CIRI EDILIZIA E COSTRUZIONI
CENTRO INTERDIPARTIMENTALE DI RICERCA INDUSTRIALE
ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

PROT. n. 409 del 08/07/2016

CONVENZIONE DI RICERCA CON

REGIONE EMILIA ROMAGNA
Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli

"Realizzazione di indagini sperimentali in situ su pareti di edifici in muratura nei comuni dell'Emilia colpiti dal Sisma del 2012"

CODICE: CUP E49G13000640001; CIG 5424660B09

Relazione riassuntiva e indicazioni tecnico-operative

Collaboratori
Prof. Ing. Claudio Mazzotti
Prof. Ing. Barbara Ferracuti
Ing. Francesca Ferretti
Ing. Anna Rosa Tilocca

Direttore
Prof. Ing. Marco Savoia

CIRI - EDILIZIA E COSTRUZIONI
ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
Via del Lazzaretto, 15/5 - 40131 - BOLOGNA - ITALIA
C.F. 80007010376 – P.I. 01131710376

Responsabile Scientifico
Prof. Ing. Marco Savoia

INDICE

1 PREMESSA 5
2 PROVE MECCANICHE NON DISTRUTTIVE O SEMI-DISTRUTTIVE 5
2.1 Indagini visive e/o saggi demolitivi 6
2.2 Prove soniche 6
2.3 Prelievo di campioni di muratura per esecuzione di prove di laboratorio 7
2.4 Prove di resistenza dei materiali 8
2.4.1 Doppio punzonamento su letto di malta 8
2.4.2 Resistenza a compressione dei mattoni 8
2.5 Prove semi-distruttive per la valutazione della resistenza della muratura 9
2.5.1 Martinetti piatti singoli e doppi 9
2.5.2 Prove di scorrimento su giunto di malta 10
2.5.3 Prove di compressione diametrale su carote con giunto orizzontale 12
2.5.4 Prove di compressione diametrale su carote con giunto inclinato 13
2.5.5 Prova di compressione su blocco di muratura 14
3 PROVE DISTRUTTIVE 15
3.1 Prova di Compressione diagonale "CD". 15
3.1.1 Interpretazione della prova 16
3.2 Prova di Taglio-Compressione "NT" 17
3.2.1 Prova NT in configurazione "Tipo A" 17
3.2.2 Prova NT in configurazione "Tipo B" 19
3.2.3 Interpretazione della prova 20
4 DESCRIZIONE DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE CONDOTTA SU EDIFICI IN MURATURA DELL'AREA EMILIANA 21
5 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA AL TAGLIO 24
5.1 Sintesi dei risultati ottenuti 24
5.2 Indicazioni operative 26
6 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE DELLE MURATURE. 30
6.1 Sintesi dei risultati ottenuti 30
6.2 Indicazioni operative 31
7 PARAMETRI DI RESISTENZA PER MURATURE DI EDIFICI RURALI 32
8 CONCLUSIONI 33
9 BIBLIOGRAFIA 39

1 Premessa

Nell'ambito delle procedure per la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici esistenti in muratura, uno degli aspetti chiave è rappresentato dalla determinazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti gli elementi strutturali. L'estensione delle indagini sulla costruzione e la qualità delle informazioni raccolte sui parametri meccanici, infatti, determinano l'utilizzo di fattori di confidenza più o meno severi nelle valutazioni della sicurezza di tali edifici (secondo i dettami delle NTC 2008). I valori di resistenza ottenuti, inoltre, determinano ovviamente la capacità degli elementi strutturali (maschi murari, fasce di piano, etc). Se è vero che la attuale Circolare allegata alle Norme Tecniche per le Costruzioni indica degli intervalli di riferimento per le resistenze di paramenti murari di diverse tipologie, non c'è dubbio che la possibile varietà in termini di blocchi e di malte del costruito in Italia sia tale che tali intervalli dovrebbero essere utilizzati unicamente come riferimento nelle fasi di progettazione preliminari degli interventi, ma non possono condurre a valutazioni accurate della sicurezza sismica degli edifici.
Nel presente documento di sintesi si farà riferimento, in particolare, alla valutazione delle capacità meccaniche di murature esistenti appartenenti ad edifici rurali dell'area emiliana, quella pesantemente colpita dagli eventi sismici del maggio 2012. Su tali tipologie murarie, infatti, è stata condotta un'ampia campagna sperimentale, caratterizzata dall'esecuzione di prove non distruttive, semi-distruttive e distruttive, su edifici della Pianura Padana tra le province di Reggio Emilia, Modena e Ferrara. I risultati sono riportati in forma estesa nella Relazione *"Realizzazione di indagini sperimentali in situ su pareti di edifici in muratura nei comuni dell'Emilia colpiti dal Sisma del 2012"* (Prot.N. 638 del 13/11/2015).
Su indicazione della Committenza, il Servizio geologico, sismico e dei suoli della Regione Emilia Romagna, vengono qui proposte indicazioni sulle tipologie di indagini e sulle procedure che è possibile utilizzare per la valutazione delle proprietà meccaniche di murature di edifici rurali, in funzione del livello di conoscenza cercato. Nel seguito sono sinteticamente descritte le tipologie di prove maggiormente utilizzate, catalogate in relazione alla loro invasività e le procedure di valutazione delle capacità meccaniche.
Sono inoltre proposti intervalli di resistenza delle murature (per le verifiche a taglio e a compressione), ottenuti mediante analisi statistiche dei risultati ottenuti, che possono essere utilizzati dai progettisti, in sostituzione o a completamento dei valori indicati dalla Circolare nazionale, per una più accurata valutazione della sicurezza degli edifici in muratura tipiche delle zone della Pianura Padana colpita dal sisma del 2012 ed oggetto del presente studio.

2 Prove meccaniche non distruttive o semi-distruttive

La campagna sperimentale per la caratterizzazione delle murature di un edificio può essere articolata prevedendo diverse tipologie di prova, eseguite in situ e in laboratorio, volte ad ottenere una migliore conoscenza dei dettagli costruttivi, la caratterizzazione meccanica dei singoli componenti (mattoni/blocchi e malta), la resistenza a compressione e taglio e il modulo elastico longitudinale e tangenziale della muratura.
Le prove più indicate, tenendo in conto l'efficacia, una limitata invasività delle prove, ed i costi relativi, sono brevemente descritte nel seguito.

2.1 Indagini visive e/o saggi demolitivi

Le indagini visive e i saggi demolitivi consentono di acquisire informazioni sulla muratura necessarie anche per definire una corretta localizzazione delle prove.
In particolare è possibile valutare:

- la forma, la tipologia e le dimensioni degli elementi;
- la natura delle malte ed il loro stato di conservazione;
- la tessitura muraria e le caratteristiche costruttive (tessitura regolare o irregolare, con o senza collegamenti trasversali, ecc.);
- la presenza di eventuali disomogeneità all'interno del paramento murario (tamponature, vuoti, impianti, ecc);
- la qualità del collegamento tra pareti verticali e tra pareti verticali e solai.

2.2 Prove soniche

Le prove soniche rappresentano un metodo di indagine non distruttivo applicabile alle strutture murarie al fine di ottenere informazioni per la caratterizzazione e la descrizione qualitativa della muratura e della sua omogeneità. La tecnica di indagine si basa sulla generazione di onde elastiche in un punto della struttura, attraverso la percussione con apposito martello strumentato, e sulla ricezione in superficie delle onde mediante un accelerometro. L'elaborazione dei dati consiste nella misura del tempo di propagazione dell'onda, attraverso il mezzo, lungo un percorso predefinito e nella determinazione della conseguente velocità.
Le misure soniche sono tipicamente effettuate in modalità indiretta (o superficiale): le informazioni così ottenute sono limitate agli strati più esterni del paramento murario. Le misurazioni vengono effettuate su traiettorie inclinate rispetto ai letti orizzontali di malta, precedentemente stabilite e di lunghezza costante e pari a 2 m. Le posizioni dei punti di misura possono variare a seconda dello spazio disponibile nella parete, a patto che la traiettoria mantenga inclinazione e lunghezza costante, in modo da non variare le dimensioni del pacchetto murario attraversato. La strumentazione di prova viene posizionata ai due estremi delle traiettorie stabilite.
L'apparecchiatura per l'esecuzione della prova è costituita da un martello strumentato, dotato di sensore piezoelettrico per registrare l'impulso generato, e da un accelerometro che riceve l'onda prodotta dall'eccitazione. Entrambi i dispositivi sono collegati ad un amplificatore di segnale e ad un convertitore analogico-digitale per la visualizzazione e registrazione dei dati su un computer portatile (Figura 1). Dal segnale opportunamente amplificato si misura l'intervallo di tempo intercorso tra l'istante di emissione dell'impulso e quello di ricezione della risposta in termini di accelerazione.

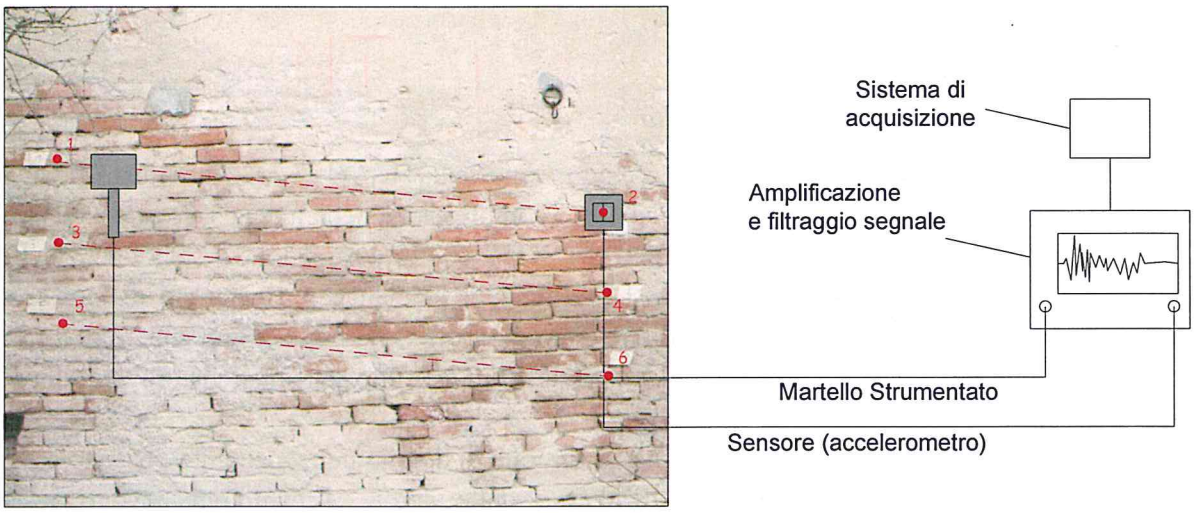


Figura 1. Configurazione prove soniche.

2.3 Prelievo di campioni di muratura per esecuzione di prove di laboratorio

I provini da estrarre, costituiti da carote e mattoni, devono essere individuati in modo tale da offrire una caratterizzazione significativa degli stessi, al fine di valutarne la resistenza attraverso prove di laboratorio.

L'operazione di prelievo delle carote (Figura 2) avviene attraverso l'impiego di una carotatrice con sistema di lubrificazione ad acqua, fissata orizzontalmente sulla superficie della parete in modo da ottenere un asse di prelievo ortogonale alla stessa. Le carote da estrarre devono avere diametro di 100 mm ed essere caratterizzate dalla presenza di un giunto di malta centrato. In questo modo, dalle carote è normalmente possibile estrarre letti di malta e porzioni di mattone idonei alle prove meccaniche successive.

Alternativamente, il prelievo dei mattoni può essere fatto direttamente estraendoli direttamente dalla parete mediante mezzi meccanici adeguati.

Figura 2. Prelievo di carote.

2.4 Prove di resistenza dei materiali

2.4.1 Doppio punzonamento su letto di malta

La prova di doppio punzonamento, secondo il metodo proposto da Henzel e Karl denominato "Double punch test" [1], permette di determinare la resistenza a compressione della malta. Tale prova consiste nel testare prismi di malta di piccole dimensioni (tipicamente 40×40×*s* mm, dove *s*=spessore del letto) applicando un carico di compressione tramite due punzoni di diametro 20 mm. Il diametro dei punzoni di compressione non deve essere minore dello spessore della malta e non superiore a metà del lato del campione di malta. In Figura 3 viene presentato il corretto schema della prova di doppio punzonamento.
I provini di malta da sottoporre alla prova di compressione di doppio punzonamento possono essere ottenuti direttamente dai giunti presenti all'interno delle carote. I campioni devono essere opportunamente tagliati, in modo da ottenere provini di dimensioni adeguate, e rettificati per mezzo di due getti di gesso sulle superfici a contatto con la macchina di prova.
La resistenza a compressione viene calcolata dal rapporto tra il carico di compressione a rottura e l'area caricata, che corrisponde all'area di base del punzone. Il risultato di resistenza a compressione della malta dalla prova di doppio punzonamento dipende dalla qualità e dalla tipologia di malta testata, dalle dimensioni dei punzoni e dall'effetto di confinamento, come riportato da Sassoni e Mazzotti in "Assessment of masonry mortar compressive strenght by double punch test: the influence of mortar porosity" [2].

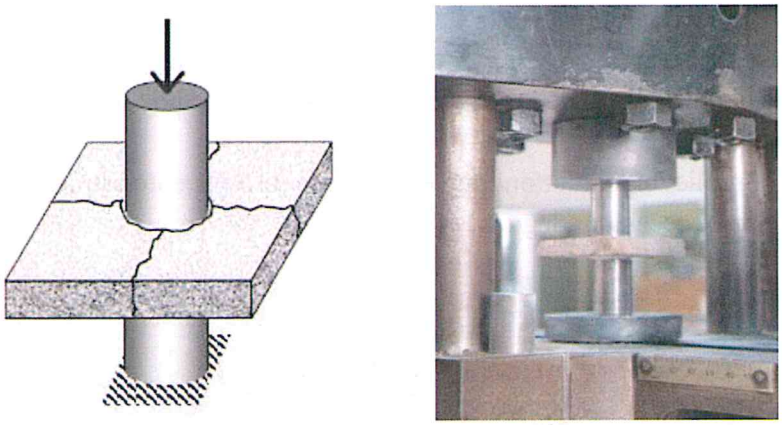


Figura 3. Schema di esecuzione della prova di compressione a doppio punzonamento.

2.4.2 Resistenza a compressione dei mattoni

La determinazione della resistenza a compressione dei mattoni viene eseguita in accordo alla vigente normativa UNI 772-1 [3], a cui fa riferimento l'Eurocodice 6 [4]. I campioni cilindrici, aventi diametro pari a circa 40 o 50 mm, sono ricavati attraverso carotaggi dai mattoni prelevati in situ. La scelta della dimensione del diametro viene fatta sulla base dell'altezza del mattone in modo da ottenere provini aventi un rapporto tra altezza e diametro H/D circa pari a 1. I campioni vengono rettificati e successivamente sottoposti a compressione lungo la direzione di compressione a cui sono

soggetti in situ (Figura 4). La resistenza a compressione di ciascun provino è ottenuta dividendo il carico massimo di rottura per la superficie caricata.

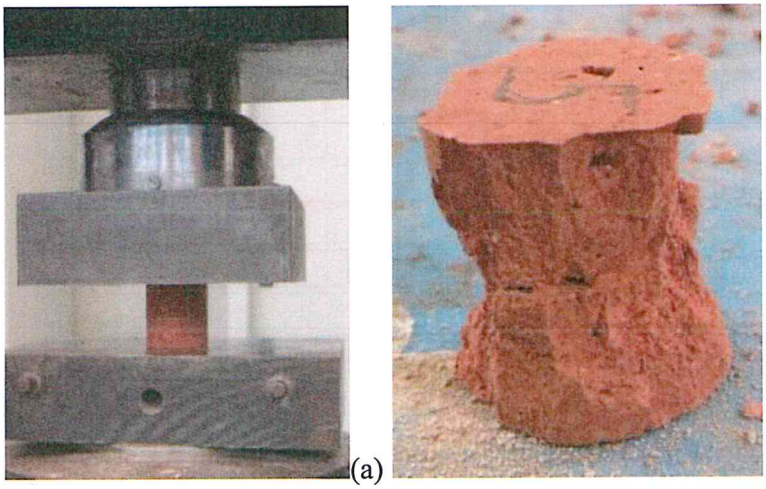


Figura 4. Prova di compressione dei laterizi: (a) setup di prova; (b) modalità di rottura.

2.5 Prove semi-distruttive per la valutazione della resistenza della muratura

2.5.1 Martinetti piatti singoli e doppi

Le prove con martinetto piatto singolo e con martinetti piatti doppi, eseguite in accordo con quanto riportato nella ASTM C1196-09 [5], nella ASTM C1197-09 [6] e nella ASTM D4729-08 [7], consentono di ottenere informazioni attendibili sulle principali caratteristiche meccaniche del paramento murario in termini di stato tensionale, deformabilità e resistenza.

La prova con martinetto piatto singolo permette di determinare lo stato di tensione agente nella muratura al di sopra dell'area in cui viene eseguito il taglio che ospita il martinetto piatto. La procedura di prova richiede, in primo luogo, il posizionamento di tre basi di misura e l'esecuzione di un taglio in corrispondenza di un giunto di malta per l'alloggiamento del martinetto. All'interno del martinetto viene generata una pressione tramite il collegamento ad una pompa idraulica. L'ipotesi su cui si basa tale tecnica è che la pressione necessaria per riportare la muratura alla configurazione indeformata iniziale precedente all'esecuzione del taglio (applicata tramite il martinetto piatto inserito nel taglio) corrisponda al valore di sollecitazione preesistente nella muratura. La grandezza di riferimento è la variazione di distanza tra le basi di misura. Ad ogni step di carico vengono misurate le relative distanze di riferimento. In Figura 5 è rappresentato il setup di prova.

La prova con martinetti piatti doppi permette invece di determinare il legame locale sforzo-deformazioni, dal quale ricavare il modulo elastico e, nel caso in cui si riesca ad arrivare alla rottura della porzione di muratura tra i due martinetti, la resistenza a compressione assiale della stessa. La procedura di prova richiede, in primo luogo, il posizionamento di tre basi di misura e l'esecuzione di n. 2 tagli orizzontali, ciascuno in prossimità di un giunto di malta per l'alloggiamento del martinetto corrispondente. Le basi di misura sono poste all'interno della porzione di muratura caricata dai martinetti. In entrambi i martinetti viene esercitata ugual pressione data dal loro collegamento in serie. Ad ogni step di carico sono misurate le relative distanze di riferimento. In Figura 6 è rappresentato il setup di prova.

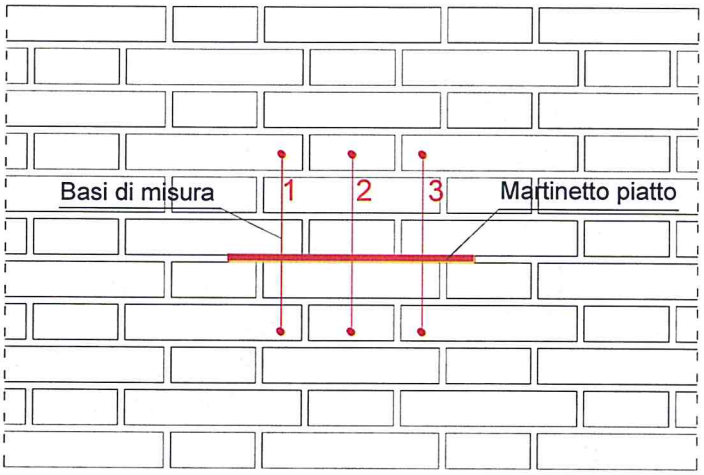


Figura 5: Schema della prova con martinetto singolo.

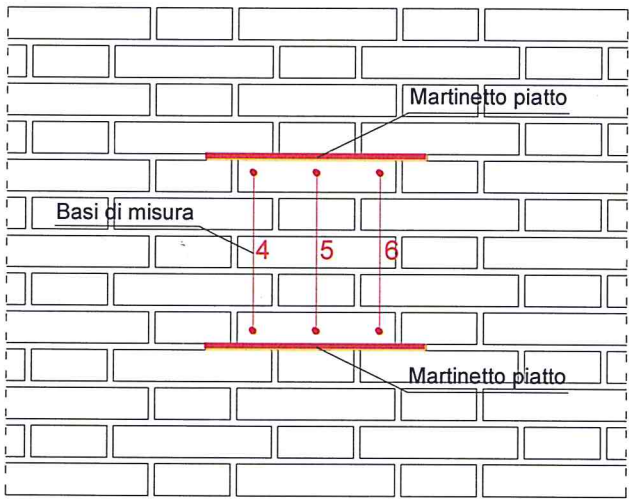


Figura 6: Schema della prova con martinetti doppi.

2.5.2 Prove di scorrimento su giunto di malta

La prova di scorrimento su giunto di malta, eseguita in accordo con le indicazioni contenute nello standard ASTM 1531-09 [8], consiste nella misura della forza necessaria a far scorrere orizzontalmente un mattone in laterizio rispetto alle file di mattoni sottostanti e soprastanti, producendo così la rottura dei corrispondenti giunti di malta orizzontali. In generale, questa tipologia di prova è in grado di fornire indicazioni attinenti alla resistenza a taglio della muratura provata. La preparazione del set-up di prova consiste nella rimozione dell'intonaco e di due mattoni, che precedono e seguono quello oggetto di prova. La forza di scorrimento viene generata mediante martinetto idraulico opportunamente collocato in una delle cavità realizzate. Per la valutazione degli spostamenti orizzontali, si posizionano due comparatori centesimali parallelamente alla direzione di spinta. Uno di essi fornisce lo spostamento relativo tra il mattone oggetto della prova e i corsi di mattoni superiori, l'altro lo spostamento relativo tra il mattone di contrasto, dietro al martinetto, e i corsi di mattoni superiori, come mostrato nel setup di prova di Figura 7. Questa seconda misura viene

presa nell'inusuale ipotesi che la crisi si manifesti in seguito allo scorrimento del mattone di contrasto invece che di quello oggetto di prova.
Per ogni prova viene calcolata la tensione tangenziale τ_i a partire dalla forza massima orizzontale esercita dal martinetto $F_{app,i}$ che ha portato allo scorrimento del giunto:

$$\tau_i = \frac{F_{app,i}}{A_i}$$

dove A_i è la somma dell'area dei giunti orizzontali superiore ed inferiore del mattone i-esimo considerato.
Parallelamente, occorre valutare la tensione verticale agente sul mattone oggetto di prova σ_i, attraverso analisi dei carichi o prove con martinetto singolo.

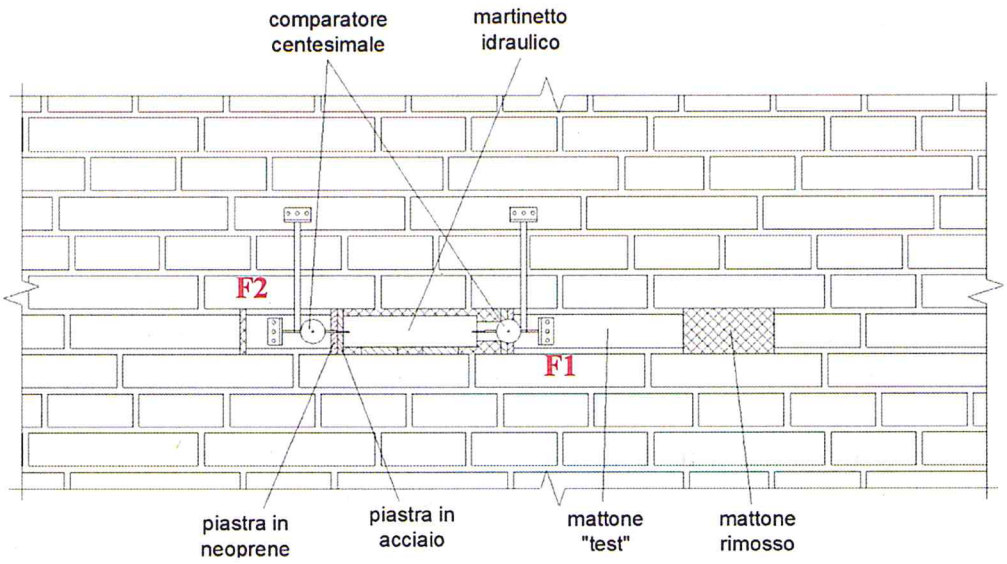


Figura 7. Prova di scorrimento su giunto di malta – Set-up sperimentale, schema.

A seguito dei risultati ottenuti dalle prove di scorrimento nella campagna sperimentale su murature di edifici rurali, si è osservato che le coppie di valori (σ_i ; τ_i) così determinate, si discostano molto dai risultati provenienti dalle prove di compressione di carote con giunto di malta inclinato e dalle prove distruttive. La forza massima, infatti, si registra in corrispondenza di valori di scorrimento tangenziale molto elevati e non compatibili con la natura fragile di questo tipo di prova. Per questo motivo, si ritiene opportuno considerare un valore di capacità ridotto, determinato per via grafica dalla curva Forza – Spostamento del mattone oggetto di prova (Figura 8). Il valore della forza di innesco dello scorrimento F_{scorr} corrisponde al punto in cui la curva devia dall'iniziale tratto pseudo-elastico, di cui idealmente si considera la tangente.

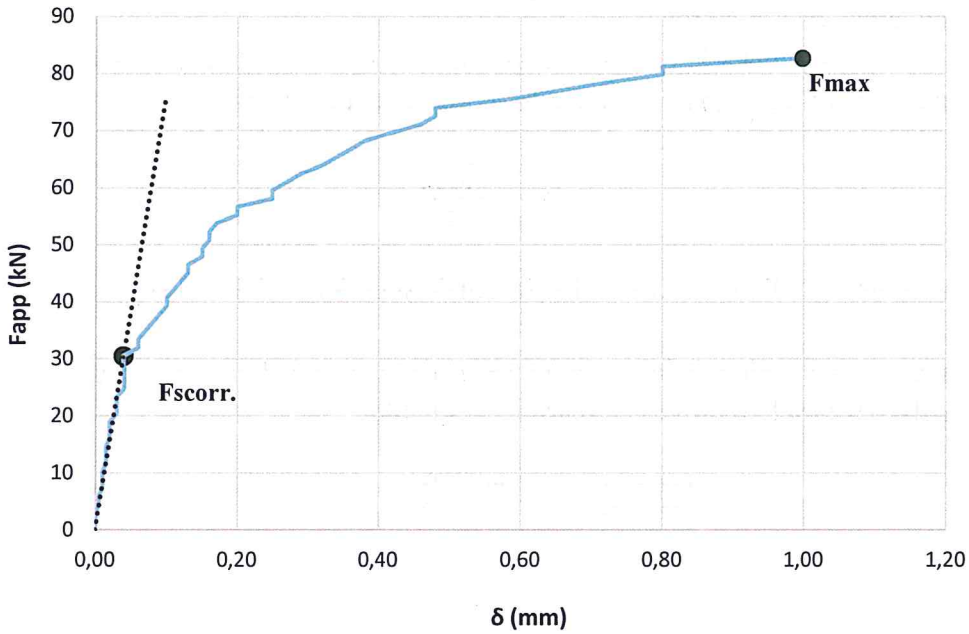


Figura 8. Metodo grafico per la valutazione della forza di innesco dello scorrimento.

2.5.3 Prove di compressione diametrale su carote con giunto orizzontale

Secondo il metodo proposto da Sassoni, Mazzotti e Pagliai in "Comparison between experimental methods for evaluating the compressive strength of existing masonry buildings" [9], è possibile valutare la resistenza a compressione della muratura attraverso prove di compressione su carote con giunto orizzontale, aventi diametro di circa 100 mm e prelevate tramite un sistema di carotaggio meccanico rotativo con lubrificazione ad acqua, avendo cura di far risultare un letto di malta in posizione diametrale.

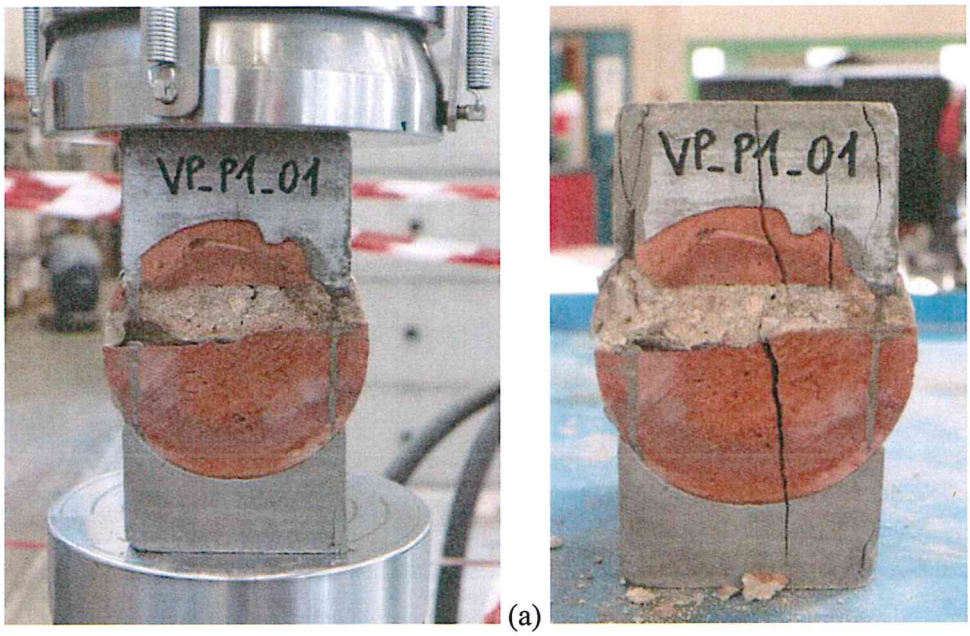
Per la preparazione dei provini vengono effettuati dei getti di malta ad alta resistenza superiormente e inferiormente alle carote con appositi casseri in modo tale che ogni getto abbia una larghezza di 8 cm e una lunghezza pari a quella della carota. Prima di effettuare la prova a compressione sulle carote (Figura 9), le superfici del getto vengono rettificate in modo da renderle il più possibile piane.

Il valore della resistenza a compressione delle carote $f_{c,core}$ viene calcolato dividendo il carico massimo misurato per l'area del giunto orizzontale di malta; il valore ottenuto viene successivamente ridotto in quanto la metodologia di prova sovrastima mediamente del 62% la resistenza a compressione della muratura f_m (per murature storiche e giunto di malta orizzontale, secondo le indicazioni riportate in [9]):

$$f_{c,core} = \frac{F_{\max}}{d \cdot l} \qquad f_m = \frac{f_{c,core}}{1.62}$$

dove:

- $f_{c,core}$: resistenza a compressione della carota;
- F_{max}: carico di rottura registrato durante la prova di compressione;
- d, l: diametro e lunghezza della carota, rispettivamente.



(a) (b)

Figura 9. Prova di compressione diametrale su carote con giunto orizzontale: (a) esecuzione della prova; (b) modalità di rottura.

2.5.4 Prove di compressione diametrale su carote con giunto inclinato

Le prove di compressione diametrale su carote con giunto inclinato vengono effettuate su provini di muratura del diametro di circa 100 mm e altezza generalmente pari al diametro. Si precisa che il giunto di malta deve essere centrato nel provino. Le carote vengono provate a compressione lungo una direzione diametrale avendo cura di posizionare il letto di malta secondo un prescritto angolo di inclinazione rispetto alla direzione di carico (Figura 10). Questo metodo prende spunto dal fatto che in una carota soggetta a splitting test con il giunto di malta ruotato rispetto all'orizzontale, si sviluppa uno stato tensionale misto di taglio – compressione che si assume uniforme sul giunto di malta. Considerando più angoli di inclinazione (45°,50°,55°) è possibile ricostruire per punti l'inviluppo a rottura della muratura sul piano di Mohr – Coulomb.
La tensione generata dal carico di compressione sulla superficie dello strato di malta si scompone in due contributi, che, alla rottura, sono calcolati come segue:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A} \cdot \cos\alpha \qquad \tau = \frac{F_{max}}{A} \cdot \sin\alpha$$

dove:
- σ: tensione di compressione sul giunto di malta a rottura;
- τ: tensione di taglio sul giunto di malta a rottura;
- F_{max}: carico di rottura registrato durante la prova;
- A: area del giunto di malta.

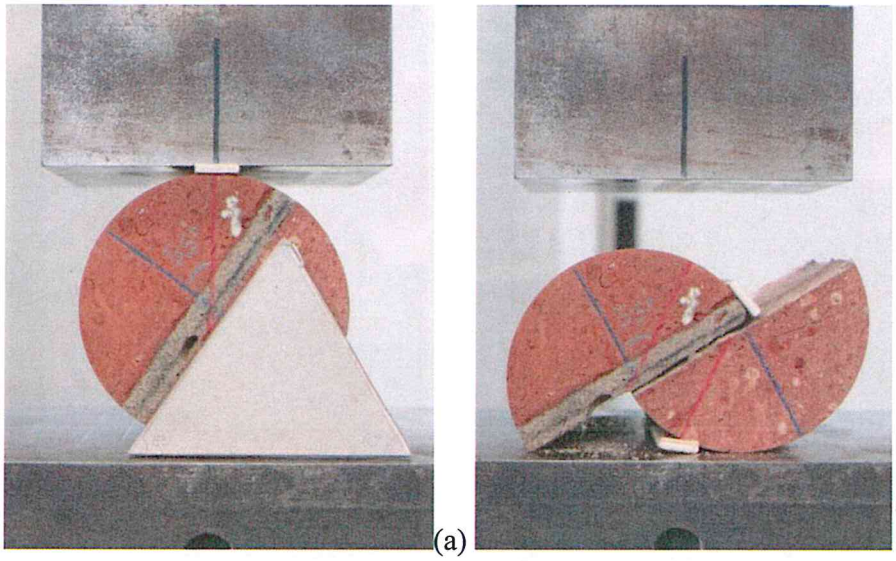


Figura 10. Prova di compressione diametrale su carote con giunto inclinato: (a) esecuzione della prova; (b) modalità di rottura per scorrimento.

2.5.5 Prova di compressione su blocco di muratura

La prova di compressione è condotta in laboratorio su un blocco di muratura estratto in sito.
Per l'esecuzione della prova (Figura 11), le superfici inferiore e superiore del blocco vengono rettificate per mezzo di un getto di malta cementizia ad alta resistenza. Su ciascuna faccia vengono disposti tre trasduttori di spostamento, in mezzeria e alle due estremità del provino, secondo il setup riportato in Figura 12.
Nota la forza massima e l'area delle superfici è possibile calcolare la resistenza media a compressione della muratura tramite la relazione:

$$f_m = \frac{F_{max}}{A}$$

dove:

- F_{max}: carico di rottura registrato durante la prova;
- A: area della superficie di contatto tra provino e piastra di carico.

Figura 11. Setup di prova.

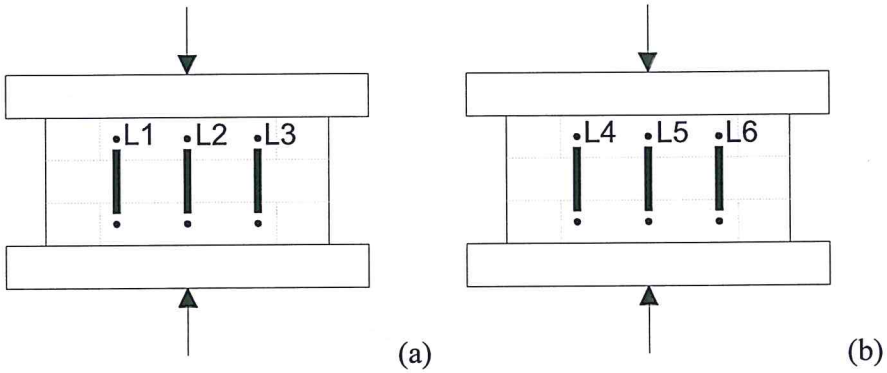


Figura 12. Setup di prova con disposizione dei trasduttori di spostamento: *(a)* Lato A; *(b)* Lato B.

3 *Prove distruttive*

Le prove di tipo distruttivo consentono di ottenere la resistenza dei pannelli murari nelle condizioni e dimensioni reali, ma per la loro invasività possono essere condotte solo in talune circostanze.
Le prove di tipo distruttivo sono condotte su pannelli murari in scala reale scelti, all'interno dell'edificio oggetto di indagine, tra i maschi murari maggiormente rappresentativi dello stato di fatto della muratura. Molte variabili intervengono nella scelta del pannello da sottoporre a prova, come la tessitura muraria, il carico verticale a cui è soggetta la parete stessa, lo stato di degrado ed eventuali quadri fessurativi presenti. È quindi molto importante procedere con una rimozione dell'intonaco su tutta l'area interessata dalla prova per assicurarsi che non vi siano notevoli disomogeneità, aperture tamponate o altre caratteristiche tali per cui non si riesca a ricavare il pannello murario delle dimensioni adatte o risulti non rappresentativo della tipica muratura dell'edificio indagato.
Le prove distruttive qui descritte (prova di compressione diagonale e prova di taglio-compressione) sono condotte al fine di indagare il comportamento e la resistenza a taglio delle murature.
Nonostante l'invasività sulla struttura e l'onerosità della messa in opera, il grande vantaggio di queste tipologie di prove è che permettono di misurare in maniera diretta le caratteristiche meccaniche della muratura e di valutare l'affidabilità dei metodi di indagine non distruttivi.

3.1 *Prova di Compressione diagonale "CD"*

La prova di compressione diagonale, in accordo allo standard ASTM E519-10 [10], è un metodo di prova distruttivo che consiste nell'applicare, su pannelli murari di forma quadrata aventi dimensioni 120 x 120 cm^2, un carico di compressione lungo una delle diagonali. Lo scopo della prova è quello di determinare la resistenza a taglio in assenza di sforzo normale e il modulo elastico di taglio della muratura investigata.
La preparazione del pannello avviene separandolo dal resto della muratura per mezzo di una sega circolare diamantata. Solamente il lato inferiore rimane ancorato per circa 70 cm. Il carico viene applicato per mezzo di un martinetto idraulico, posizionato, in corrispondenza di uno spigolo del pannello, tra una culla in contatto con la muratura e un profilo metallico, collegato, tramite due barre Diwidag, a un analogo elemento collocato all'angolo opposto del campione. Il sistema chiuso consente l'applicazione del carico lungo una diagonale.

Lungo le diagonali del pannello, su entrambi i lati, sono posizionati 4 potenziometri, per rilevare allungamenti e accorciamenti rispettivamente lungo la diagonale tesa e compressa. In Figura 13 è rappresentato il setup di prova.
Gli strumenti vengono collegati ad un amplificatore universale per segnali standard, connesso a sua volta ad un elaboratore fornito di software che consente l'acquisizione dei dati in continuo.

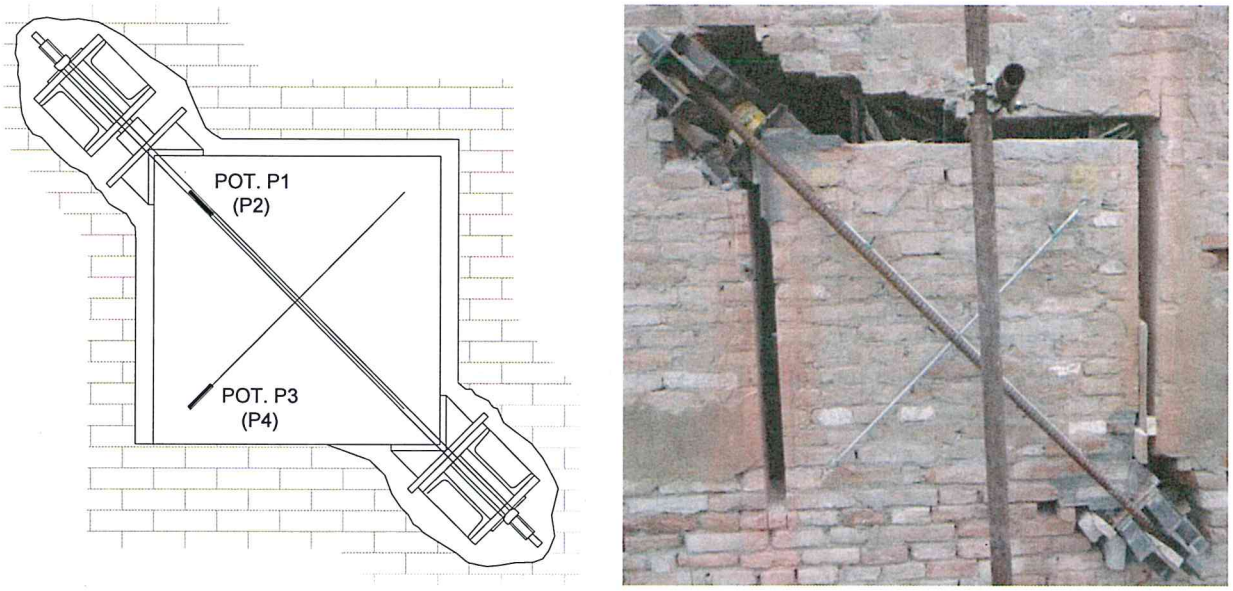


Figura 13. Setup della prova di compressione diagonale in situ.

3.1.1 Interpretazione della prova

Nell'interpretazione standard della prova di compressione diagonale [10], si assume che lo stato di sforzo al centro del pannello sia di taglio puro e che le direzioni principali di tensione coincidano con le diagonali del pannello (Figura 14).

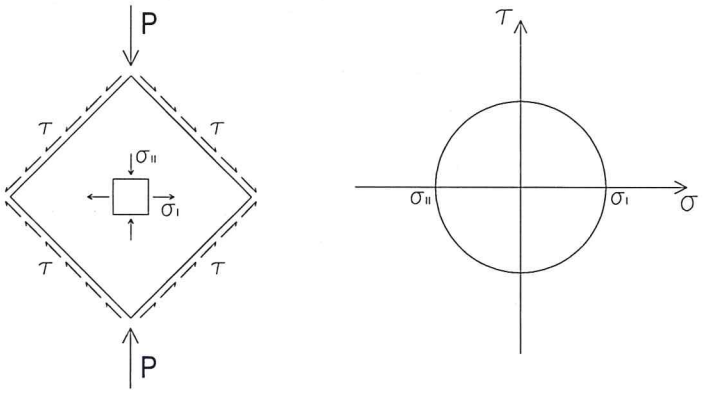


Figura 14. Stato di taglio puro.

La resistenza a taglio in assenza di sforzo normale può essere quindi calcolata attraverso la formula:

$$\tau_0 = 0.707 \frac{P_{max}}{A_n}$$

dove:

- P_{max} è il carico massimo ottenuto dalla prova;
- A_n è l'area netta del pannello, calcolata come: $A_n = \left(\frac{w+h}{2}\right) \cdot t$;
- w, h e t sono, rispettivamente, le dimensioni dei lati e lo spessore del pannello.

La valutazione della deformazione a taglio viene calcolata considerando le deformazioni lungo le diagonali del pannello:

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g}$$

dove:

- ΔV : accorciamento lungo la diagonale compressa;
- ΔH : allungamento lungo la diagonale tesa;
- g : base di misura del potenziometro.

Per la determinazione del modulo di taglio G, si può considerare il rapporto tra la tensione tangenziale in corrispondenza di 1/3 del carico massimo raggiunto durante la prova e la relativa deformazione angolare:

$$G = \frac{\tau_{1/3}}{\gamma_{1/3}}$$

3.2 *Prova di Taglio-Compressione "NT"*

La prova di taglio-compressione è una prova distruttiva che consiste nell'applicare, in maniera ciclica o monotona, uno sforzo di taglio ad un pannello rettangolare sottoposto ad uno stato di compressione costante. L'obiettivo di tale prova è di investigare il comportamento a taglio della muratura e di ottenere le tensioni normale e tangenziale (σ; τ) a rottura.
La prova di taglio-compressione può essere eseguita con due setup differenti, denominati "Tipo A" e "Tipo B" e descritti nel seguito.

3.2.1 Prova NT in configurazione "Tipo A"

Nella prova di taglio-compressione di tipo A, il pannello, di dimensioni 90 x 180 cm^2, viene separato dal resto della muratura tramite due tagli verticali e un taglio orizzontale in sommità, eseguiti per mezzo di una sega circolare diamantata. Il pannello rimane così ancorato alla muratura circostante solamente lungo il lato inferiore.
Il carico di compressione viene applicato per mezzo di due martinetti idraulici posizionati nella parte superiore del pannello tra due profili metallici, uno in contatto con la sezione del pannello, l'altro

connesso, per mezzo di barre filettate, a due profili a C fissati nella sezione d'incastro alla base del pannello stesso. Il livello di compressione imposto al pannello, tipicamente una frazione della stima della resistenza a compressione della muratura investigata, è mantenuto costante durante la prova.
Il carico di taglio viene applicato nella mezzeria del pannello per mezzo di un martinetto idraulico posizionato tra due profili metallici, uno agente come contrasto a contatto con la muratura, l'altro connesso, tramite barre metalliche, ad un altro elemento metallico posizionato in corrispondenza della mezzeria del pannello oggetto di prova.
Nel setup di prova, riportato in Figura 15, si utilizzano i seguenti strumenti:

- n. 2 martinetti idraulici per applicare lo sforzo normale;
- n. 1 martinetto idraulico per applicare lo sforzo di taglio;
- n. 8 potenziometri, posizionati lungo le diagonali dei semi-pannelli inferiore e superiore, su entrambi i lati, per la misura degli accorciamenti e degli allungamenti;
- n. 6 LVDT per la misura degli spostamenti orizzontali delle sezioni d'estremità e della mezzeria del pannello, su entrambi i lati;
- n. 1 cella di carico per la misura della reazione orizzontale in testa al pannello.

Gli strumenti vengono collegati ad un amplificatore universale per segnali standard, connesso a sua volta ad un elaboratore fornito di software che consente l'acquisizione dei dati in continuo.

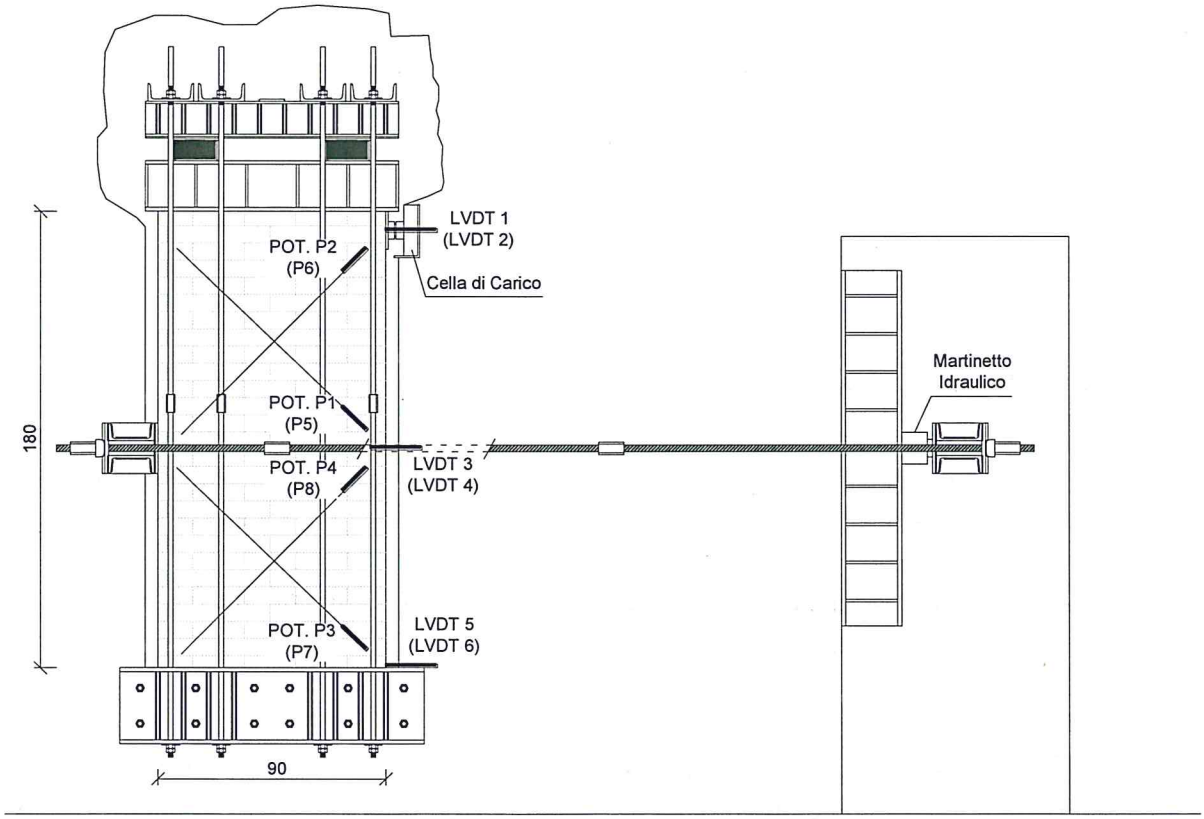


Figura 15. Setup della prova di taglio-compressione Tipo A.

3.2.2 Prova NT in configurazione "Tipo B"

Nella prova di taglio-compressione di tipo B, il pannello, di dimensioni 100 x 140 cm^2, viene separato dal resto della muratura tramite due tagli verticali, eseguiti per mezzo di una sega circolare diamantata. Il pannello rimane così ancorato alla muratura circostante lungo i lati inferiore e superiore ed è garantita la continuità del maschio murario in elevazione.
Il livello di compressione agente sul pannello è stimato attraverso un'accurata analisi dei carichi.
Il carico di taglio viene applicato nella mezzeria del pannello per mezzo di un martinetto idraulico posizionato tra due profili metallici, uno agente come contrasto a contatto con la muratura, l'altro connesso, tramite barre Diwidag, ad un altro elemento metallico posizionato in corrispondenza della mezzeria del pannello oggetto di prova.
Nel setup di prova, riportato in Figura 16, si utilizzano i seguenti strumenti:

- n. 1 martinetto idraulico per applicare lo sforzo di taglio;
- n. 8 potenziometri, posizionati lungo le diagonali dei semi-pannelli inferiore e superiore, su entrambi i lati, per la misura degli accorciamenti e degli allungamenti;
- n. 6 LVDT per la misura degli spostamenti orizzontali delle sezioni d'estremità e della mezzeria del pannello, su entrambi i lati.

Gli strumenti vengono collegati ad un amplificatore universale per segnali standard, connesso a sua volta ad un elaboratore fornito di software che consente l'acquisizione dei dati in continuo.

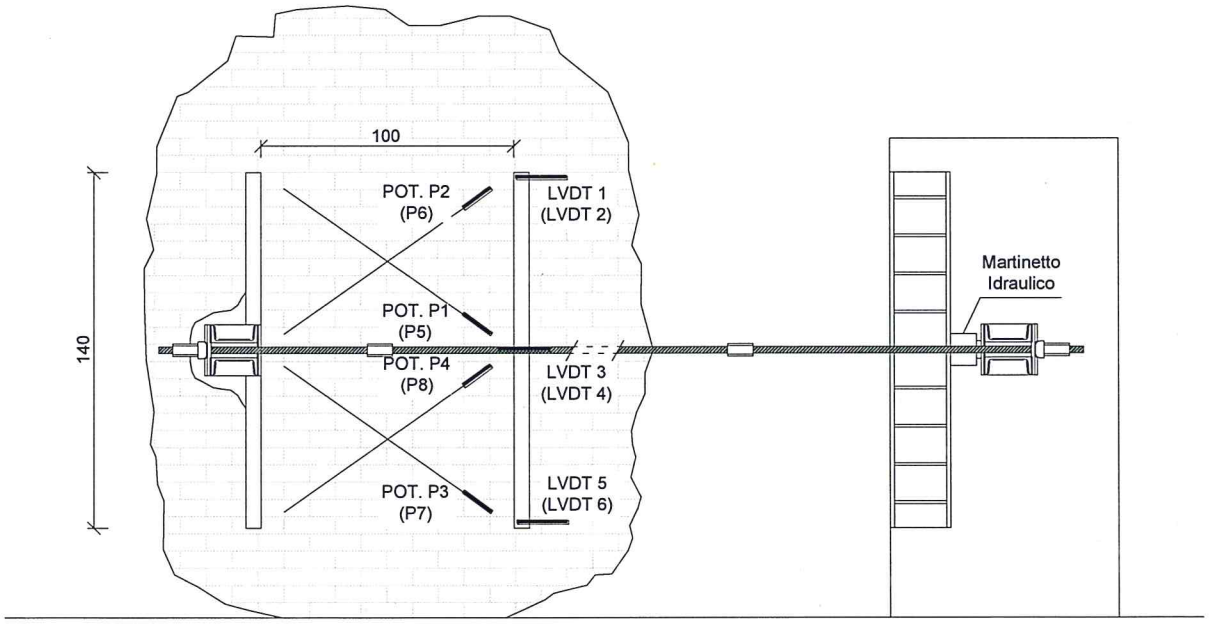


Figura 16. Setup della prova di taglio-compressione Tipo B.

3.2.3 Interpretazione della prova

Per l'interpretazione della prova di taglio-compressione e dei suoi risultati si considerano gli schemi statici riportati in Figura 17.

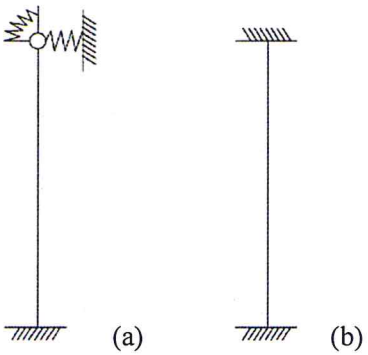


Figura 17. Schemi statici per la prova di taglio-compressione: (a) Tipo A; (b) Tipo B.

In particolare, per la prova di Tipo B si può assumere uno schema statico di incastro-incastro dovuto alla continuità del maschio murario in elevazione. In questo caso il comportamento dei semi-pannelli inferiore e superiore si può considerare simmetrico.
La tensione tangenziale, considerando lo schema statico ipotizzato, può essere così valutata:

$$\tau = \frac{T}{2A}$$

dove:
- T è il valore dello sforzo di taglio a rottura;
- A è l'area della sezione del pannello murario.

Nella prova di Tipo A, invece, l'individuazione del corretto schema statico è di più difficile comprensione: dal momento che il pannello risulta separato nella parte superiore lo schema si discosta dallo schema ideale di incastro-incastro. Mentre nella sezione di base, dove è mantenuta la continuità della muratura, è verosimile ipotizzare la presenza di un incastro, nella sezione in sommità la presenza della carpenteria e del carico applicato non sono sufficienti a costituire un vincolo di incastro. In questa sezione infatti possono avvenire traslazioni e rotazioni e può quindi essere corretto assumere la presenza di un vincolo cedevole.
In questo modo, il comportamento del pannello non è simmetrico e il semi-pannello inferiore, più rigido, tende ad assorbire la maggior parte del carico.
Lo stato tensionale nei semi-pannelli superiore e inferiore è così calcolato:

$$\tau_{sup} = \frac{R}{A}$$

$$\tau_{inf} = \frac{T-R}{A}$$

dove:
- T è lo sforzo di taglio applicato nella mezzeria del pannello;
- A è la sezione del pannello murario;
- R è la reazione orizzontale in sommità al pannello, registrata tramite la cella di carico.

Per entrambe le tipologie di prova, la deformazione angolare γ del semi-pannello è calcolata come rapporto tra lo spostamento orizzontale netto in mezzeria δ, ovvero depurato dallo spostamento registrato all'estremità, e l'altezza del semi-pannello *h:*

$$\gamma = \frac{\delta}{h}$$

Alla rottura, si calcolano la tensione verticale (σ) attraverso l'analisi dei carichi e la tensione tangenziale (τ) sulla sezione di mezzeria con le formule sopra riportate. I valori così ottenuti ($\sigma;\tau$) rappresentano un punto nel diagramma di Mohr-Coulomb.
È possibile determinare il modulo di taglio *G* per entrambi i semi-pannelli, considerando la seguente formula, in cui la tensione tangenziale e la deformazione angolare sono prese a 1/3 del carico massimo registrato durante la prova:

$$G = \frac{\tau_{1/3}}{\gamma_{1/3}}$$

Confrontando i setup delle due prove, è possibile osservare come per la prova di Tipo A sia presente un certo grado di incertezza nello schema statico da considerare. Questo può causare difficoltà nell'interpretazione dei risultati, anche in considerazione del fatto che, data la geometria più snella del pannello, si è osservato un comportamento prevalentemente flessionale durante le prove eseguite nella campagna sperimentale. Nella prova di Tipo B si ha, quindi, il vantaggio di avere uno schema statico più chiaro, che si può considerare simmetrico, e una geometria più tozza del pannello, che facilita la rottura a taglio con la comparsa di fessure lungo le diagonali compresse.

4 *Descrizione della campagna sperimentale condotta su edifici in muratura dell'area emiliana*

Nella campagna sperimentale presentata in dettaglio nella Relazione *"Realizzazione di indagini sperimentali in situ su pareti di edifici in muratura nei comuni dell'Emilia colpiti dal Sisma del 2012"* (Prot.N. 638 del 13/11/2015) sono stati investigati otto edifici rurali in muratura portante nel territorio della campagna emiliana. In Tabella 1 sono riportati gli indirizzi degli edifici e in Figura 18 è rappresentata la loro localizzazione rispetto agli epicentri degli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012. Tutti gli edifici, situati nelle province di Reggio Emilia, Modena e Ferrara, sono stati danneggiati notevolmente e sono stati considerati inagibili e in attesa di demolizione.
Il territorio emiliano, piuttosto omogeneo per quanto riguarda la geografia, il costruito e lo sviluppo socio-economico, presenta numerosi edifici isolati di campagna che ne compongono l'architettura rurale. Spesso si tratta di corti composte almeno da una struttura con destinazione d'uso di abitazione e da un edificio adibito a stalla-fienile, realizzati in adiacenza o separati. Le indagini sperimentali sono state svolte su entrambe le tipologie edilizie.
Gli edifici investigati presentano configurazioni semplici, con piante rettangolari e due o tre piani fuori terra. Le strutture portanti sono costituite da paramenti murari a due teste, in laterizio pieno e malta di calce, caratterizzati generalmente da un'adeguata connessione trasversale. Si riscontra spesso la presenza di malte di scarsa qualità, contenenti talvolta tracce di materiale argilloso e si registra, in alcuni casi, un elevato degrado superficiale della muratura, specialmente nelle pareti esterne esposte a Nord.

Le strutture orizzontali sono costituite da solai lignei a semplice o doppia orditura, con tavolato o pianelle, e da solai con voltine in laterizio. Le coperture, a due o quattro falde con doppia orditura di travi lignee, assito e coppi, si presentano in uno stato di elevato degrado e con porzioni crollate.
Le criticità e le modalità di collasso osservate consistono in principi di ribaltamento delle pareti, assenza di adeguati ammorsamenti fra pareti ortogonali e di efficaci collegamenti dei solai, quadri fessurativi dovuti a meccanismi di danno a taglio nel piano e collasso della copertura.

Edificio	Macroarea	Indirizzo
Edificio 1	Est Modenese	Via di Mezzo, 91 - Mirandola (MO)
Edificio 2	Est Modenese	Via di Mezzo, 91 - Mirandola (MO)
Edificio 3	Est Modenese	Via Roncaglio, 1 - San Prospero (MO)
Edificio 4	Ovest Modenese/ Reggiano	Via Moglia, 54 - Reggiolo (RE)
Edificio 5	Ovest Modenese/ Reggiano	Via Moglia, 64 - Reggiolo (RE)
Edificio 6	Ferrarese	Via Argine Po, 41 - Vigarano Pieve (FE)
Edificio 7	Ovest Modenese/ Reggiano	SS. Romana Nord, 136 - Fossoli di Carpi (MO)
Edificio 8	Ferrarese	Via Argine Po, 51 - Vigarano Pieve (FE)

Tabella 1. Denominazione e localizzazione degli edifici investigati.

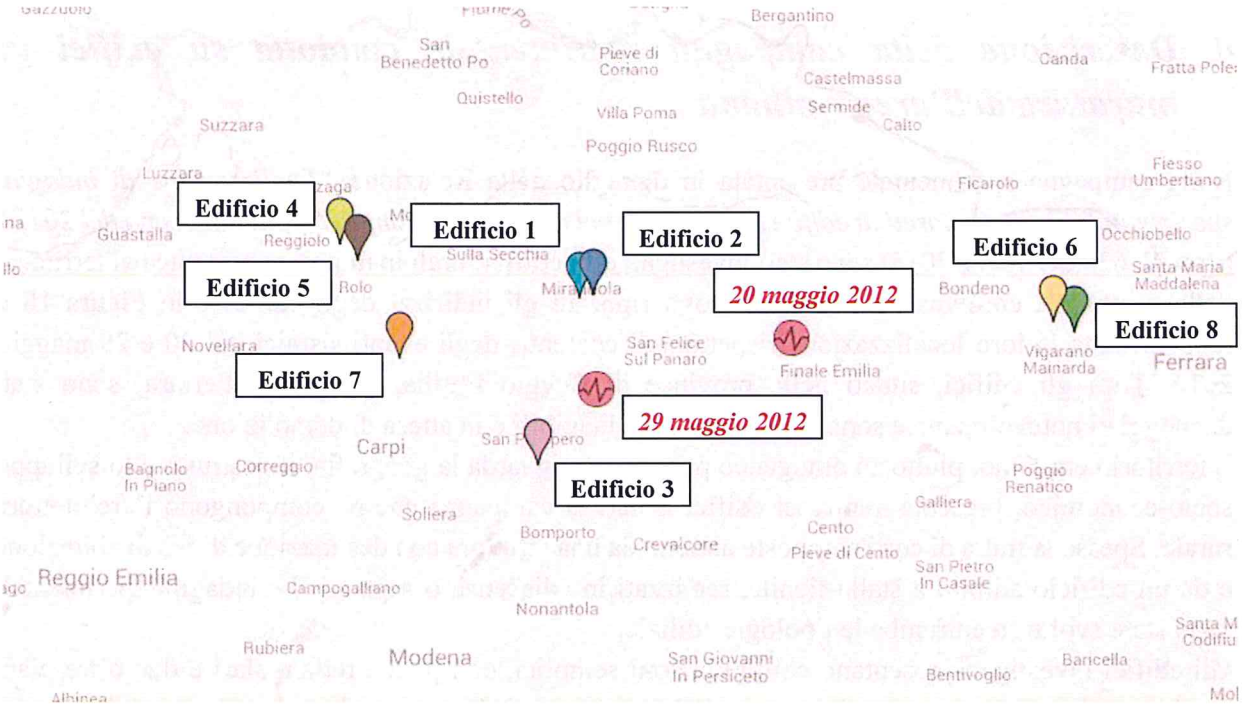


Figura 18. Localizzazione degli edifici investigati rispetto agli epicentri degli eventi sismici del maggio 2012.

La campagna sperimentale, i cui risultati sono sinteticamente riportati nel seguito, si è incentrata sull'esecuzione di indagini non distruttive, semi-distruttive e distruttive in situ per la caratterizzazione della muratura. Le attività svolte sono state articolate, quando reso possibile dalla geometria e dallo stato di conservazione dell'edificio, secondo le tipologie di prova presentate nei paragrafi precedenti. In Tabella 2 si riporta la numerosità delle prove in-situ non distruttive e semi-distruttive e delle prove di laboratorio eseguite. In Tabella 3 si riporta la numerosità delle prove distruttive.

Edificio	Prove Soniche	Prove di Scorrimento	Prove laterizi	Prove malte	Prove Carote		Prelievo Blocco	Martinetti
					Giunto inclinato	Giunto Orizz.		
Ed. 1	6	5	61	38	25	-	1	-
Ed. 2	4	2	84	27	14	-	-	-
Ed. 3	2	7	108	22	21	-	-	-
Ed. 4	3	5	40	35	34	-	1	-
Ed. 5	4	6	60	28	19	-	-	-
Ed. 6	-	6	72	34	13	6	-	1
Ed. 7	4	9	70	33	8	-	-	1
Ed. 8	4	6	99	42	12	4	1	-
Totale	**27**	**46**	**594**	**259**	**146**	**10**	**3**	**2**

Tabella 2. Numerosità delle prove semi-distruttive.

	Prove distruttive su muratura non rinforzata		Prove CD su muratura rinforzata	
Edificio	**Prova CD**	**Prova NT**		
Edificio 1	1	1	-	
Edificio 2	1	1	2	
Edificio 3	1	1	-	
Edificio 4	1	1	-	
Edificio 5	1	1	-	
Edificio 6	1	1	-	
Edificio 7	1	1		
Edificio 8	1	1		
Totale	**8**	**8**	**2**	**18**

Tabella 3. Numerosità delle prove distruttive.

5 Determinazione della resistenza al taglio

5.1 Sintesi dei risultati ottenuti

La resistenza a taglio delle murature investigate è stata valutata secondo il modello di Mohr-Coulomb:

$$\tau = \tau_0 + \mu\sigma_v,$$

dove σ_v, τ_0 e μ sono la tensione verticale, la tensione tangenziale resistente in assenza di tensione normale e il coefficiente di attrito, rispettivamente.
Per la determinazione dell'inviluppo di rottura lineare per ciascuno degli 8 edifici investigati, si sono considerati i risultati delle prove semi-distruttive, quali prove di compressione su carote con giunto inclinato e prove di scorrimento su giunto di malta. I valori medi dei parametri τ_0 e μ per i singoli edifici, calcolati considerando distribuzioni lognormali per entrambi i parametri, sono riportati in Tabella 4 (si veda la relazione completa per i dettagli).

	τ_0	μ
EDIFICIO 1	0.118	0.870
EDIFICIO 2	0.107	0.906
EDIFICIO 3	0.204	0.897
EDIFICIO 4	0.225	0.867
EDIFICIO 5	0.264	0.713
EDIFICIO 6	0.054	0.801
EDIFICIO 7	0.165	0.794
EDIFICIO 8	0.058	0.875
Valore Medio	**0.155**	**0.841**

Tabella 4. Valori di τ_0 e μ medi e per i singoli edifici.

Al fine di indicare un range di valori per la resistenza al taglio in assenza di sforzo normale e per il coefficiente di attrito, sono stati calcolati gli intervalli di confidenza per i valori medi delle distribuzioni al 95% (Tabella 5 e Tabella 6).

PROVE MECCANICHE SEMI-DISTRUTTIVE Intervallo di Confidenza - τ_0 [MPa]		
Limite Inferiore	**Valor Medio**	Limite Superiore
0.086	**0.155**	0.196

Tabella 5. Prove meccaniche semi-distruttive: intervallo di confidenza al 95% sul valor medio di τ_0.

PROVE MECCANICHE SEMI-DISTRUTTIVE Intervallo di Confidenza - μ[MPa]		
Limite Inferiore	**Valor Medio**	Limite Superiore
0.792	**0.841**	0.886

Tabella 6. Prove meccaniche semi-distruttive: intervallo di confidenza al 95% sul valor medio di μ.

Dai risultati delle prove distruttive di compressione diagonale si sono ottenuti ulteriori valori di τ_0, mentre dai risultati delle prove di taglio-compressione sono stati calcolati valori equivalenti di τ_0 imponendo il passaggio dell'inviluppo di rottura lineare, avente pendenza fissata e pari al valor medio riportato in Tabella 6, per i punti (σ, τ) corrispondenti alla crisi registrata nelle prove. Considerando una distribuzione lognormale dei valori di τ_0 ottenuti, si è quindi ricavato il valor medio della resistenza al taglio in assenza di sforzo normale dalle prove distruttive e il relativo intervallo di confidenza al 95% (Tabella 7).

PROVE DISTRUTTIVE Intervallo di Confidenza - τ_0 [MPa]		
Limite Inferiore	**Valor Medio**	Limite Superiore
0.058	**0.127**	0.142

Tabella 7. Prove distruttive: intervallo di confidenza al 95% sul valor medio di τ_0.

Analizzate le distribuzioni statistiche del valore medio di τ_0 ottenute dalle prove meccaniche semi-distruttive e dalle prove distruttive (Tabella 8), si può osservare come queste ultime forniscano un valore medio ridotto del 18% rispetto a quanto ottenuto dalle prove semi-distruttive. Il rapporto tra i due valori risulta infatti pari a

$$\tau_{0,D} / \tau_{0,SD} = 0.82$$

Tale valore può essere considerato un fattore di conversione che consente di passare dalla resistenza a taglio ($\tau_{0,SD}$) ottenuta da indagini non distruttive o semi-distruttive a quella che invece caratterizza il pannello di dimensioni reali ($\tau_{0,D}$), da utilizzarsi quindi nelle verifiche di sicurezza degli edifici.

Intervalli di Confidenza - τ_0 [MPa]			
	Limite Inferiore	**Valor Medio**	Limite Superiore
PROVE SEMI-DISTRUTTIVE	0.086	**0.155**	0.196
PROVE DISTRUTTIVE	0.058	**0.127**	0.142

Tabella 8. Confronto tra gli intervalli di confidenza al 95% sul valor medio di τ_0.

5.2 Indicazioni operative

Per la valutazione dei parametri meccanici delle murature di edifici esistenti, l'approccio proposto dalla Normativa italiana (NTC2008 - [11], [12]) si basa sulla definizione di tre livelli di conoscenza (LC1, LC2, LC3) a seconda della tipologia e dell'estensione delle indagini effettuate sulla struttura in esame.
A partire dalle prescrizioni contenute nei paragrafi C8A.1.A.3 - 4 delle NTC2008, che prevedono che le Regioni possano dotarsi di database di risultati di indagini sperimentali dai quali ottenere intervalli dei parametri di resistenza per le murature tipiche di certe zone, si riportano di seguito alcune indicazioni operative per la determinazione della resistenza a taglio, che si ritiene possano essere utili ai professionisti incaricati delle valutazioni di vulnerabilità sismica di edifici rurali in muratura della zona dell'Emilia Romagna investita dal sisma del 2012.
Tali indicazioni sono riportate nella forma di integrazione rispetto a quanto previsto dalla Circolare alle Norme Tecniche per le Costruzioni, nell'ottica sopra indicata.

- <u>Livello di conoscenza LC1</u>
  Per acquisire il livello di conoscenza LC1, ovvero in assenza di prove meccaniche sui materiali, non si riportano indicazioni aggiuntive rispetto a quanto previsto dalla Normativa. Per i valori dei parametri meccanici si fa quindi riferimento alla Tabella 9 e Tabella 10, considerando i minimi degli intervalli per le resistenze e i valori medi degli intervalli per i moduli elastici (Tabella 11).

- <u>Livello di conoscenza LC2</u>
  Al fine di raggiungere il livello di conoscenza LC2 è opportuno che le indagini visive siano estese a tutta la costruzione e che le caratteristiche meccaniche siano determinate per ogni tipologia muraria presente. Per la valutazione della resistenza al taglio, si consiglia di eseguire prove di scorrimento su giunto di malta e prove di compressione su carote con giunto inclinato, al fine di determinare un inviluppo di rottura lineare, secondo il modello di Mohr-Coulomb.
  Considerando i risultati sperimentali ottenuti per murature emiliane di edifici rurali, la numerosità delle prove sopra citate potrà essere limitata. I risultati così ottenuti non sono sufficienti per valutazioni di tipo statistico, ma potranno essere utilizzati per stabilire se c'è una corrispondenza tra la tipologia muraria dell'edificio in esame e quella degli edifici investigati nella campagna sperimentale.
  In presenza di una chiara corrispondenza, sarà possibile utilizzare i valori riportati in Tabella 14 per quanto riguarda la resistenza media a taglio in assenza di sforzo nomale τ_0. La scelta sull'utilizzo del valore medio o del limite inferiore dell'intervallo proposto dovrà essere fatta considerando la qualità e lo stato di conservazione della muratura stessa, a giudizio del tecnico.
  Tali valori sono riferiti a murature in mattoni pieni e malta di calce, caratterizzate da malte di caratteristiche scarse, giunti non particolarmente sottili, paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata, tessitura a regola d'arte. L'intervallo di resistenza proposto è stato determinato applicando un coefficiente riduttivo ai risultati riportati al paragrafo 5.1 per le prove distruttive (Tabella 7). Le murature investigate nella campagna sperimentale, infatti,

erano caratterizzate mediamente da un'adeguata connessione trasversale e perciò si è ritenuto opportuno dividere i risultati ottenuti per il coefficiente 1.3 (Tabella 10).
Come valore per il coefficiente di attrito μ, invece, si raccomanda prudenzialmente l'utilizzo del valore riportato in Normativa ($\mu = 0.4$).
Nel caso non si riscontrasse una corrispondenza tra le tipologie murarie, restano valide le indicazioni riportate in Normativa (Tabella 9 - Tabella 10 - Tabella 11).

- Livello di conoscenza LC3

Per il raggiungimento del livello di conoscenza LC3 sono richieste prove distruttive da eseguire in situ o in laboratorio su elementi non disturbati prelevati dalle strutture dell'edificio.
Nell'impossibilità di condurre questo tipo di prove, i risultati sperimentali ottenuti per murature emiliane di edifici rurali consentono di limitare le indagini e di eseguire solo prove localmente distruttive per la determinazione della resistenza al taglio.
In particolare, sarà necessario svolgere almeno 2 prove di scorrimento su giunto di malta e alcune prove di compressione su carote con giunto inclinato (selezionando inclinazioni di: 45° - 50°-55°) per ogni tipo di muratura. Questa procedura è consigliata al fine di determinare un inviluppo di rottura lineare, secondo il modello di Mohr-Coulomb.
Per tenere conto del fatto che queste tipologie di prova, eseguite su porzioni di muratura ridotte e più localizzate, forniscono generalmente valori maggiori delle resistenze rispetto alle prove su campioni in vera grandezza, si consiglia di applicare un fattore correttivo ai valori medi di resistenza trovati. Nel caso delle murature emiliane di edifici rurali, si ritiene attendibile considerare resistenze ridotte del 20%.
Confrontando i risultati ottenuti con gli intervalli di resistenza proposti in Tabella 14, si consiglia di procedere come segue:

- Se il valore sperimentale è compreso nell'intervallo, considerare il risultato sperimentale;
- Se il valore sperimentale è minore dell'estremo inferiore dell'intervallo, considerare il risultato sperimentale;
- Se il valore sperimentale è maggiore dell'estremo superiore dell'intervallo, considerare il limite superiore dell'intervallo.

Nel caso vengano eseguite indagini di tipo distruttivo, restano valide le indicazioni riportate in Normativa (Tabella 9 - Tabella 10 - Tabella 11).

Tipologia di muratura	f_m (N/cm²)	τ_0 (N/cm²)	E (N/mm²)	G (N/mm²)	w (kN/m³)
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadrati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤ 40%)	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

Tabella 9. Valori di riferimento dei parametri meccanici per diverse tipologie di muratura (Tabella C8A.2.1 – NTC2008)

Tipologia di muratura	Malta buona	Giunti sottili (<10 mm)	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Nucleo scadente e/o ampio	Iniezione di miscele leganti	Intonaco armato *
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	-	1,3	1,5	0,9	2	2,5
Muratura a conci sbozzati, con paramen-to di limitato spessore e	1,4	1,2	1,2	1,5	0,8	1,7	2
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	-	1,1	1,3	0,8	1,5	1,5
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,5	1,5	-	1,5	0,9	1,7	2
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	1,2	-	1,2	0,7	1,2	1,2
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1,5	1,5	-	1,3	0,7	1,5	1,5

Tabella 10. Coefficienti correttivi dei parametri meccanici (Tabella C8A.2.2 – NTC2008).

Livello di Conoscenza	Geometria	Dettagli costruttivi	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Rilievo muratura, volte, solai, scale. Individuazione carichi gravanti su ogni elemento di parete Individuazione tipologia fondazioni. Rilievo eventuale quadro fessurativo e deformativo.	verifiche in situ limitate	Indagini in situ limitate Resistenza: valore minimo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1	Tutti	1.35
LC2		verifiche in situ estese ed esaustive	Indagini in situ estese Resistenza: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1		1.20
LC3			Indagini in situ esaustive -caso a) (disponibili 3 o più valori sperimentali di resistenza) Resistenza: media dei risultati delle prove Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1 -caso b) (disponibili 2 valori sperimentali di resistenza) Resistenza: se valore medio sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, valore medio dell'intervallo di Tabella C8A.2.1; se valore medio sperimentale maggiore di estremo superiore intervallo, quest'ultimo; se valore medio sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore medio sperimentale. Modulo elastico: come LC3 – caso a). -caso c) (disponibile 1 valore sperimentale di resistenza) Resistenza: se valore sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, oppure superiore, valore medio dell'intervallo; se valore sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore sperimentale. Modulo elastico: come LC3 – caso a).		1.00

Tabella 11. Definizione dei livelli di conoscenza per edifici in muratura (Tabella C8A.1.1 – NTC2008).

6 Determinazione della resistenza a compressione delle murature

6.1 Sintesi dei risultati ottenuti

La resistenza a compressione delle murature investigate è stata calcolata a partire dalle resistenze a compressione di malte e laterizi, secondo la formula riportata nell'Eurocodice 6 del 2002:

$$f_k = k \cdot f_{bN,M}^{\alpha} \cdot f_{dp,M}^{\beta}$$

dove:

$f_{bN,M}$ valor medio normalizzato della resistenza a compressione dei laterizi, calcolato considerando la formula: $f_{bN,M} = \zeta \cdot \delta \cdot f_{b,M}$, dove: ζ e δ sono il fattore di forma e di condizionamento dei provini, pari a 0.80 e 0.85, rispettivamente; $f_{b,M}$ è la resistenza media a compressione dei laterizi.

$f_{dp,M}$ valor medio della resistenza a compressione per doppio punzonamento delle malte.

K, α, β costanti di calibrazione assunte pari a 0.55, 0.7 e 0.3, rispettivamente.

I valori di resistenza a compressione f_k ottenuti per i singoli edifici vengono riportati in Tabella 12. Il valore medio è stato calcolato considerando una distribuzione lognormale.

	f_k (MPa)
EDIFICIO 1	3.83
EDIFICIO 2	5.64
EDIFICIO 3	5.50
EDIFICIO 4	4.88
EDIFICIO 5	6.48
EDIFICIO 6	4.58
EDIFICIO 7	5.79
EDIFICIO 8	4.39
Valore Medio	**5.15**

Tabella 12. Valore della resistenza a compressione f_k media e per i singoli edifici.

Al fine di indicare un intervallo di valori per la resistenza a compressione, a partire dalla distribuzione lognormale, si è calcolato l'intervallo di confidenza del valor medio al 95% (Tabella 13).

PROVE MECCANICHE SEMI-DISTRUTTIVE Intervallo di Confidenza – f_k [MPa]		
Limite Inferiore	**Valor Medio**	Limite Superiore
4.50	**5.15**	5.71

Tabella 13. Resistenza a compressione: intervallo di confidenza al 95% sul valor medio di f_k.

Dal confronto dei risultati ottenuti da prove di compressione su malte e laterizi e prove con martinetti piatti doppi, si ritiene che il valore di resistenza calcolato con la formula dell'EC6 rappresenti un valore medio e non caratteristico della resistenza a compressione della muratura. Pertanto, nel seguito, si farà riferimento a tale grandezza con il simbolo f_m.

6.2 Indicazioni operative

Per la valutazione dei parametri meccanici delle murature di edifici esistenti, l'approccio proposto dalla Normativa italiana (NTC2008) si basa sulla definizione di tre livelli di conoscenza (LC1, LC2, LC3) a seconda della tipologia e dell'estensione delle indagini effettuate sulla struttura in esame. A partire dalle prescrizioni contenute nei paragrafi C8A.1.A.3 - 4 delle NTC2008, si riportano di seguito alcune indicazioni operative per la determinazione della resistenza a compressione, che si ritiene possano essere utili ai tecnici incaricati delle valutazioni di vulnerabilità sismica di edifici rurali in muratura della zona dell'Emilia Romagna investita dal sisma del 2012.

- Livello di conoscenza LC1
  Per acquisire il livello di conoscenza LC1, ovvero in assenza di prove meccaniche sui materiali, non si riportano indicazioni aggiuntive rispetto a quanto riportato dalla Normativa. Per i valori dei parametri meccanici si fa quindi riferimento alla Tabella 9 e Tabella 10, considerando i minimi degli intervalli per le resistenze e i valori medi degli intervalli per i moduli elastici (Tabella 11).

- Livello di conoscenza LC2
  Al fine di raggiungere il livello di conoscenza LC2 è opportuno che le indagini visive siano estese a tutta la costruzione e che le caratteristiche meccaniche siano determinate per ogni tipologia muraria presente. Per la valutazione della resistenza a compressione, si consiglia di eseguire prove con martinetti piatti doppi, prove di compressione su carote con giunto orizzontale e prove di compressione su campioni di malta e laterizio.
  Considerando i risultati sperimentali ottenuti per murature emiliane di edifici rurali, la numerosità delle prove sopra citate potrà essere limitata. I risultati così ottenuti non sono sufficienti per valutazioni di tipo statistico, ma potranno essere utilizzati per stabilire se c'è una corrispondenza tra la tipologia muraria dell'edificio in esame e quella degli edifici investigati nella campagna sperimentale.
  In presenza di una chiara corrispondenza, sarà possibile utilizzare i valori riportati in Tabella 14 per quanto riguarda la resistenza media a compressione f_m. La scelta sull'utilizzo del valore medio o del limite inferiore dell'intervallo proposto dovrà essere fatta considerando la qualità e lo stato di conservazione della muratura stessa, a giudizio del tecnico.
  Tali valori sono riferiti a murature in mattoni pieni e malta di calce caratterizzate da malte di caratteristiche scarse, giunti non particolarmente sottili, paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata, tessitura a regola d'arte. L'intervallo di resistenza proposto è stato determinato applicando un coefficiente riduttivo ai risultati riportati al paragrafo 6.1 (Tabella 13). Le murature investigate durante la campagna sperimentale, infatti, erano caratterizzate mediamente da un'adeguata connessione trasversale e perciò si è ritenuto opportuno dividere i risultati ottenuti per il coefficiente 1.3 (Tabella 10). Per i motivi che saranno

descritti al paragrafo 8, in presenza di malte di pessima qualità si ritiene opportuno ridurre ulteriormente del 30% il valore del limite inferiore dell'intervallo.
Nel caso non si riscontrasse una corrispondenza tra le tipologie murarie, restano valide le indicazioni riportate in Normativa (Tabella 9 - Tabella 10 - Tabella 11).

- Livello di conoscenza LC3
  Per il raggiungimento del livello di conoscenza LC3 sono richieste prove distruttive da eseguire in situ o in laboratorio su elementi non disturbati prelevati dalle strutture dell'edificio.
  Nell'impossibilità di condurre questo tipo di prove, i risultati sperimentali ottenuti per murature emiliane di edifici rurali consentono di limitare le indagini e di eseguire solo prove localmente distruttive per la valutazione della resistenza a compressione. In particolare, sarà necessario svolgere almeno 1 prova con martinetti piatti doppi e 3 prove di compressione su carote con giunto orizzontale per ogni tipo di muratura.
  Confrontando i risultati ottenuti con gli intervalli di resistenza proposti in Tabella 14, si consiglia di procedere come segue:
  - Se il valore sperimentale è compreso nell'intervallo, considerare il risultato sperimentale;
  - Se il valore sperimentale è minore dell'estremo inferiore dell'intervallo, considerare il risultato sperimentale;
  - Se il valore sperimentale è maggiore dell'estremo superiore dell'intervallo, considerare il limite superiore dell'intervallo.

  Nel caso vengano eseguite indagini di tipo distruttivo, restano valide le indicazioni riportate in Normativa (Tabella 9 - Tabella 10 - Tabella 11).

7 *Parametri di resistenza per murature di edifici rurali*

In Tabella 14 si riportano infine gli intervalli di confidenza proposti per i valori medi della resistenza a taglio in assenza di sforzo normale e della resistenza a compressione, a partire dai risultati ottenuti nella campagna sperimentale su edifici rurali in muratura. Tali valori sono riferiti a murature in mattoni pieni e malta di calce caratterizzate da malte di caratteristiche scarse, giunti non particolarmente sottili, paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata, tessitura a regola d'arte. I coefficienti correttivi dei parametri meccanici possono essere applicati ai valori proposti nei casi previsti dalla Normativa (Tabella 10).

Tipologia di muratura		f_m (N/cm^2)	τ_0 (N/cm^2)
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	Limite inf.	346	4.5
	Valor medio	396	9.8
	Limite sup.	439	10.9

Tabella 14. Parametri di resistenza per murature di edifici rurali costituite da mattoni pieni e malta di calce.

8 Conclusioni

In Tabella 15 è riportato il confronto tra gli intervalli proposti per murature di edifici rurali e gli intervalli indicati dalla Normativa per edifici esistenti, considerando sia il caso di paramenti mal collegati che il caso di connessioni trasversali efficaci. Si noti come i valori ottenuti dalla presente campagna sperimentale risultino generalmente superiori, nonostante la qualità delle murature investigate fosse piuttosto scarsa. Nel caso della resistenza al taglio, fanno eccezione i limiti inferiori degli intervalli, che sono minori rispetto ai valori da Normativa.

Con riferimento alla resistenza a compressione, i risultati indicati sono da considerare con grande cautela. Si è osservato, infatti, negli edifici in cui sono state eseguite anche prove con martinetti piatti doppi, che la formula dell'EC6 utilizzata per il calcolo di f_m sovrastima significativamente la resistenza a compressione della muratura. L'approccio indiretto (formula dell'EC6) attribuisce alla resistenza del laterizio una importanza superiore rispetto alla resistenza della malta, che per la muratura considerata sembra esagerato e fuorviante. Per questo motivo nelle procedure operative si è suggerito di eseguire prove con martinetti piatti doppi rispetto a prove di compressione sui singoli componenti della muratura.
Con riferimento alla resistenza a taglio, per quanto riguarda il coefficiente di attrito (pendenza della retta inviluppo di rottura) si osserva che, rispetto al valore prescritto dalla Normativa, pari a 0.4, i risultati sperimentali forniscono un valore significativamente maggiore (0.841). Considerando che i risultati sperimentali non tengono conto di alcun fattore riduttivo, si raccomanda l'utilizzo del valore riportato in Normativa (appunto 0.4), che riduce in buona sostanza l'incremento di resistenza a taglio delle murature dovuto alla presenza di uno sforzo di compressione.

In conclusione, la procedura qui proposta per la valutazione delle proprietà meccaniche di edifici esistenti in muratura ricalca quella contenuta nelle NTC2008 con l'aggiunta sia di indicazioni in merito alla tipologia e alla numerosità di prove da eseguire sia di intervalli di riferimento dei parametri di resistenza per murature di edifici rurali. Nelle Tabelle 16a, 16b e 16c si riporta un confronto tra le suddette procedure, per ogni livello di conoscenza.

Tipologia di muratura		f_m (N/cm²)		τ_0 (N/cm²)	
		NTC2008	Proposta	NTC2008	Proposta
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	Limite inf.	240	346	6.0	4.5
	Valor medio	320	396	7.6	9.8
	Limite sup.	400	439	9.2	10.9
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (con connessione trasversale: parametri migliorati utilizzando il coefficiente 1.3, come da Tabella C8A.2.2 delle NTC2008)	Limite inf.	312	450	7.8	5.8
	Valor medio	416	515	9.9	12.7
	Limite sup.	520	571	12.0	14.2

Tabella 15. Parametri di resistenza per murature in mattoni pieni e malta di calce: valori ottenuti dall'elaborazione dei risultati della campagna sperimentale e confronto con la Normativa.

Livello di Conoscenza	Proprietà dei materiali				FC
	Tipologia di indagine		Valori delle proprietà		
	NTC2008	Proposta	NTC2008	Proposta	
LC1	**Indagini in situ LIMITATE:** servono a completare le informazioni sulle proprietà dei materiali ottenute dalla letteratura, o dalle regole in vigore all'epoca della costruzione, e per individuare la tipologia della muratura (in Tabella C8A.2.1 sono riportate alcune tipologie più ricorrenti). Sono basate su esami visivi della superficie muraria. Tali esami visivi sono condotti dopo la rimozione di una zona di intonaco di almeno 1m x 1m, al fine di individuare forma e dimensione dei blocchi di cui è costituita, eseguita preferibilmente in corrispondenza degli angoli, al fine di verificare anche le ammorsature tra le pareti murarie. È da valutare, anche in maniera approssimata, la compattezza della malta. Importante è anche valutare la capacità degli elementi murari di assumere un comportamento monolitico in presenza delle azioni, tenendo conto della qualità della connessione interna e trasversale attraverso saggi localizzati, che interessino lo spessore murario.	**Indagini in situ LIMITATE:** per acquisire il livello di conoscenza LC1, ovvero in assenza di prove meccaniche sui materiali, non si riportano indicazioni aggiuntive rispetto alle NTC2008.	Resistenza: valore minimo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1.	Resistenza: valore minimo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1	1.35

Tabella 16a. Procedure per la valutazione delle proprietà meccaniche di edifici in muratura: LC1.

Livello di Conoscenza	Proprietà dei materiali				FC
	Tipologia di indagine		Valori delle proprietà		
	NTC2008	Proposta	NTC2008	Proposta	
LC2	**Indagini in situ ESTESE:** le indagini di cui al punto precedente sono effettuate in maniera estesa e sistematica, con saggi superficiali ed interni per ogni tipo di muratura presente. Prove con martinetto piatto doppio e prove di caratterizzazione della malta (tipo di legante, tipo di aggregato, rapporto legante/aggregato, etc.), e eventualmente di pietre e/o mattoni (caratteristiche fisiche e meccaniche) consentono di individuare la tipologia della muratura (si veda la Tabella C8A.2.1 per le tipologie più ricorrenti). È opportuna una prova per ogni tipo di muratura presente. Metodi di prova non distruttivi (prove soniche, prove sclerometriche, penetrometriche per la malta, etc.) possono essere impiegati a complemento delle prove richieste. **Qualora esista una chiara, comprovata corrispondenza tipologica per materiali, pezzatura dei conci, dettagli costruttivi, in sostituzione delle prove sulla costruzione oggetto di studio possono essere utilizzate prove eseguite su altre costruzioni presenti nella stessa zona. Le Regioni potranno, tenendo conto delle specificità costruttive del proprio territorio, definire zone omogenee a cui riferirsi a tal fine.**	**Indagini in situ ESTESE:** è opportuno che le indagini visive siano estese a tutta la costruzione e che le caratteristiche meccaniche siano determinate per ogni tipologia muraria presente. RESISTENZA AL TAGLIO: Per la valutazione della resistenza al taglio, si consiglia di eseguire prove di scorrimento su giunto di malta e prove di compressione su carote con giunto inclinato, al fine di determinare un inviluppo di rottura lineare, secondo il modello di Mohr-Coulomb. RESISTENZA A COMPRESSIONE: Per la valutazione della resistenza a compressione, si consiglia di eseguire prove con martinetti piatti doppi, prove di compressione su carote con giunto orizzontale e prove di compressione su campioni di malta e laterizio. Considerando i risultati sperimentali ottenuti per murature emiliane di edifici rurali, la numerosità delle prove sopra citate potrà essere limitata. I risultati così ottenuti non sono sufficienti per valutazioni di tipo statistico, ma potranno essere utilizzati per stabilire se c'è una corrispondenza tra la tipologia muraria dell'edificio in esame e quella degli edifici investigati nella campagna sperimentale.	Resistenza: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1.	*Caso 1* – Nel caso di corrispondenza tra tipologia muraria oggetto delle indagini e tipologie rurali investigate (stabilita attraverso l'esecuzione di un numero limitato di indagini): considerare il limite inferiore o il valore medio di Tabella 14 a seconda della qualità e dello stato di conservazione della muratura, a giudizio del tecnico. Per la resistenza a compressione, in presenza di malte di pessima qualità, ridurre del 30% il valore limite inferiore proposto in tabella. *Caso 2* – Nel caso di non corrispondenza tra tipologia muraria oggetto delle indagini e tipologie rurali investigate (stabilita attraverso l'esecuzione di un numero limitato di indagini): si rimanda alle indicazioni delle NTC2008.	1.20

Tabella 16b. Procedure per la valutazione delle proprietà meccaniche di edifici in muratura: LC2.

Livello di Conoscenza	Proprietà dei materiali				FC
	Tipologia di indagine		Valori delle proprietà		
	NTC2008	Proposta	NTC2008	Proposta	
LC3	**Indagini in situ ESAUSTIVE:** servono per ottenere informazioni quantitative sulla resistenza del materiale. In aggiunta alle verifiche visive, ai saggi interni ed alle prove di cui ai punti precedenti, si effettua una ulteriore serie di prove sperimentali che, per numero e qualità, siano tali da consentire di valutare le caratteristiche meccaniche della muratura. La misura delle caratteristiche meccaniche della muratura si ottiene mediante esecuzione di prove, in situ o in laboratorio (su elementi non disturbati prelevati dalle strutture dell'edificio). Le prove possono in generale comprendere prove di compressione diagonale su pannelli o prove combinate di compressione verticale e taglio. Metodi di prova non distruttivi possono essere impiegati in combinazione, ma non in completa sostituzione di quelli sopra descritti. **Qualora esista una chiara, comprovata corrispondenza tipologica per materiali, pezzatura dei conci, dettagli costruttivi, in sostituzione delle prove sulla costruzione oggetto di studio possono essere utilizzate prove eseguite su altre costruzioni presenti nella stessa zona. Le Regioni potranno, tenendo conto delle specificità costruttive del proprio territorio, definire zone omogenee a cui riferirsi a tal fine.**	**Indagini in situ ESAUSTIVE:** prove distruttive da eseguire in situ o in laboratorio su elementi non disturbati prelevati dalle strutture dell'edificio. Nell'impossibilità di condurre questo tipo di prove, i risultati sperimentali ottenuti per murature emiliane di edifici rurali consentono di limitare le indagini e di eseguire solo prove localmente distruttive. Per ogni tipo di muratura: RESISTENZA AL TAGLIO: sarà necessario svolgere almeno 2 prove di scorrimento su giunto di malta e alcune prove di compressione su carote con giunto inclinato. RESISTENZA A COMPRESSIONE: sarà necessario svolgere almeno 1 prova con martinetti piatti doppi e 3 prove di compressione su carote con giunto orizzontale.	*Caso A* (disponibili 3 o più valori sperimentali di resistenza): Resistenza: media dei risultati delle prove. Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1. *Caso B* (disponibili 2 valori sperimentali di resistenza): Resistenza: - se valore medio sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1; - se valore medio sperimentale maggiore di estremo superiore intervallo, quest'ultimo; - se valore medio sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore medio sperimentale. Modulo elastico: come LC3 - *Caso A.* *Caso C* (disponibile 1 valore sperimentale di resistenza): Resistenza: - se valore sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, oppure superiore, valore medio intervallo; - se valore sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore sperimentale. Modulo elastico: come LC3 - *Caso A.*	Si considerano i risultati delle prove localmente distruttive: - se il valore sperimentale è compreso nell'intervallo di Tabella 14, considerare il valore sperimentale; - se il valore sperimentale è minore dell'estremo inferiore dell'intervallo di Tabella 14, considerare il valore sperimentale; - se il valore sperimentale è maggiore dell'estremo superiore dell'intervallo di Tabella 14, prendere quest'ultimo. Nel caso della valutazione della resistenza al taglio, i risultati sono ridotti del 20%. Nel caso vengano eseguite indagini di tipo distruttivo, fare riferimento alle indicazioni delle NTC 2008.	1.00

Tabella 16c. Procedure per la valutazione delle proprietà meccaniche di edifici in muratura: LC3.

9 Bibliografia

[1] J. Henzel e S. Karl, «Determination of strength of mortar in the joints of masonry by compression tests on small specimens,» *Darmstadt Concrete 2,* pp. 123-136, 1987.

[2] E. Sassoni e C. Mazzotti, «Assessment of masonry mortar compressive strenght by double punch test: the influence of mortar porosity,» in *Online Proceedings of Conference Built Heritage 2013*, Milano, 2013.

[3] UNI EN 772-1, *Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength,* CEN, 2011.

[4] Eurocode 6 - EN 1996-1-1, *General rules for reinforced and unreinforced masonry structures,* CEN, 1996.

[5] ASTM C1196-09, *Standard test method for in-situ compressive stress within solid unit masonry estimated using the flat-jack method,* American Society for Testing Material, 2009.

[6] ASTM C1197-09, *Standard test method for in-situ measurement of masonry deformability properties us-ing the flat jack method,* American Society for Testing Material, 2009.

[7] ASTM D4729-08, *Standard Test Method for In Situ Stress and Modulus of Deformation Using Flatjack Method,* American Society for Testing Material, 2008.

[8] ASTM C1531-09, *In situ measurement of masonry mortar joint shear strength index,* American Society for Testing Material, 2009.

[9] E. Sassoni, C. Mazzotti e G. Pagliai, «Comparison between experimental methods for evaluating the compressive strength of existing masonry buildings,» *Construction and Building Materials,* n. 68, pp. 206-219, 2014.

[10] ASTM E519-10, *Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry,* American Society for Testing Materials, 2010.

[11] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 14 Gennaio 2008,* 2008.

[12] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Circolare sulle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni,* 2009 .

Bologna, lì 27 maggio 2015

Gruppo di lavoro:

Prof. Ing. Claudio Mazzotti
Prof. Ing. Barbara Ferracuti
Ing. Francesca Ferretti
Ing. Anna Rosa Tilocca

Responsabile Scientifico:

Prof. Ing. Marco Savoia
DICAM
Scuola di Ingegneria e Architettura
Università di Bologna

Direttore del CIRI Edilizia e Costruzioni
Prof. Ing. Marco Savoia

CIRI - EDILIZIA E COSTRUZIONI
ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
Via del Lazzaretto, 15/5 - 40131 - BOLOGNA - ITALIA
C.F. 80007010376 – P.I. 01131710376