

**LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DELLE MURATURE
PARTE SECONDA: MARTINETTI PIATTI**

Lorenzo Jurina

www.jurina.it

Politecnico di Milano

Dipartimento di Ingegneria Strutturale

Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Italy

Introduzione

La caratterizzazione meccanica delle murature è un presupposto fondamentale per la valutazione della sicurezza di una struttura esistente ed i parametri ottenuti entrano come dati in tutti i modelli numerici, dal più semplice al più complesso, che il progettista intenda utilizzare per valutare gli attuali stati di sforzo e di deformazione presenti nell'edificio.

Nella prima parte dell'articolo (dedicato alle "prove penetrometriche") si sono esaminate tecniche e strumenti che consentono la determinazione puntuale delle caratteristiche dei componenti della muratura, vale a dire la malta ed i mattoni, al fine di poterne dedurre, in modo indiretto, le caratteristiche del sistema composto, vale a dire della "muratura". Tale operazione di composizione presenta sempre dei limiti e delle incertezze, soprattutto tenendo conto che le informazioni disponibili sono locali, anche se potenzialmente numerose e quindi statisticamente affidabili.

Le cosiddette "prove soniche" potrebbero rappresentare una interessante risposta alla caratterizzazione rapida e poco costosa di porzioni di muratura di volume consistente. La misura della velocità di penetrazione di un'onda di frequenza medio-bassa all'interno della parete, effettuata adottando una griglia sufficientemente estesa (alcuni metri quadrati) di punti di emissione e punti di ricezione dell'onda, consente di realizzare una "tomografia sonica" della parete che permette di ricavare informazioni preziose sulla densità media del materiale esaminato e sulla presenza di eventuali zone di densità bassa. Una correlazione statistica tra densità e resistenza del materiale consentirebbe una caratterizzazione della muratura ma i fattori di disturbo di questa prova *indiretta* sono particolarmente numerosi e pertanto questa tecnica di indagine ha usualmente più una utilità di confronto, rivolta alla definizione di "zone" di murature tra loro omogenee, che alla definizione assoluta della loro resistenza.

Senza addentrarci sul tema delle prove soniche, questa seconda parte dell'articolo sulla "caratterizzazione meccanica delle murature" si occuperà della descrizione di una prova *diretta*, invece che indiretta, che, sollecitando meccanicamente la muratura, interessa una zona di estensione geometrica non trascurabile ai fini della caratterizzazione media di una muratura.

Tale prova è disponibile da quasi trent'anni ed è chiamata "prova con martinetti piatti". Essa consente la definizione in situ delle caratteristiche medie del materiale "muratura" e, riferendosi a campioni di maggiori dimensioni geometriche, appare più affidabile, anche se più complessa e, sfortunatamente, più costosa delle prove puntuali di tipo penetrometrico.

In occasione del restauro del Palazzo della Ragione di Milano (1979) l'ingegner P.P.Rossi dell'ISMES ed il sottoscritto hanno proposto e messo a punto una tecnica di prova diretta, in situ, di tipo *poco distruttivo*, basata sull'impiego di speciali martinetti piatti, che consente la caratterizzazione meccanica di una porzione rappresentativa di muratura e che specializzava al caso delle murature un metodo già in parte utilizzato nel campo della meccanica delle rocce. La tecnica, ormai diffusa in tutto il mondo e normata da ASTM e da RILEM, è stata ampiamente sviluppata e migliorata tanto da essere divenuta estremamente affidabile e, in alcuni casi, addirittura insostituibile.

Nei paragrafi seguenti vengono descritte le modalità di prova, le potenzialità ed i limiti, oltre ad alcuni prevedibili sviluppi ed applicazioni.

Non è superfluo osservare che anche questa prova ha carattere locale e quindi i suoi risultati sono significativi se e solo se la zona scelta è rappresentativa dello stato

tensionale medio della parete e del materiale costituente. Gravi anomalie geometriche o di carico presenti in prossimità alle zone esaminate (aperture, cambi di spessore, elementi spingenti, appoggi di travi) modificano sensibilmente i risultati. Altrettanto si può dire per il materiale le cui caratteristiche medie, sia in termini di resistenza che di deformabilità, sono influenzate dalla presenza di eterogeneità locali.

Prove con Martinetti Piatti

Tra le varie prove in situ oggi disponibili, quella con i martinetti piatti è particolarmente interessante perché consente di fornire informazioni attendibili sulle principali caratteristiche meccaniche di una struttura in termini di deformabilità, stato di sforzo e resistenza.

La prova si può definire “quasi non distruttiva” e si articola in due fasi distinte:

- a) FASE 1: misura dello stato di sollecitazione;
- b) FASE 2: determinazione delle caratteristiche di deformabilità e della tensione di collasso per compressione.

L'indagine con il martinetto piatto singolo consiste nell'eseguire un taglio in un elemento strutturale per poi applicare sulle superfici del taglio una pressione nota che porti al ripristino delle condizioni iniziali del corpo. L'esecuzione di un taglio piano in direzione normale alla superficie di un elemento provoca una richiusura dei lembi della fessura; introducendo un martinetto piano all'interno della fessura (ossia introducendo una tasca metallica molto sottile nella quale si può iniettare olio a pressione nota) è possibile riportare i lembi della fenditura nelle condizioni iniziali.

Dalla forza esercitata del martinetto per ripristinare la situazione iniziale è possibile individuare lo stato tensionale originariamente presente nella muratura (in situ stress).

Si tratta in definitiva di una applicazione del metodo di “liberazione delle tensioni” già noto in altri settori di ricerca.

La metodologia prevede anzitutto l'esecuzione del taglio e la misura della convergenza della fessura, la cui entità viene rilevata attraverso misure di spostamento relativo fra due o più punti situati in posizione simmetrica rispetto allo stesso taglio tramite un trasduttore di spostamento. Inserito il martinetto piatto all'interno del taglio, esso viene portato gradualmente in pressione fino ad annullare la convergenza in precedenza misurata. In queste condizioni la pressione all'interno del martinetto sarà pari alla sollecitazione preesistente nella muratura, a meno di costanti che tengono conto del rapporto tra l'area del martinetto e quella del taglio praticato e di un coefficiente di rigidità del martinetto.

La tensione in situ vale pertanto:

$$\sigma = P \cdot K_t \cdot K_m \quad (1)$$

Dove:

P = Pressione del martinetto per la quale si recupera lo stato di sollecitazione antecedente il taglio;

σ = Valore di sforzo calcolato;

K_m = Costante adimensionale data dal rapporto tra area del martinetto ed area del taglio (<1);

K_t = costante adimensionale che dipende dalla geometria e dalla rigidità del martinetto. Viene usualmente riportata sul certificato di taratura del martinetto stesso (<1);



Figura 1: Taglio, installazione del martinetto singolo e lettura della convergenza a cavallo del taglio

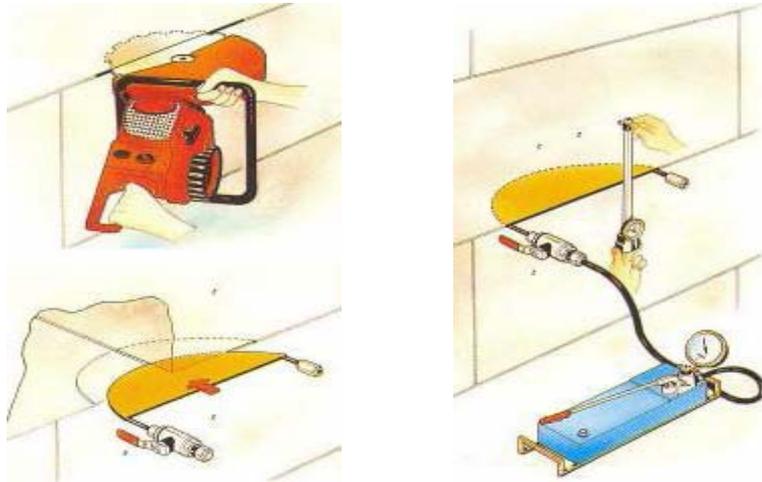


Figura 2: Apparecchiatura per la prova di martinetto semplice



Figura 3: Prove di martinetti piatti in corso nel Duomo di Cremona

L'indagine con **doppio martinetto piatto** si basa sul fatto di eseguire due tagli paralleli nella muratura a debita distanza, indicativamente da 40 a 80 cm, a seconda della muratura, all'interno dei quali posizionare due martinetti piatti. Mandando contemporaneamente in pressione i due martinetti si provoca uno stato di tensione monoassiale sulla porzione di muratura compresa fra i due martinetti, riproducendo

quindi una prova in condizioni simili a quelli di un test uniassiale convenzionale.

La misura degli spostamenti va effettuata con comparatori collocati nella zona compresa tra i due martinetti. La prova può proseguire fino al raggiungimento di pressioni molto superiori a quelle iniziali, in modo da ottenere indicazioni sulle caratteristiche di resistenza a collasso della muratura.

Il rapporto tra la tensione limite così determinate e il valore della tensione d'esercizio, individuata con la prova del martinetto piatto singolo, fornisce un coefficiente di sicurezza relativo al maschio murario in esame.

Le prove con martinetti talora comportano la perdita dello strumento, anche se nella maggior parte dei casi il recupero è possibile.

Nel caso di installazione fissa, il martinetto viene cementato nella fessura e servirà al rilevamento a medio e lungo termine delle misure di pressione nel punto di installazione, utili per una fase di monitoraggio della struttura.

Lo scopo della prova è quello di:

- Distinguere la fase essenzialmente elastica da quella caratterizzata da deformazioni irreversibili;
- Individuare il modulo elastico della muratura
- Individuare la tensione di prima fessurazione;
- Individuare la tensione di collasso del blocco murario.

Il valore della pressione effettivamente applicata alla muratura viene definito mediante la seguente formula:

$$\sigma = P \cdot K_m \cdot \left(\frac{A_m}{A_t} \right), \quad (2)$$

dove: P = Pressione erogata ai martinetti;

K_m = Valore medio dei 2 coefficienti di taratura dei martinetti;

A_m = Area del martinetto;

A_t = Valore medio delle 2 aree di taglio.

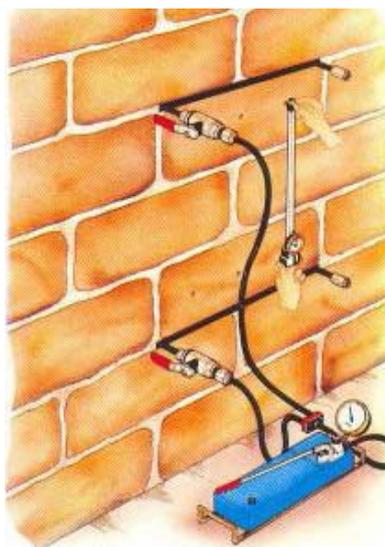


Figura 4: Apparecchiatura per la prova di martinetto doppio

Dal rapporto tra la tensione applicata e la deformazione misurata si ricava il valore

del modulo elastico della muratura.

Per valutare la resistenza limite a compressione della muratura il carico viene aumentato fino all'apparire delle prime microfrazture nei mattoni. La prova viene eseguita applicando il carico per cicli di carico e scarico, con intensità via via crescente. Per questo tipo di prove è raccomandato l'utilizzo dei martinetti piatti aventi maggiori capacità di deformazione.

A causa dell'anisotropia del materiale e della presenza del confinamento laterale, per una corretta determinazione del modulo elastico verticale e del coefficiente di Poisson è necessario effettuare una analisi dei risultati che tenga conto della impedita deformabilità trasversale. Questo è possibile sia mediante prove sperimentali condotte in laboratorio, sia mediante il confronto con un modello numerico che simuli la situazione esaminata. In questo modello vengono fatti variare i parametri di deformabilità del materiale fino a trovare quelli che al meglio giustificano i risultati sperimentali. (si tratta di una tecnica di "back analysis")

Rispetto a quanto descritto, una semplice variante consiste nel praticare i due tagli orizzontali e successivamente anche due *tagli verticali*, in modo da delimitare un prisma quasi totalmente isolato dal contorno murario.

Il collegamento rimane presente, infatti, solo sulla faccia più nascosta, parallela alla superficie esterna. Questa variante elimina pressoché totalmente l'effetto del contenimento laterale e quindi fornisce risultati più facilmente interpretabili in quanto più prossimi a quelli ottenibili da prove monodimensionali. È evidente che questa modalità di prova danneggia maggiormente il paramento murario e pertanto usualmente non viene consentita dagli organi di tutela e controllo quando si operi su edifici monumentali.

Per determinare la resistenza a compressione della muratura, (informazione che è indispensabile per una corretta verifica di sicurezza della struttura esistente), è possibile incrementare le pressioni applicate fino all'apparire delle prime fessure verticali nei mattoni.

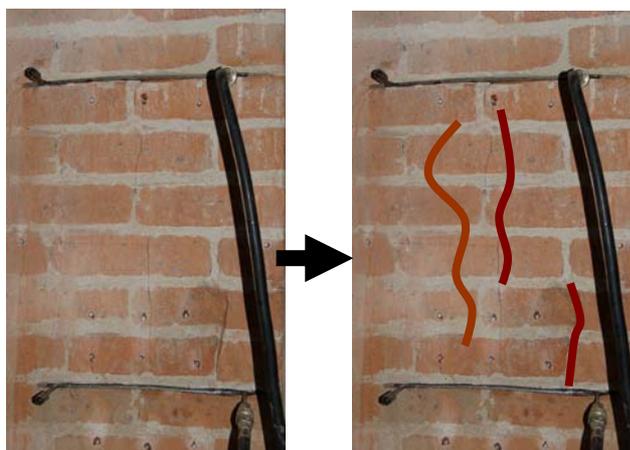


Figura 5: In prossimità del carico di collasso appaiono fessure con andamento verticale

Una estrapolazione della curva tensioni - deformazioni consente una buona approssimazione del valore di sigma limite. Anche in questo caso naturalmente è necessario apportare una correzione dovuta al *contenimento* esercitato dalla muratura adiacente la zona esaminata. Questa correzione risulta in pratica trascurabile nel caso si praticino i due tagli verticali.

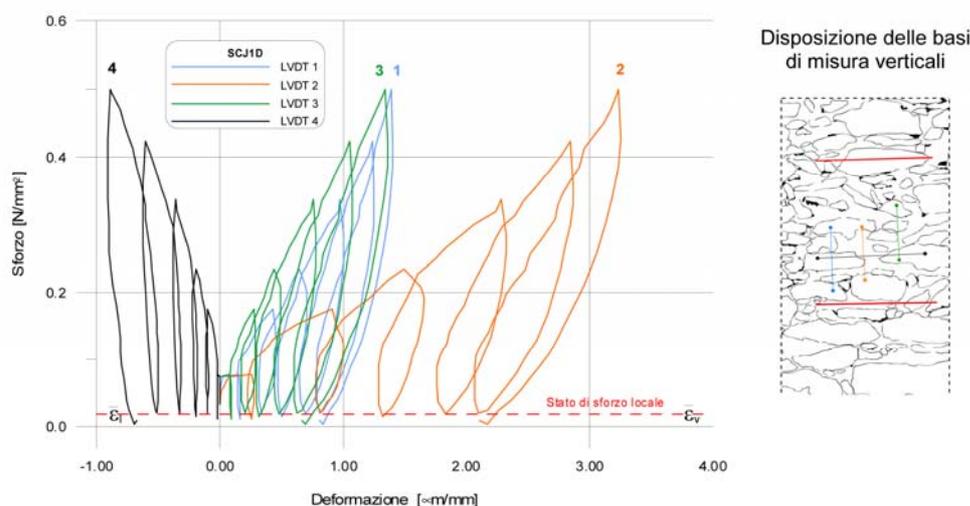


Figura 6: Diagramma sforzi-deformazioni nelle prove con martinetti doppi

E' possibile che la dimensione geometrica degli elementi di mattone o pietra che costituiscono la muratura del materiale induca problemi di "scala" nella prova. Infatti la dimensione dell'area investigata con la usuale tecnica del martinetto doppio è adeguata per murature regolari costituite da filari di mattoni e malta (tipologia di muratura per la quale la prova è stata introdotta) ma nel caso di murature in pietra di grossa pezzatura è opportuno lavorare su prismi di dimensioni maggiori. Con tali finalità è stata ideata dall'autore una tecnica di indagine innovativa, attualmente oggetto di sperimentazione, che ha trovato una prima applicazione nella diagnostica della sede della Magnifica Comunità di Val di Fiemme ed una seconda applicazione nello studio delle caratteristiche meccaniche delle murature di Laino Castello.

La prova ha come obiettivo la valutazione del carico ultimo a rottura di una muratura eterogenea, oltre che del modulo di elasticità, su una porzione di muratura di dimensione significativa di circa 1 mq. Si opera con l'adozione di 4 pistoni oleodinamici (2 da una parte e 2 dall'altra della parete), collegati mediante perni passanti attraverso la muratura.

La preparazione della prova, che risulta decisamente più laboriosa di quella con soli martinetti piatti, passa attraverso una prima esecuzione di 8 carotaggi al fine di permettere l'inghisaggio alla muratura delle barre in acciaio filettate. Successivamente viene posizionato su uno dei due paramenti un martinetto piatto. Si possono poi posizionare le basi di misura ed infine montare le piastre a forma di T, a cui collegare i martinetti.

Le basi estensimetriche installate al centro del prisma murario consentono la determinazione del diagramma sforzi -deformazioni, potendo disporre del valore delle tensioni verticali presenti nel "cuore" dell'area indagata, misurato attraverso un martinetto piatto appositamente alloggiato.

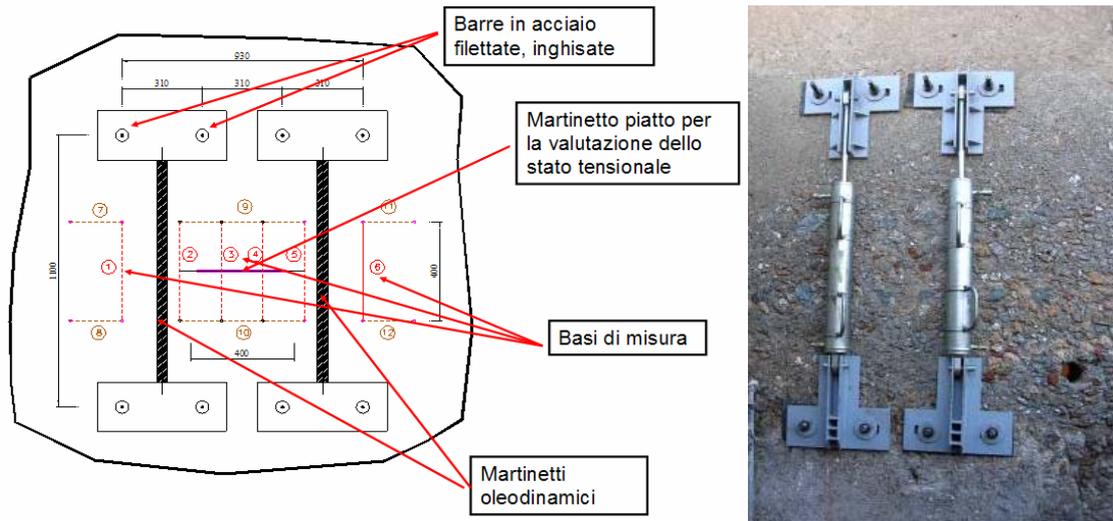


Figura 7: Prova con martinetti oleodinamici, geometria della prova

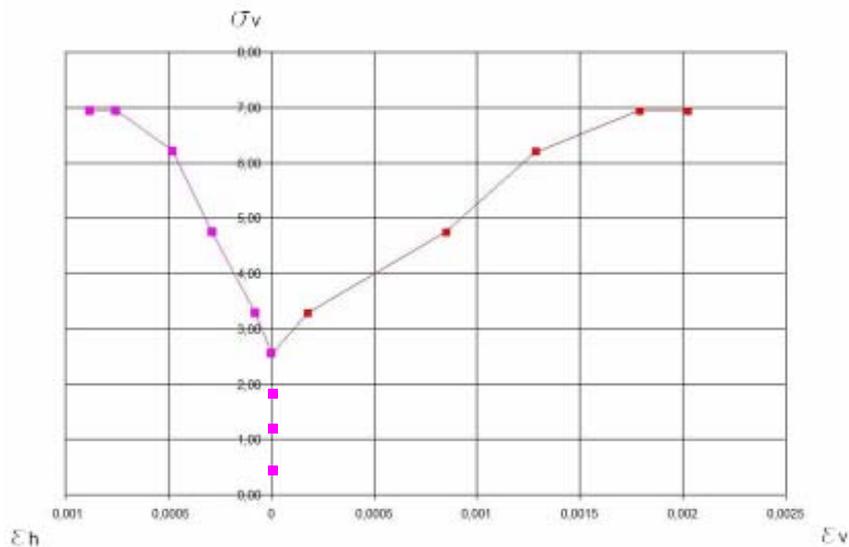


Figura 8: Diagramma Tensione verticale - Deformazione verticale (σ_v - ϵ_v) e Tensione verticale - Deformazione orizzontale (σ_v - ϵ_h)

Tornando ai martinetti standard si presentano alcune osservazioni, frutto della ormai lunga esperienza acquisita dalle migliori società di servizi nel campo della diagnostica.

Criteri per l'esecuzione del taglio

Il taglio della muratura deve essere eseguito in maniera tale da non danneggiare le parti circostanti della muratura stessa e generalmente viene eseguito con particolari seghe (troncatrici eccentriche) a lama diamantata che producono una incisione leggermente superiore allo spessore del martinetto.

Nelle murature di mattoni il taglio per l'inserimento del martinetto viene solitamente (ma non sempre) eseguito in corrispondenza dei corsi di malta. Nelle murature in pietra di pezzatura eterogenea l'applicazione della tecnica è complicata dalla difficoltà di individuare giunti di malta regolari.

Il taglio a secco, ma anche il taglio con raffreddamento ad acqua della lama, comporta sempre inconvenienti per lo strato di malta. Infatti, in particolari murature, per effetto del riscaldamento localizzato si possono manifestare variazioni dimensionali, mentre l'acqua usata per il raffreddamento può causare dilavamenti.

L'orizzontalità del taglio praticato può essere assicurata montando le attrezzature di taglio su appositi telai rigidi di supporto.

Difficoltà di misurazione e interpretazione

L'attendibilità dell'intera procedura può essere compromessa da effetti di concentrazione di sforzi o da deformazioni non elastiche dopo il taglio, oppure dalla scelta di punti di prova a quote troppo alte dell'edificio, per le quali il limitato peso della muratura soprastante non può fornire un adeguato contrasto alla azione divaricante esercitata dal martinetto. Questa considerazione è particolarmente importante nella fase di prova con utilizzo di due martinetti.

I valori di spostamento misurati sulle basi di misura a cavallo del taglio, nella prima fase di prova, non sono uguali, ma tendono ad essere maggiori al centro. Ci sarà quindi una concentrazione di tensione più accentuata al bordo. Le misurazioni delle varie basi non daranno mai tutte lo stesso valore e raramente il ripristino della distanza originaria avviene contemporaneamente sulle basi al raggiungimento dello stesso valore di sollecitazione applicato dal martinetto. Ci si dovrà pertanto limitare ad un ripristino "in media" della geometria precedente. Questa circostanza è ancora più frequente quando, a causa della disomogeneità della muratura, si verificano variazioni irregolari del campo di tensione.

E' opportuno rilevare la geometria della tessitura muraria nel momento in cui si effettua il taglio e successivamente quando si vanno a rilevare gli spostamenti. Per esempio in murature di pietre irregolari il taglio non deve essere effettuato nei giunti di malta ma va effettuato nel corso di pietra; questa scelta è giustificata dal fatto di limitare la disomogenea distribuzione di sforzi in murature di questo tipo.

Riferimento normativo

In Italia non esiste normativa in merito all' utilizzo dei martinetti. Si fa riferimento alle norme americane ASTM C 1196 (1991) ed ASTM C 1197 (1991) e alle norme Rilem, per la corretta esecuzione della prova.

Aspetti tecnologici della prova

a) I martinetti

I primi martinetti avevano forme rettangolari e dimensioni 40x20x0,8 cm. Tali dimensioni consentivano di inserire agevolmente il martinetto all'interno di un giunto orizzontale di malta e di interessare una zona le cui dimensioni sono pari approssimativamente ad 1,5 volte la dimensione delle eterogeneità presenti nel mezzo (ossia le dimensioni medie dei mattoni o delle pietre).

Su elementi strutturali di dimensioni ridotte (quali archi, volte, colonne isolate) è possibile utilizzare martinetti più piccoli { 12x12 e 12x24 cm),

Per murature in pietra e pareti in calcestruzzo sono stati proposti martinetti di forma semicircolare realizzati con una semplice sega rotante. Negli anni successivi hanno trovato larga diffusione martinetti estremamente sottili (4 mm) caratterizzati da una forma allungata, composta da un semicerchio prolungato con un rettangolo.

Martinetti ancora più allungati, in grado di fornire risultati anche in murature con mattoni o pietre di grandi dimensioni, si possono realizzare facilmente per settori affiancati, dopo aver praticato il taglio mediante una traslazione della troncatrice circolare.

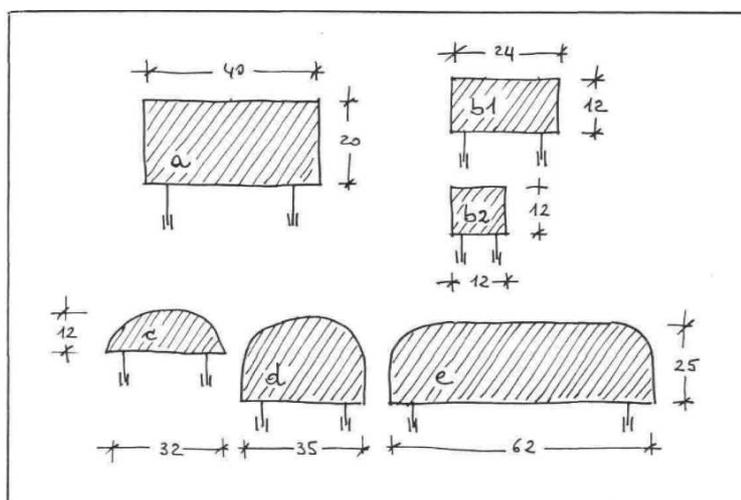


Figura 9: Dimensioni geometriche dei martinetti piatti più frequentemente adottati

b) L'apparecchiatura di taglio

La forma dei martinetti deve essere tale da consentire di riempire quanto più esattamente possibile l'area del taglio praticato nella muratura (al fine di avere un coefficiente K_m il più possibile prossimo ad 1).

Questa è una delle ragioni che ha portato alle maggiori modifiche della forma dei martinetti.

- Per i martinetti *rettangolari* il taglio viene di norma realizzato nello spessore della malta tra due corsi di mattoni mediante una serie di fori paralleli eseguiti col trapano e successivamente raccordati con una fresa.

- Per i martinetti *semicircolari* (o a settore semicircolare) si utilizza una sega a disco diamantato.

- Per i martinetti a *semicerchio-allungato* si utilizza ancora una sega a disco diamantato di particolare concezione, dove il movimento del disco rotante viene impresso eccentricamente rispetto al centro del disco stesso.

Quest'ultimo tipo di martinetto, oggi il più diffuso, presenta una superficie di contatto molto più ampia di quelli semicircolari.

Un sensibile miglioramento nella precisione del taglio (e quindi nella facilità di inserimento del martinetto, e nel ridotto spessore dell'incisione) si è ottenuto recentemente montando la sega circolare su un sostegno a colonna dotato di un dispositivo per l'avanzamento a velocità regolabile.

Riguardo all'ubicazione del taglio, le prime esperienze sono state condotte con *tagli praticati nella malta* tra mattone e mattone, in quanto, al termine della prova, la malta poteva essere più facilmente risarcita mediante miscele debolmente espansive introdotte nella fessura. Attualmente, ove possibile, la tendenza è piuttosto di praticare il taglio *in corrispondenza dei mattoni* in quanto il taglio risulta molto più netto e minore è il pericolo di movimento dei mattoni superiori, causato dal rotolamento dagli inerti di maggiore pezzatura presenti nella malta.

c) La strumentazione e la disposizione delle basi estensimetriche

In entrambe le fasi della prova {ossia la individuazione della tensione in sito e la ricerca dei moduli elastici}, le deformazioni vengono misurate mediante comparatori centesimali fissi o rimovibili (di lunghezza nota), che individuano le variazioni di distanza tra piastrine metalliche ("basi") incollate o comunque ancorate alla muratura. Risultati più rapidi ed affidabili si ottengono utilizzando trasduttori di spostamento collegati in continuo ad una apparecchiatura di registrazione automatica. Alla stessa centralina vengono collegati anche i trasduttori che rilevano la pressione dell'olio nella pompa e nei martinetti. È possibile così ottenere, in tempo reale, i grafici tensione-deformazione-tempo che facilitano l'interpretazione delle prove. Riguardo alle posizioni delle basi per gli estensimetri risulta certamente consigliabile disporle a metà circa di un mattone in modo da essere meno influenzati da disturbi locali.

Per la *prima fase della prova*, ossia la determinazione della tensione in sito, vengono adottate abitualmente almeno tre basi estensimetriche "a cavallo" del taglio. In questo modo si ottiene una misura diretta della convergenza tra i due bordi del taglio, e la misura del suo annullamento, quando venga imposta nuovamente la tensione in sito. È stata proposta recentemente una diversa disposizione delle basi di misura che prevede tre comparatori ubicati al di sopra e tre al di sotto del taglio.

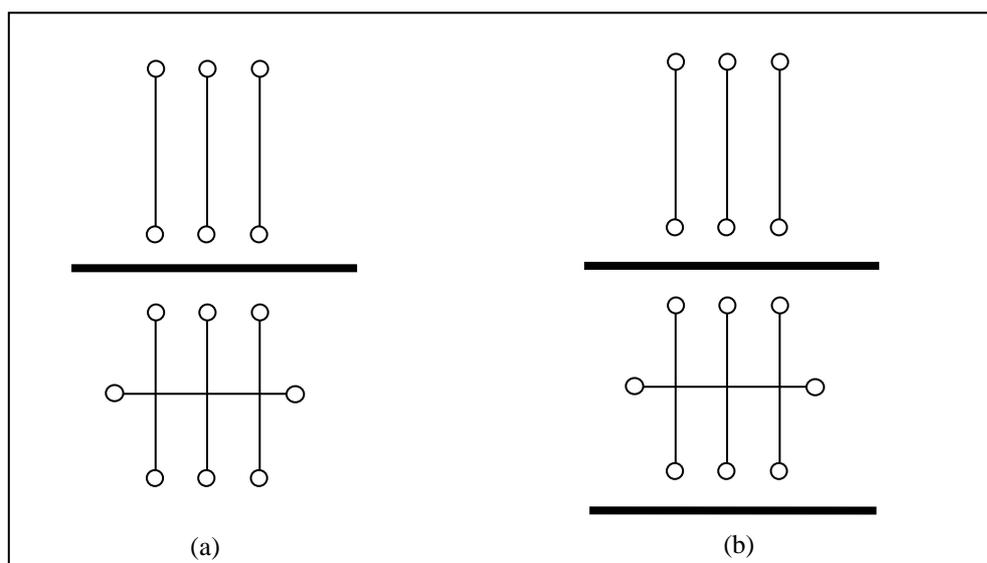


Figura 10: Disposizione delle basi di misura per prove con martinetto semplice (a) e doppio (b)

Se le basi estensimetriche sono abbastanza lunghe (50 - 60 cm per martinetti di dimensione 30 - 40 cm), il punto più distante dal taglio praticamente non si sposta ed è possibile ottenere gli stessi dati di convergenza per differenza tra gli spostamenti superiori e quelli inferiori. Questa disposizione, va sottolineato, ha un grosso vantaggio rispetto a quella tradizionalmente usata. Separando infatti le informazioni relative alle due zone (superiore ed inferiore) è possibile:

- 1) effettuare il taglio della muratura *in presenza dei comparatori*
- 2) *interpretare separatamente* i risultati della zona superiore (che risulta soggetta ad una debole trazione al termine del taglio) e quelli della zona inferiore (sempre compressa).

Il punto (1) consente di ottenere informazioni sulla convergenza del taglio a *varie*

profondità del taglio stesso. Torneremo su questo punto più avanti per vedere come è possibile ottenerne informazioni relative *al gradiente delle tensioni* lungo lo spessore della muratura.

Il punto (2) consente, almeno in parte, di depurare i risultati dagli effetti di non linearità introdotti sia *da rotture localizzate* in prossimità dei bordi del taglio (conseguenti agli elevati gradienti di tensione che si vengono a creare), sia *dallo stato di debole trazione* che si manifesta al di sopra del taglio (e che, in murature molto povere, può dare luogo a movimenti irreversibili di un mattone rispetto all'altro). Gli spostamenti assoluti misurati nella zona inferiore infatti, benché più modesti come entità, sono meno influenzati dal comportamento non lineare del materiale, e consentono, ad esempio, una valutazione approssimata del modulo elastico verticale anche utilizzando un solo martinetto.

Per la *seconda fase della prova*, dove si utilizzano i due martinetti piatti, è opportuno sistemare almeno tre basi estensimetriche verticali ed almeno una orizzontale. Risulta di scarsa rilevanza disporre ulteriori basi esternamente alla zona compresa tra i due martinetti a meno di voler tenere conto dell'influenza di eventuali anomalie (zone molto più rigide o molto più deformabili) presenti attorno alla zona esaminata. Queste anomalie, agendo come condizioni al contorno non-standard, potrebbero infatti influenzare pesantemente i risultati.

d) Valutazione della resistenza a taglio

È possibile ottenere ulteriori informazioni sottoponendo contemporaneamente la muratura ad una tensione tangenziale e ad una compressione verticale. I dati ottenuti sono particolarmente significativi nel caso di verifiche relative a strutture in zona sismica.

La prova prevede l'utilizzo di un martinetto idraulico di ridotte dimensioni in grado di esercitare spinte orizzontali su una parte del prisma soggetto a compressione. Estratto un mattone (in una zona laterale rispetto al prisma soggetto a compressione) si posiziona nel vano risultante un martinetto a pistone di ridotte dimensioni. Quest'ultimo agisce contro il mattone adiacente (già soggetto a compressione) inducendo una sollecitazione tangenziale nella malta di allettamento. Notiamo che il mattone prescelto deve essere preventivamente isolato rimuovendo la malta dei giunti verticali, sia dietro che lateralmente. Mantenendo costante, a diversi livelli, la tensione verticale di compressione, viene incrementata la forza laterale in modo da ottenere una tensione tangenziale nella malta e quindi uno scorrimento del mattone.

La tensione tangenziale viene valutata come $T = T/2A$ dove T è la forza applicata ed A è l'area del mattone.

È possibile pertanto determinare il valore dell'angolo di attrito interno e il valore della coesione della malta, riferiti alla resistenza a taglio, ottenendo relazioni del tipo:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg}(\Phi) \quad (3)$$

Questa relazione può essere ottenuta sia per valori di "picco" che per valori "residui" della tensione tangenziale, vale a dire prima e dopo l'inizio dello scorrimento.

Nei casi in cui sia possibile, risulta molto più rapido adottare uno o più martinetti piatti, inseriti nei due tagli verticali, anche per esercitare la spinta laterale. Questa modalità di prova, proposta recentemente dallo scrivente, è stata sperimentata nel borgo-cantiere di Laino Castello.

La prova consiste nell'isolare completamente una porzione di muratura, di dimensione circa 40x80cm, e di applicare poi dei sistemi di forza sia verticali che

orizzontali mediante 6 martinetti piatti (2 orizzontali e 4 verticali). L'obiettivo è quello di valutare, al variare della tensione verticale, la resistenza a taglio della muratura.

In particolare, una volta effettuati i 2 tagli orizzontali nella muratura, inseriti i martinetti piatti e posizionate le basi di misura, si procede mantenendo costanti i valori della tensione verticale (nei martinetti 1-2) e applicando una azione tangenziale attraverso l'azione di una delle due coppie di martinetti verticali (3-4 oppure 5-6). Al generico ciclo, fissata la tensione verticale, una delle due coppie verticali di martinetti laterali viene rimossa, l'altra invece viene utilizzata per incrementare la tensione tangenziale. Alla fine del ciclo generico, quando cioè la muratura ha superato la resistenza di picco, si incrementa la tensione verticale e si inserisce la seconda coppia di martinetti verticali, assenti nel ciclo precedente. In sostanza al crescere della sollecitazione verticale si alterna la direzione di spinta orizzontale e si valuta l'incremento di resistenza a taglio. La tensione verticale viene controllata con una pompa collegata alla coppia di martinetti 1e2.

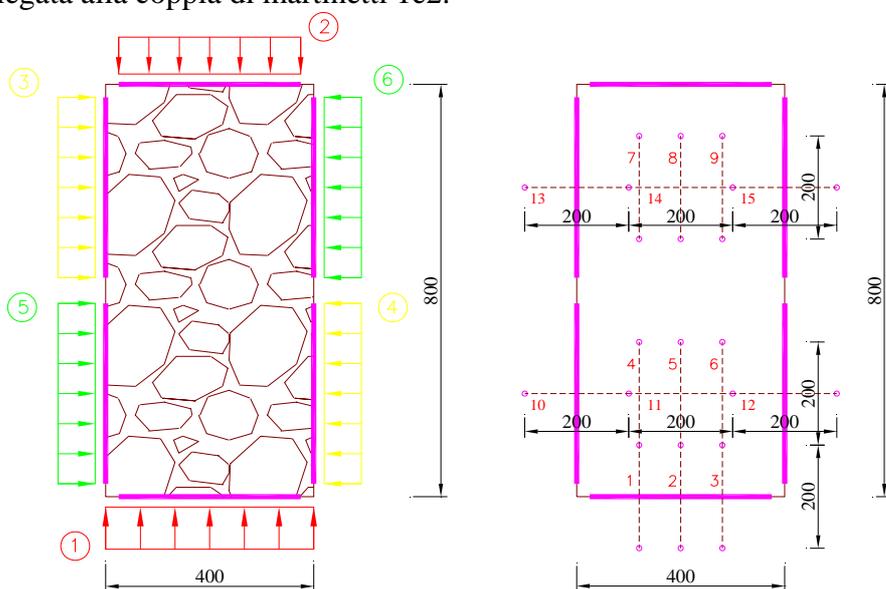


Figura 11: Prova con 6 martinetti piatti, geometria



Figura 12: Prova a taglio con 6 martinetti piatti

La tensione tangenziale viene incrementata attraverso un'altra pompa collegata, alternativamente, alla coppia di martinetti verticali (3-4 oppure 5-6). Le deformazioni vengono valutate attraverso letture sistematiche delle basi deformometriche con giacitura orizzontale, posizionate all'inizio della prova.

Nella figura seguente sono riportati i grafici della tensione tangenziale residua al variare dello spostamento orizzontale ed è possibile verificare come al variare della tensione verticale applicata dai martinetti 1 e 2 si ottenga un aumento della resistenza a taglio con una variazione sostanzialmente lineare.

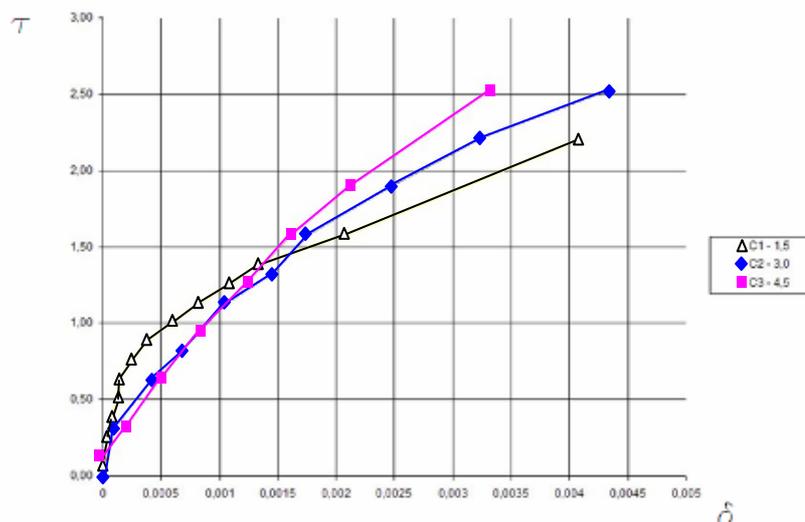


Figura 13: Prova a taglio con martinetti piatti, diagramma t-d

Ritornando alle classiche fasi 1 e fase 2 della prova, una campagna sperimentale a scala 1:1 condotte negli anno '90 presso i laboratori dell'ISMES consente di affermare che la misura dello stato di sollecitazione, su muratura in mattoni pieni con carico uniformemente distribuito, presenta differenze medie tra i valori applicati (e quindi noti) e quelli misurati mediante martinetti piattali, *non superiori ai 5%*, per prove correttamente condotte. Il risultato è stato ottenuto sia con martinetti 40x20 cm che con martinetti più piccoli (12x24 cm), dando risultati analoghi. Per martinetti di tipo semicircolare si ha una percentuale di errore inferiore al 20%.

Riguardo *all'effetto del contenimento* della muratura circostante nella determinazione del modulo elastico e poi del carico a rottura utilizzando due martinetti, ulteriori prove condotte dall'ISMES confermano che il modulo elastico ottenuto mediante martinetti piattali risulta molto prossimo a quello ottenuto con prove di compressione monoassiale di tipo convenzionale, il che evidenzia la scarsa influenza del contenimento laterale. Le differenze riscontrate sono risultate contenute entro 8% per martinetti di dimensioni 20x40, mentre per martinetti di dimensioni più ridotte (24x12 cm) l'errore è stato notevole, raggiungendo anche percentuali dell'80% nella sovrastime della rigidezza del materiale. Per martinetti semicircolari la norma ASTM cita errori possibili dell'ordine del 24%.

Prove condotte fino a rottura evidenziano sovrastime pari al 10-15% nella determinazione della resistenza limite a compressione, anche per i martinetti di maggiori dimensioni, Differenze molto minori, anche se mancano confronti sperimentali, dovrebbero rilevarsi in prove dove si siano praticati anche i due tagli verticali.

Va ricordato che la pressione nel martinetto è distribuita in modo uniforme sulla

muratura e quindi la tensione che si determina in sito ha valore di *tensione media*. Nel caso fosse presente una pressoflessione all'interno della parete esiste il rischio di una sovra o sotto-valutazione della tensione locale. Una soluzione, costosa ma praticabile, consiste nell'eseguire la prova prima su un lato e poi sull'altro lato della muratura determinando così la tensione media in prossimità delle due superfici libere. Una interpolazione dei risultati consente poi di determinare l'andamento trapezoidale del diagramma delle tensioni all'interno della muratura.

Un promettente, alternativo, modo di operare deriva da alcune simulazioni numeriche, sviluppate dall'autore, con un modello 3D agli elementi finiti, elastico lineare, in cui si evidenzia l'incremento di convergenza della fessura all'approfondirsi del taglio nella parete.

Il modello numerico ha simulato un prisma di dimensioni 180x130x50 cm in cui viene praticato un taglio di dimensioni 27x37 per la successiva introduzione di un martinetto standard.

Le tre curve illustrate in figura si riferiscono a diverse eccentricità del carico agente sulla parete ed in particolare, rispettivamente, (a) ad eccentricità verso il lato del taglio pari ad 1/6 dello spessore della parete, (b) a un carico centrato, e (c) ad un carico con eccentricità verso il lato opposto al taglio, pari ad 1/6 dello spessore.

La risultante del carico applicato viene mantenuta costante nei tre casi esaminati. Le curve sono state adimensionalizzate sia rispetto al valore massimo della convergenza sia rispetto alla profondità massima del taglio.

Pur nella semplicità del modello adottato è possibile notare che le curve (a,b) presentano una *concavità opposta* alla curva (c). In pratica, mentre nei casi (a-b) la tensione misurata dal martinetto è il valore massimo della tensione riscontrabile lungo lo spessore della parete, e quindi in termini di valutazione della sicurezza non è necessario proseguire nella ricerca, nel caso (c) il valore medio di tensione che si otterrà con la prova di martinetto piatto semplice è solo *una stima per difetto* della tensione massima in quella zona della muratura e quindi è opportuno eseguire una prova ulteriore sul lato opposto.

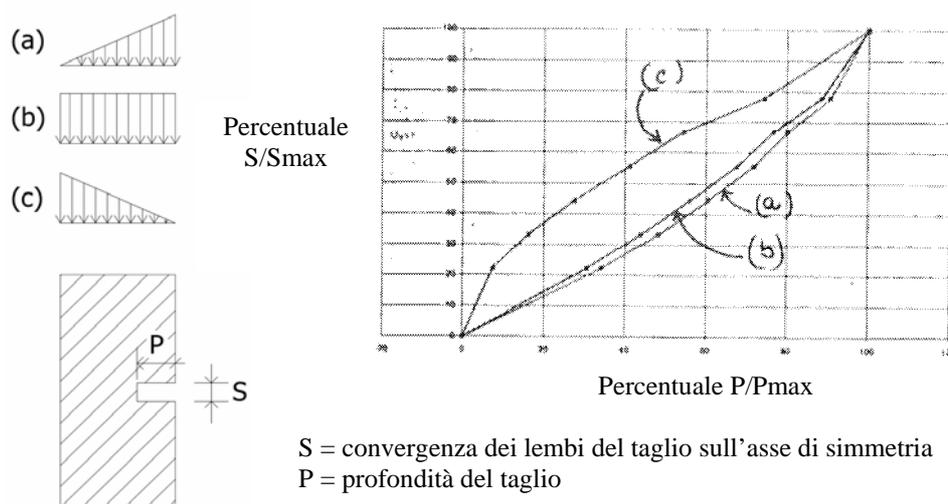


Figura 14: Convergenza della fessura al variare della profondità del taglio

Sviluppi e potenzialità

La tecnica di prova con martinetti piatti è relativamente recente e ancora oggetto di ricerca e di sviluppo.

La qualità ed affidabilità della prova è certamente aumentata con l'adozione di lame molto sottili e di martinetti sottili e poco rigidi.

L'uso di una strumentazione per l'acquisizione automatica dei dati in tempo reale ha fornito non solo la possibilità di ottenere un numero di dati rilevante, ma anche la possibilità di ripetere cicli di carico in tempi brevi, limitando le incertezze (difficilmente interpretabili) legate ai fenomeni di viscosità del materiale che si manifestano in prove di durata più lunga.

A giudizio dello scrivente è opportuno rendere ancora più ricche le informazioni ottenibili dalla *prima fase di prova*, quella dove si usa un solo martinetto, A questo proposito l'uso di comparatori *esterni* rispetto al taglio (e non a cavallo", come prevede la disposizione usuale) offre delle interessanti possibilità.

L'uso di comparatori disposti esternamente consente di eseguire il taglio e contemporaneamente misurare la "convergenza" del taglio alle varie profondità. In pratica si stanno eseguendo, durante la fase del taglio (che è unica e irripetibile !), *varie prove di carico a geometria variabile*.

La strada sembra promettente perché già durante la prima fase delle prove ci si può rendere conto della *eventuale presenza di eccentricità* e quindi valutare l'opportunità, (sia in termini di accuratezza diagnostica che in termini economici), di ripetere la prova sull'altro lato della muratura in modo da verificare quanto intuito riguardo al gradiente delle tensioni.

Riguardo alla seconda fase della prova, dove vengono disposti due martinetti tra loro paralleli, è da meglio verificare la stima del *confinamento* esercitato dalla muratura circostante il prisma. Risulta necessaria una campagna di prove comparate per valutare questo effetto in funzione di diversi parametri, prevalentemente geometrici, quali:

- la forma dei tagli
- la distanza tra i due tagli paralleli
- lo spessore del muro e le dimensioni medie dei mattoni
- la presenza o meno dei due tagli verticali.

L'adozione dei due tagli verticali (ove possibile) ridurrebbe notevolmente le difficoltà di interpretazione, isolando maggiormente il prisma sotto prova.

Questo accorgimento, come già illustrato, rende possibile inserire martinetti piatti anche in queste fessure verticali e (adottando due pompe idrauliche, una per i martinetti orizzontali ed una per quelli verticali) è possibile sottoporre la muratura a *stati tensionali bidirezionali*, determinando così alcuni punti del dominio di rottura in termini di tensioni principali. Questa informazione è, palesemente, molto utile in murature di edifici in zona sismica.

Conclusioni

La prova con martinetti piatti ha avuto uno sviluppo notevole negli anni trascorsi dalla sua prima applicazione nel campo del restauro. Le prove di laboratorio e quelle in sito hanno fornito indicazioni positive sull'affidabilità e ripetibilità della prova.

Gli aspetti tecnologici possono influenzare considerevolmente i risultati (metodo di taglio, forma dei martinetti), velocità della prova, uso di acqua, disposizione dei punti di misura, ...).

È opportuna una definizione *di standard di prova*, almeno sulle murature più comuni, seguendo l'esempio delle ASTM CI 196-93, CI 197-91 attualizzandole alle modalità di esecuzione e ai tipi di martinetto più adottati nel nostro paese.

Resta da sottolineare un aspetto cruciale legato alla significatività della prova, che dipende in modo cospicuo dalla posizione scelta sull'edificio per effettuare la prova. E' opportuna una collaborazione stretta tra il tecnico incaricato di eseguire le prove ed il professionista che dovrà poi interpretarle e che dovrà prendere decisioni in merito agli interventi da adottare o meno sull'edificio. La localizzazione va definita scegliendo porzioni rappresentative di muratura, sia per quanto riguarda la loro natura materiale, sia per quanto riguarda lo stato di tensione, sia, da ultimo, per l'assenza di singolarità geometriche difficili da tenere in conto (aperture, vani, cambiamenti di geometria in zone vicine).

A parte queste ovvie cautele, la prova costituisce un supporto estremamente prezioso per la valutazione della risposta strutturale di un edificio, sia per conoscerne lo stato attuale sia per prevederne le potenzialità in caso di nuove condizioni di utilizzo.

Dopo quasi trent'anni dalla sua introduzione ritengo giunto il tempo per la definizione di un nuovo standard cui riferirsi che costituirebbe garanzia nei confronti di procedure poco affidabili e poco sperimentate, le quali spesso sono fonte di nuovi problemi, invece che di aiuto, per il progettista che è chiamato a dare una interpretazione dei dati e a farne uso nel suo processo decisionale.

Bibliografia

- [1] Bonaldi P, Jurina L., Rossi P.P., "*Indagini sperimentali e numeriche sui dissesti del Palazzo della Ragione di Milano*", XIV Congr. Naz. Geotecnica, Firenze, 1980.
- [2] Rossi P.P., "*Analysis of mechanical characteristics of brick masonry by means of non-destructive in-situ tests*", Proc. 6th LBMaC, Roma. 1982.
- [3] Rossi P.P., "*Fiat jack test for the analysis of mechanical behavior of brick masonry structures*", Proc. 7th IBMaC, Metbourne, 1985.
- [4] Jurina L., Califano F., "*Flat-jacks: evolution of the test technique*", Int. Conf. on Monitoring and Predictive Maintenance of Plants and Structures, Firenze, 1992.
- [5] Riccioni R., Rossi P.P., "*Resauro edilizio e monumentale. Diagnosi e consolidamento*", Editrice Il Cigno, Galileo Galilei, Roma, 1989.
- [6] ASTM, American Society for Testing and Materials, "*C 1196-91, Standard test method for in situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flatjack measurements*", 1991.
- [7] ASTM, American Society for Testing and Materials, "*C 1197-91, Standard test method for in situ measurement of masonry deformability properties using The flatjack method*", 1991.
- [8] Rossi P.P., "*L'impiego dei martinetti piatti nello studio delle murature*", seminario "*Sperimentazione su struttura, attualità ed affidabilità delle metodologie di indagine*", Venezia, 1993-
- [9] Locati S., Ruiu G., 1996. La tecnica dei martinetti piatti: uno studio teorico e sperimentale. *Tesi di laurea. Politecnico di Milano, Fac. Architettura, relatore prof L. Jurina*
- [10] Jurina L., "*Alcuni recenti sviluppi nella tecnica dei martinetti piatti*", Convegno Nazionale, La Meccanica delle Murature tra Teoria e Progetto, Messina, 1996.