

Laboratory Calibration and In Situ Application of Test Methods to Assess Masonry Shear Characteristics through Flat Jack (FJ-SCT Method)

Dario Foppoli^a, Alessandro Armanasco^a

^a Foppoli Moretta e Associati srl via Damiani, 2 23037 Tirano (SO)

Keywords: masonry, shear strength, flat-jack, slightly destructive test

ABSTRACT

The test methods currently available to determine the shear behavior of masonry structures doesn't fit to the execution of in situ tests on existing buildings (and especially the heritage ones) due to the fact that they are usually strongly destructive. Another relevant consideration is linked to the method of preparation of the sample, that causes damages that can reduce the mechanical characteristics of the masonry itself: there is a significant doubt about the effective representativeness of the results obtained with the in situ application of the current standards.

It has been developed by the authors a new testing technique based on the use of flat jacks that, belonging to the category of slightly destructive test methods, allows to greatly reduce the impact of the tests on the buildings and then to apply them to a wide range of cases.

In order to test this new technique (called FJ-SCT method) they were built in laboratory a series of brick walls similar for texture, composition and characteristics to the walls of the heritage Italian buildings.

First of all both the materials and the walls were subjected to standardized tests in order to define their mechanical characteristics; then the FJ-SCT test technique was calibrated by mean a testing frame so as to reproduce the in situ operating. The results of the laboratory tests carried out by traditional methods were then compared with the results of the laboratory tests carried out by the FJ-SCT method experiencing a very good correspondence between them.

Further calibrations were performed in situ to evaluate the operability of the defined procedures; this campaign proved the technique to be reliable, the procedures to be efficient and effective and the results to be repeatable. The damages produced to the masonry by this test technique are limited and justified by the level of the results obtained.

In the paper will be presented also some case histories with the analysis of the results, the proposal for the processing of shear strength data and the comparison with reference shear values taken from Italian codes. Then further operational insights will be suggested aimed to a proper standardization of the proposed test technique.

1 INTRODUZIONE

Le grandezze meccaniche che caratterizzano il comportamento al taglio delle murature sono fondamentali per effettuare valutazioni della sicurezza strutturale sia in campo sismico che in campo statico. Se consideriamo il campo sismico possiamo osservare che, tra i 28 meccanismi di collasso individuati dalla norma italiana (DPCM 09/02/2011) che consentono di effettuare la valutazione di sicurezza al livello LV1 della tipologia strutturale “chiese... ed altre strutture con grandi aule senza orizzontamenti intermedi”, ben 8 meccanismi coinvolgono direttamente la resistenza al taglio delle murature; anche in campo statico (Mastrodicasa, 1993) numerosi

meccanismi di danno, soprattutto quelli dovuti ai cedimenti differenziali delle fondazioni, sono correlati alla resistenza tagliente delle murature.

A fronte di tali considerazioni è piuttosto carente la definizione di metodi sperimentali utili per valutare le grandezze in gioco.

Tra le prove di laboratorio troviamo normalizzati due metodi:

- prove su triplette di mattoni (RILEM TC 127 MS-B4 - EN 1052-3:2002);
- prove di compressione diagonale (ASTM E519/E519M-10).

Le prove su triplette consentono la sola determinazione della resistenza al taglio dei giunti di malta, che è un meccanismo che viene solo raramente attivato nei danneggiamenti delle murature sia in campo statico che in campo sismico in quanto le fessure diagonali tipiche del

taglio interessano in genere sia il giunto di malta che i mattoni (Fig.1); le prove di compressione diagonale consentono invece di determinare indirettamente la resistenza al taglio delle murature.



Figura 1. Fessura di taglio che coinvolge giunti di malta e mattoni

Per quanto riguarda le prove in sito, la letteratura fornisce riscontro dell'applicazione di metodologie desunte dalle precedenti. Sostanzialmente le prove attualmente applicate si possono classificare secondo tre metodologie:

- prove di scorrimento del singolo mattone;
- prove di compressione diagonale;
- prove di taglio-compressione.

Le prove di scorrimento in sito (RILEM TC 127 MS-D6), la cui tecnica è stata desunta dalle prove di laboratorio su triplete già citate, sono applicabili esclusivamente a murature in laterizio, presuppongono che il giunto posteriore del mattone, che non viene rimosso, abbia un effetto irrilevante (ipotesi che a parere degli scriventi risulta arbitraria poiché la prova implica grandi spostamenti), sono classificabili come leggermente distruttive, ma forniscono anch'esse il solo valore della resistenza al taglio dei giunti di malta, non esaustivo del comportamento globale della muratura.

Le prove di compressione diagonale vengono realizzate in sito con procedure desunte dalla già citata norma applicabile in laboratorio; in genere il carico diagonale viene applicato attraverso l'impiego di martinetti cilindrici (Borri et al. 2001). Poiché per collocare tali martinetti e gli elementi di contrasto è necessaria l'esecuzione di rilevanti opere di demolizione, tali prove hanno un significativo impatto sulle strutture esistenti, tanto da risultare difficilmente applicabili per l'analisi di manufatti che non siano già gravemente danneggiati.

Le prove di taglio-compressione, che dal punto di vista teorico sono quelle che meglio descrivono il comportamento effettivo delle

murature, vengono in genere effettuate inserendo nella muratura un telaio di contrasto realizzato con profilati metallici ed applicando il carico sia verticale che orizzontale per mezzo di martinetti cilindrici: per questo richiedono anch'esse l'esecuzione di rilevanti opere di demolizione con le controindicazioni già citate.

Per inciso è utile osservare che, al di là delle ovvie considerazioni di tipo conservativo, la realizzazione dei tagli e delle demolizioni richieste per l'esecuzione delle prove di compressione diagonale o di taglio-compressione trasmette notevoli vibrazioni alla muratura, già di per sé un materiale poco resistente, e causa inoltre un processo di totale decompressione “triassiale” della stessa: permangono quindi significativi dubbi sul fatto che il campione così predisposto mantenga le stesse caratteristiche della muratura originale.

Stante la difficoltà di determinare sperimentalmente le grandezze rilevanti, nella pratica si procede a determinare le caratteristiche taglianti delle murature per via indiretta, applicando per esempio la ben conosciuta, standardizzata ed affidabile prova con martinetti piatti (ASTM C 1196-09) che consente di ottenere le caratteristiche meccaniche della muratura (a compressione); le caratteristiche al taglio vengono poi calcolate interpolando i valori tabulati, per esempio quelli contenuti nel DM 14/01/2008. Tuttavia, se da un lato, nell'ipotesi di materiale elastico, omogeneo ed isotropo, esiste la ben nota relazione che correla E , ν (determinabili mediante prove con martinetti piatti) e G , dall'altro lato occorre tener presente che il comportamento meccanico reale della muratura è molto differente da quello così ipotizzato; inoltre non esiste correlazione tra la resistenza a compressione e la resistenza al taglio.

Infine è opportuno ribadire che il DPCM 09/02/2011 specifica che “tecniche diagnostiche non distruttive di tipo indiretto, quali prove soniche ed ultrasoniche, consentono di valutare l'omogeneità dei parametri meccanici nelle diverse parti della costruzione, ma non forniscono stime quantitative attendibili dei loro valori, in quanto essi vengono desunti dalla misura di altre grandezze. La misura diretta dei parametri meccanici della muratura, in particolare di quelli di resistenza, non può essere eseguita, quindi, se non attraverso prove debolmente distruttive o distruttive, anche se su porzioni limitate. Le calibrazioni di prove non distruttive con prove distruttive possono essere utilizzate per ridurre l'invasività delle indagini di qualificazione”. Ciò conferma la necessità di avere a disposizione un metodo di prova diretto ed affidabile per

determinare le caratteristiche al taglio delle murature quant'anche con carattere di leggera invasività.

La disanima delle varie metodologie applicate in sito e descritte sopra ha consentito di valutare come configurazione più interessante della prova di taglio-compressione quella già applicata da Sheppard, 1985.

E' stata quindi messa a punto (Foppoli et al. 2016) una nuova tecnica di prova di taglio-compressione basata sull'impiego di martinetti piatti, denominata "Flat-Jack Shear Compression Test" (FJ-SCT), che, ascrivendosi alla categoria dei metodi solo leggermente distruttivi, (SDT-Slightly Destructive Test) consente di ridurre l'impatto delle prove sugli edifici e quindi risulta effettivamente applicabile ad un ampio range di casi. Tale tecnica è stata sperimentata in laboratorio realizzando n°12 muretti in laterizio che per tessitura, composizione e consistenza simulano le caratteristiche delle murature degli edifici storici della pianura Padana; la prova è stata poi sperimentata anche in sito, su due edifici danneggiati da sisma del 2012 in Emilia, per ottenere riscontri relativi all'efficacia delle procedure messe a punto.

2 PROVA DI TAGLIO-COMPRESSIONE

2.1 Descrizione della tecnica di prova

La prova consiste nel realizzare nella muratura da analizzare due tagli passanti, di lunghezza 160-200 cm e di spessore 8-10 mm, posti a distanza reciproca $b=60-80$ cm. In corrispondenza della mezzeria di uno dei due tagli viene inserito un martinetto piatto, disposto in verticale, ed il taglio opposto viene strumentato mediante trasduttori di spostamento che consentono la misura degli spostamenti orizzontali.

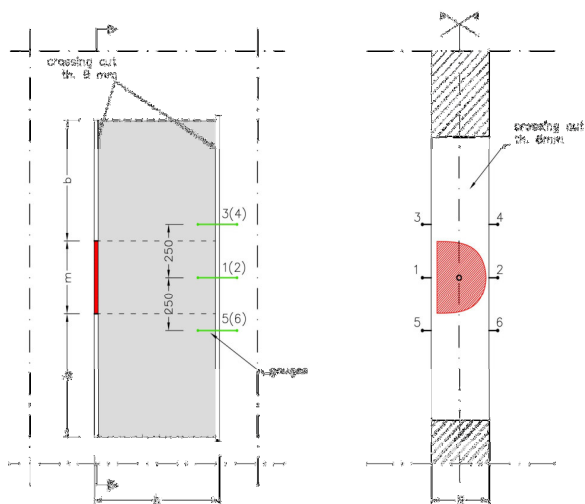


Figura 2. Lay-out della prova FJ-SCT

In questo modo il lay-out di prova (Fig.2) perviene all'individuazione di due campioni sovrapposti, di forma pressoché quadrata e di lato $b \times b$, che vengono assoggettati contemporaneamente alla sollecitazione tagliante.

Attraverso il martinetto disposto in verticale viene applicato al campione un carico orizzontale, incrementando la pressione fino ad ottenere la fessurazione diagonale di almeno uno dei due campioni di muratura. Tutte le prove effettuate hanno messo in evidenza che, con lo spostamento orizzontale di 8-10 mm consentito dall'ampiezza dei due tagli realizzati, si sviluppano fessure diagonali confermando la correttezza del meccanismo di rottura al taglio instauratosi nella muratura.

2.2 Descrizione della campagna di taratura

La taratura della tecnica FJ-SCT è stata effettuata in laboratorio su campioni in scala reale appositamente realizzati. Sono stati costruiti muretti-campione in laterizio (dim. di prova $68 \times 180 \times 23,5$ cm), utilizzando mattoni (nuovi) con resistenza nominale limitata e malta povera di legante e realizzando giunti di malta di rilevante spessore in modo da ottenere murature con caratteristiche meccaniche scadenti, come si riscontra spesso durante le indagini in sito su edifici nella pianura Padana, ed in particolare nelle zone dell'Emilia Romagna colpite dal sisma del 2012. Per caratterizzare i materiali utilizzati le informazioni relative ai mattoni, alla malta ed alla sabbia trasmesse dal fornitore sono state confrontate con i dati ottenuti dalle prove ultrasoniche, di compressione e di trazione indiretta effettuate sui campioni di malta e di laterizio prelevati durante la costruzione dei muretti-campione. Tutti i muretti-campione sono stati inoltre sottoposti a prove soniche ed ultrasoniche in modo da valutarne in modo non distruttivo l'omogeneità, come suggerito dalla norma.

Per eseguire le prove in laboratorio (Fig.3) è stato realizzato un telaio metallico (1) dimensionato per fornire il necessario contrasto orizzontale all'azione del martinetto piatto. Il carico verticale è stato applicato utilizzando un martinetto piatto di grande dimensione (2), disposto in orizzontale tra la sommità del muro ed il telaio, e contrastato da 4 tiranti verticali (3). I muretti-campione sono stati caratterizzati meccanicamente attraverso due cicli di compressione applicata con il martinetto piatto orizzontale (2), fino al livello 1,0 MPa. Dopo il secondo ciclo la pressione nel martinetto è stata ridotta e fissata ad un livello mantenuto costante

Per raffronto sono state realizzate anche prove di compressione diagonale. Per queste, contestualmente con i muretti precedenti, sono stati realizzati due muretti della stessa larghezza, ma di dimensione pressoché quadrata (dim. 68x68x23,5 cm), che sono stati posti entro un telaio (Fig.2) costituito da due angolari rigidi (I) contrastati tra di loro mediante due barre in acciaio (II). Anche in questo caso il carico è stato applicato mediante un martinetto piatto (III) fino ad ottenere la rottura per fessurazione diagonale del campione.

3.1 Realizzazione dei muretti-campione



La campagna di prova ha previsto la realizzazione di due serie di muretti-campione (Fig.4), denominati tipo A e tipo B. Ogni serie risulta costituita da 4 muretti grandi e 2 muretti piccoli, tutti realizzati in modo da avere una limitata resistenza a compressione. I mattoni utilizzati hanno una resistenza media a compressione verticale dichiarata dal produttore di 18 MPa; la malta è stata realizzata per il tipo A con calce idraulica NHL 3,5, sabbia di fiume scelta secondo una curva granulometrica simile a quella delle malte storiche con rapporto in volume 1/5 e grassello di calce aerea al 20% in peso sulla calce idraulica. Per il tipo B è stata utilizzata calce idraulica NHL 2 con rapporto in volume 1/4 e grassello di calce aerea come sopra. Nel primo caso i giunti di malta sono stati realizzati di spessore medio 1,5-2,0 cm, nel secondo caso di spessore medio 1,0-1,5 cm. Nel periodo di maturazione dei muretti la temperatura e l'umidità in ambiente sono state monitorate in continuo.

La modalità di esecuzione delle prove FJ-SCT prevede che il martinetto piatto posto in verticale si possa spanciare in modo tale da provocare nella muratura spostamenti fino ad un massimo di 8-10 mm; la costante del martinetto k_m non può quindi essere considerata costante durante la prova: secondo la norma (ASTM C 1196-09) essa viene infatti determinata mediante taratura effettuata nella condizione di deformazione impedita.

Per la presente campagna di prova è stato necessario effettuare una specifica taratura dei martinetti piatti determinando il valore $k_{m(6)}$ ottenuto imponendo al martinetto una deformazione di 6 mm, in relazione a quanto previsto nel corso delle prove.

I dati di prova sono poi stati tabulati calcolando la forza orizzontale applicata al martinetto con l'utilizzo del valore k_m interpolato linearmente in funzione dello spostamento rilevato durante la prova.

3.3 Prove di caratterizzazione dei materiali e dei muretti

Le prove di laboratorio per la caratterizzazione dei materiali utilizzati per costruire i campioni hanno fornito i risultati riportati in Tab.1 dove:

- 1: velocità ultrasuoni nella malta secondo UNI EN 12504-4:2005
- 2: resistenza a compressione della malta secondo UNI EN 196-1:2005
- 3: resistenza a trazione della malta secondo UNI EN 12390-6:2010

- 4: velocità ultrasuoni nei mattoni secondo UNI EN 12504-4:2005

Tabella 1. Prove di caratterizzazione dei materiali dei muretti (media di 6 campioni).

	1 [m/s]	2 [MPa]	3 [MPa]	4 [m/s]
tipo A	1111	0,77	<0,1	2085
tipo B	864	0,55		1900

Le caratteristiche meccaniche a compressione dei muretti-campione sono state determinate sperimentalmente in laboratorio e sono state correlate con le misure della velocità delle onde soniche, come riportato in Tab.2 dove:

- 1: E_d (0.4-0.8)*
- 2: v_d (0.4-0.8)*
- 3: velocità ultrasuoni campioni A1-A4 secondo UNI EN 12504-4
- 4: velocità ultrasuoni campioni A5-A6 secondo UNI EN 12504-4

* = valori calcolati nel primo ciclo di carico nell'intervallo (0.4-0.8MPa)

Tabella 2. Prove di caratterizzazione dei muretti-campione (valori medi di 4 campioni).

	1 [MPa]	2 [MPa]	3 [m/s]	4 [m/s]
tipo A	1165	0,20	1843	1836,5
tipo B	1826	0,10	1734	1766

I valori medi delle velocità soniche sono risultati simili tra i muretti piccoli e quelli grandi, confermandone l'omogeneità costruttiva. E' stata osservata tuttavia una notevole dispersione delle caratteristiche meccaniche rilevate nelle murature sottoposte a prova.

3.4 Prove di calibrazione della tecnica FJ-SCT

Successivamente i muretti piccoli sono stati sottoposti a prove di compressione diagonale ed i muretti grandi (a cui è stato imposto un carico verticale costante mediante il martinetto orizzontale) sono stati sottoposti a prove di taglio-compressione.

In tutti i casi i muretti hanno raggiunto la rottura a taglio sviluppando fessure diagonali e presentando significativi spostamenti, come si osserva nell'immagine riportata in Fig. 5.



Figura 5. Campioni di laboratorio fessurati dopo la prova FJ-SCT

Nella Fig. 6 è riportato un tipico diagramma tensione di taglio-spostamento dedotto dalla prova. I risultati ottenuti sono riassunti in Tab.3.



Figura 6. Diagramma tensione di taglio-spostamento

Tabella 3. Risultati delle prove di taglio.

** = calcolati nel primo ciclo di carico nell'intervallo (0 - 0.07MPa)

	σ_v [MPa]	τ_v [MPa]	$G_{(0-0.07)}^{**}$ [MPa]
A1	0,4	0,289	750
A2	0,4	0,314	539
A3	0,6	0,42	492
A4	0,6	0,405	663
A5	0	0,155	--
A6	0	0,15	--
B1	0,4	0,366	1037
B2	0,4	0,382	750
B3	0,8	0,426	545
B4	0,8	0,396	339
B5	0	0,174	--
B6	0	0,182	--

3.5 Analisi dei risultati

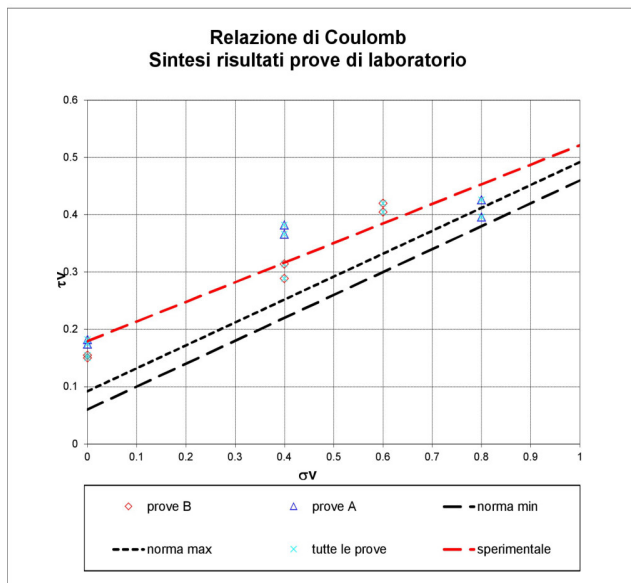


Figura 7. Tarature in laboratorio: relazione di Coulomb tra la sollecitazione verticale ed il taglio

I risultati delle prove effettuate sono stati diagrammati confrontandoli con la relazione di Coulomb (1) definita sulla base dei valori massimi e minimi ricavati dalla norma.

$$\tau = \tau_{v0} + \sigma \tan \phi \quad (1).$$

L'interpolazione di tutti i risultati delle 12 prove ha fornito i seguenti valori:

$$\tau_{v0} = 0,179 \text{ MPa}$$

$$\tan \phi = 0,34$$

Il valore τ_{v0} in particolare è maggiore dei valori proposti dalla norma, ma si sottolinea che esso risulta del tutto in linea con i valori forniti dalle 4 prove di compressione diagonale che sono stati ottenuti con metodi di prova standardizzati.

L'osservazione qualitativa delle modalità di fessurazione riscontrate durante le prove mette in evidenza alcune ulteriori circostanze.

Dal punto di vista teorico la rottura può avvenire secondo due modalità:

1. rottura per scorrimento lungo un giunto di malta;
2. rottura per formazione di fessure diagonali.

Nel secondo caso si può effettuare una ulteriore classificazione:

- 2.a le fessure diagonali si formano contemporaneamente sui due campioni sovrapposti;
- 2.b le fessure diagonali si formano solo su uno dei due campioni.

Nel corso delle prove effettuate non è mai stata riscontrata la modalità di rottura 1); nel corso delle prove di laboratorio è stata riscontrata solamente la modalità di rottura 2.b); per le prove

in sito frequentemente è stata riscontrata anche la modalità di rottura 2.a).

Queste modalità alternative di rottura sono indifferenti nei riguardi della resistenza a taglio del campione in quanto è ragionevole ritenere che, fino al momento immediatamente precedente alla formazione delle fessure, la tensione sia distribuita in modo uniforme sia nel campione superiore che nel campione inferiore: in sostanza si rompe prima il meno resistente dei due. La modalità di prova applicata equivale quindi a testare due campioni contemporaneamente acquisendo solamente il valore relativo al meno resistente, quindi risulta a favore della sicurezza.

Le prove in laboratorio hanno evidenziato in qualche caso la formazione di una fessura orizzontale in corrispondenza di un giunto di malta posto in mezzeria; tuttavia tale fenomeno, i cui effetti non sono rilevabili dalle misure dei trasduttori, non ha mai impedito il successivo sviluppo di fessure diagonali nel campione.

4 TARATURE IN SITO

Per valutare l'applicabilità in sito e l'efficacia della tecnica FJ-SCT, le prove sono state sperimentate in due edifici storici del modenese danneggiati dal sisma dell'Emilia del 2012, villa La Bertusa a Rovereto (TB) e villa Bonasi Benucci a Stuffione (TS) (Foppoli 2016). Per ognuno dei due casi sono state effettuate n. 3 prove individuando campioni di muratura rispettivamente di dimensione 68x176x28 cm e 60x160x28 cm, molto vicine quindi alle dimensioni dei campioni realizzati in laboratorio. La sollecitazione di compressione verticale agente è stata determinata mediante prove con martinetto piatto realizzate in prossimità del punto di esecuzione della prova di taglio.

Si osserva che dal punto di vista teorico non è necessario rimuovere l'intonaco dalla muratura, a meno che esso non sia tale da influenzare significativamente la resistenza al taglio (p.e. nel caso di intonaci cementizi e murature sottili); ciò riduce evidentemente in modo significativo il livello di danneggiamento atteso della muratura. Nel corso delle prove di taratura, tuttavia, gli intonaci sono stati rimossi per eliminare qualsiasi incertezza sperimentale.

I tagli sono stati realizzati con troncatrice con disco diamantato. Anche in questo caso le modalità di fessurazione conseguenti alle prove sono risultate del tutto conformi a quanto atteso per la rottura al taglio dei campioni (Fig.8).

relazione alla specifica tessitura dell'apparecchiatura muraria.

In questi casi gli spessori delle murature sono risultati maggiori di quanto testato in sede sperimentale. Per spessori superiori a 50 cm si è operato inserendo due martinetti piatti posti in verticale ed idraulicamente collegati in parallelo (Fig.10). La prova può essere infatti realizzata applicando il carico orizzontale mediante due martinetti rettangolari (per spessori > di 40 cm) oppure due martinetti semicircolari (per spessori > di 52 cm). Sono stati ottenuti ottimi riscontri sia riguardo all'applicabilità della tecnica di prova che riguardo alla ripetibilità dei risultati.

Le prove con martinetti piatti sono state realizzate secondo le norme ASTM C 1196-09 e ASTM C 1197-09 sia per definire le caratteristiche a compressione verticale delle murature che per determinarne lo stato di sollecitazione.

Risulta interessante confrontare le caratteristiche delle murature determinate sperimentalmente con quelle desumibili sulla base dell'osservazione dell'apparecchiatura muraria dalle tabelle del DM 14/01/2008 e riportate in Tab.4.

Tabella 4. Confronto delle caratteristiche determinate sperimentalmente con quelle desunte in modo tabellare

	Tabellare		Sperimentale	
	f _m [MPa]	E [MPa]	f _m [MPa]	Ed (0.4-0.8) [MPa]
BS	2,6	1500	2,33	1903
	3,8	1980		(3 prove)
CC	2,0	1020	3,33	4450
	3,0	1440		(3 prove)

A partire dai dati tabellari sono state poi determinate le caratteristiche al taglio della muratura, riportate in Tab. 5

Tabella 5. Caratteristiche al taglio della muratura determinate in modo tabellare secondo D.M. 14/01/2008

	Tabellare	
	τ_0 [MPa]	$\tan \phi$
BS	0,056	0,40
	0,074	
CC	0,035	0,40
	0,051	

I dati sperimentali di resistenza al taglio possono quindi essere diagrammati con riferimento alla relazione (1) avendo cura anche in questo caso di riportare sui diagrammi il range di valori di riferimento.

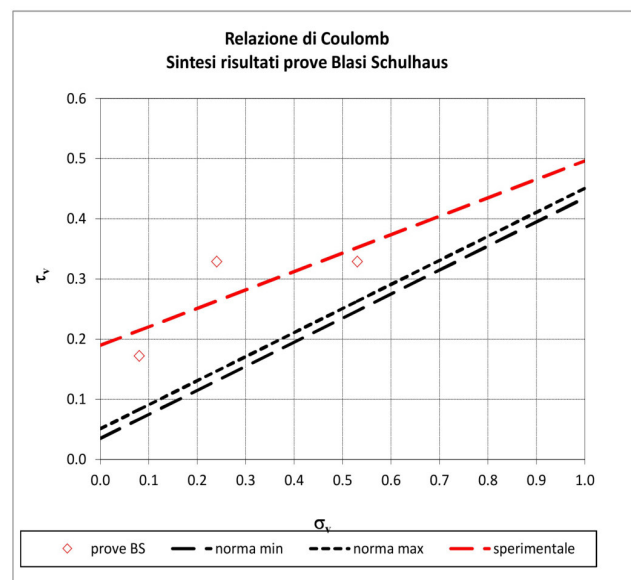


Figura 11. Blasi Schulhaus (BS) a Basilea (Svizzera): relazione di Coulomb.

Per le prove BS l'interpolazione dei valori ottenuti dalle 3 prove FJ-SCT effettuate è riportata nel diagramma di Fig. 11 ed ha fornito i seguenti valori:

$$\tau_{v0} = 0.1898 \text{ MPa}$$

$$\tan \phi = 0.30$$

Nel caso di CC le prove effettuate hanno avuto lo scopo di valutare gli effetti degli interventi di consolidamento confrontando le caratteristiche meccaniche delle murature non consolidate con quelle delle murature consolidate. Per questo, anche tenendo conto della notevole disomogeneità di questo edificio, possono essere ritenuti significativi i soli dati riferiti a 2 prove FJ-SCT. Nella Fig. 12 vengono riportati i risultati ottenuti nel caso CC che risultano sostanzialmente in linea con il range definito dalle tabelle della norma.

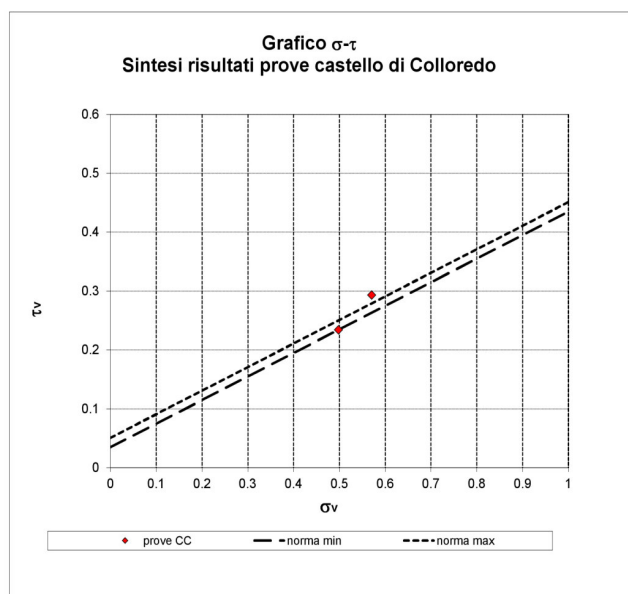


Figura 12. Castello Colloredo - Sintesi risultati prove

6 CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI

È stata descritta la sperimentazione, in sito e di laboratorio per la taratura della nuova tecnica di prova a taglio-comprensione denominata FJ-SCT e la successiva applicazione a 2 casi in sito.

La campagna di calibrazione realizzata ha dimostrato:

- che la tecnica FJ-SCT risulta affidabile, le procedure messe a punto efficienti ed efficaci ed i risultati ripetibili ed in linea con quanto determinato applicando altre tipologie di prova;
- che la tecnica FJ-SCT, pur risultando leggermente distruttiva, comporta un danneggiamento della muratura contenuto e giustificato dall'utilità dei risultati ottenuti.

Sono stati analizzati inoltre i dati ottenuti dall'esecuzione di prove realizzate con tecnica FJ-SCT nell'ambito di campagne diagnostiche propedeutiche alla valutazione di vulnerabilità sismica di edifici rilevanti in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso, quali la Blasi Schulhaus a Basilea (Svizzera) ed il castello di Colloredo. Essi presentavano murature in pietra di grandi spessori e le prove effettuate hanno consentito di valutare che, inserendo due martinetti piatti collegati in parallelo, l'esecuzione della tecnica FJ-SCT è fattibile anche su murature di spessore superiore ai 50 cm.

In sito è stata in genere riscontrata una notevole disomogeneità delle caratteristiche meccaniche delle murature; poiché il campione non è risultato in qualche caso abbastanza numeroso, per rendere significativa l'interpolazione i dati sono stati elaborati confrontandoli con il range di valori di riferimento tabellari.

Si specificano infine alcune raccomandazioni messe in evidenza dalle prove effettuate:

- la prova riveste comunque un seppur limitato carattere di distruttività, per cui occorre che i punti di prova siano attentamente valutati sia dal punto di vista conservativo che dal punto di vista strutturale in modo da non provocare danni all'edificio;
- il ripristino dei punti di prova è un'operazione semplice ma importante e deve essere effettuato accuratamente dopo l'esecuzione della prova, operando con tecniche di cucì-scuci o iniezione;
- la prova è molto sensibile alle modalità di determinazione del carico verticale; se esso viene effettuato eseguendo una prova con martinetto piatto, il punto di prova

deve essere scelto sulla base di considerazioni strutturali in un punto in condizioni staticamente del tutto simili a quello di esecuzione delle prove di taglio.

Come previsto peraltro dal DPCM 09/02/2011 i risultati puntuali devono poi essere estesi con l'applicazione estensiva di prove non distruttive; in particolare nei casi in studio sono state utilizzate misure della velocità di propagazione degli impulsi sonici.

RINGRAZIAMENTI

Un sincero ringraziamento a tutti i progettisti che ci hanno richiesto di effettuare le prove in sito descritte nel presente articolo consentendoci di ottenere i dati necessari per le elaborazioni riportate, ed in particolare a:

- ing. Antonio Stringhini per le prove di taratura sulla villa La Bertusa a Rovereto;
- arch. Alberto Mazzoni, geom. Giorgio Badodi e geom. Olver Zaccanti per le prove di taratura sulla villa Bonasi Benucci a Stufione;
- prof. ing. Lorenzo Jurina per le prove sulla Blasi Schulhaus a Basilea;
- prof. ing. Claudio Modena per le prove al castello di Colloredo.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografia

- Borri A., Corradi M., Vignoli A., 2001. Il problema della valutazione della resistenza al taglio della muratura mediante prove sperimentali, *10° congresso nazionale "L'ingegneria sismica in Italia"*, Potenza-Matera.
- Foppoli D., 2016. Inspections and NDT for the Characterization of Historical Buildings after Seismic Events: 2012 Emilia Earthquake, *Atti della 10th International Conference Structural Analysis for Historical Constructions (SAHC 2016)*, Leuven.
- Foppoli D., Pulcini A., 2016. A New Method to Test Masonry Shear Characteristics Thought Flat Jack (FJ-SCT Method), *Atti del 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016)*, Monaco.
- Mastrodicasa S., 1993. Dissesti statici delle strutture edilizie, ed. Hoepli, Milano.
- Milosevic J., Gago A., Lopès M., Bento R., 2013. *Experimental assessment of shear strength parameters on rubble stone masonry specimens*, *Construction and Building Materials*, n. 47: pp. 1372-1380.
- Sheppard P.F., 1985. In situ test of the shear strength and deformability of an 18th century stone and brick masonry wall, *7th int. brick masonry conference*, Melbourne.
- Norme e Standard
- ASTM C 1196-09 Standard test method for in situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flatjack measurements.
- ASTM C 1197-09 Standard test method for in situ measurement of deformability properties using the flatjack method.

ASTM E519 / E519M-10 Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages.
D.M. 14/1/2008, Norme tecniche per le costruzioni.
D.P.C.M. 9/2/2011, Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale.
RILEM TC 127 MS-B.4 determination of shear strength index for masonr unit/mortar junction, Matherials and structures Vol 29 Oct 1996, pp 459-469.
RILEM TC 127 MS-D.6, In situ measurement of masonry bed joint shear strength Matherials and structures Vol 29 Oct 1996, pp 470-475.
EN 1052-3:2002 Methods of Test for Masonry-par.3: determination of initial shear strength.