

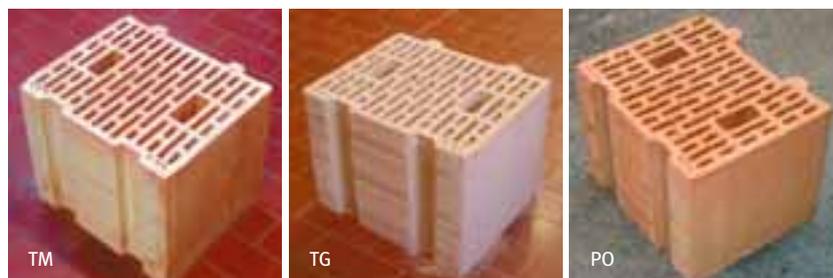
Murature realizzate con diverse tipologie di giunto

Una ricerca sulle prestazioni meccaniche di murature portanti, realizzate con blocchi semipieni di laterizio, ha indagato il comportamento strutturale di murature eseguite con blocchi ad incastro, blocchi con tasca di malta e blocchi rettificati per assemblaggio con strati sottili di malta

Lo studio ha preso avvio sulle basi di una precedente indagine sperimentale condotta, nel 2001, sempre presso l'Università di Padova. L'obiettivo principale di tale ricerca era stato quello di definire il sistema costruttivo con blocchi rettificati preliminarmente alla sua introduzione nel mercato nazionale. Si erano pertanto sperimentate murature rettificate eseguite con tre tipologie di blocco diverse, assemblate con due distinte tecnologie costruttive (giunto sottile di malta realizzato con macchina stendi-giunto, oppure per immersione/contacto con la malta della faccia di letto del blocco), e se ne era confrontato il comportamento meccanico con quello di una muratura realizzata con blocchi non rettificati e assemblati con giunti orizzontali ordinari.

La presente ricerca, inoltre, è scaturita dal contesto normativo nazionale ed europeo che indirettamente limita o sottopone ad alcune particolari condizioni l'utilizzo di sistemi di muratura attualmente impiegati.

Infatti, se i giunti di malta non sono conformi, ovvero se hanno spessore minore di 5 mm, oppure non ricoprono l'intera superficie del blocco, oppure sono realizzati mediante incastro verticale meccanico con assemblaggio a secco, non possono essere utilizzate le tabelle (riprese anche dalle recenti "Norme tecniche per le costruzioni") che il D.M. 20/11/87 fornisce per la determinazione della resistenza caratteristica a compressione e a taglio della muratura. L'Ordinanza P.C.M. n. 3431, che ha classificato come sismico tutto il territorio nazionale, stabilisce che nelle zone a rischio i giunti verticali debbano essere riempiti con malta e che l'impiego di murature diverse da quelle previste è ammesso previa verifica sperimentale. Nei chiarimenti forniti in data 08/08/2003 dal



1. Blocchi adottati nella sperimentazione.

Dipartimento della Protezione Civile in merito alla prima versione dell'Ordinanza, l'O.P.C.M. n. 3274, tale principio è ribadito. Inoltre, è esplicitamente affermato che, nel caso di blocchi conformati per l'assemblaggio con giunto verticale a secco, è opportuno ricorrere a prove sperimentali che consentano di determinare anche "...la stabilità della risposta sotto cicli alterni e quindi la duttilità".

In particolare, l'attuale normativa europea, nell'Eurocodice 8, stabilisce che saranno le Appendici Nazionali a selezionare quale tipologia di muratura possa essere utilizzata nelle zone sismiche di ciascun Paese [prEN 1998-1, 2003], mentre, nell'Eurocodice 6, fornisce formule basate sulle proprietà dei materiali per la determinazione della resistenza caratteristica dei diversi tipi di muratura portante in relazione alle tipologie di giunto orizzontale e verticale, stabilendo che esse potranno essere determinate in alternativa facendo ricorso a data-base nazionali [prEN 1996-1, 2004].

La ricerca descritta nel seguito, quindi, ha come obiettivo fondamentale quello di proseguire lo studio sperimentale della muratura portante, realizzata con diverse tipologie di giunti verticali ed orizzontali secondo le modalità ordinarie di prova previste nel D.M. '87 e dall'Eurocodice 6, al fine del completamento dei data-base nazionali e della calibrazione delle formulazioni di progetto; essa è in particolare mirata ad approfondire la conoscenza del comportamento di tali murature sotto azioni cicliche nel piano, per l'implementazione dei risultati nelle nuove normative antisismiche, mediante modalità di prova non ancora armonizzate, ma sviluppate nel corso di estese ricerche e ormai riconosciute a livello nazionale.

1 Prove sperimentali eseguite su blocchi e malte.

Materiale	Tipo di prova (normativa di riferimento)	Tipo di blocco	Prove effettuate
Blocco	Resistenza a compressione in dir. // ai fori (UNI EN 772-1)	TM	10
		TG	10
		Po	10
	Modulo elastico e coefficiente di Poisson (UNI 8942)	TM	3
		TG	3
		Po	3
	Resistenza a compressione in dir. ⊥ ai fori (UNI EN 772-1)	TM	10
		TG	10
		Po	10
	Resistenza a trazione indiretta (UNI 8942)	TM	10
TG		10	
Po		10	
Malta	Resistenza a trazione per flessione (UNI EN 1015-11)	giunti sottili	9
		ordinaria	9
	Resistenza a compressione cubica (UNI EN 1015-11)	giunti sottili	9
		ordinaria	9
	Modulo elastico e coefficiente di Poisson (UNI 6556)	giunti sottili	6
		ordinaria	6

2 Principali prove sperimentali eseguite su elementi di muratura e caratteristiche geometriche dei campioni testati.

Tipo di campione	Tipo di prova (normativa di riferimento)	Tipo di blocco	Prove effettuate	Dimensioni medie dei campioni LxWxH (mm)	N. giunti e spessore medio (mm)
Due blocchi	Resistenza a trazione del giunto (ASTM C 952-86)	TM	6	245 x 300 x 500	1 (1.3)
		TG & Po	6	245 x 300 x 462	1 (12.3)
	Scorrimento lungo i giunti orizzontali (UNI EN 1052-3)	TM	9	245 x 300 x 300	1 (1.3)
		TG & Po	9+9	245 x 300 x 310	1 (12.3)
Muretto	Compressione monoassiale (UNI EN 1052-1)	TM	6	983 x 300 x 998	3 (1.3)
		TG	6	991 x 300 x 928	3 (12.3)
		Po	6	991 x 300 x 928	3 (12.3)
	Compressione diagonale (ASTM E 519-81)	TM	6	983 x 300 x 998	3 (1.3)
		TG	6	991 x 300 x 928	3 (12.3)
		Po	6	991 x 300 x 928	3 (12.3)
	Prove cicliche di compressione e taglio (no normative di riferimento)	TM	4	984 x 300 x 1250	4 (1.3)
		TG	4	992 x 300 x 1170	4 (12.3)
		Po	4	992 x 300 x 1170	4 (12.3)
	Prove monotoniche di compressione e taglio (no normative di riferimento)	TM	1	984 x 300 x 1250	4 (1.3)
		TG	1	992 x 300 x 1170	4 (12.3)
		Po	1	992 x 300 x 1170	4 (12.3)

Programma di ricerca sperimentale Le diverse tipologie di muratura analizzate nella presente sperimentazione sono: muratura confezionata con blocchi rettificati ad incastro e giunti sottili (TM), muratura confezionata con blocchi ad incastro e giunti di malta orizzontali ordinari (TG), muratura confezionata con blocchi conformati con una tasca verticale per riempimento con malta e giunti orizzontali ordinari (Po).

Le tre tipologie di muratura sono state realizzate utilizzando blocchi di caratteristiche analoghe e malte premiscelate pronte per l'uso. Oltre alla caratterizzazione di base dei materiali, per la quale sono state eseguite circa 150 prove, sono state svolte, per tutte le tipologie di muratura allo studio, prove su assemblaggi di piccole dimensioni per la determinazione delle proprietà di interfaccia tra blocco e malta (in tutto 70 test, comprendenti prove di scorrimento e di trazione sul giunto orizzontale).

Le prove su elementi di grandi dimensioni, per la valutazione del comportamento meccanico dei sistemi costruttivi allo studio sottoposti ad azioni agenti nel piano della muratura, hanno compreso, per ogni tipologia di muratura analizzata, sei prove di compressione monoassiale, sei di compressione diagonale e cinque prove di compressione e taglio, di cui una condotta in modalità monotona e le altre quattro condotte in modalità ciclica, per un totale di 51 campioni testati.

Le tabelle I e II riportano uno schema delle principali prove sperimentali eseguite sia sui materiali che su assemblaggi di muratura di piccole o grandi dimensioni, con le caratteristiche geometriche dei campioni testati.

Materiali utilizzati e caratterizzazione di base Per quanto riguarda i blocchi utilizzati per il confezionamento dei campioni (fig. 1), essi rispettano le disposizioni normative nazionali in vigore al momento della sperimentazione (D.M. '87 e O.P.C.M. n. 3274) e risultano tutt'ora conformi agli attuali sviluppi normativi ("Norme tecniche per le costruzioni", 2005; O.P.C.M. n. 3431, 2005). I blocchi sono caratterizzati da una sezione orizzontale con cartelle rettilinee e continue nella direzione del piano della muratura, con valori medi di spessore pari a 12.5 mm per le cartelle esterne e pari a 9 mm per i setti interni. Pur essendo di tre diverse tipologie, i blocchi utilizzati hanno la stessa area e lo stesso disegno della sezione orizzontale, uguale percentuale di foratura, pari al 43%, e uguali lunghezza e larghezza (250x300mm). L'utilizzo di blocchi il più possibile simili, e provenienti dallo stesso produttore, ha consentito di ottenere risultati confrontabili tra le differenti tipologie di muratura testate.

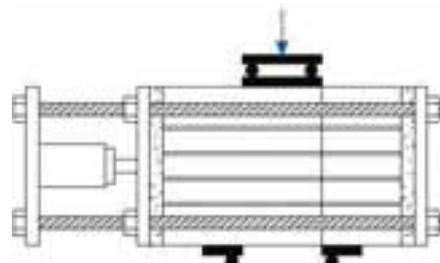
Per tutti i campioni sono state impiegate malte premiscelate pronte per l'uso, con resistenza media almeno pari a 5 MPa come richiesto per le costruzioni in zona sismica (O.P.C.M. n. 3431, 2005; prEN 1998-1, 2003). Per la muratura assemblata con blocchi non rettificati (TG, Po) si è adottata una malta di calce idraulica naturale e cemento con aggregati aventi diametro massimo di 4 mm, preparata in betoniera. Per la muratura con blocchi rettificati (TM) si è impiegata, invece, una malta cementizia con aggregati fini (granulometria 0-0.5 mm) e additivi polimerici di metil-cellulosa per la ritenzione dell'acqua d'impasto, preparata per miscelazione con mescolatore a doppia elica e messa in opera mediante uno strumento meccanico a rullo.

3 Caratteristiche meccaniche dei blocchi (sull'area lorda).

Blocco	Resist. compressione dir. parallela ai fori media		Resist. compressione dir. ortogonale ai fori media		Resist. trazione fenditura parallela a lunghezza		Modulo elastico E N/mm ²	Coeff. Poisson calcolato su lunghezza e spessore	
	$f_{b,m}$ N/mm ²	f_b N/mm ²	$f_{bh,m}$ N/mm ²	f_{bh} N/mm ²	$f_{t/l}$ N/mm ²	$f_{t/w}$ N/mm ²		ν (ϵ_{ht}/ϵ_v)	ν (ϵ_{hw}/ϵ_v)
TM	20.42	23.49	7.57	8.71	0.434	0.586	9328	-0.22	-0.32
TG	20.96	23.58	9.10	10.46	0.349	0.526	7997	-0.17	-0.22
Po	20.43	22.98	7.95	9.14	0.370	0.611	7887	-0.14	-0.23



3. Prove di compressione monoassiale: configurazione di prova.



4. Prove di scorrimento lungo un giunto di malta: schema (in alto) e configurazione di prova (in basso).

4 Proprietà fisico-meccaniche delle malte (valori medi).

Malta	Rapporto acqua/prodotto	Giorni di maturazione	Resist. flessione	Resist. compressione	Modulo elastico E N/mm ²	Coeff. Poisson ν
			f_{mt} N/mm ²	f_m N/mm ²		
Malta per giunti sottili	0.35	28 60÷75	4.43 5.08	17.68 19.79	8238	0.210
Malta ordinaria	0.28	28 60÷75	3.51 4.22	11.51 14.64	9507	0.154

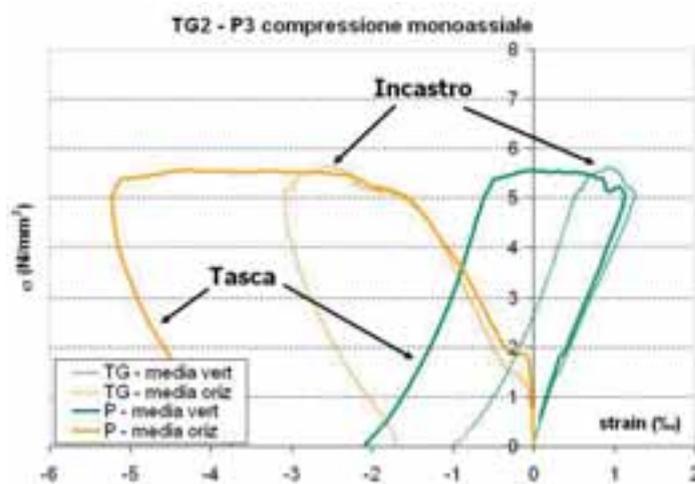
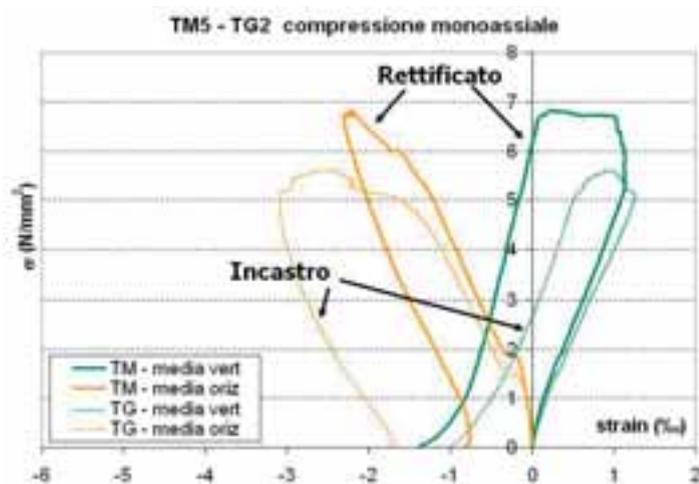
5 Risultati delle prove di compressione monoassiale (valori medi su 6 prove).

Campioni	Tensione di compressione al carico			Modulo elastico		Coeff. di Poisson	Deformazioni a σ_{inv}		
	massimo	inversione deformazioni	rapporto				verticali	orizzontali	rapporto
	σ_{max}	σ_{inv}	$\sigma_{inv}/\sigma_{max}$	$E_{10-40\%}$	$E_{30-60\%}$	$\nu_{10-40\%}$	$\epsilon_{v\ inv}$	$\epsilon_{h\ inv}$	$\epsilon_{h\ inv}/\epsilon_{v\ inv}$
	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	%	%	%	-
TM	6.95	4.97	71	4497	4424	-0.45	1.07	-1.73	-1.60
TG	5.67	4.57	80	4924	4278	-0.36	0.99	-1.48	-1.52
Po	5.34	4.62	86	5237	4141	-0.25	0.94	-1.34	-1.56



5. Prove di compressione diagonale: test set-up.

2. Diagrammi tensione-deformazione tipici per compressione monoassiale: confronto tra muratura con blocco ad incastro e giunto sottile o ordinario (sinistra); confronto tra muratura con blocco ad incastro e con blocco con tasca di malta (destra).



I risultati delle prove meccaniche sui blocchi e sulle malte, prelevate in fase di costruzione dei campioni di muratura, sono riportati rispettivamente nelle tabelle III e IV.

Le prove effettuate (sei test per tipo) su campioni a due blocchi sfalsati (ASTM C 952-86), realizzati con giunto sottile (TM) e con giunto di malta ordinario (TG), sono state svolte per ottenere la resistenza a trazione del giunto, parametro che rientra nella caratterizzazione del comportamento osservato durante le prove di compressione e taglio. Esse hanno fatto rilevare per i campioni TM una resistenza a trazione del giunto pari a $0,20 \text{ N/mm}^2$; per i campioni con giunto ordinario TG, date le sorprendenti proprietà di adesione del giunto di malta al blocco, a $0,42 \text{ N/mm}^2$ si ottiene la rottura del blocco anziché un distacco dei due elementi a contatto per raggiungimento della resistenza a trazione del giunto stesso.

Le prove di compressione monoassiale, necessarie per determinare le caratteristiche di base delle tre diverse tipologie di muratura considerate, sono state invece eseguite (fig. 3), applicando il carico monotonicamente sino alla rottura con incrementi di circa $0,5 \text{ kN/s}$. Come messo in evidenza dai diagrammi di fig. 2, il comportamento dei campioni è caratterizzato da due fasi sostanzialmente lineari, la seconda delle quali, a rigidità inferiore, interviene dopo la formazione della prima fessura visibile. Per quasi tutti i campioni, il quadro fessurativo si manifesta con l'apertura di lesioni verticali a metà dei blocchi, a prosecuzione dei giunti verticali, sino a giungere alla netta separazione della muratura in colonnine. Per carichi prossimi a quelli di rottura, i campioni iniziano a deformarsi fuori dal piano, producendo un'inversione degli spostamenti letti dai trasduttori di posizione verticali.

Come si può osservare anche dai risultati sperimentali sintetizzati in tabella V, la resistenza a compressione dei campioni realizzati con muratura rettificata (TM) è risultata più elevata che nel corrispondente caso della muratura ordinaria (circa +20%). I campioni rettificati hanno, inoltre, presentato una deformabilità più bassa ai carichi verticali rispetto ai campioni di muratura ordinaria, come dimostrato sia dal valore più elevato del modulo elastico (in media +6%), sia dalla tendenza più alta alla deformabilità orizzontale anziché verticale. Dal confronto tra i campioni realizzati con giunto verticale ad incastro (TG) o con tasca (Po), emerge che sia la resistenza a compressione che il modulo elastico sono praticamente uguali, con valori addirittura leggermente più bassi per la muratura con giunto verticale, a conferma di quanto si può desumere dalla letteratura.

Risultati sperimentali delle prove a taglio I risultati sperimentali che caratterizzano il comportamento a taglio della muratura sono stati ottenuti mediante prove di compressione diagonale, di scorrimento lungo giunti orizzontali e mediante prove di compressione e taglio.

Le prime due tipologie di prova sono contemplate, rispettivamente, nelle norme nazionali (D.M. 20/11/'87) ed europee

(Eurocodice 6) e sono adottate per la valutazione dello stesso parametro, ovvero della resistenza a taglio in assenza di carichi di compressione ($f_{vk,0}$). Tale parametro si utilizza in una legge di tipo lineare alla Mohr-Coulomb, adottata da entrambe le normative, per il progetto e la verifica a taglio delle pareti in muratura portante. La normativa, tuttavia, non spiega come ricavare, dai risultati della prova di compressione diagonale, il valore di resistenza a taglio media, sulla base del quale si ottiene la $f_{vk,0}$, come si vedrà nel seguito, lasciando ai tecnici libertà nell'utilizzo dei risultati ottenuti. Entrambe le procedure di prova, possono, poi, condurre a risultati discutibili, soprattutto quando applicate al caso di murature realizzate con blocchi di dimensioni notevoli, come evidenziato sia dai risultati sperimentali della presente e di altre ricerche, che hanno messo in luce il manifestarsi di modalità di collasso diverse da quelle attese e quindi non utili alla definizione dei parametri meccanici ricercati, sia dall'analisi numerica.

L'incoerenza tra le due norme e tra le procedure di prova ed i criteri adottati per la loro interpretazione rende incerta l'applicazione delle formule di progetto per il calcolo della effettiva resistenza a taglio della muratura. Proprio per far fronte a queste incertezze ed incoerenze, si è proposta l'indagine sperimentale del comportamento a taglio delle tipologie di muratura allo studio per tutte e tre le tipologie di prova esposte; se ne sono inoltre analizzati i risultati secondo le diverse formulazioni di progetto, ricorrendo all'esecuzione di prove di compressione e taglio per la determinazione dei parametri deformativi ed energetici fondamentali per la valutazione del comportamento sotto carichi ciclici, come messo in risalto dall'applicazione di codici di progettazione anti-sismica più moderni [O.P.C.M. n. 3431, 2005; prEN 1998-1, 2003].

Prove di scorrimento lungo i giunti orizzontali Le prove di scorrimento lungo i giunti orizzontali sono state condotte su campioni realizzati con due elementi, secondo la versione recentemente modificata della UNI EN 1052-3 (2003). I campioni sono stati testati applicando una pressione di confinamento pari a $0,015, 0,05, 0,10, 0,20$ e $0,30 \text{ N/mm}^2$. I valori più elevati suggeriti dalla normativa non sono stati considerati in quanto si ottenevano rotture premature dei blocchi. La fig. 4 riporta lo schema e la configurazione di prova. L'andamento sperimentale della resistenza a taglio in funzione della tensione di precompressione può essere così sintetizzato: giunto sottile (TM) $\tau = 0,44 + 0,40\sigma \text{ (N/mm}^2\text{)}$, giunto ordinario (TG e Po) $\tau = 0,54 + 0,64\sigma \text{ (N/mm}^2\text{)}$.

Prove di compressione diagonale Le prove di compressione diagonale, il cui set-up di prova è riportato in fig. 5, sono state eseguite in conformità con le prescrizioni contenute nella ASTM E 519-02.

I risultati ottenuti sono riportati in tabella 6 in termini di resistenza a taglio nominale τ_{max} , valutata come massimo carico

6 Risultati delle prove di compressione diagonale (valori medi su 6 prove).

Campioni	τ_{max}	Modulo a taglio		Scorrimento angolare			Deformazione verticale, orizzontale e rapporto al carico massimo		
		$G_{10-40\%}$	$G_{30-60\%}$	$\gamma_{10-40\%}$	$\gamma_{30-60\%}$	γ_{tmax}	ϵ_{vmax}	ϵ_{hmax}	$\epsilon_{hmax}/\epsilon_{vmax}$
		N/mm ²	N/mm ²	‰	‰	‰	‰	‰	-
TM	0.206	927	753	0.039	0.086	0.248	0.281	-0.033	-0.123
TG	0.270	1002	816	0.062	0.124	0.342	0.373	-0.032	-0.099
Po	0.537	1402	1213	0.07	1.0154	0.399	0.459	-0.061	0.124



7 Risultati sperimentali delle prove di compressione e taglio cicliche (media sui diversi campioni).

Campioni	H_{cr}/H_{max}	H_{du}/H_{max}	$\delta_{cr}/\delta_{Hmax}$	δ_u/δ_{Hmax}	δ_u/δ_{cr}	θ_{cr}	θ_{Hmax}	θ_u	f_t	G_{exp}
						%	%	%	N/mm ²	N/mm ²
TMC	0.85	0.94	0.37	1.33	3.73	0.32	0.82	1.08	0.249	653
TGC	0.96	0.87	0.67	1.24	2.16	0.86	1.26	1.55	0.247	1016
PoC	0.95	0.82	0.67	1.44	2.55	1.04	1.49	2.19	0.274	1098



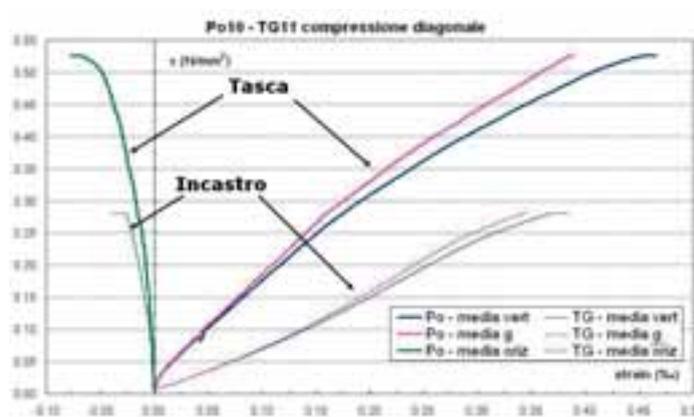
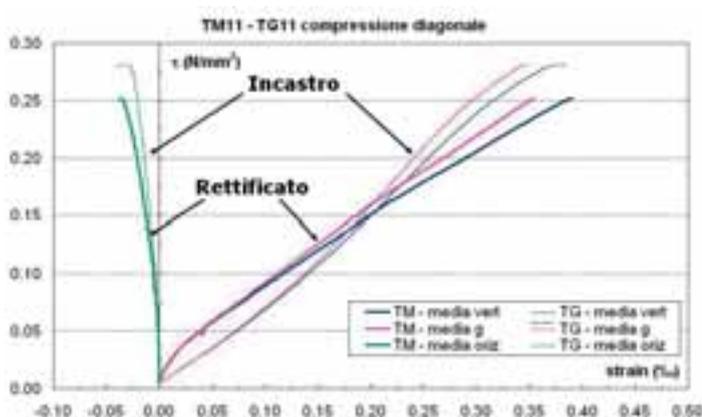
6. Collasso con rottura di un blocco lungo la direttrice di carico (*in alto*, campione di tipo Po) e rottura del giunto ordinario e dei relativi denti di malta (*in basso*, campione di tipo TG).

applicato diviso l'area lorda della diagonale del campione, insieme ai parametri deformativi.

Il meccanismo di collasso è caratterizzato per tutte e tre le tipologie di muratura testate dalla formazione di una fessura diagonale che segue l'andamento dei giunti (fig. 6), con fenomeni di scorrimento lungo i giunti verticali e di rottura a trazione lungo quelli orizzontali. Tale fessura si manifesta generalmente in modo improvviso, sottolineando il carattere fragile della risposta dei campioni, messo in evidenza anche dai grafici tensione-deformazione di fig. 7, ma dovuto in parte anche alla stessa configurazione di prova. Solo in qualche caso sporadico si presentano anche delle rotture locali nei blocchi con anda-

mento sub diagonale, in linea con la direttrice di carico.

Dal confronto dei risultati (tabella VI e fig. 7) tra i campioni realizzati con blocchi con tasca riempita di malta (Po) e quelli realizzati con blocchi ad incastro, sia rettificati che non rettificati (TM e TG), si osserva che i primi hanno fatto registrare una maggiore resistenza a taglio nominale (circa +100%) ed un maggiore modulo a taglio (circa +30%) rispetto alle altre due tipologie di muratura. Questo trova spiegazione nell'attivazione, per la modalità di collasso osservata, di meccanismi resistenti aggiuntivi (attrito lungo il giunto verticale e coesione interna tra i giunti di malta verticali ed orizzontali) dovuti alla presenza della tasca di malta.



7. Diagrammi tensione-deformazione tipici per compressione diagonale: confronto tra muratura con blocco ad incastro e muratura rettificata (*sinistra*); confronto tra muratura con blocco ad incastro e muratura con blocco con tasca di malta (*destra*).

Prove di compressione e taglio L'esecuzione di prove di compressione e taglio non è ancora regolamentata da una procedura armonizzata valida a livello nazionale od internazionale. La configurazione di prova e la metodologia di applicazione dei carichi utilizzate nella presente sperimentazione sono state quindi fissate sulla base di raccomandazioni internazionali [RILEM TC 76-LUM C3, 1991] ed utilizzate nelle principali esperienze sperimentali già condotte da altri ricercatori.

I campioni sono stati testati con condizione di vincolo a mensola incastrata alla base e libera di ruotare in sommità (fig. 8). Le prove, condotte sino al collasso completo del provino, sono state progettate in modo da riprodurre, a seconda del livello di precompressione applicato ai campioni, i meccanismi di rottura tipici per flessione e per taglio di pareti in muratura reali soggette ad azioni verticali ed orizzontali nel piano.

Durante le prove cicliche si è osservato il raggiungimento di quattro stati limite principali, sintetizzati in fig. 9, che si possono considerare come riferimento per l'idealizzazione del comportamento dei pannelli di muratura.

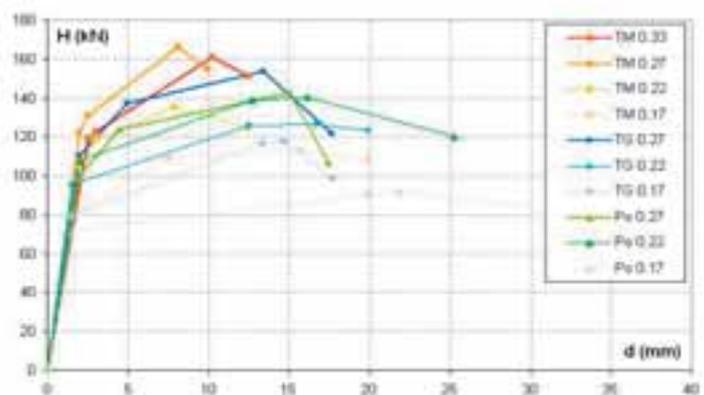
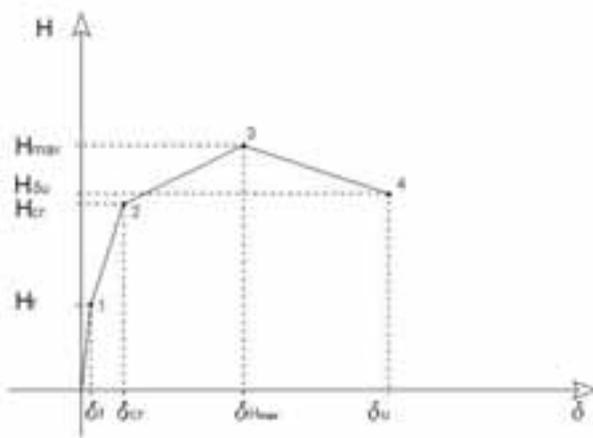
I risultati sperimentali principali sono riportati in tabella VII in termini di carico orizzontale critico (all'apertura della lesione a taglio) e ultimo normalizzati al carico massimo, di spostamento critico e ultimo normalizzati allo spostamento corrispondente al carico massimo, di angolo di rotazione (rapporto percentuale tra lo spostamento orizzontale e l'altezza del pannello) ai vari stati limite. Tra i risultati si riportano, inoltre, alcune caratteristiche meccaniche desunte direttamente dai dati sperimentali, ovvero la resistenza a trazione f_t valutata per mezzo del criterio di Turnsek e Cacovic (1971) e il modulo a taglio sperimentale G_{exp} , valutato sulla base delle deformazioni misurate sulle diagonali del pannello, in un intervallo di carico orizzontale tra il 30% e il 60% del carico massimo.

Dalla tabella VII si ricava che la capacità di spostamento, espressa in termini di angolo di rotazione ai diversi stati li-



8. Prova di compressione e taglio: test set-up.

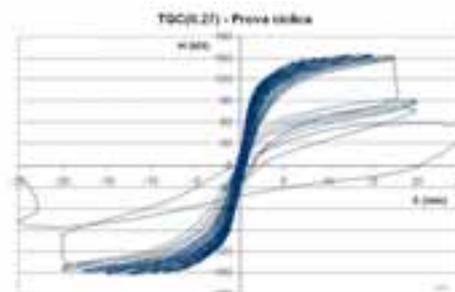
mite, è maggiore per i campioni realizzati con blocchi non rettificati (TG, Po) che per i campioni con blocchi rettificati (TM), ed è massima per i campioni realizzati con tasca di malta. Questo indica migliori caratteristiche in termini di duttilità, anche se il dato andrebbe rivisto alla luce della maggior tendenza alla rotazione come corpo rigido dei campioni di tipo TG e Po. Riguardo agli indicatori di duttilità, espressi in termini di rapporto tra lo spostamento allo stato limite ultimo e lo spostamento allo stato limite di apertura della lesione a taglio, si osserva che i campioni di muratura rettificata presentano valori apparentemente elevati, dovuti però al basso valore di spostamento per cui si innescava la prima lesione a taglio. Tale stato, raggiunto per una rotazione angolare pari allo 0,32%, può essere messo in relazione con lo stato limite di danno, per il quale lo spostamento d'interpiano limite, fissato dalla normativa, è pari allo 0,3%. Al raggiungimento della resistenza massima, è già visibile un quadro fessurativo che segue le due diagonali compresse sull'altezza del campione. In termini di resistenza a



9. Schematizzazione dei quattro stati limite individuabili nel comportamento dei campioni durante le prove di compressione e taglio (sinistra); risultati ottenuti sui campioni testati (destra).

8 Valori ottenuti per la resistenza a taglio caratteristica in assenza di compressione ($f_{vk,o}$) e relativi valori di resistenza a taglio f_{vk} .

Serie	$f_{vk,o}^{[1]}$	$f_{vk,o}^{[2]}$	$f_{vk,o}^{[3]}$	$f_{vk,o}^{[4]}$	σ_D	Resistenza a taglio				
	EC6 tab	EC6 test	DM'87	DM'87		$f_{v,exp}$	$f_{vko}^{[1]}$	$f_{vk}^{[2]}$	$f_{vk}^{[3]}$	$f_{vk}^{[4]}$
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
TMC(0.33)					2.27	0.545	1.058	1.084	1.053	0.994
TMC(0.27)					1.90	0.562	0.909	0.935	0.903	0.846
TMC(0.22)	0.3	0.35	0.144	0.086	1.53	0.458	0.763	0.789	0.757	0.698
TMC(0.17)					1.16	0.381	0.613	0.639	0.607	0.550
TMM(0.27)					1.90	0.561	0.909	0.935	0.903	0.846
TGC(0.27)					1.55	0.516	0.769	0.835	0.808	0.738
TGC(0.22)					1.24	0.425	0.648	0.714	0.687	0.614
TGC(0.17)	0.3	0.43	0.189	0.118	0.94	0.395	0.527	0.593	0.566	0.494
TGM(0.22)					1.24	0.430	0.648	0.714	0.687	0.614
PoC(0.27)					1.46	0.480	0.883	1.015	0.959	0.819
PoC(0.22)					1.14	0.472	0.758	0.890	0.834	0.691
PoC(0.17)	0.3	0.43	0.376	0.235	0.89	0.308	0.656	0.788	0.732	0.591
PoM(0.27)					1.55	0.518	0.920	1.052	0.996	0.855



10. Diagramma carico laterale-spostamento sotto un carico verticale pari al 27% della massima resistenza a compressione (in alto); stato fessurativo al termine della prova (in basso).

trazione, le differenze osservate tra le diverse tipologie di muratura sono state molto più limitate rispetto alle differenze in termini di resistenza a taglio nominale ottenute mediante prove di compressione diagonale, anche per effetto dei diversi meccanismi di rottura osservati. In particolare, si sono ottenuti valori pressoché simili (in media sui campioni testati alle diverse precompressioni) di resistenza a trazione per i campioni di muratura rettificata TM e per la muratura ad incastro TG, mentre valori più elevati del 10% circa sono stati rilevati per i campioni con tasca di malta Po (tabella VII). La capacità di dissipare energia, valutata sia dal rapporto tra energia accumulata e dissipata che dal corrispondente *damping* viscoso equivalente, sia dall'analisi dei cicli d'isteresi, dominati da un effetto di *pinching*, è risultata bassa per tutti i tipi di murature testati. La fig. 10 riporta un tipico diagramma carico laterale - spostamento, ottenuto testando il campione sotto un carico di compressione verticale pari al 27% della massima resistenza a compressione e un'immagine dello stesso campione.

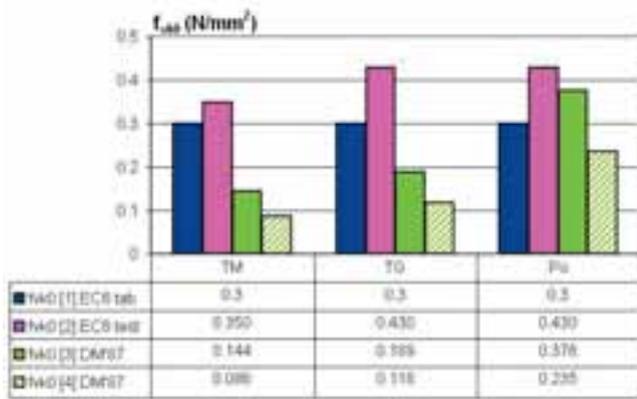
Analisi dei risultati delle prove a taglio La resistenza a taglio $f_{v,exp}$, ricavata sperimentalmente dai test di compressione e taglio sui pannelli di muratura (tabella VIII), valutata come rapporto tra la resistenza massima (H_{max}) e l'area della sezione orizzontale del pannello testato (A), è stata confrontata con la resistenza a taglio desunta dalle formulazioni proposte dalle normative nazionali e da quelle europee, con lo scopo di verificarne l'attendibilità.

Entrambe le normative adottano una legge attrittiva di tipo lineare alla Mohr-Coulomb, dove σ è la tensione di compres-

sione agente e 0.4 è il valore assunto come coefficiente d'attrito tra il giunto di malta e il blocco:

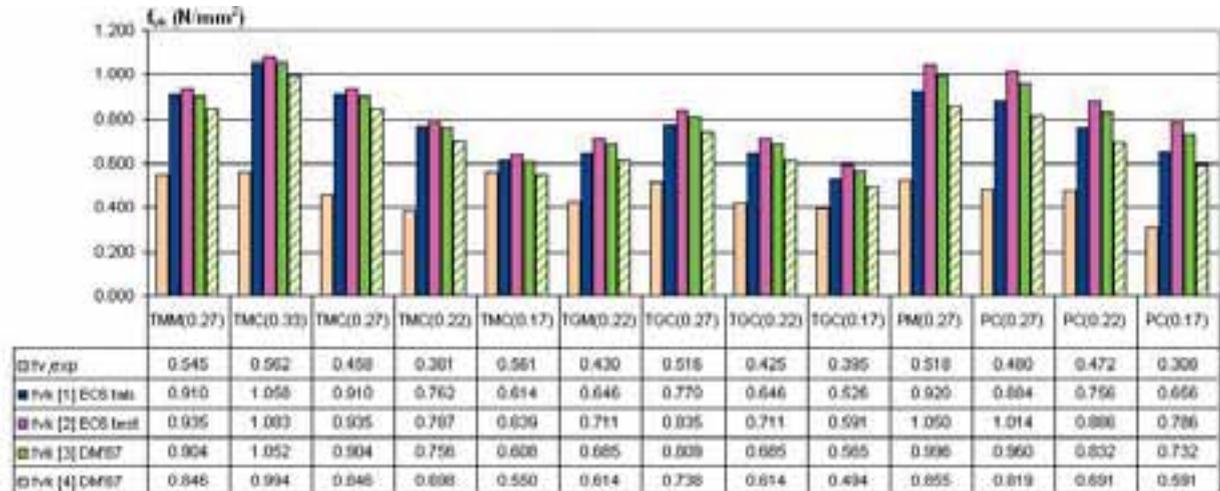
$$f_{vk} = f_{vko} + 0.4\sigma$$

Il valore della resistenza caratteristica a taglio risultante f_{vk} è inoltre limitato sulla base della resistenza a compressione dei blocchi o sulla base di altri valori fissi forniti dalle stesse normative [prEN 1996-1, 2004; D.M. 20/11/1987]. Il valore di f_{vko} può quindi essere preso come valore tabulato oppure sulla base dei risultati di prove di scorrimento lungo i giunti per l'Eurocodice 6 (prima e seconda colonna di tabella VIII), e deve essere ridotto di un fattore pari a 0.5 nel caso che i giunti verticali siano assemblati a secco (ad esempio, per i campioni TM e TG). Il valore di f_{vko} è invece valutato per riduzione del 30% della resistenza a taglio media $f_{v,m}$ ricavata da prove di compressione diagonale, secondo il D.M. '87. Nel caso dell'utilizzo della normativa italiana sorgono due problemi: innanzitutto, anche in questo caso sono presenti dei valori tabulati, ma essi sono validi per la sola muratura confezionata con giunti orizzontali e verticali riempiti di malta e ordinari, e quindi possono essere applicabili ai soli campioni realizzati con blocchi con tasca riempita di malta (Po), se si considera tale muratura alla stregua di una muratura con giunto verticale ordinario, come si può assumere sulla base dell'Eurocodice 6. In secondo luogo, non è chiaro come ricavare il valore di $f_{v,m}$ dalle prove di compressione diagonale. Frequentemente tale valore è calcolato come rapporto tra il carico massimo applicato diviso l'area lorda della diagonale del campione (terza colonna di tabella VIII), ma in tal caso il valore di $f_{v,m}$ ricavato



11. Confronto tra valori di resistenza a taglio caratteristica in assenza di compressione.

12. Resistenza a taglio delle diverse tipologie di muratura testate: confronto tra valori sperimentali e valori caratteristici di calcolo.



non è coerente con il criterio di resistenza nel quale deve poi essere utilizzato, come precedentemente esposto.

Una proposta, approssimata, potrebbe essere quella di valutare tale parametro per scomposizione del carico lungo le due direzioni principali del pannello. Tale approccio porta ai valori di $f_{vk,0}$ esposti nella quarta colonna di tabella VIII. È da osservare che, se tale approccio in linea teorica potrebbe consentire un calcolo più coerente delle resistenze a taglio delle murature, non è però giustificato completamente nel caso della sperimentazione in oggetto, stante la modalità di rottura osservata per i campioni testati a compressione diagonale, riconducibile al raggiungimento di una rottura di trazione lungo i giunti orizzontali.

I valori di resistenza a taglio caratteristica corrispondenti ai valori di resistenza a taglio iniziale caratteristica esposti sono riportati nelle successive colonne di tabella VIII. Le formulazioni di progetto per il calcolo della resistenza a taglio caratteristica sono state applicate supponendo una tensione di compressione σ_0 pari a quella media agente nei campioni durante lo svolgimento delle prove di compressione e taglio. Gli istogrammi delle figg. 11 e 12 mostrano i valori di $f_{vk,0}$ determinati secondo le modalità esposte ed i corrispondenti valori di resistenza a taglio caratteristica determinati, sempre in confronto con quelli sperimentali ricavati dalle prove di compressione e taglio. Si può osservare che, per tutte e tre le tipologie di muratura testate, il valore di resistenza fornito dalle normative sovrastima sistematicamente i valori sperimentali, di una quantità che sembra comunque essere costante. La valutazione approssimata dell' $f_{vk,0}$, per quanto affetta dall'errore sopra esposto, sembra invece portare a risultati migliori.

Conclusioni I risultati sperimentali hanno mostrato che tutte le tipologie di muratura testate, anche in virtù della forma del blocco prescelta, caratterizzata dalla regolarità e rettilineità dei setti, hanno presentato un comportamento adeguato sotto carichi di compressione monoassiale. Le prove di resistenza a taglio secondo le tre modalità di prova eseguite hanno consentito di ottenere parametri utili per la progettazione di strutture in murature portanti.

In particolare, dalle prove di compressione e taglio si sono ottenuti valori solo leggermente superiori di resistenza (+11%) per la muratura realizzata con blocchi con tasca di malta (Po), ad indicare un parziale effetto migliorativo dato dalla presenza del giunto verticale. In ogni caso, i valori di resistenza ottenuti sono in linea con quelli desumibili dalla letteratura. In termini di semplice resistenza a taglio, è da osservare che con i valori di progetto, ottenuti mediante il criterio proposto sia dall' Eurocodice 6 che dal D.M. '87, si ottiene una sovrastima sistematica delle resistenze ottenute sperimentalmente mediante prove di compressione e taglio.

I campioni con tasca di malta (Po), inoltre, insieme a quelli confezionati con blocchi ad incastro e giunti ordinari (TG), presentano valori di rotazione angolare e di spostamento allo stato limite di danno e ultimo più elevati rispetto al caso della muratura rettificata, e accettabili se confrontati coi limiti imposti dalla normativa (O.P.C.M. n. 3431, 2005). La maggiore duttilità rilevata è legata alla presenza per lo meno del giunto orizzontale di spessore ordinario, ma anche, in parte, alla maggiore tendenza alla rotazione come corpo rigido dovuta, nel caso della presente sperimentazione, all'eccessiva rigidità della malta impiegata e alla resistenza a trazione del giunto. ¶