Università degli Studi di Genova

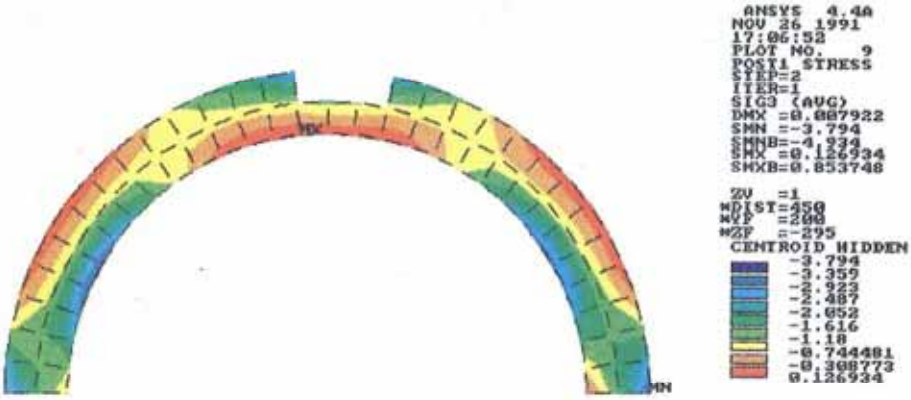
Facoltà di Architettura

Istituto di Costruzioni

ENI service spa

DIAGNOSTICA STRUTTURALE E STRUMENTAZIONE DI CANTIERE

Andrea Buti



PONTE DELLE FATE (ARCO LATO MONTE)

Tavola Rotonda
del 29 Maggio 1992
in Genova

VALUTAZIONE DELLA RISPOSTA STRUTTURALE MEDIANTE MARTINETTI PIATTI

Lorenzo Jurina *

1. Premessa

Negli interventi di restauro statico e di consolidamento la proposta progettuale deve essere strettamente correlata alle conclusioni diagnostiche ottenute da una accurata analisi del manufatto. Tale analisi sfocia usualmente in un modello (più o meno raffinato) in grado di fornire risposte sull'attuale grado di sicurezza dell'edificio e quindi sulla necessità o meno di intervenire con correttivi passivi o attivi.

La formulazione del modello interpretativo abbisogna di dati relativi alla *geometria* della struttura, ai *carichi* e alle sollecitazioni cui è sottoposta, e alla natura dei *materiali* che la costituiscono.

Quest'ultimo aspetto, legato alla caratterizzazione meccanica dei materiali, risulta spesso di gravosa soluzione soprattutto nel caso di murature in laterizio o pietra, talora molto eterogenee.

* Dipartimento di Ingegneria Strutturale - Politecnico di Milano.

Il prelievo di numerosi campioni da sottoporre a prove distruttive in laboratorio, risolverebbe il problema ma risulta il più delle volte proibitivo in termini di costi, spesso poco affidabile a causa dei disturbi arrecati al campione durante il prelievo ed il trasporto, e frequentemente impossibile da effettuare quando la struttura abbia una rilevanza storica che ne impedisca qualunque danneggiamento, anche a scopo diagnostico.

Va aggiunto inoltre che la eterogeneità intrinseca del *materiale* muratura impone l'esecuzione di prove su campione di dimensioni non troppo ridotte, il che rende ancora più gravoso il problema dei prelievi.

Tecniche alternative di indagine non distruttiva, del tipo *indagini soniche* forniscono solo una valutazione qualitativa del comportamento meccanico delle murature e, benchè utili, rapide e poco costose, vanno utilizzate prevalentemente per definire *zone tra loro omogenee* da sottoporre poi a metodi di indagine in grado di fornire in modo diretto i parametri che descrivono il comportamento meccanico delle murature.

In occasione del restauro del Palazzo della Ragione di Milano (1979) l'Ing. P. P. Rossi dell'ISMES e lo scrivente hanno proposto e messo a punto una tecnica di prova diretta in sito, di tipo *poco distruttivo*, basata sull'impiego di speciali martinetti piatti, che specializzava al caso delle murature un metodo già utilizzato nel campo della meccanica delle rocce [1, 2, 3].

Dopo questa prima applicazione la tecnica è stata ampiamente sviluppata e migliorata tanto da essere divenuta estremamente affidabile e, direi, in molti casi insostituibile [4, 5, 6, 7, 8].

Nei paragrafi seguenti verranno descritte le modalità di prova, le sue potenzialità ed i suoi limiti, oltre ad alcuni previsti sviluppi e a varie applicazioni.

2. La tecnica di prova con martinetti piatti

La tecnica di prova con martinetti piatti ha lo scopo di determinare:

- a) la compressione verticale esistente nella muratura;
- b) il modulo elastico in direzione verticale e orizzontale;
- c) la resistenza a compressione;
- d) la resistenza a taglio.

La prova è pertanto suddivisa in fasi successive che verranno brevemente descritte.

a) Misura dello stato di sollecitazione verticale

La prima fase della prova utilizza un approccio che prevede la *liberazione* delle tensioni esistenti in una zona della muratura.

Dopo aver applicato alcuni punti di riferimento sulla superficie della muratura e misurata la loro distanza, viene infatti praticato un taglio piano perpendicolare alla superficie stessa (Fig. 1).

Questo provoca localmente l'azzeramento delle tensioni sulle superfici del taglio e, conseguentemente, la sua parziale chiusura, con una modifica delle distanze mutue tra i punti di riferimento.

Viene quindi inserito nel taglio un martinetto piatto, di ridotto spessore (3-8 mm) e gradualmente aumentata la pressione dell'olio al suo interno fino a riportarsi ad una configurazione geometrica uguale a quella esistente (e misurata) all'origine.

La pressione del martinetto che annulla la convergenza provocata dal taglio è uguale (salvo fattori di correzione) alla tensione verticale media preesistente nella muratura.

Il fattore di correzione deve tenere conto del rapporto tra l'area del martinetto e l'area del taglio (K_a = area martinetto/area taglio) e di una costante (K_m) la quale è legata alla rigidezza intrinseca del martinetto, da determinare mediante prove di taratura in laboratorio.

La tensione media σ nella zona di prova risulta così legatà alla pressione (p) del martinetto da una relazione del tipo:

$$\sigma = K_a \cdot K_m \cdot p \qquad (1)$$

b) Misura delle caratteristiche di deformabilità

La seconda fase della prova si propone di *isolare* un prisma di muratura di dimensioni sufficientemente grandi, da sottoporre a carico noto, in modo da misurare le deformazioni del campione in varie direzioni ed, eventualmente, rilevare la tensione cui corrispondono i primi sintomi di un collasso locale.

Viene pertanto eseguito, parallelamente al primo, un secondo taglio a distanza pari ad 1 - 2 volte la dimensione massima del martinetto. In questo taglio viene poi inserito un secondo martinetto (Fig. 2).

Collegati i due martinetti in parallelo alla medesima pompa, vengono eseguiti alcuni cicli di carico sul campione indisturbato di muratura tra i due martinetti.

Il campione risulta sottoposto ad uno stato di tensione molto prossimo a quello di una prova di compresisone monodimensionale, malgrado il confinamento causato dal parziale collegamento laterale tra il campione e la muratura circostante.

Mediante comparatori fissi o rimovibili applicati nella zona compresa tra i due martinetti, vengono eseguiti vari cicli di carico con la misura delle deformazioni medie sia in direzione verticale che orizzontale (Fig. 3).

È possibile ricavare facilmente il *modulo elastico* verticale mediante la classica formula:

$$E = \sigma / \varepsilon_v \quad (2)$$

dove ε_v è la deformazione verticale misurata in prossimità dell'asse di mezzeria dell'elemento murario.

Stante l'anisotropia del materiale e la presenza del confinamento laterale, per una determinazione del modulo elastico orizzontale 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 agli elementi finiti che simuli la situazione esaminata. In questo modello vengono fatti variare parametricamente i parametri di deformabilità del materiale fino a trovare quelli che al meglio giustificano i risultati sperimentali.

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

Il collegamenteo rimane presente infatti solo sulla faccia parallela alla superficie esterna (Fig. 4).

Questa variante elimina pressochè totalmente l'effetto del contenimento laterale e quindi fornisce risultati più facilmente interpretabili in quanto più prossimi a quelli ottenibili in prove monodimensionali.

È evidente che questa modalità di prova danneggia maggiormente il paramento murario e pertanto spesso non viene consentita dagli organi di controllo quando si operi su edifici monumentali.

c) Valutazione della resistenza a compressione

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 nella fase precedente fino all'apparire delle prime fessure verticali nei mattoni.

Una estrapolazione della curva tensioni - deformazioni consente una buona approssimazione del valore di sigma limite (Fig. 5).

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 pratichino i due tagli verticali.

d) Valutazione della resistenza a taglio

È possibile ottenere ulteriori informazioni sottoponendo contemporaneamente la muratura ad una tensione tangenziale e ad una compressione verticale. [9]

I dati ottenuti sono particolarmente significativi nel caso di verifiche di strutture in zona sismica.

La prova prevede l'utilizzo di un terzo martinetto in grado di esercitare spinte orizzontali su una parte del prisma soggetto a compressione (Fig. 6).

Estratto un mattone (in una zona laterale rispetto al prisma soggetto

a compressione) si posiziona nell'incavo risultante un martinetto a pistone di dimensioni contenute. Quest'ultimo agisce contro il mattone adiacente (già soggetto a compressione) inducendo una sollecitazione tangenziale nella malta di allettamento.

Notiamo che il mattone prescelto era stato preventivamente isolato rimuovendo la malta dei giunti verticali, sia dietro che lateralmente.

Mantenendo costante, a diversi livelli, la tensione verticale (σ) di compressione, viene incrementata la forza laterale in modo da ottenere una tensione tangenziale (τ) nella malta e quindi uno scorrimento del mattone.

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

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

$$\tau = c + \sigma \text{ tg } \phi$$

Questa relazione può essere ottenuta sia per valori di "picco" che per valori "residui" di τ. Vale a dire prima e dopo l'inizio dello scorrimento.

Nei casi in cui sia possibile, risulta molto più rapido adottare anche per la spinta laterale un martinetto piatto, inserito in uno dei due tagli verticali (Fig. 7).

Questa modalità di prova, proposta recentemente dallo scrivente, [10, 11], è attualmente in fase di sperimentazione.

3. Aspetti tecnologici della prova

a) I martinetti

I primi martinetti, utilizzati nel 1979, avevano forme rettangolari e di-

mensioni 40x20x0,8 cm (Fig. 8/a). Tali dimensioni consentono 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), (Fig. 8/b).
Per murature in pietra e pareti in calcestruzzo sono stati proposti martinetti di forma semicircolare [4], (Fig. 8/c).
Più recentemente hanno trovato larga diffusione martinetti estremamente sottili (3 mm) caratterizzati da una forma composta da un semicerchio prolungato con un rettangolo (Fig. 8/d).
Martinetti 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 un taglio allungato, mediante una semplice traslazione della sega circolare [12, 13], (Fig. 8/e).

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_s il più possibile prossimo ad 1).
Questa è una delle ragioni che ha portato in questi anni ad una serie di 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, che si sta diffondendo rapidamente, presenta una superficie di contatto molto più ampia di quelli semicircolari.

A conoscenza dello scrivente per ora non si sono ottenuti risultati incoraggianti con seghe a nastro che, potenzialmente, potrebbero dare luogo a tagli di forme diverse, adattabili alle varie circostanze.

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 [8] 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 geometria dei tagli

Da parte di vari operatori sono state sperimentate varianti a quanto pre-

cedentemente descritto riguardo alle forme e alle posizioni dei tagli praticati nella muratura.
Nel disegno di Fig. 9 vengono riportate alcune di queste possibilità operative.

- La soluzione (a) è quella più adottata.
- La soluzione (b) è preferibile quando esista la possibilità di praticare tagli verticali.
- La soluzione (c) isola completamente il prisma murario (che risulta però a base triangolare).
- La soluzione (d) consente di utilizzare un solo martinetto sia per le prove a compressione che per quelle a deformazione.

d) La strumentazione di misura 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 usualmente mediante comparatori centesimali 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 ad una apparecchiatura di registrazione automatica. Alla stessa centralina vengono collegati anche i trasduttori che rilevano la pressione dell'olio (p) 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 basi per gli estensimetri risulta certamente consigliabile disporle a metà circa di un mattone in modo da essere meno influenzati da disturbi locali.
Spesso questa esigenza porta all'utilizzo di estensimetri di lunghezza

diversa, i quali interessano zone dove la percentuale di malta compresa lungo il loro sviluppo risulta diversa.
È conveniente allora, dopo avere misurato tali percentuali al di sotto di ogni estensimetro, ricorrere come illustrato in [11] a due moduli elastici *di comodo* (E malta ed E mattone) per poter interpretare le varie misure e passare a definire poi il modulo medio E muratura.

d.1) Per la *prima fase delle prove,* ossia la determinazione della tensione in sito, vengono usati abitualmente due o tre basi estensimetriche *"a cavallo"* del taglio (Fig. 10a).
In questo modo si ottiene una misura diretta della convergenza tra i due bordi del taglio, e del suo annullamento, quando venga imposta nuovamente la tensione in sito.
È stata proposta recentemente [8] una diversa disposizione delle basi di misura che prevede tre comparatori ubicati al di sopra e tre al di sotto del taglio (Fig. 10b).
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 ha però un grosso vantaggio rispetto a quello tradizionalmente usato.
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 li 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, benchè 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.
In una recente nota [14], P.P. Rossi dell'ISMES, forte di un'esperienza pionieristica e ormai più che decennale su questa prova, cita varie esperienze effettuate per la determinazione dello schema ottimale delle basi estensimetriche nella valutazione della tensione in sito.
Vengono confrontati a questo scopo gli schemi di Fig. 11 e lo schema (a) viene individuato come quello che dà i migliori risultati.
Esperienze simili, condotte dallo scrivente, indicano che lo schema di Fig. 10/b risulta altrettanto affidabile e, come si accennava pocanzi, più ricco d'informazioni.

d.2) Per la *seconda fase delle prove*, dove si utilizzano i due martinetti piatti è opportuno sistemare almeno tre basi estensimetriche verticali ed almeno una orizzontale (Fig. 12).

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.

4. Affidabilità della prova

La prova viene influenzata da numerosi fattori che se non tenuti nel debito conto, rischiano di rendere inutilizzabili i risultati.

a) Anzitutto va osservato che il *coefficiente* K_m del martinetto non è una costante, ma varia al variare della pressione presente nel martinetto e a seconda della estensione da questo raggiunto durante la prova. La taratura va pertanto effettuata tenendo conto di queste due variabili. Per i vari tipi di martinetto e le varie condizioni di utilizzo K_m varia da 0,8 a 0,95.
I martinetti di forma rettangolare 20x40x0,8 cm e semicircolare-allungata presentano i migliori risultati.
La taratura del martinetto va effettuata periodicamente in quanto una prova condotta su muratura molto deformabile o in presenza di vuoti tra mattone e mattone può rovinare in modo irreversibile il martinetto. La vita media di un martinetto comunque andrebbe limitata ad una quindicina di applicazioni [8].

b) La fase di taglio è particolarmente delicata in termini di affidabilità soprattutto se l'utensile inserito manualmente vibra troppo, oppure se viene forzato a causa di inclinazioni accidentali della sega.

Il foro nella muratura risulta così inevitabilmente alterato. Molto più consigliabile quindi usare lame montate su supporti rigidi.
Notiamo che un diverso spessore del taglio alle varie profondità pregiudica una successiva uniforme distribuzione delle tensioni da parte del martinetto.
Una metodica di uso frequente prevede di effettuare il taglio raffreddando ad acqua la lama.
In particolari murature questo può dilavare la malta, arrivando anche a rimuoverla, e comunque modifica la temperatura superficiale della muratura, ciò che provoca cambiamenti dimensionali, da tenere in conto nell'analisi dei risultati.
A parere dello scrivente manca ancora un sufficiente controllo sperimentale dell'incidenza di questa modalità operativa. Osserviamo che, per contro, un problema analogo è presente anche nella più frequente modalità di taglio *a secco*, che induce, forti riscaldamenti localizzati e conseguenti variazioni dimensionali.

c) Riguardo agli strumenti di misura, la precisione centesimale offerta dagli usuali comparatori (vuoi fissi, vuoi rimovibili) è sufficiente rispetto alle esigenze della prova.
È invece fondamentale la scelta delle posizioni in cui ubicare le basi per le successive misure scegliendo punti non suscettibili di movimenti localizzati.

d) Durante la fase di sperimentazione della prova sono nate perplessità riguardanti la reversibilità delle operazioni effettuate, ossia l'effettivo ripristino delle tensioni esistenti dopo una loro iniziale *liberazione*. Le

perplessità erano legate alle possibili non linearità del fenomeno indotte dalla propagazione di fratture nel materiale e della limitata resistenza a trazione dello stesso.
Prove sperimentali a scala 1:1 condotte presso i laboratori dell'ISMES [14] consentono 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 piatti, *non superiori al 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 in [12] si indica una percentuale di errore inferiore al 20%.

e) È necessario quantificare *l'effetto del contenimento* della muratura circostante quando si determini il modulo elastico e poi il carico a rottura della muratura utilizzando due martinetti.
- Prove condotte ancora dall'ISMES [14] confermano che il modulo elastico ottenuto mediante martinetti piatti (E_m) risulta molto prossimo a quello ottenuto con prove di compressione monoassiale (E_c) di tipo convenzionale, il che evidenzia la scarsa influenza del contenimento laterale. Le differenze riscontrate sono risultate contenute entro l'8% per martinetti di dimensioni 20x40, mentre per martinetti di dimensioni ridotte (24x12 cm) l'errore è stato notevole, raggiungendo anche percentuali dell'80% nella sovrastima della rigidezza del materiale.
Per martinetti semicircolari la norma ASTM [13] cita errori possibili dell'ordine del 24%.

- Prove condotte fino a rottura [14] 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 conforti sperimentali, dovrebbero rilevarsi in prove dove si siano praticati anche i due tagli verticali.

f) Va riscontrato che la pressione nel martinetto presenta ovunque lo stesso valore 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 sui due lati della muratura determinando così la tensione media in prossimità delle due superfici libere (Fig. 13). Una interpolazione dei risultati consente poi di determinare l'andamento trapezoidale del diagramma delle tensioni all'interno della muratura [9, 14]. Un promettente, alternativo, modo di operare è descritto nel seguente paragrafo 5.

g) Non pare superfluo osservare che la prova qui descritta 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 dicasi per il materiale le cui caratteristiche medie, sia in termini di resistenza che di deformabilità, sono influenzate dalla presenza di eterogeneità locali.

5. Sviluppi e potenzialità

La tecnica di prova con martinetti piatti è, come si diceva, relativamente recente e oggetto pertanto di ricerca e di sviluppo.

La qualità ed affidabilità della prova è certamente aumentata con l'adozione di lame per il taglio molto sottile e di martinetti altrettanto 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 gli effetti (difficilmente interpretabili) legati ai fenomeni di viscosità del materiale che si manifestano in prove di durata più lunga.

5.1) 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.

a) Anzitutto è possibile ottenere informazioni sulla deformabilità della parte superiore rispetto a quella inferiore.
Come si osserva in Fig. 14 gli allungamenti rilevati nella zona superiore sono (a parità di lunghezza della base del comparatore) quasi il doppio di quelli rilevati nella parte inferiore.
Superiormente infatti si hanno fenomeni di non linearità legati al debole stato di trazione che si viene a creare nel materiale (non fosse altro per il peso proprio dei mattoni distribuito sopra al taglio); inferiormente il materiale resta, seppur debolmente, sempre compresso.

Questo consente di determinare, usando la parte inferiore, il modulo elastico verticale del materiale.
Va tuttavia meglio definita, da un punto di vista sia teorico che sperimentale, la distanza ottimale alla quale ubicare la base del compratore più lontana dal taglio.
Notiamo comunque che la scelta adottata finora ($50 \div 60$ cm) appare soddisfacente da un punto di vista sperimentale.

b) 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 eseguento, durante la fase del taglio (che è unica e *irripetibile*!), *varie prove di carico a geometria variabile.*
Pare evidente come la presenza di tensioni verticali non costanti nella muratura, ma linearmente variabili come in Fig. 13, comporti durante le fasi di taglio, *andamenti diversi* per la funzione che lega la profondità del taglio (h) alla convergenza dei bordi (δ).
In Fig. 15 vengono mostrati i risultati che illustrano le curve h, δ, ottenute numericamente, mediante un semplice modello elastico ad elementi finiti della muratura.
Nei vari casi considerati si è variata l'eccentricità del carico agente sulla muratura, pur mantenendo costante la risultante delle tensioni.
I risultati vengono forniti sia in valore assoluto, sia adimensionalizzando δ rispetto alla δ_{max} quale ottenuta a fine taglio.
Come era facile intuire il gradiente iniziale di incremento di δ al variare di h è superiore nel caso (c) rispetto al (b) e, a maggior ragione, al caso (a).
La differenza tra le tre curve adimensionalizzate non è particolarmente

evidente, ma questo potrebbe essere legato alla eccessiva semplicità del modello usato per le interpretazioni.
Malgrado sia in fase di approntamento un modello numerico di interpretazione tridimensionale, più realistico, la validazione finale non potrà che essere affidata alla sperimentazione fisica su prismi murari assoggettati a carichi con diverse eccentricità.
La strada tuttavia sembra promettente perchè già durante la primissima 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. Questa informazione consente pertanto di poter prendere delle decisioni operative suffragate da riscontri oggettivi, per eventuali modifiche alla campagna di prova.

5.2) Riguardo alla seconda fase della prova, dove vengono disposti due martinetti tra loro paralleli, pare ancora carente la definizione dell'influenza del *confinamento* esercitato dalla muratura circostante il prisma. Risulta necessaria pertanto 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.

Riguardo ai tagli verticali andrebbe valutata la necessità di realizzarli paralleli tra di loro o convergenti, in modo da separare quasi completamente il prisma dalla muratura circostante.

Anche questa seconda fase di prova va comunque resa più ricca di informazioni per il progettista dell'intervento di consolidamento strutturale. L'adozione dei due tagli verticali pare in questo senso molto opportuna, là dove sia consentito effettuarli.
È possibile infatti inserire martinetti piatti anche in queste fessure e (adottando due pompe idrauliche, una per i martinetti orizzontali ed una per quelli verticali) sottoporre la muratura a *stati tensionali bidirezionali*, determinando così alcuni punti del dominio di rottura in termini di tensioni principali (σ orizzontale e σ verticale).
La Fig. 16 illustra questo concetto.
È possibile ancora praticare i due tagli verticali ed inserire un solo martinetto in una delle fessure, come illustrato in Fig. 17.
Mantenendo costante il carico esercitato dai martinetti superiore ed inferiore, si fa variare il carico orizzonale fino ad ottenere uno *scorrimento* del blocco murario.
È possibile determinare in questo modo, al variare di σ, alcuni punti delle curve limite σ - τ della muratura.
Questa informazione è, palesemente, molto utile in murature di edifici in zona sismica.

6. Conclusioni

La prova con martinetti piatti ha avuto uno sviluppo notevole nei pochi 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 del martinetto, 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 C1196-91, C1197-91 attualizzandole alle modalità di esecuzione e ai tipi di martinetto più adottati nel nostro paese.

Resta tuttavia da sottolineare un aspetto cruciale legato alla significatività della prova, che dipende in modo cospicuo dalla posizione scelta sull'edificio per effettuare la prova.

È opportuna pertanto 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.

Allo stato attuale manca ancora un confronto costruttivo tra le so-

cietà che operano nel settore per valutare le difficoltà incontrate e le soluzioni adottate.

La definizione di uno standard nazionale cui riferirsi, potrebbe, in tal senso, costituire un'utile occasione di incontro e di scambio di esperienze tra gli addetti ai lavori. Uno standard 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, alla fine, deve darne una interpretazione e deve farne uso nel suo processo decisionale.

7. Bibliografia

[1] Rocha, Lopez, Da Silva *"A new technique for applying the method of the flat-jack in the determination of stresses inside rock masses"*, LNEC, Lisbon, 1969.

[2] Leeman E.R., *"The measurement of stress in rock"*, I, II, III, Jl.S.Agr., Ind. Min. Metall. 65, 1964.

[3] 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.

[4] Abdunur, *"Mesure de contraintes per libèration"*, Int. Conf. on Inspection, Maintenance and Repair of Road and Railway Bridges, Brussels-Paris, 1981.

[5] Rossi P.P., *"Analysis of mechanical characteristics of brick masonry by means of non-destructive in-situ tests"*, Proc. 6th IBMaC, Roma, 1982.

[6] Rossi P.P., *"Flat jack test for the analysis of mechanical behaviour of brick masonry structures"*, Proc. 7th IBMaC, Melbourne, 1985.

[7] Rossi P.P., *"Recent developments of the flat-jack test on masonry structures"*, ISMES Bollettino n. 231, 1988.

[8] Jurina L., Califano F., *"Flat-jacks: evolution of the test technique"*, Int. Conf. on Monitoring and Predictive Maintenance of Plants and Structure, Firenze, 1992.

[9] Riccioni R., Rossi P.P., *"Restauro edilizio e monumentale. Diagnosi e consolidamento"*, Editrice Il Cigno, Galileo Galilei, Roma, 1989.

[10] Jurina L., *"Comunicazione orale"*, presentata al Seminario su l'Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni, CCR ISPRA, 1992.

[11] Califano F., Jurina L., *"Martinetti piatti: una applicazione per la valutazione di interventi di consolidamento su murature"*, *Seminario sull'Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni*, CCR ISPRA, 1992.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

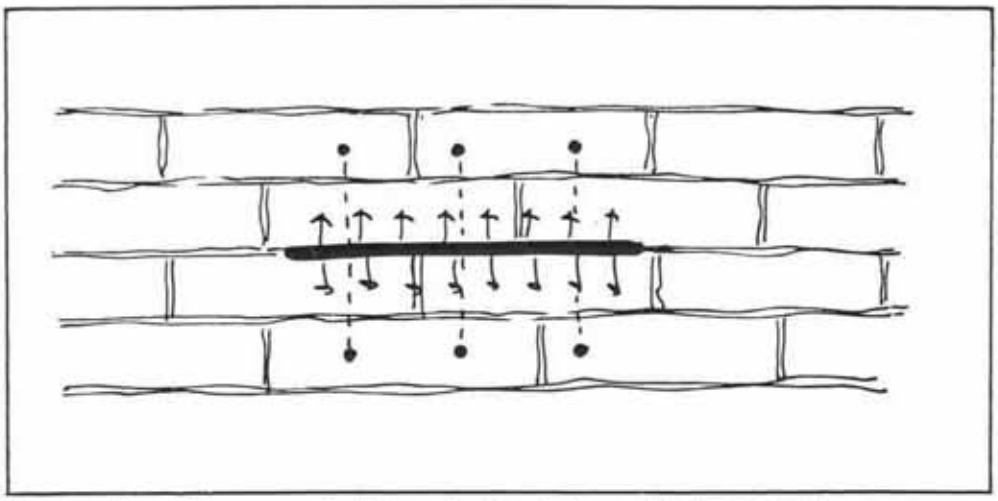


Fig. 1 - Disposizione usuale del martinetto piatto e delle basi di misura per la valutazione della tensione verticale.

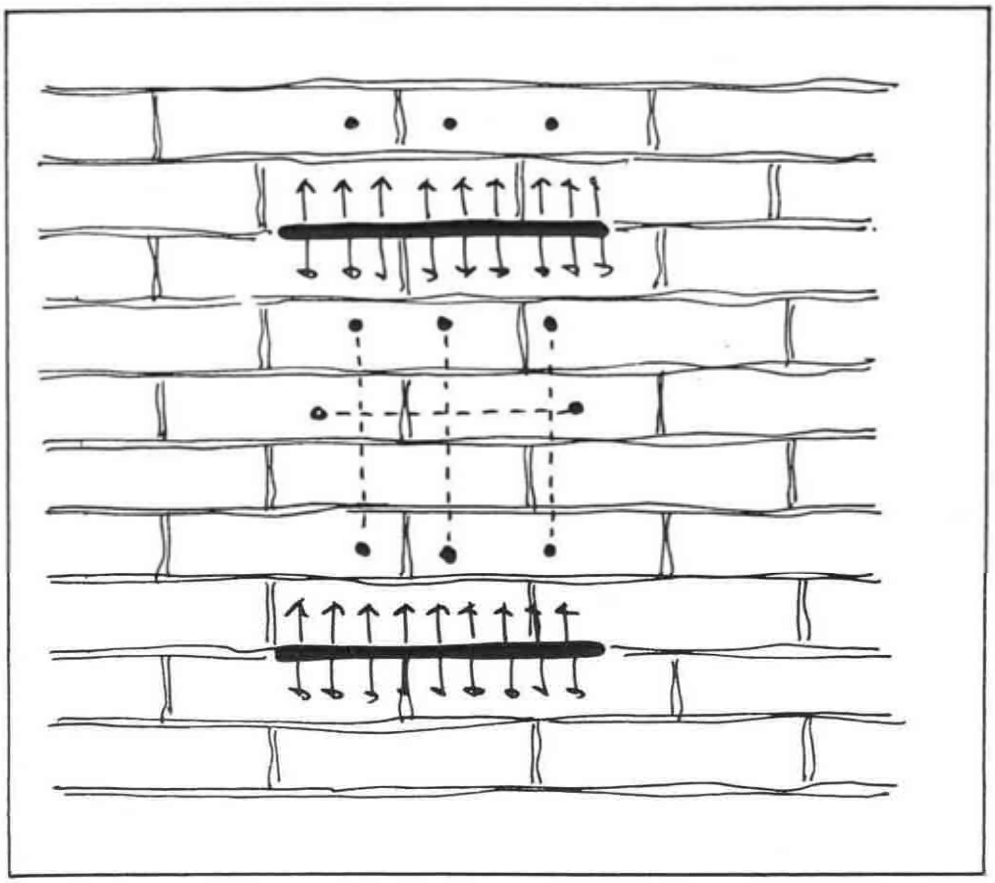


Fig. 2 - Disposizione usuale dei martinetti piatti e delle basi di misura per la valutazione delle caratteristiche di deformabilità.

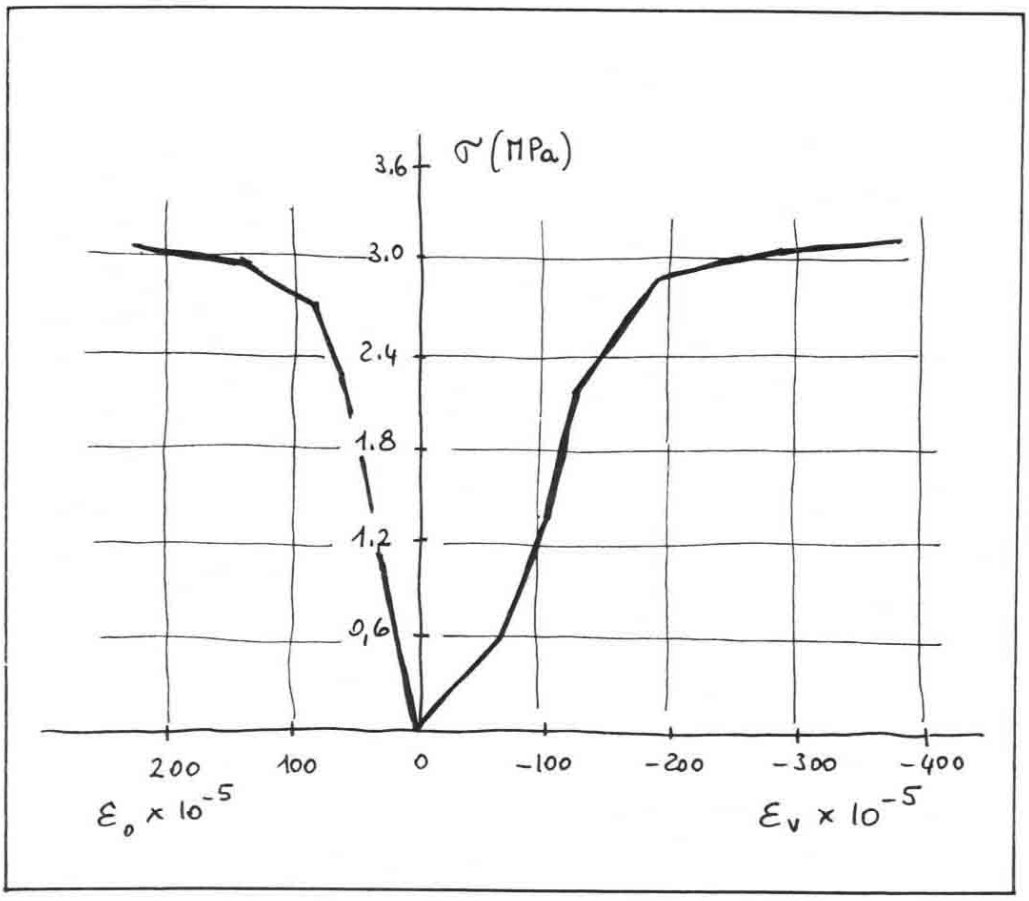


Fig. 3 - Diagrammi tensione verticale - deformazione verticale ($\sigma \div \varepsilon_v$) e tensione verticale - deformazione orizzontale ($\sigma \div \varepsilon_h$) ottenuti con due martinetti piatti.

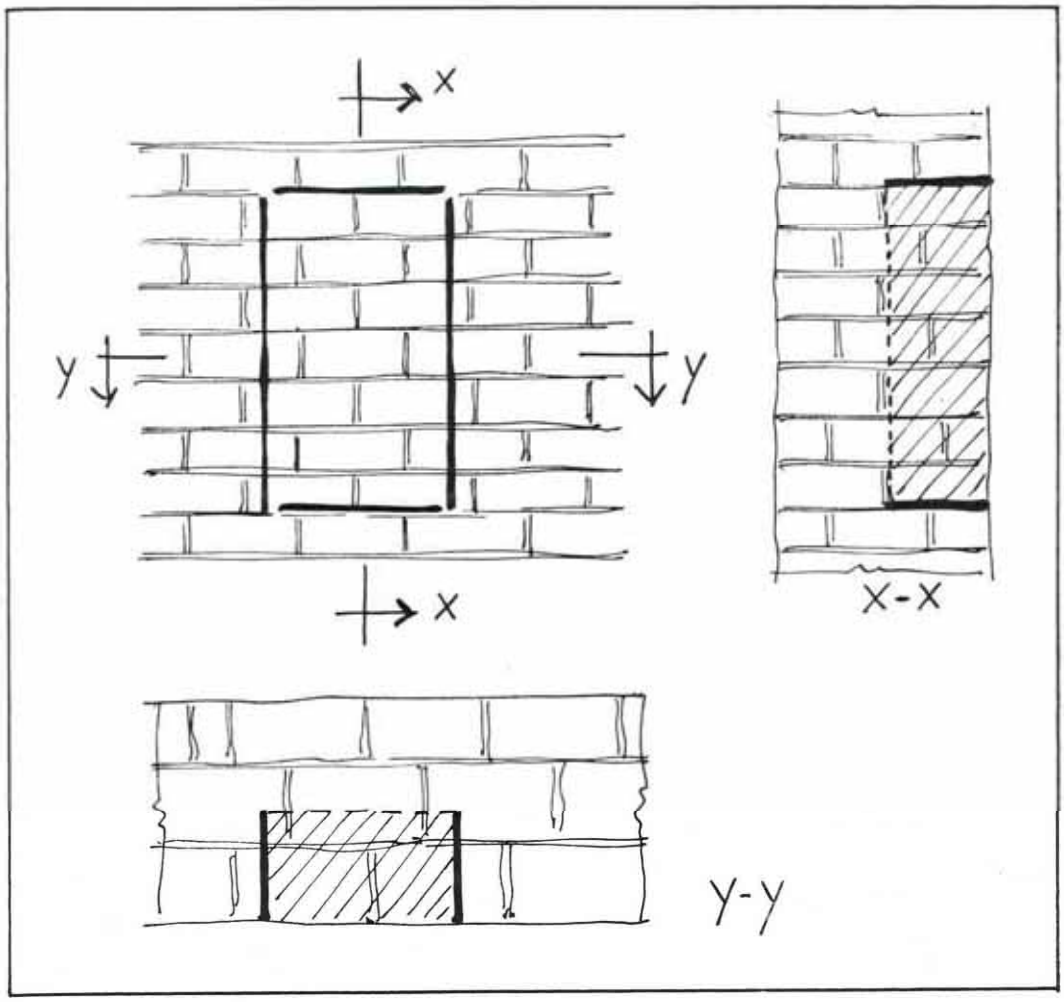


Fig. 4 - Variante alle prove con due martinetti piatti. Vengono praticati anche due tagli verticali per ridurre l'interazione tra la zona esaminata e la muratura circostante.

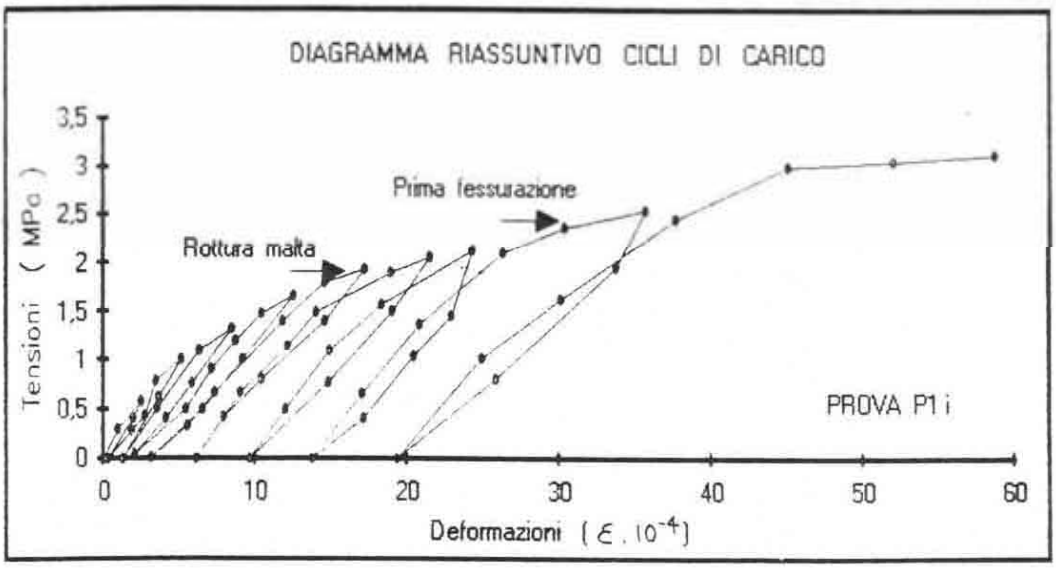


Fig. 5 - Diagramma tensione-deformazione verticale ottenuto durante una prova a più cicli di carico. Si evidenzia la presenza di una tensione limite di rottura.

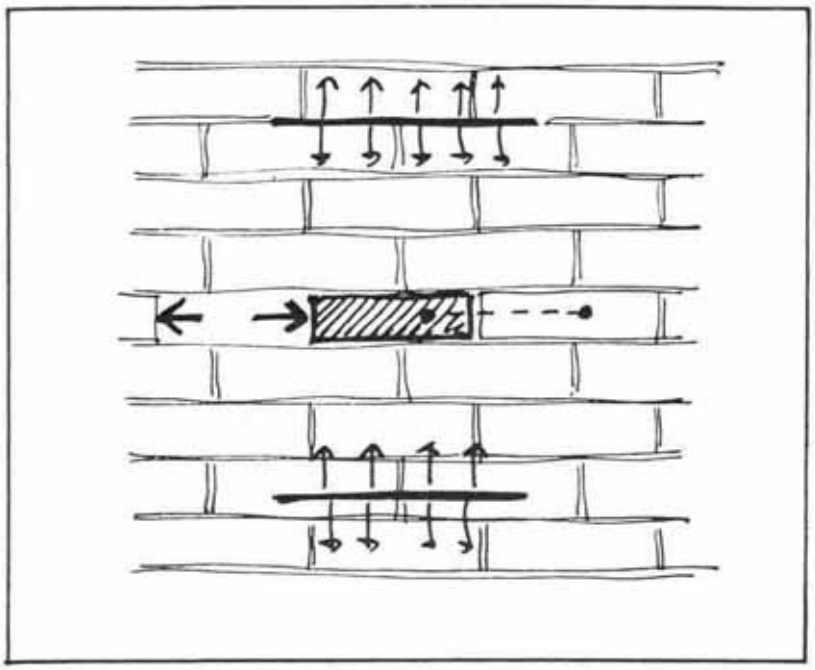


Fig. 6 - Prove di resistenza a taglio della muratura sottoposta a tensione verticale. Un solo mattone viene sottoposto a carico orizzontale.

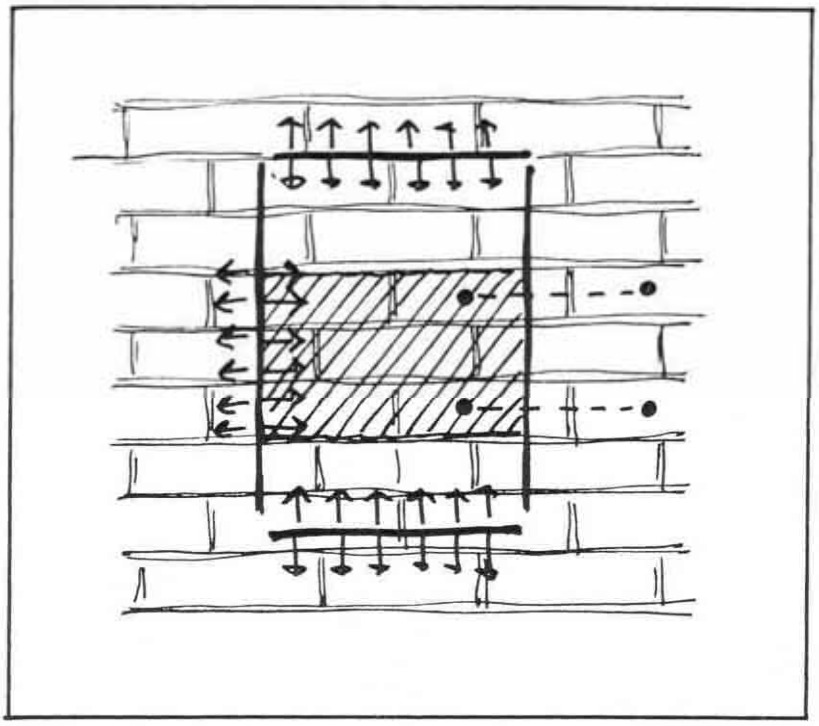


Fig. 7 - Prove di resistenza a taglio della muratura, con utilizzo di 3 martinetti piatti.

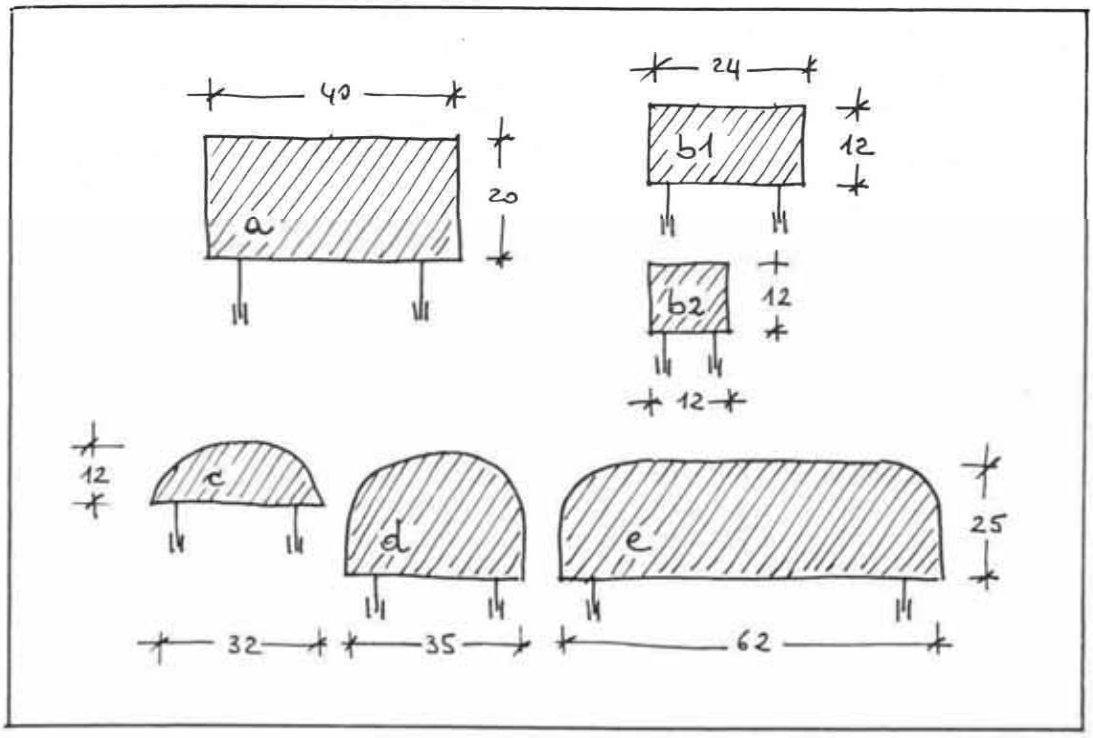


Fig. 8 - Dimensioni e sagome di martinetti piatti.

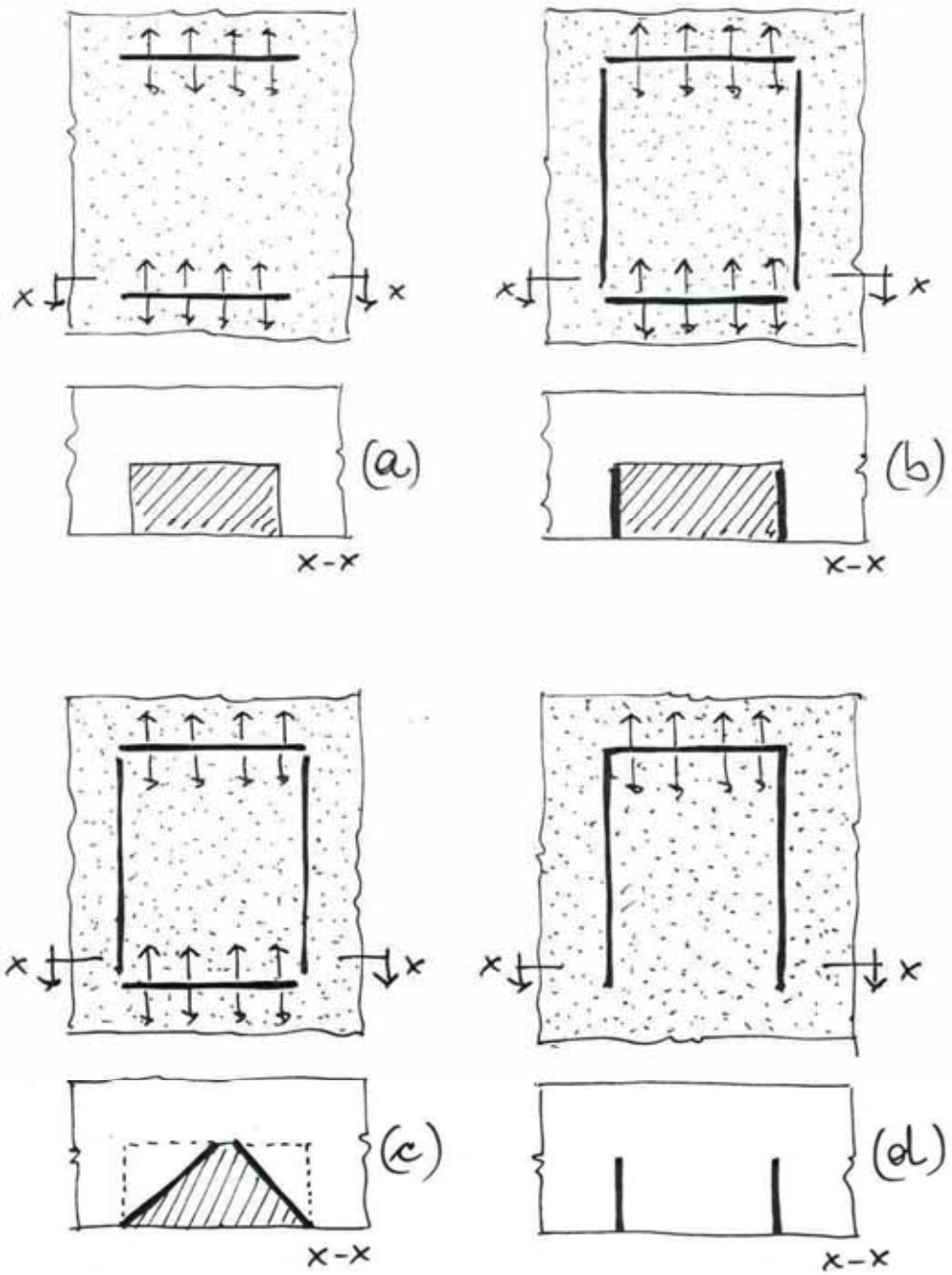


Fig. 9 - Forma e posizione dei tagli praticati nella muratura secondo diverse metodologie.
a) due tagli orizzontali
b) due tagli orizzontali e due verticali paralleli
c) due tagli orizzontali e due verticali convergenti
d) un taglio orizzontale e due tagli verticali

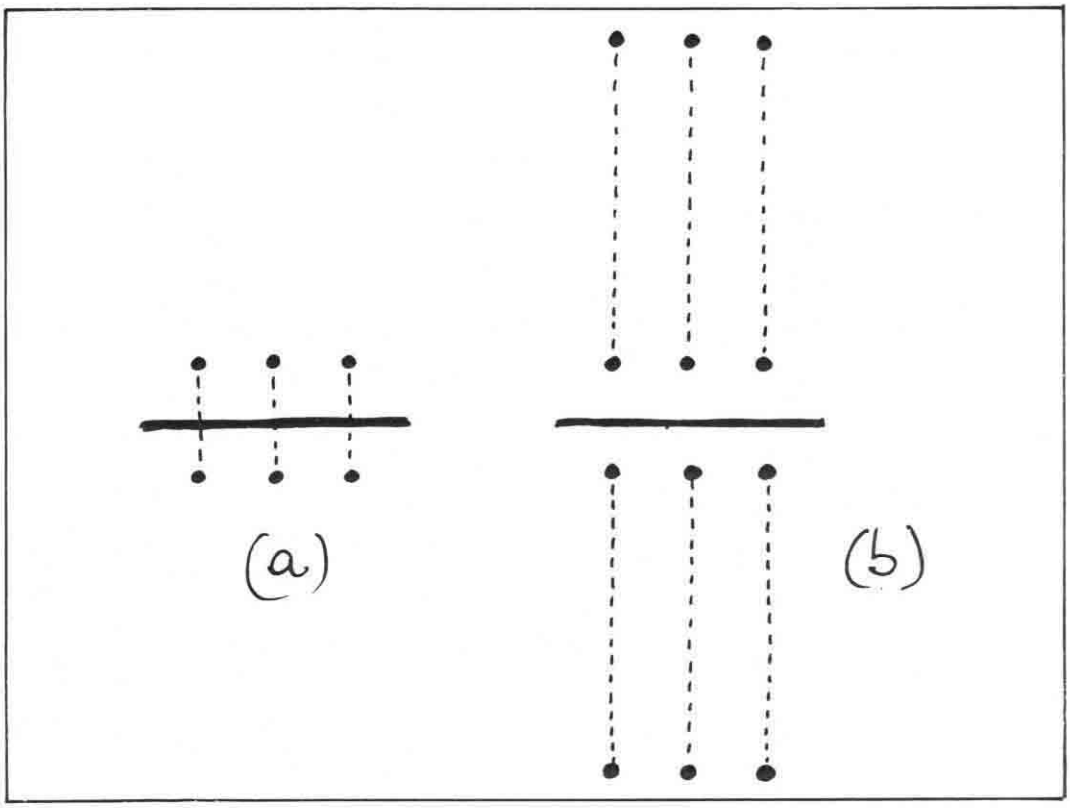


Fig. 10 - Disposizione delle basi estensimetriche nella prova con un martinetto piatto:
a) disposizione usuale, a cavallo del taglio
b) disposizione alternativa che permette di ottenere misure durante l'operazione di taglio.

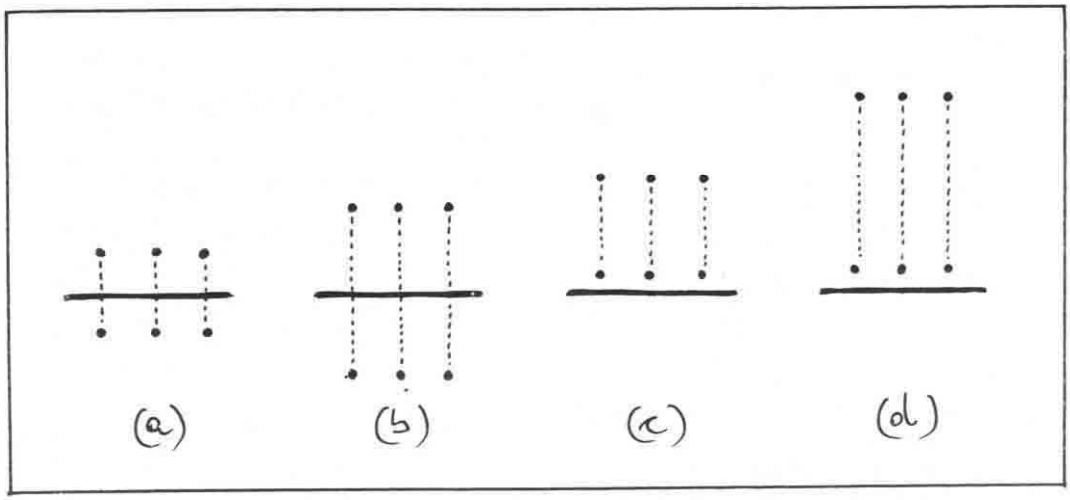


Fig. 11 - Altre possibili disposizioni delle basi estensimetriche nella prova con un martinetto piatto.

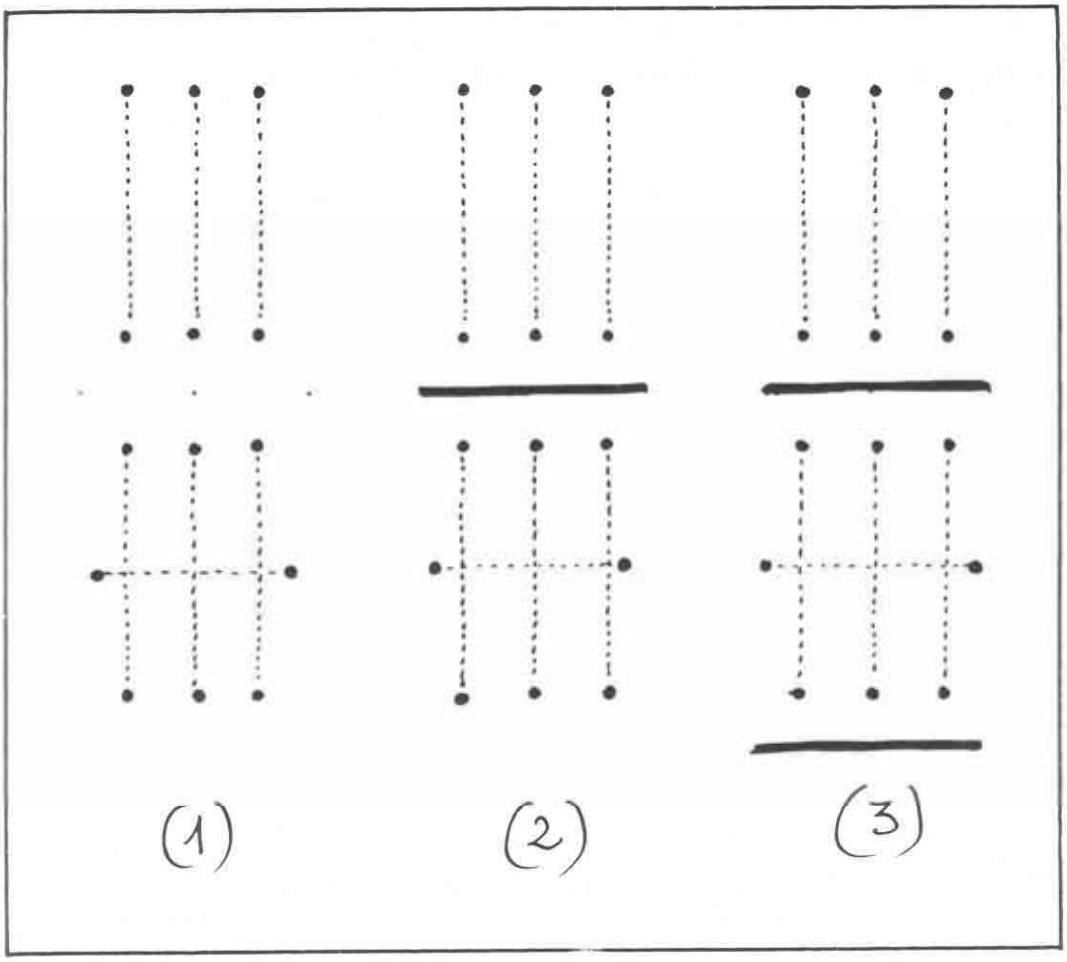


Fig. 12 - Disposizione proposta delle basi estensimetriche.
1) misurazione prima del taglio
2) esecuzione del primo taglio e successive misurazioni
3) esecuzione del secondo taglio e successive misurazioni

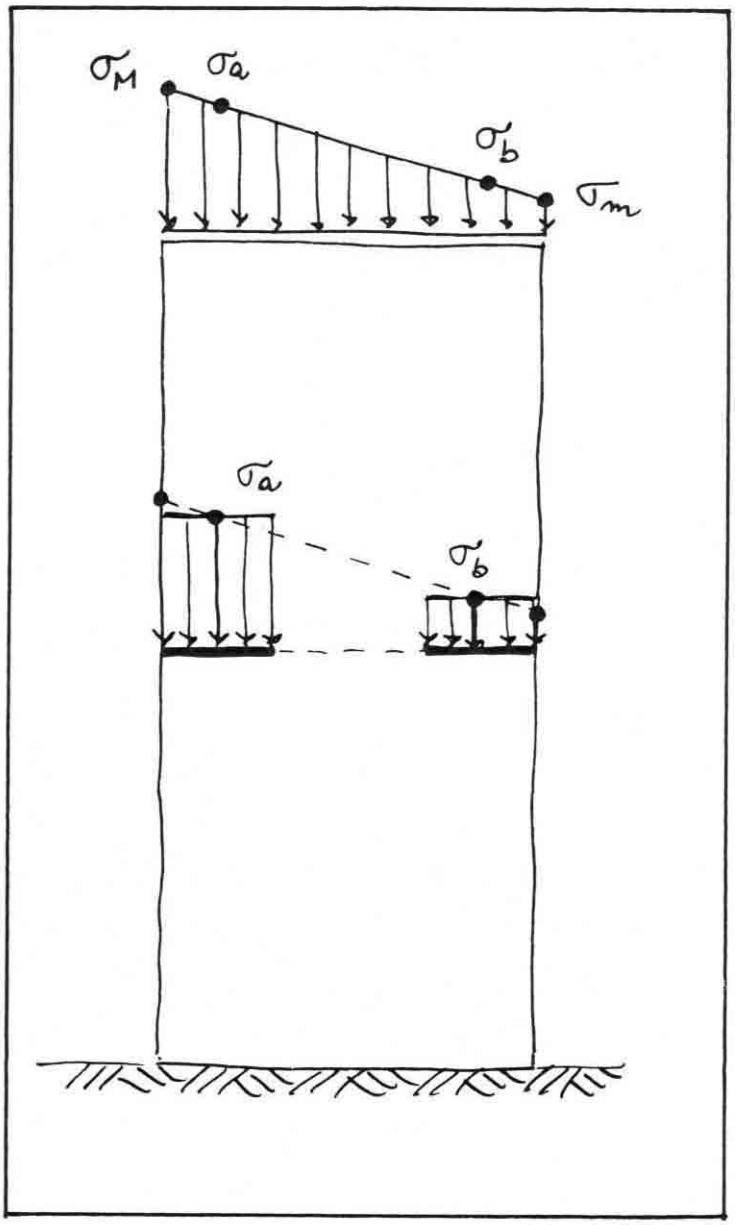


Fig. 13 - Determinazione delle tensioni medie in prossimità delle zone di superficie, in muratura soggetta a pressoflessione.

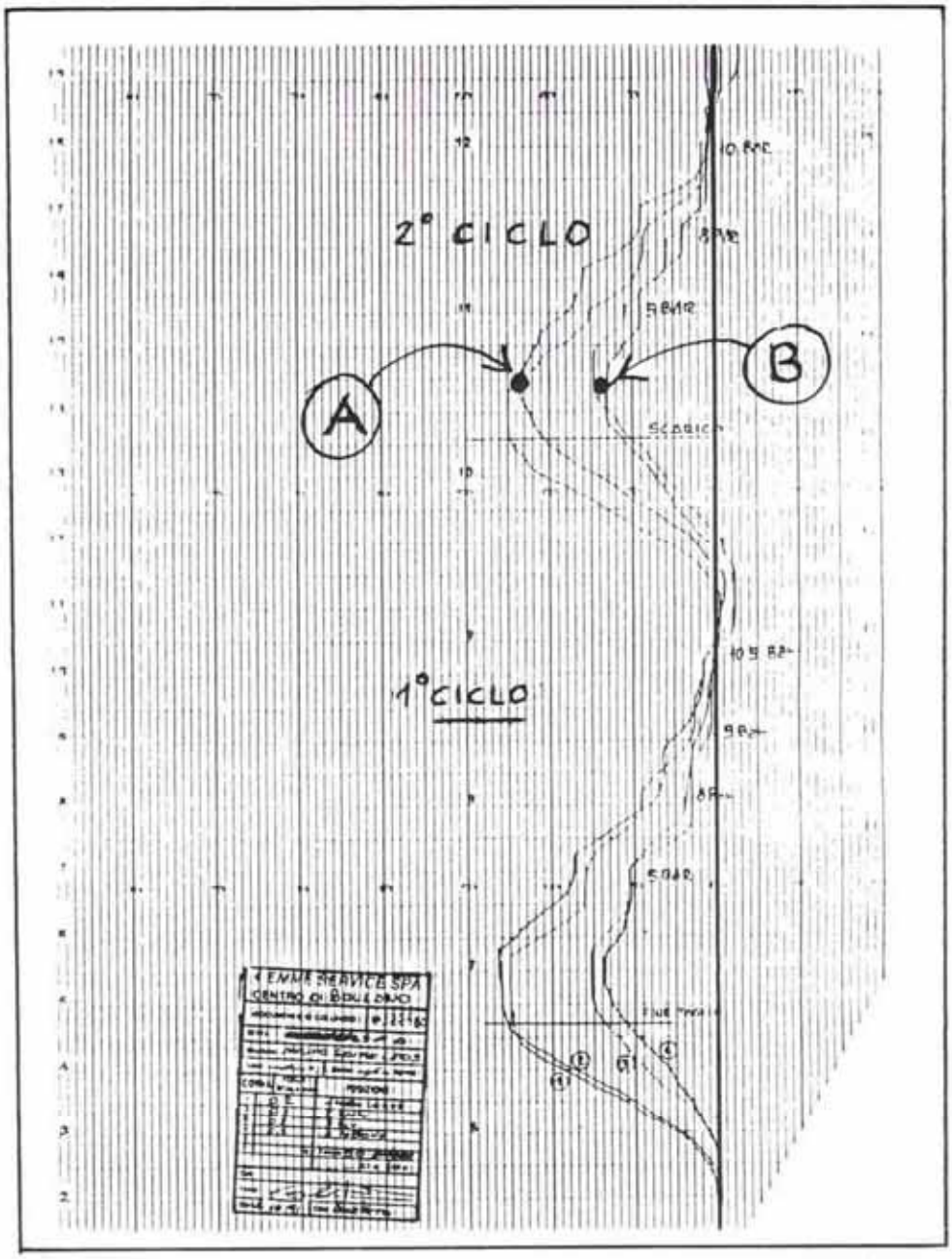


Fig. 14 - Diagramma carico-spostamenti-tempo in una prova con un martinetto piatto
a) risposta nella zona superiore al martinetto
b) risposta nella zona inferiore al martinetto
(a parità di lunghezza della base estensimetrica)

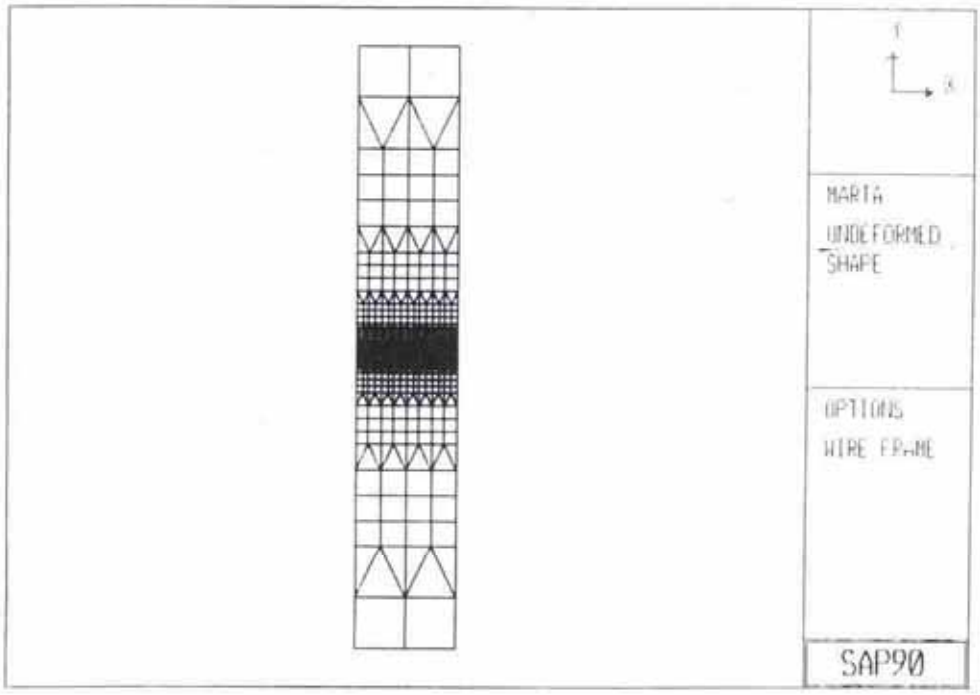
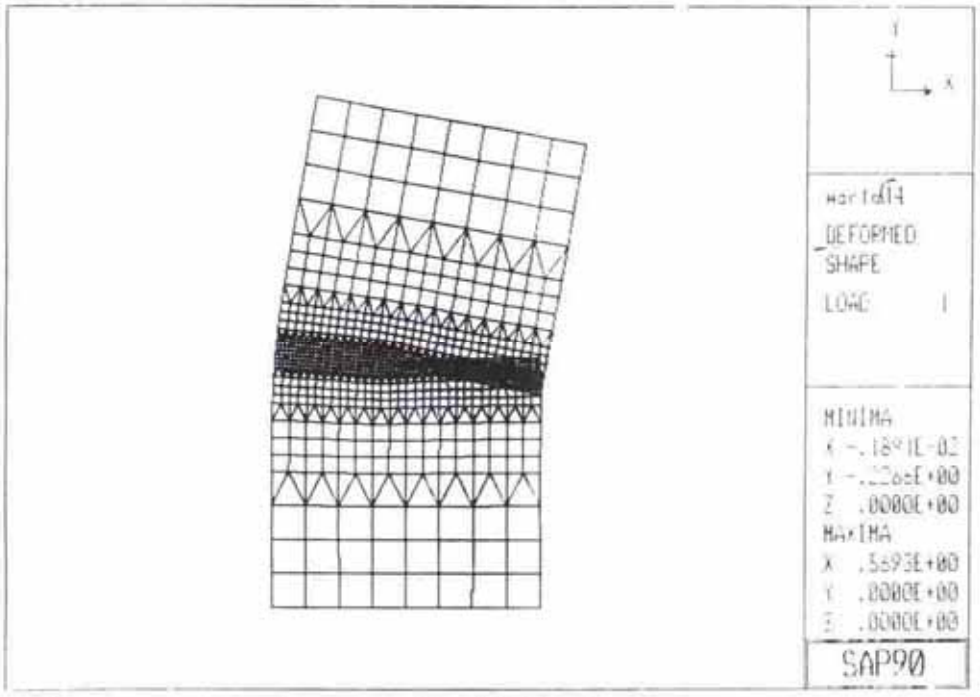
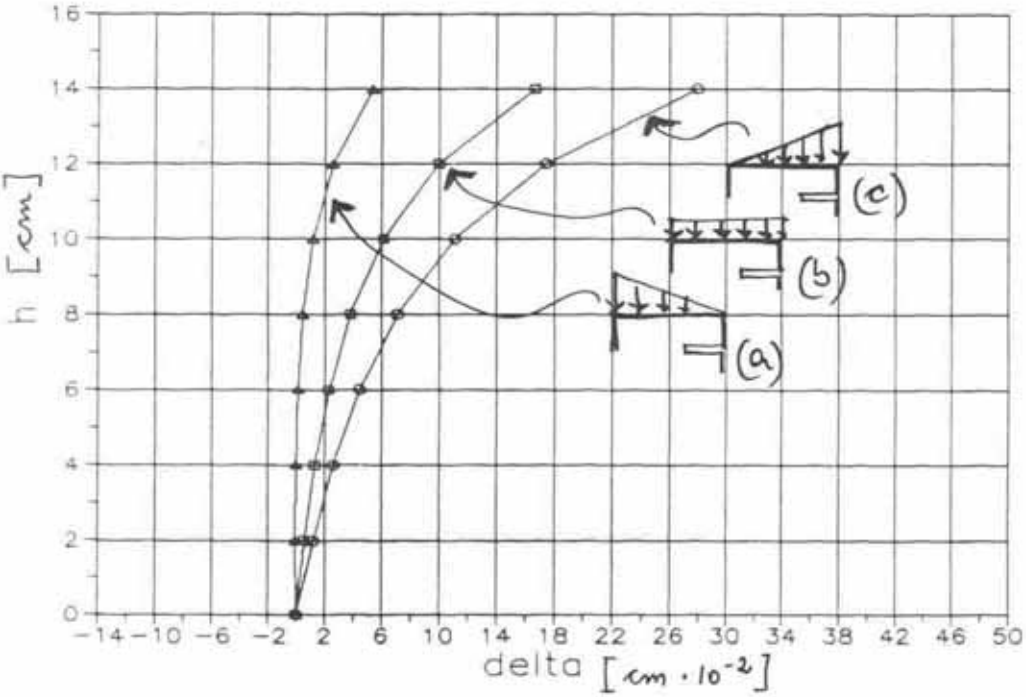


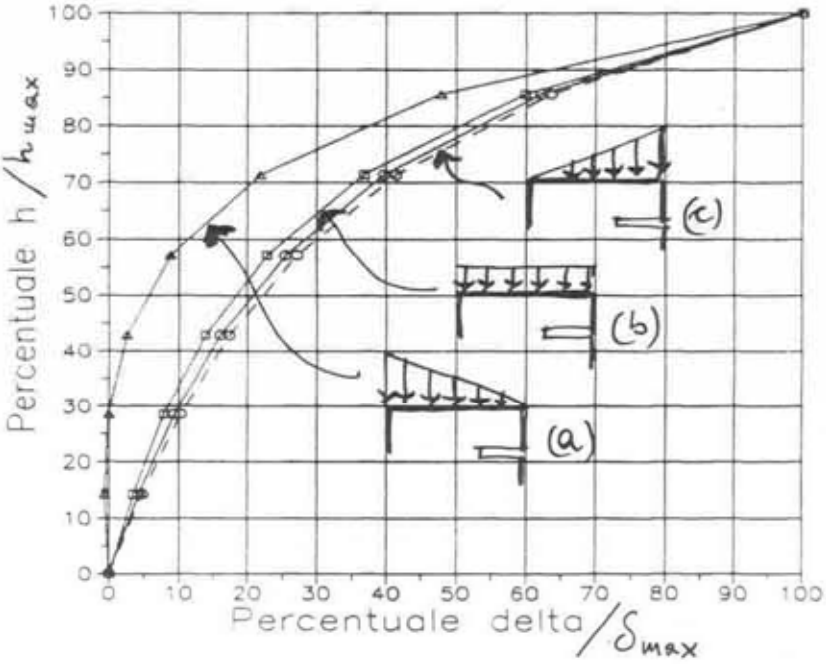
Fig. 15 - Variazione della convergenza tra i bordi del taglio (δ) all'aumentare della profondità del taglio (h)
a) modello agli elementi finiti adottato



b) convergenza amplificata, tra i bordi del taglio



c) relazione h ÷ δ , per varie eccentricità del carico



d) relazione h/h_{max} ÷ δ/δ_{max}, per varie eccentricità del carico

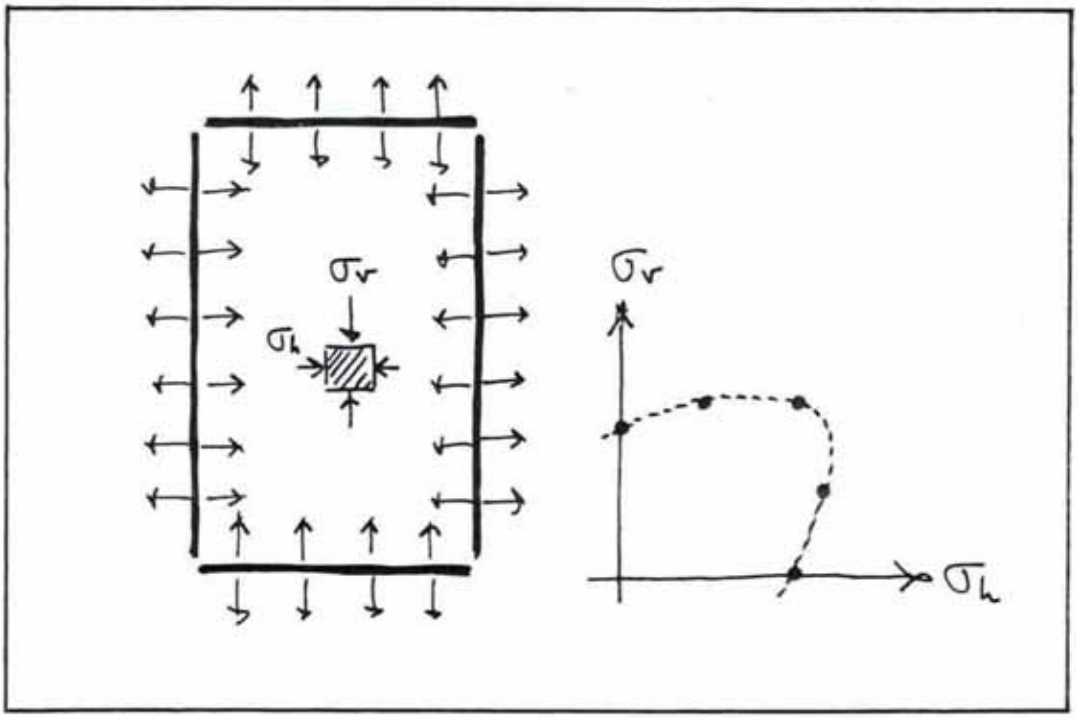


Fig. 16 - Muratura soggetta a stato tensionale $\sigma_v \div \sigma_h$ *e determinazione del dominio di rottura*

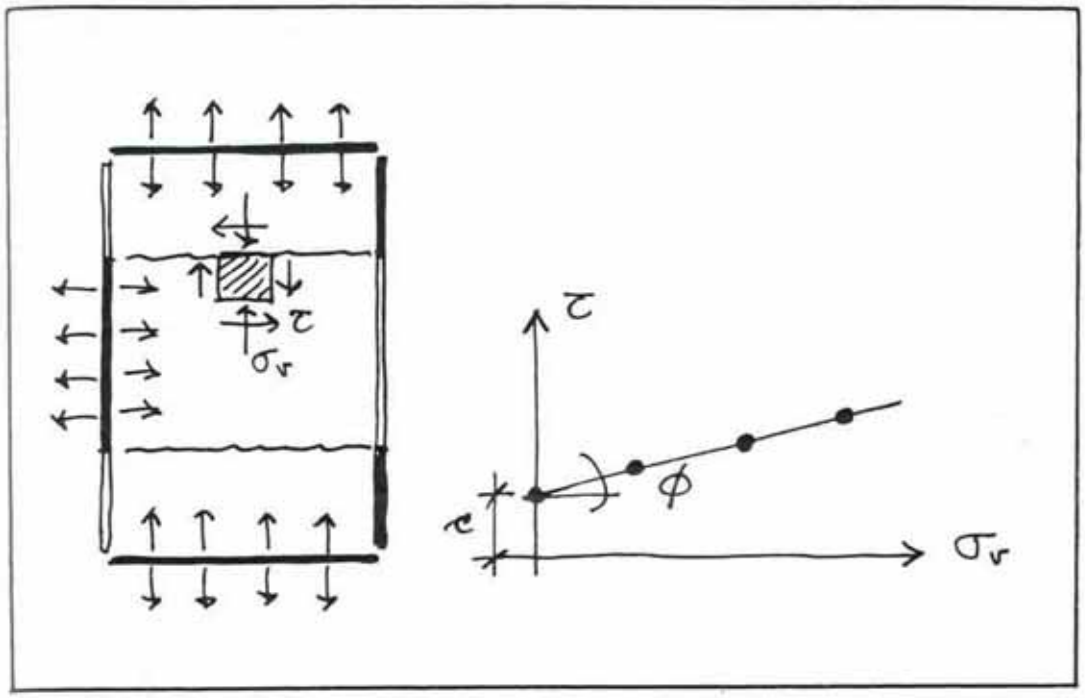


Fig. 17 - Muratura soggetta a stato tensionale $\sigma_v \div \tau$ *e determinazione dei valori di coesione (c) ed angolo di attrito* (ϕ).