W_m$ [daN/cm <sup>2</sup> ]
1	201	15,46	53	4,08
2	26	2,00	268	20,62
3	87	6,69	25	1,92
4	54	4,15	258	19,85
5	23	1,77	167	12,85
6	428	32,92	555	41,21
7	27	2,08	102	7,85
8	21	1,62	8	0,62
9	1660	96,46	335	25,77
10	57	4,38	147	11,31
11	123	9,46	143	11,00
12	43	3,31	86	6,62
13	91	7,00	363	27,92
14	89	6,85	540	40,46
15	55	4,23	463	35,62
Media	199	13,23	234	17,84
Scarto	226	14,02	152	11,54

Tabella 2. Prove penetrometriche su giunti di malta interni alle pareti della palestra.

Punto di misura	Parete 1		Parete 2	
	lettura	$W_m$ [daN/cm <sup>2</sup> ]	lettura	$W_m$ [daN/cm <sup>2</sup> ]
1	326	25,08	544	40,66
2	212	16,31	326	25,08
3	168	12,92	498	38,31
4	206	15,85	470	36,15
5	152	11,69	812	54,06
6	270	20,77	541	40,51
7	234	18,00	713	49,11
8	191	14,69	1059	66,41
9	152	11,69	910	58,96
10	197	15,15	670	46,96
11	155	11,92	391	30,08
12	255	19,62	749	50,91
13	175	13,46	704	48,66
14	201	15,46	625	44,71
15	284	21,85	523	39,61
Media	212	16,30	636	44,68
Scarto	41	3,18	156	8,31

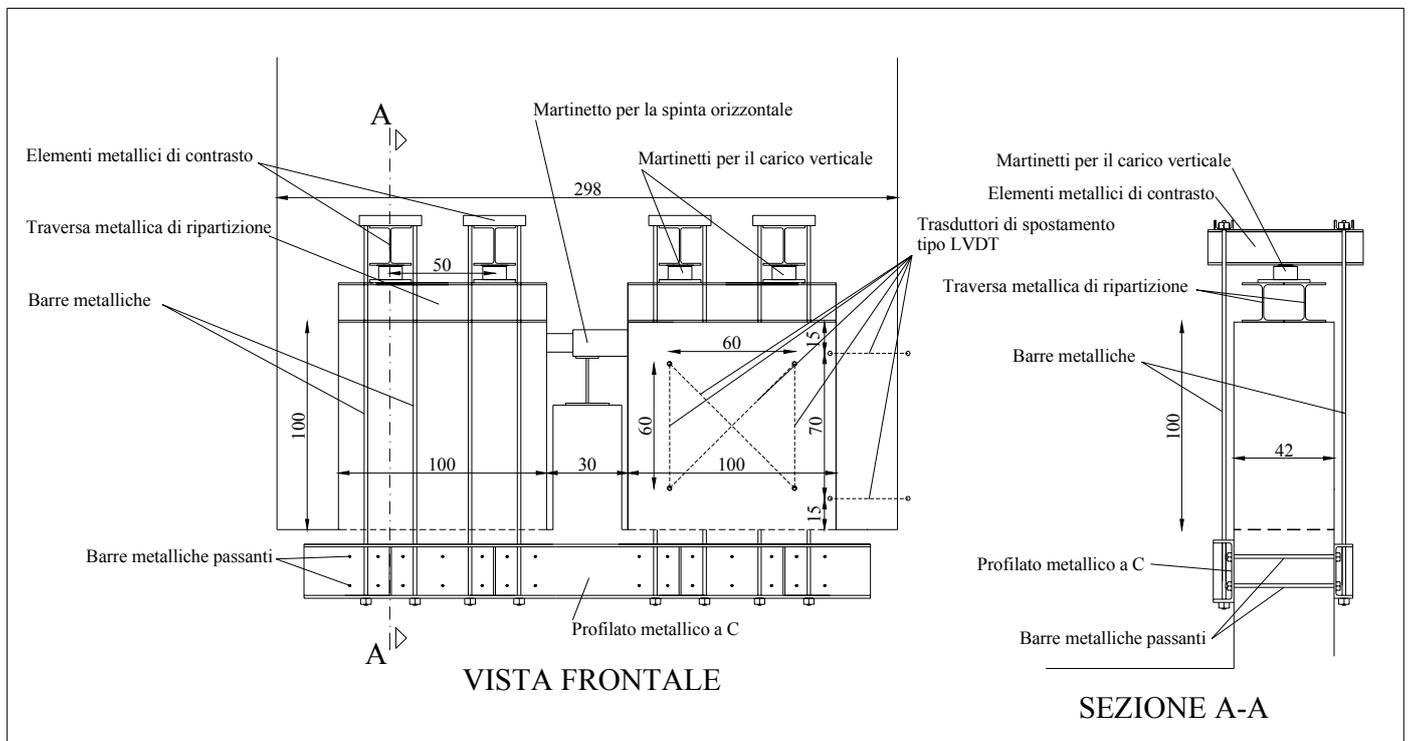


Figura 3. Lay-out delle prove.

### 3 LA METODOLOGIA DI PROVA

Sui campioni di muratura dei sottofinestra sono state eseguite preliminari prove non distruttive di compressione semplice e quindi tre serie di prove combinate di taglio-compressione, per diversi valori del carico assiale costante.

Nel sottofinestra a piano terra, oggetto dei test, preventivamente depurato dall'intonaco, sono stati isolati, mediante taglio con sega circolare, due pannelli identici, delle dimensioni di 100x100cm, spessore 42cm; si è mantenuto il solo collegamento alla base dei pannelli, mentre le due fasce verticali sono state separate mediante sega a disco diamantato: in tal modo si sono ricavati un vano centrale di ampiezza circa 30cm, in cui collocare il martinetto per la spinta contrapposta a taglio, e due fessure laterali di circa 6cm, più che sufficienti per impedire il contatto a fine corsa tra pannello e maschi murari dell'edificio.

Su ciascuno dei due pannelli, lo sforzo di compressione è stato applicato tramite un sistema formato da una traversa di contrasto superiore e due martinetti spingenti su ripartitori metallici; la traversa di contrasto è stata ancorata, tramite barre filettate metalliche, a due profilati a C, fissati inferiormente al pannello con barre filettate inghisate nella muratura (vedi Figure 3 e 4).

In definitiva con questa tecnica non vi è necessità di un sistema di contrasto esterno e le murature esterne ai pannelli in prova risultano di fatto sgravate dai carichi di prova applicati, evitando danni alle

strutture portanti e depurando il test dall'influenza offerta dal contrasto.

Si sono predisposti tre circuiti oleodinamici indipendenti, due per il carico verticale in estradosso di ciascun pannello, il terzo per la forza orizzontale: è stato così possibile eseguire in contemporanea prove di taglio sui due pannelli in differenti condizioni di sforzo assiale impresso.

La strumentazione di prova è consistita in trasduttori di pressione per la misura delle forze applicate e trasduttori di spostamento tipo LVDT, posizionati simmetricamente su entrambe le facce dei due pannelli, in modo da rilevare deformazioni lungo le direzioni verticale e diagonale; analoghi trasduttori sono stati posti per la misura degli spostamenti orizzontali dei due pannelli, sia all'altezza del carico orizzontale che in prossimità delle basi.



Figura 4. Foto del meccanismo di prova, vista interna.

#### 4 DESCRIZIONE DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE

Sui due pannelli A e B ricavati come descritto, è stata effettuata una serie di prove così articolata:

- prove sui pannelli allo stato originario:
  1. prova di compressione semplice sul pannello A con due cicli di carico a tensioni massime di  $0,25 \text{ N/mm}^2$  e  $0,3 \text{ N/mm}^2$ ;
  2. prova di compressione semplice sul pannello B con due cicli di carico, entrambi con tensione massima di  $0,25 \text{ N/mm}^2$ ;
  3. prova di taglio-compressione sui due pannelli, con valori della tensione verticale pari a  $0,4 \text{ N/mm}^2$  per il pannello A e  $0,2 \text{ N/mm}^2$  per il pannello B; sono stati effettuati tre cicli di carico con valori massimi della forza orizzontale pari a 40 kN, 50 kN, 60 kN; la prova è stata interrotta nell'imminenza del collasso del pannello B;
  4. prova di taglio-compressione sui due pannelli, con valori della tensione verticale pari a  $0,2 \text{ N/mm}^2$  per il pannello A e  $0,1 \text{ N/mm}^2$  per il pannello B; è stato effettuato un solo ciclo di carico con forza orizzontale massima pari a 40 kN, in corrispondenza della quale si è verificato il collasso per fessurazione diagonale del pannello B (vedi Figura 5);
- prove sul pannello A nello stato originario e sul pannello B consolidato:
  5. prova di compressione semplice sul pannello B consolidato in tre cicli con tensioni massime di  $0,27 \text{ N/mm}^2$ ,  $0,36 \text{ N/mm}^2$ ,  $0,40 \text{ N/mm}^2$ ;
  6. prova di taglio-compressione sui due pannelli, con valori della tensione verticale pari a  $0,3 \text{ N/mm}^2$  per il pannello A e  $0,4 \text{ N/mm}^2$  per il pannello B consolidato; sono stati effettuati tre cicli di carico con valori massimi della forza orizzontale pari a 40 kN, 58 kN, 75 kN, in corrispondenza della quale si è verificato il collasso per fessurazione diagonale del pannello A (vedi Figure 6 e 7);
  7. prova di taglio-compressione sul pannello B consolidato, comprendente tre cicli di carico orizzontale fino a 45 kN, previa applicazione di carichi verticali corrispondenti ai valori di compressione di  $0,3 \text{ N/mm}^2$ ,  $0,2 \text{ N/mm}^2$ ,  $0,1 \text{ N/mm}^2$ , rispettivamente per ciascun ciclo; al termine del terzo ciclo è comparsa una lesione orizzontale alla base del pannello;
  8. prova di taglio-compressione sul pannello B consolidato, con tensione assiale pari a  $0,30 \text{ N/mm}^2$  e forza orizzontale crescente, fino al collasso per fessurazione diagonale in corrispondenza del valore di 80 kN (vedi Figura 8);
  9. prova di compressione fino a rottura sul pannello A; la prova è stata sospesa ad una tensione pari a  $0,56 \text{ N/mm}^2$  per raggiungimento del carico limite dell'apparato, senza conseguire la crisi per schiacciamento del pannello.



Figura 5. Pannello B dopo la prova 4, vista interna.



Figura 6. Pannello A dopo la prova 6, vista interna.

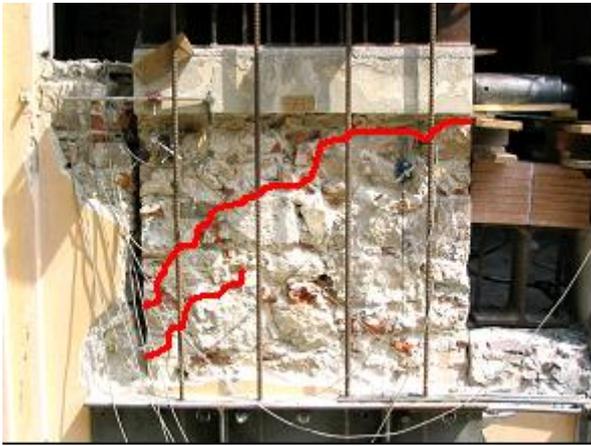


Figura 7. Pannello A dopo la prova 6, vista esterna.



Figura 8. Pannello B consolidato dopo la prova 8, vista interna.

## 5 ELABORAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI

### 5.1 Prove di compressione

Si sono eseguite un totale di quattro prove di compressione semplice di cui:

- la prova 1 sul pannello A nello stato originario fino alla tensione di  $0,30 \text{ N/mm}^2$ ; nella prova n. 3 di taglio-compressione, il pannello A è stato preliminarmente compresso fino a  $0,4 \text{ N/mm}^2$ ;
- la prova 2 sul pannello B non consolidato originario fino a  $0,25 \text{ N/mm}^2$  e il precarico di compressione della prova 3;
- la prova 5 sul pannello B consolidato fino a  $0,40 \text{ N/mm}^2$ ;
- la prova 9 sul pannello A, in condizioni fessurate per taglio-compressione, fino a  $0,56 \text{ N/mm}^2$ .

I risultati delle prove sono riportati nei diagrammi tensione-deformazione delle Figure 9, 10 e 11.

Dai test effettuati si è altresì ricavato il valore del modulo elastico secante per ogni ciclo di carico, valutato nell'intervallo di tensione  $0,10\text{-}0,25 \text{ N/mm}^2$  (Tabella 3).

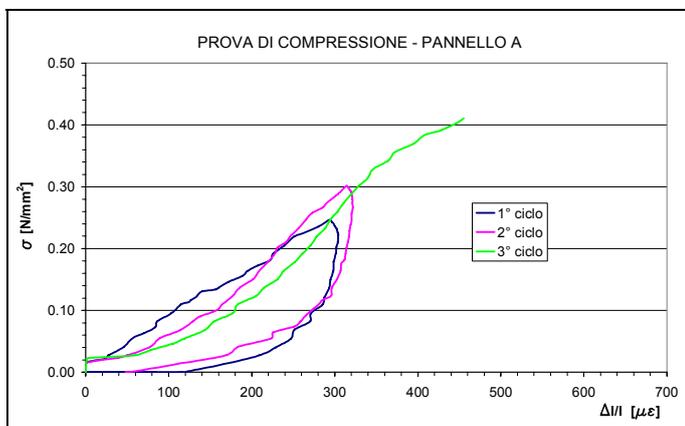


Figura 9. Diagramma tensione-deformazione per le prove di compressione sul pannello A originario.

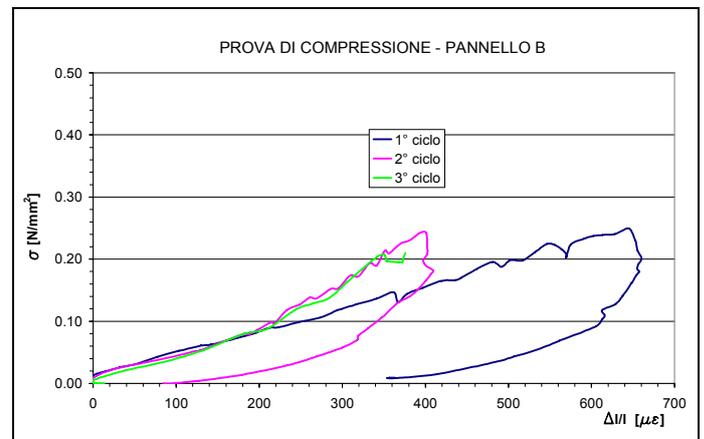


Figura 10. Diagramma tensione-deformazione per le prove di compressione sul pannello B originario.

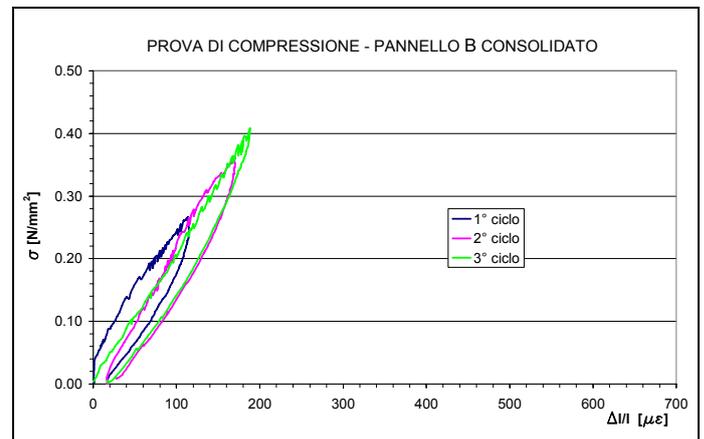


Figura 11. Diagramma tensione-deformazione per le prove di compressione sul pannello B consolidato.

### 5.2 Prove di taglio-compressione

I dati riguardanti le prove di taglio-compressione eseguite sul pannello A e sul pannello B, sia nello stato originario che consolidato, sono riassunti nella Tabella 4.

Nei diagrammi delle Figure 12 e 13, rispettivamente per i pannelli allo stato originario e per il pannello B consolidato, sono riportati gli involuipi

dei diagrammi ( $H-\delta$ ), in cui  $H$  è la forza orizzontale applicata sulla sommità del pannello mentre  $\delta$  è lo spostamento orizzontale relativo tra sommità e base del pannello.

Nella Tabella 5 sono riportati i risultati ottenuti durante le prove in termini di:

- $\sigma_{vert}$  [ $N/mm^2$ ]: tensione normale applicata al pannello durante la prova di taglio-compressione;
- $G$  [ $N/mm^2$ ]: modulo di elasticità tangenziale ricavato nell'intervallo compreso tra il 10 e il 30% del valore massimo di tensione nei test a collasso;
- $H_{max}$  [kN]: valore massimo della forza orizzontale;
- $\tau_{max}$  [ $N/mm^2$ ]: rapporto fra  $H_{max}$  e la sezione trasversale del pannello.

Nel grafico di Figura 14, sono riportati, nel piano  $\sigma_{vert}-\tau_{max}$ , i punti rappresentativi dei risultati delle prove effettuate sui pannelli allo stato originario (punti rossi); nello stesso grafico sono indicate, a tratto rosso, le curve di correlazione fra  $\tau_{max}$ ,  $\sigma_{vert}$  e  $\tau_0$  di Turnsek-Cacovic /12/ relative a ciascun risultato di prova e, a tratto verde, l'analoga correlazione generalmente utilizzata per le murature nuove. Risulta evidente che quest'ultima interpreta al meglio i risultati trovati.

Nello stesso grafico sono rappresentati -punti blu- i risultati delle due prove eseguite sul pannello consolidato.

Utilizzando la correlazione lineare dell'OPCM 3431/2005, si sono valutati i valori di riferimento  $\tau_0$  della muratura nello stato originario ed in quello consolidato.

Tabella 3. Valori del modulo di elasticità normale.

$E_{(0,10-0,25)}$ [ $N/mm^2$ ]	Pannello A	Pannello B	Pannello B consolidato
1° ciclo	793	379	1943
2° ciclo	1363	831	2557
3° ciclo	1286	733	1996

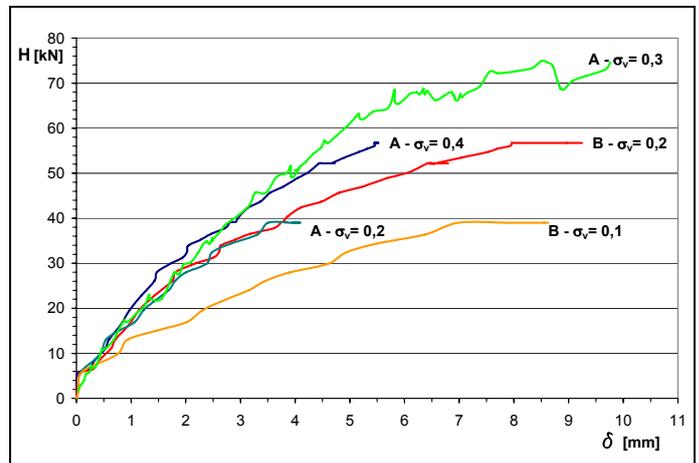


Figura 12. Diagrammi carico-spostamento orizzontale per i pannelli A e B non consolidati.

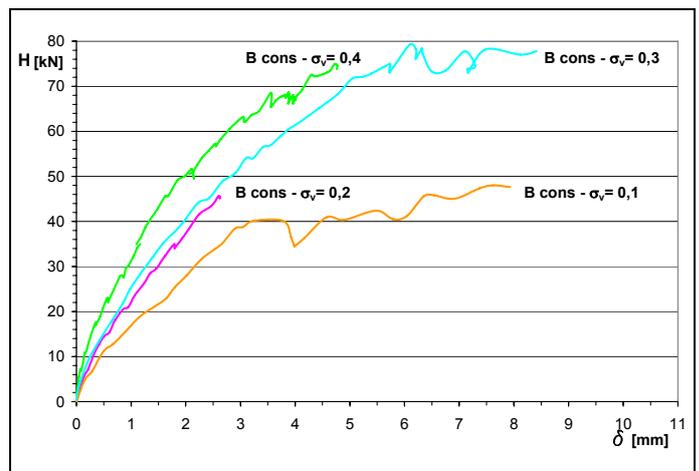


Figura 13. Diagrammi carico-spostamento orizzontale per il pannello B consolidato.

Tabella 4. Dati delle prove di taglio-compressione.

prova n°	tensione verticale [N/mm <sup>2</sup> ]			carico orizzontale max per ciclo [kN]	esito
	pannello A	pannello B	Pannello B cons.		
3	0,4	0,2		40 - 50 - 60	scricchiolii
4	0,2	0,1		40	fess. diag. B
6	0,3		0,4	40 - 58 - 73	fess. diag. A
7			0,3	45	-
			0,2	45	-
			0,1	45	fess. orizz.
8			0,3	86	fess. diag.

Tabella 5 - Risultati delle prove di taglio-compressione

prova n°	pannello	$\sigma_{vert}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	G [N/mm <sup>2</sup> ]	H <sub>max</sub> [kN]	$\tau_{max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	esito
3	A	0,41	38	58,7	0,135	---
	B	0,20	33	58,7	0,135	segni di cedimento
4	A	0,20	20	39,0	0,093	---
	B	0,09	12	39,0	0,093	fess diag.
6	A	0,30	26	68,3	0,163	fess diag.
	B cons	0,42	53	68,3	0,152	---
7	B cons	0,31	38	46,4	0,103	---
	B cons	0,24	36	45,6	0,101	---
	B cons	0,11	20	48,0	0,106	fess oriz.
8	B cons	0,30	---	73,3	0,163	fess diag.

## 6 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Nella Tabella 6 sono riassunti i dati ottenuti dalla sperimentazione sui pannelli, in termini di valori medi. Nella stessa tabella sono indicati i valori di riferimento dell'OPCM 3431/2005 contenuti nella tabella 11.D.1, per muratura di tipologia simile a quella sperimentata, e nella tabella 11.D.2 per la muratura consolidata con tecnica analoga a quella sperimentata.

Ciò evidenzia una buona corrispondenza tra i valori di normativa e quelli sperimentali, ad eccezione del modulo elastico tangenziale G: per quest'ultimo anche i dati disponibili in letteratura risultano alquanto dispersi /2/ /7/ (Tabella 7).

Per quanto riguarda i valori di  $\tau_0$  ricavati dai dati sperimentali, si constata un miglior accordo con i va-

lori in normativa rispetto a quelli ricavati dalla relazione di Turnsek-Cacovic.

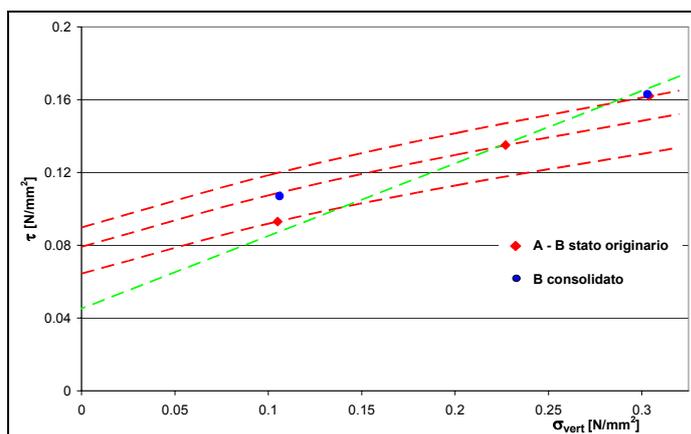


Figura 14. Correlazioni  $\sigma$ - $\tau_{max}$  per le varie prove effettuate.

Tabella 6. Confronto fra parametri rilevati e quelli forniti dall'OPCM 3431/2005.

dalla sperimentazione					OPCM 3431/2005				
Muratura sperimentata	$f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E [N/mm <sup>2</sup> ]	G [N/mm <sup>2</sup> ]	Tipologia di riferimento	$f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E [N/mm <sup>2</sup> ]	G [N/mm <sup>2</sup> ]
stato originario	>0,56	0,045	900	26	muratura in pietrame con listature	0,78 1,17	0,026 0,041	690 1050	115 175
pannello consolidato	>0,56	0,055	2165	37	con intonaco armato	1,50 2,25	0,050 0,080	1725 2625	287 437

Tabella 7. Alcuni dati disponibili in letteratura.

Autore	Campione	Tipo di prove	$f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E [N/mm <sup>2</sup> ]	G [N/mm <sup>2</sup> ]
Brignola et al. /7/	San Godenzo	PCD		0,025		44,5
				0,032		70,5
	Filecchio	PCD		0,038		183
				0,030		177
				0,044		181
Corfino	PCD		0,037 0,022			
Belfiore	PCD		0,034			
Gorfigliano	PCD		0,026			
Borri et al./2/	B-T-04-OR	PTC	0,309	0,130	1100	430
	V-T-07-IN	PTC	0,305	0,149	1700	380
	B-D-01-OR	PCD		0,791		30

## 7 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nell'intento di determinare, per via sperimentale, le caratteristiche di comportamento meccanico delle murature di un edificio oggetto di interventi di consolidamento, è stata sperimentata una tecnica di prova per alcuni aspetti innovativa, avvalendosi di due identici pannelli di muratura contrapposti, ricavati da sottofinestra con caratteristiche costruttive analoghe a quelle dei maschi murari. Le prove sono state effettuate dapprima sui campioni allo stato originario, successivamente su uno dei campioni consolidato con intonaco armato su una delle due superfici.

La metodologia sperimentale ha permesso l'effettuazione di prove preliminari di compressione semplice e, successivamente, prove di taglio con compressione impressa a diversi valori, fino ad imminente collasso dei campioni, in condizioni originarie e consolidate.

Le prove effettuate, pur avendo fornito, da un lato, risultati utili ai fini delle verifiche di resistenza nello stato di fatto e del progetto di consolidamento, dall'altro hanno evidenziato rilevanti discrepanze fra i valori caratteristici di  $\tau_0$  ricavati per murature simi-

li in campagne di prove differenti, confermando così le incertezze che ancora sussistono nell'interpretazione dei risultati delle prove sulle murature /9/.

L'esperienza condotta ha quindi confermato la necessità di approfondite ricerche sia sperimentali che numeriche, finalizzate, da un lato, alla determinazione di valori di riferimento delle caratteristiche meccaniche delle murature tipiche dell'edilizia storica italiana, dall'altro, alla messa a punto di metodologie di prova affidabili e al tempo stesso poco invasive, da utilizzare in fase di progettazione degli interventi sull'esistente per migliorare il livello di sicurezza delle strutture.

## RINGRAZIAMENTI

Il lavoro è stato svolto nell'ambito di una convenzione fra l'Amministrazione Provinciale di Pisa e il Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa per lo "Studio del rischio sismico in edifici scolastici della Provincia di Pisa". Il lavoro è stato altresì cofinanziato dal progetto di ricerca

“RELUIS 1 – costruzioni in muratura” promosso dal Dipartimento della Protezione Civile.

## BIBLIOGRAFIA

- /1/ Borri A, Gioffrè M., Vignoli A., (1999). *Caratterizzazione meccanica delle murature nelle zone interessate dal sisma umbro-marchigiano del 1997*, IX conv. naz. “L’Ingegneria Sismica in Italia”, Torino, pp.200-209.
- /2/ Borri A, Corradi M., Vignoli A., (2000). *Il comportamento strutturale della muratura nelle zone terremotate dell’Umbria: alcune sperimentazioni*, Ingegneria Sismica, n.3/2000, pp. 23-33.
- /3/ Borri A, Corradi M., Vignoli A., (2001). *Il problema della valutazione della resistenza a taglio della muratura mediante prove sperimentali*, X Congr. Naz. “L’Ingegneria Sismica in Italia” Potenza-Matera.
- /4/ Borri A, Corradi M., Vignoli A., (2002). *Strengthening techniques tested on masonry structures struck by the Umbria-Marche earthquake of 1997-1998*, Construction and Building Materials 16, pp. 229-239.
- /5/ Borri A, Corradi M., Galano L., Vignoli A., (2004). *Analisi sperimentali e numeriche per la valutazione della resistenza a taglio delle murature*, Ingegneria Sismica, n.3/2004, pp. 50-68.
- /6/ Brignola A., Frumento S., Lagomarsino S., Podestà S., (2006). *Valutazione sperimentale dei parametri di deformabilità e di resistenza a taglio della muratura*, Atti Conv. "Sperimentazione su materiali e strutture", Venezia, pp.173-182.
- /7/ Brignola A., Ferrini M., Lagomarsino S., Mangone F., Podestà S., (2006). *Valutazione sperimentale dei parametri di deformabilità e di resistenza a taglio della muratura*, Ingegneria sismica (in corso di stampa).
- /8/ Chiostrini S., Galano L., Vignoli A., (2000). *On the determination of strength of ancient masonry walls via experimental tests*, Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, paper n. 2564.
- /9/ Galano L., Vignoli A. (2002). *Resistenza a taglio di murature di pietra: analisi comparata della rappresentatività di tipiche prove di taglio in situ*, X Congr. Naz. “L’Ingegneria Sismica in Italia” Potenza-Matera.
- /10/ Gucci N., Sassu M., (2002). *Resistenza delle murature: valutazione con metodi non distruttivi, il penetrometro PNT-G*, L’Edilizia, n.2, Vol. XVI, pag.36-40.
- /11/ Lagomarsino S., (2006). *Le indagini per la conoscenza nella valutazione della sicurezza sismica di edifici esistenti in muratura*, Atti Conv. "Sperimentazione su materiali e strutture", Venezia, pp.33-40.
- /12/ Turnsek V., Cacovic F., (1971). *Some experimental result on the strength of brick masonry walls*, Proc. 2° Intern. Brick Masonry Conference, Stoke-on-Trent, pp.149-156.
- /13/ Turnsek V., Sheppard P., (1980). *The shear and flexural resistance of masonry walls*, Proc. Research Conference on Earthquake Eng., Skopje.
- /14/ Vestroni F., Beolchini G., Grillo F., Martinelli A., Ricciardulli G.L., Buffarini G., (1995). *Il progetto di un’indagine sperimentale su una vecchia casa in muratura*, VII Conv. Naz. “L’Ingegneria Sismica in Italia”, Siena, pp.331-340.
- /15/ O.P.C.M. 3431/2005, *Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l’adeguamento sismico degli edifici*