

Pier Paolo Rossi, Alberto Peano, Edmondo Carabelli

Determinazione sperimentale delle caratteristiche meccaniche delle murature

(estratto da: AA.VV., *Comportamento statico e sismico delle murature*, Milano (1982); per gentile concessione della CLUP)



2.1. Premessa

Ogni intervento di restauro statico su vecchi edifici richiede una conoscenza approfondita delle caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti la struttura.

Il problema della determinazione dei parametri necessari per la stesura del progetto di restauro si presenta particolarmente difficile nel caso di mura-ture in laterizio o pietra le quali presentano una marcata eterogeneità es-sendo costituite da materiali dotati di elevate caratteristiche meccaniche al-ternati a strati di malta con caratteristiche decisamente più scadenti.

L'approccio più semplice a disposizione del progettista per risolvere il pro-bblema della caratterizzazione del materiale è costituito dalle prove mecca-niche di tipo distruttivo eseguite su campioni, il più possibile indisturbati, prelevati dalla struttura. Questi campioni devono essere, come noto, suffi-cientemente rappresentativi del comportamento medio globale della strut-tura, per cui ci si trova sovente nella necessità di sottoporre a prove mec-caniche campioni di muratura di grandi dimensioni che non sempre pos-sono essere prelevati dalle strutture murarie. Nel caso di edifici di interes-se storico e monumentale è addirittura impossibile il prelievo anche di campioni di piccole dimensioni.

L'esigenza di caratterizzare in modo corretto la muratura attraverso prove meccaniche di tipo distruttivo su campioni rappresentativi di grande di-mensione, trova quindi un ostacolo spesso insuperabile nella difficoltà di prelievo dalla struttura dei campioni richiesti. Occorre inoltre rilevare che le scadenti caratteristiche della malta presente nelle vecchie murature non permette nella maggior parte dei casi di prelevare campioni indisturbati se non adottando tecniche di prelievo particolarmente sofisticate e onerose. I risultati di prove meccaniche eseguite su campioni di muratura alterati durante la fase del prelievo sono di scarsa attendibilità e possono condurre a vistose sottostime delle caratteristiche meccaniche.

Le enormi difficoltà connesse col prelievo di campioni rappresentativi dal-le strutture murarie possono essere evitate facendo ricorso a tecniche di prova di tipo non-distruttivo. In questo ambito si dimostrano particolar-mente utili le indagini soniche le quali si basano sullo studio delle caratte-ristiche di propagazione delle onde elastiche nel mezzo in esame.

Come noto però, queste misure possono essere influenzate dalle disconti-nuità presenti all'interno della struttura per cui i risultati che ne conseguono forniscono solo una valutazione qualitativa del comportamento fisico-meccanico della muratura. Notevoli errori possono essere compiuti qualora si pretenda di utilizzare le sole misure geofisiche per una valutazione anche quantitativa dei parametri meccanici.

Per questo motivo è indispensabile che, in parallelo a questa utilissima me-todologia di indagine, vengano messe a punto prove meccaniche "non-di-struttive" che permettano una determinazione diretta dei parametri neces-sari a definire il comportamento meccanico della muratura.

Una speciale tecnica di prova, basata sull'impiego di martinetti piatti, è stata messa a punto da Rossi per determinare 'in situ' le caratteristiche di defor-

mabilità di campioni di muratura di grandi dimensioni senza l'estrazione o l'alterazione del campione. Questa tecnica di prova permette inoltre, in una prima fase, di acquisire un'altra importantissima informazione sul comportamento meccanico della struttura: la misura dello stato di sollecitazione presente nel punto di prova.

In questo capitolo vengono illustrate alcune tecniche per la determinazione sperimentale delle caratteristiche meccaniche della muratura utilizzate dall'ISMES, che ha sempre rivolto particolare attenzione ai problemi relativi al restauro statico di edifici di interesse storico e monumentale. Nella prima parte vengono illustrate le prove meccaniche di tipo distruttivo e non distruttivo. Quindi si accennerà all'utilizzo dell'elaboratore elettronico per identificare, attraverso i risultati delle prove non distruttive, i parametri elastici che governano il comportamento deformativo della muratura. Infine vengono descritte le tecniche di rilievo con metodi sonici delle caratteristiche elastiche dinamiche e dello stato di integrità delle murature. Tra di esse viene illustrato un metodo di indagine basato sulla spettroscopia sonica delle murature; questo nuovo metodo è stato impiegato a scopo sperimentale per la localizzazione delle canne fumarie, ma può prestarsi in futuro ad indagini speditive con finalità diverse.

2.2. Prove meccaniche di tipo distruttivo

2.2.1. *Prove su materiali costituenti la muratura*

Campioni di piccole dimensioni sono sufficienti per la determinazione delle caratteristiche fisico-meccaniche degli elementi costituenti la muratura. Sono generalmente prelevati mediante piccole carotatrici ad avanzamento manuale e sono sottoposti a prova di compressione monoassiale dopo aver spianato e rettificato le due basi. Estensimetri a resistenza elettrica incollati sulla superficie laterale permettono di misurare le deformazioni assiali e diametrali del campione durante l'intero arco della prova, fino a rottura. Mediante la prova di compressione monoassiale si determinano sia le caratteristiche di deformabilità del campione (modulo di elasticità E e coefficiente di Poisson ν) che le caratteristiche di resistenza a rottura.

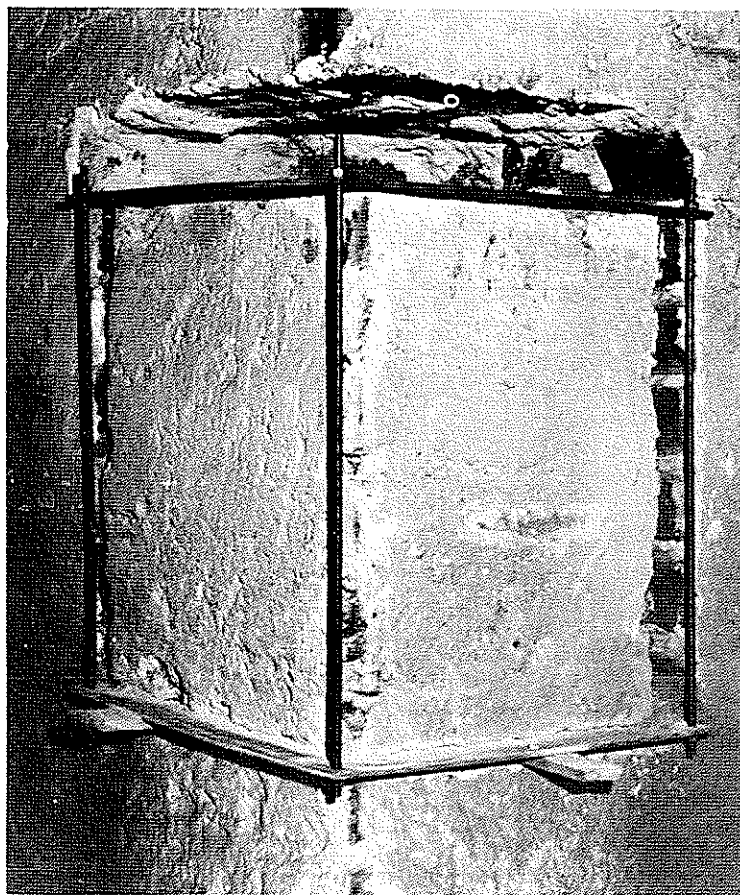
Prima di essere sottoposto a prova meccanica, sul campione viene eseguita una serie di prove di qualificazione per la caratterizzazione fisica del materiale; si determinano in particolare:

- peso dell'unità di volume;
- peso specifico assoluto;
- velocità di propagazione delle onde elastiche longitudinali (correlabile coi parametri di deformabilità e resistenza del materiale).

Molto più difficile si presenta la determinazione delle caratteristiche meccaniche della malta per la impossibilità di ricavare campioni di dimensioni sufficienti da sottoporre a prova di compressione monoassiale. In questo caso il problema può essere risolto mediante prove di taglio diretto esegui-



(a)



(b)

Fig. 2.1
Fasi di prelievo di un campione di muratura.

te su corsi di malta prelevati, con tecniche di campionamento indisturbato, unitamente ai due mattoni adiacenti. Si perviene in tal modo alla determinazione dei seguenti parametri di resistenza meccanica della malta: angolo di attrito interno e coesione.

2.2.2. Prove su campioni di muratura di grandi dimensioni

Le prove eseguite sugli elementi componenti non sono sufficienti a fornire un quadro completo del comportamento meccanico di assieme della muratura. Per questo motivo è indispensabile che le caratteristiche globali di deformabilità a resistenza vengano determinate mediante prove meccaniche eseguite su campioni di muratura sufficientemente rappresentativi dell'intera struttura. Questi campioni devono aver dimensioni tali da comprendere alcuni corsi di mattoni (almeno 4 o 5) coi relativi corsi di malta e devono essere prelevati con particolari tecniche di campionamento indisturbato.

Una interessante tecnica di prelievo, messa a punto dall'ISMES nel corso delle indagini eseguite sulle strutture murarie di uno stabile in Piazzale D'Adda a Milano, ha permesso di ricavare campioni di dimensioni 40x50x20 cm. Il prelievo è stato eseguito nella muratura dello scantinato dell'edificio secondo le modalità illustrate in Figura 2.1. Si è proceduto in primo luogo all'esecuzione di due tagli piani paralleli, in corrispondenza di due

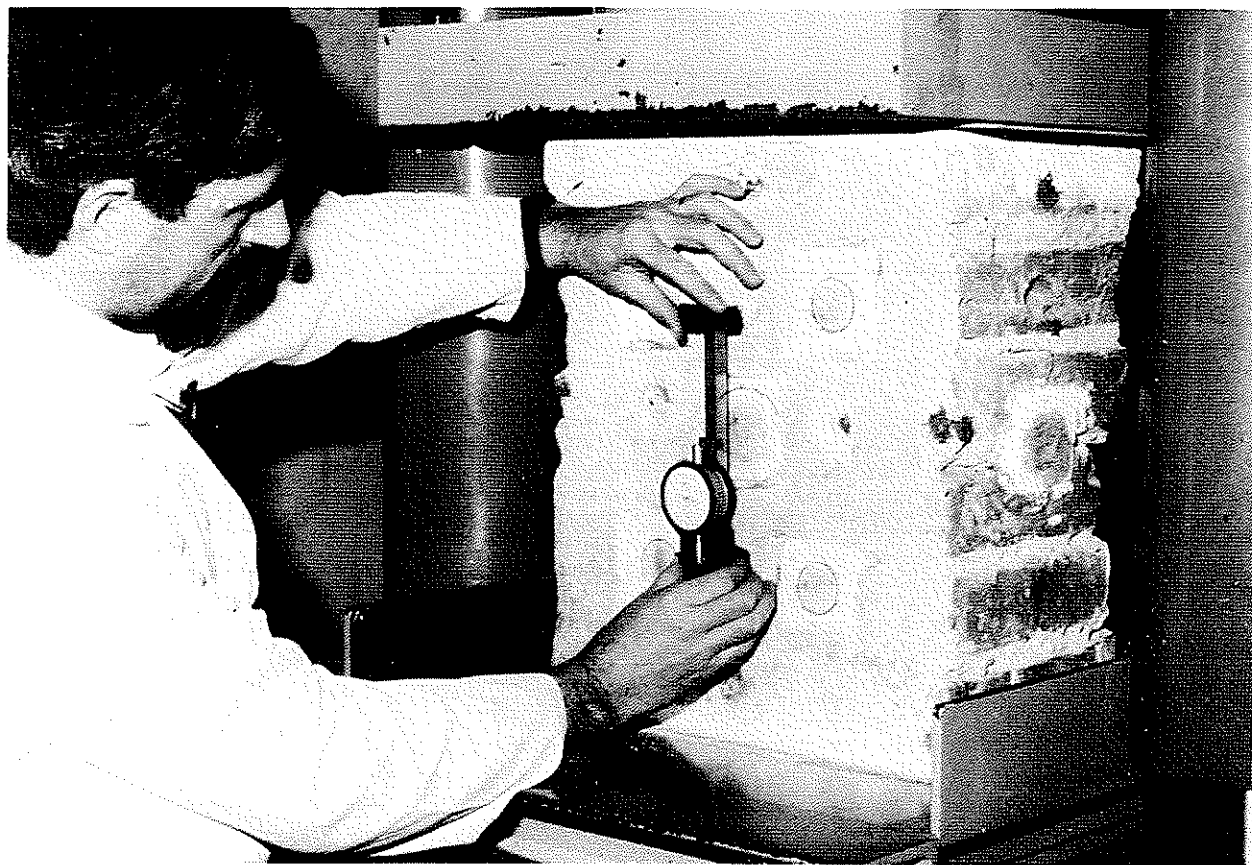


Fig. 2.2

Prova di compressione monoassiale su un campione di muratura di dimensioni 40x50x20 cm. Sono visibili le basi per la misura della velocità sonica durante le fasi di prova.

corsi di malta, all'interno dei quali sono stati inseriti due piatti metallici collegati mediante tiranti in acciaio. Il taglio delle facce laterali del campione è stato eseguito dopo aver applicato, mediante i tiranti, un piccolo carico di contenimento al campione. Si è cercato in tal modo di alterare e di decomprimere il meno possibile durante le operazioni di prelievo il campione di muratura oggetto della prova. Dopo aver regolarizzato le teste mediante un sottile strato di gesso, ciascun campione è stato sottoposto a prova di compressione monoassiale per la determinazione del modulo di deformabilità assiale e trasversale e della resistenza a compressione. Per la misura delle deformazioni del campione si è fatto uso di estensimetri meccanici di tipo rimovibile con base 40 cm (Figura 2.2).

In Figura 2.3 sono riportati, a titolo d'esempio, i diagrammi sforzi-deformazioni rilevati su n. 5 campioni. Si osserva che, per valori di sollecitazione molto bassi ($< 0,3$ MPa), le curve volgono la concavità verso l'alto, il che significa che nella fase iniziale ha luogo un processo di progressivo consolidamento della malta. Nel campo di sollecitazioni compreso fra 0,3 e 1,5 MPa la muratura presenta un comportamento deformativo di tipo lineare. Per valori di sollecitazione superiori a 1,5 MPa iniziano a manifestarsi deformazioni plastiche e viscosi via via più accentuate a mano a mano che ci si approssima al limite di rottura del materiale. I valori della resistenza a compressione monoassiale σ_c dei campioni prelevati dalle murature dell'edificio di Piazzale Dateo sono risultati compresi tra 2,25 e 4,0 MPa. Di particolare interesse risulta di norma il confronto tra i valori del modulo di deformabilità E_c e i corrispondenti valori della resistenza a compressione σ_c , come indicato nel diagramma di Figura 2.4 che si riferisce all'esempio sopra citato. I valori di E_c riportati nel diagramma sono stati calcolati in corrispondenza di un intervallo di sollecitazione compreso fra 0,9 e 1,2 MPa. Una interpolazione lineare ha permesso di determinare nel caso in esame la seguente correlazione fra E_c e σ_c :

$$E_c = 496,48 \cdot \sigma_c - 117,6$$

coefficiente di correlazione: $r = 0,818$.

2.3. Prova meccanica di tipo non-distruttivo

Come osservato al paragrafo 2.1, le notevoli difficoltà connesse col prelievo di campioni rappresentativi di grandi dimensioni dalle strutture murarie degli edifici di interesse storico e monumentale, hanno consigliato di ideare e mettere a punto tecniche di indagine alternative di tipo non-distruttivo.

In questo ambito, particolarmente interessante si presenta una metodologia di prova, basata sull'impiego di martinetti piatti, già ampiamente collaudata nel campo della meccanica delle rocce per la determinazione dello stato di sollecitazione naturale di un ammasso roccioso. La prova si articola in due fasi distinte.

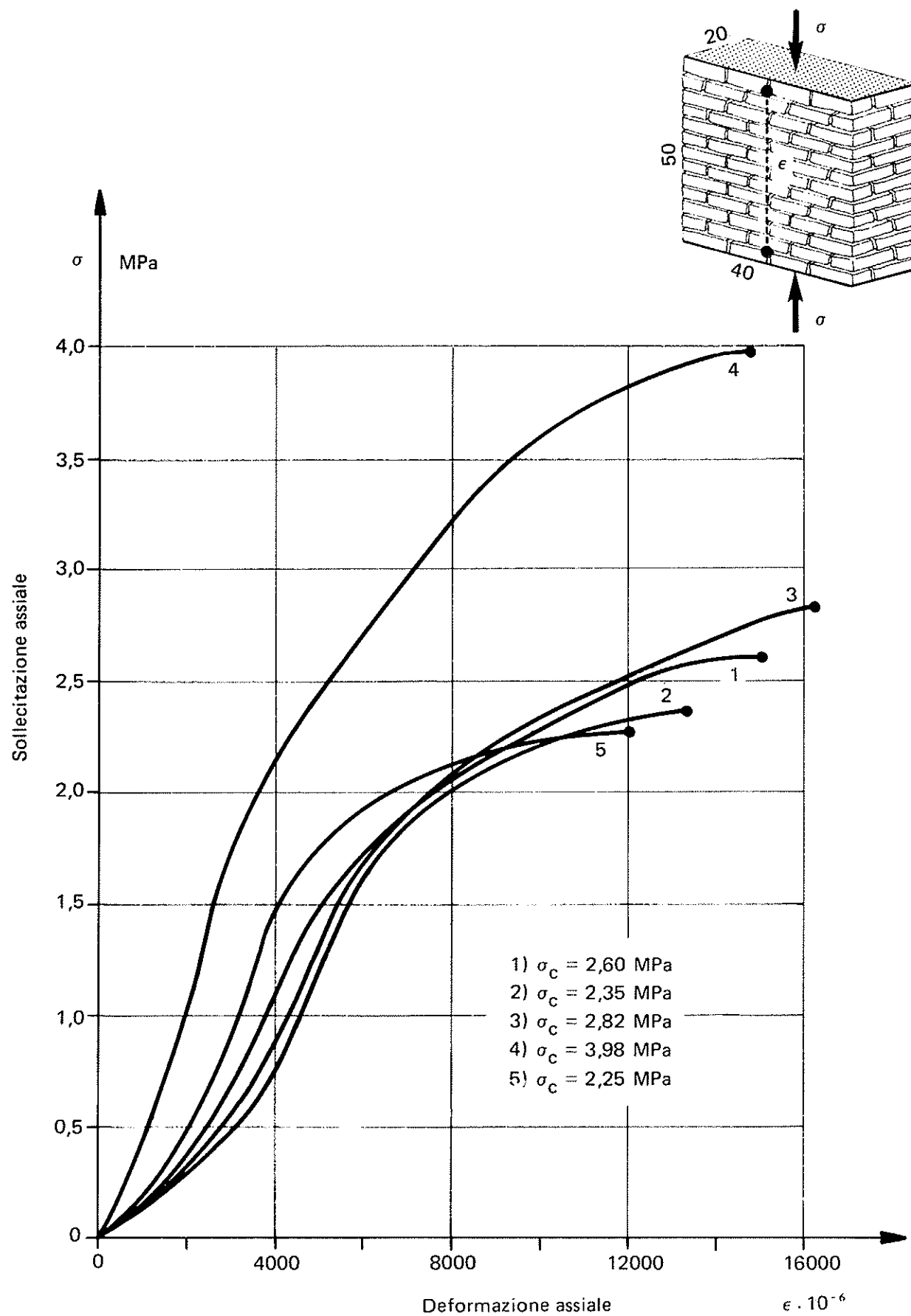


Fig. 2.3
 Prove di compressione monoassiale. Curve complete sforzi-deformazioni rilevate su
 n. 5 campioni di muratura.

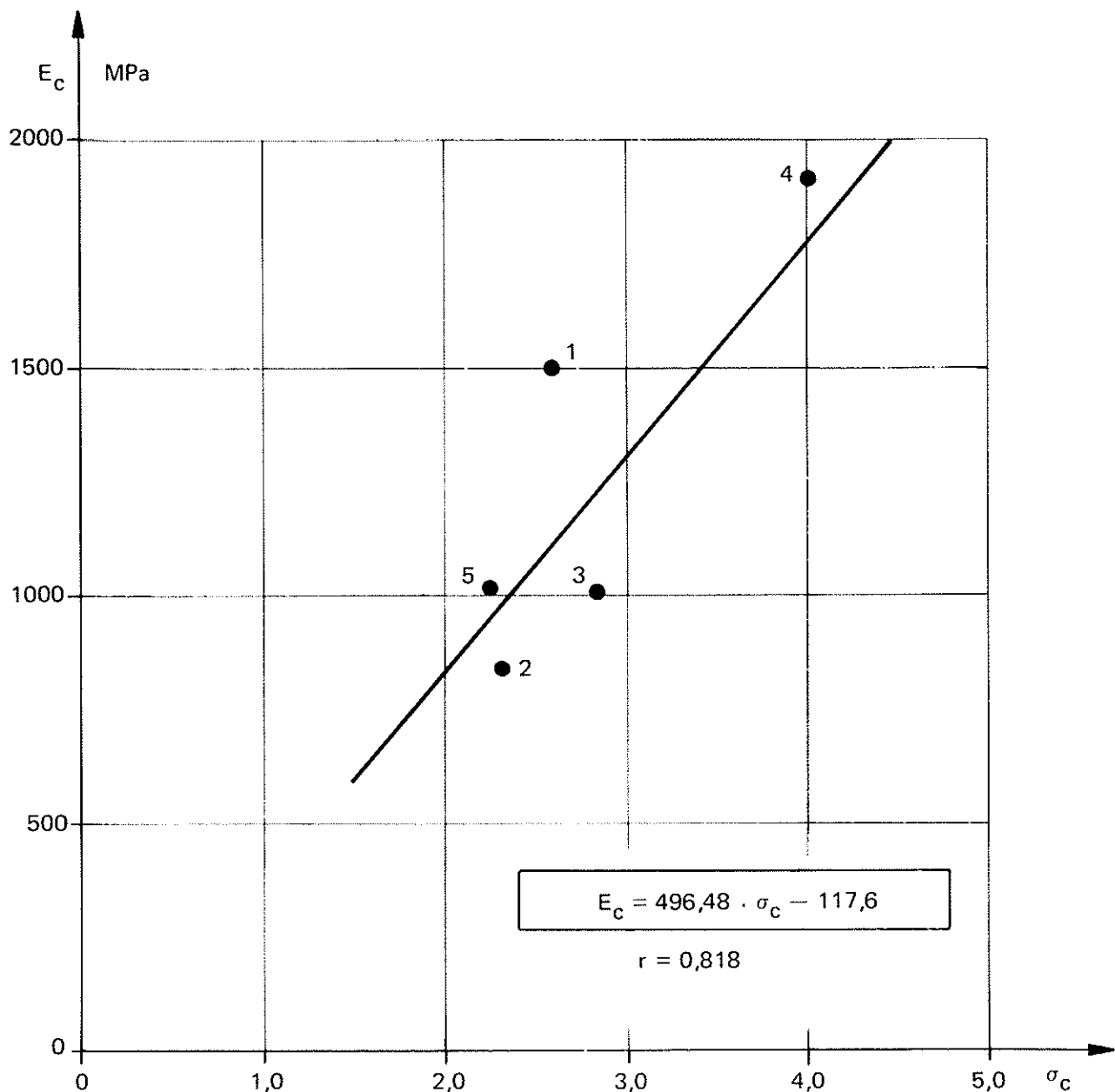


Fig. 2.4

Correlazione tra modulo di deformabilità e resistenza a compressione monoassiale.

2.3.1. Fase 1 - Misura dello stato di sollecitazione

Questa misura è basata sulla variazione dello stato tensionale in un punto della struttura per effetto di un taglio piano eseguito in direzione normale alla superficie. Il rilascio delle tensioni provoca una chiusura del taglio che può essere rilevata attraverso misure di convergenza fra due punti in posizione simmetrica rispetto al taglio.

Uno speciale martinetto piatto viene inserito all'interno del taglio e la pressione viene gradualmente aumentata fino ad annullare la convergenza in precedenza misurata. In queste condizioni la pressione all'interno del martinetto è pari alla sollecitazione preesistente nella muratura a meno di una costante che tiene conto del rapporto tra l'area del martinetto di carico e quello del taglio.

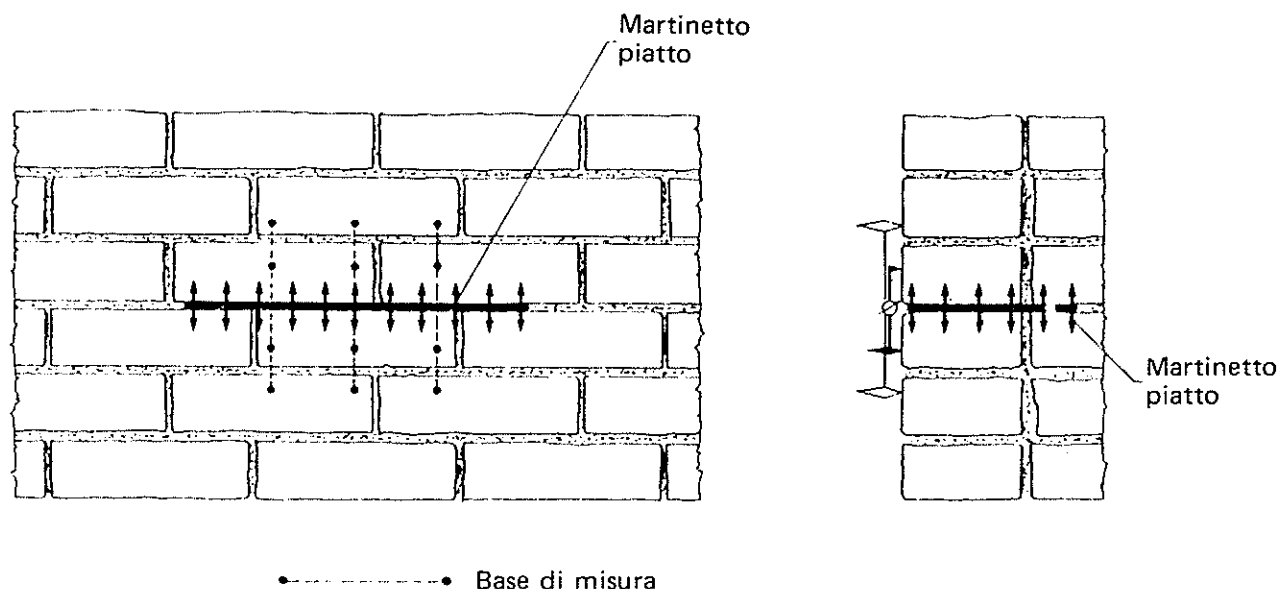


Fig. 2.5

Schema della prova con martinetto piatto.
1a Fase - Determinazione dello stato di sollecitazione.

In Figura 2.5 è indicato lo schema della prova.

Nelle strutture in muratura di mattoni, il taglio per l'inserimento del martinetto può essere eseguito con relativa facilità in corrispondenza dei corsi di malta mediante speciali seghe con utensili al widia oppure mediante una serie di fori affiancati. Le dimensioni del taglio possono essere variabili in funzione delle dimensioni degli elementi costituenti la muratura. Per mura-ture in laterizio vengono normalmente adottate le seguenti dimensioni: lar-ghezza 400 mm, profondità 200 mm, spessore 10 mm.

Le misure di convergenza sono eseguite in modo altrettanto semplice me-diante l'impiego di estensimetro meccanico di tipo rimovibile (Figura 2.6) con una serie di basi di misura realizzate mediante l'incollaggio sulla super-ficie della muratura di piastrine metalliche di diametro 5 mm.

Al termine della prova il martinetto piatto può essere facilmente estratto e lo spessore di malta ripristinato in modo da riportare la muratura alle condizioni originarie.

2.3.2. Fase 2 - Determinazione delle caratteristiche di deformabilità

Nel caso di mezzi omogenei e isotropi la prima fase di prova descritta al punto 2.3.1 viene di norma usata anche per la determinazione delle carat-teristiche di deformabilità.

Nel caso di strutture in muratura o in genere di mezzi eterogenei è prefe-ribile apportare una modifica allo schema di prova introducendo un secon-do martinetto piatto parallelo al primo ed avente le stesse dimensioni.

I due martinetti paralleli delimitano in tal modo un campione di muratura di dimensioni apprezzabili (40x50x20 cm) sul quale viene eseguita una prova di compressione monoassiale in direzione normale al piano di posa dei mattoni senza l'asportazione del campione (Figura 2.7).



Fig. 2.6

Fase di carico per la determinazione dello stato di sollecitazione. Misura delle deformazioni con estensimetro meccanico rimovibile di base 200 mm.

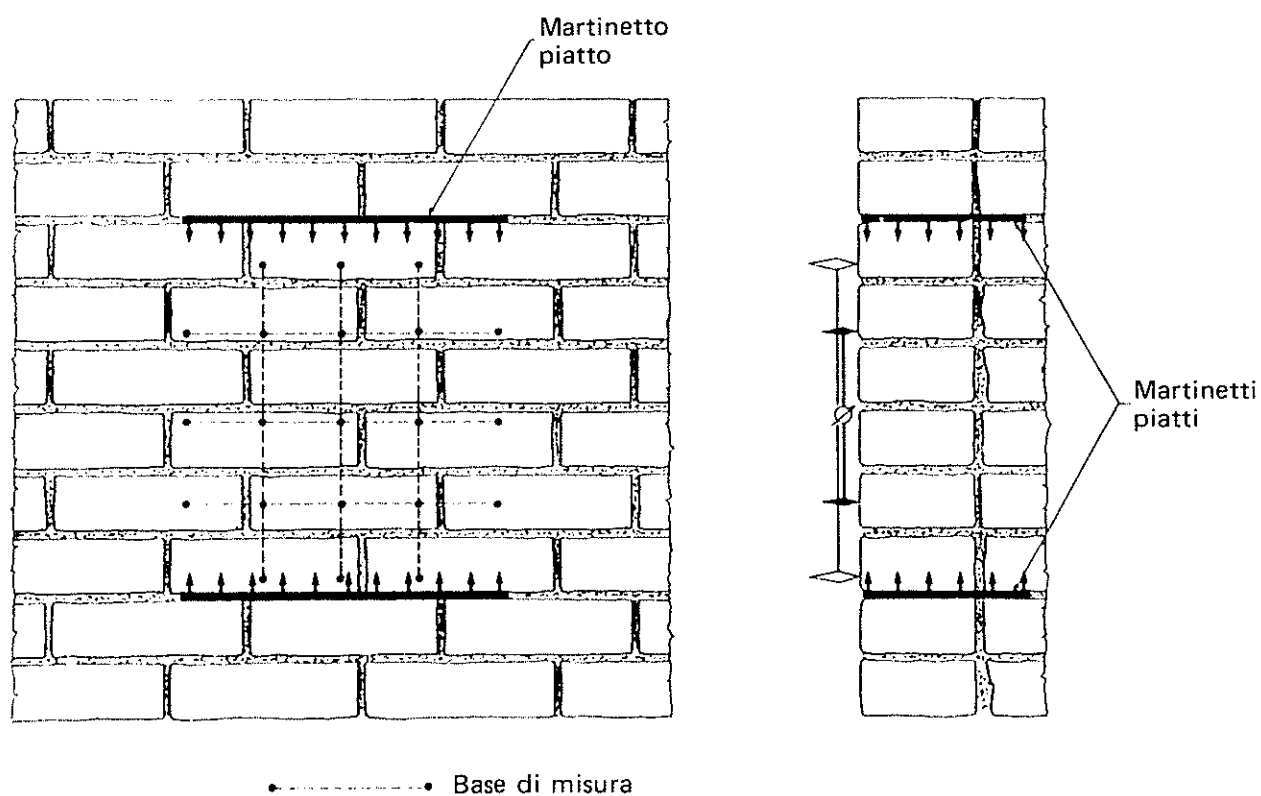


Fig. 2.7

Schema della prova con due martinetti piatti paralleli.
2a Fase - Determinazione delle caratteristiche di deformabilità.

Numerose basi di misura per estensimetro rimovibile, installate sulla faccia libera del campione, permettono di ottenere un quadro completo del comportamento deformativo del campione in direzione assiale e trasversale (Figura 2.8).



Fig. 2.8

Fase di prova per la misura del modulo di deformabilità di una muratura. Misura delle deformazioni assiali con estensimetro meccanico rimovibile di base 400 mm.

2.4. Principali vantaggi della prova con martinetti piatti

La tecnica messa a punto dall'ISMES può certamente definirsi non-distruttiva in quanto, al termine della prova, i martinetti piatti inseriti entro la muratura possono essere rimossi con estrema facilità e gli strati di malta possono essere facilmente reintegrati in modo da riportare la muratura alle

sue condizioni originarie. Anche le basi di misura incollate sulla superficie della muratura possono essere rimosse rapidamente e con grande facilità. I risultati forniti dalla prova sono di sicura affidabilità poiché le caratteristiche di deformabilità sono misurate su un campione certamente indisturbato e di dimensioni tali da risultare sicuramente rappresentativo del comportamento medio globale della struttura.

Sia la strumentazione di misura che le attrezzature di carico sono estremamente semplici e la loro rapida installazione permette di eseguire una prova completa (1^a e 2^a fase) in circa 7-8 ore. Questa prova risulta quindi decisamente meno onerosa rispetto ad una prova di tipo distruttivo, eseguita su un campione di analoghe dimensioni, la quale richiede un tempo non inferiore a 25-30 ore per il completamento delle fasi di prelievo, preparazione del campione e prova di laboratorio.

I martinetti piatti utilizzati per la prova sono dispositivi di carico dotati di elevata deformabilità e sono quindi particolarmente idonei ad applicare uno schema di carico uniformemente distribuito. Anche il disturbo dovuto alla maggiore rigidità del bordo di saldatura può considerarsi trascurabile come dimostrato dal diagramma di taratura del martinetto riportato in Figura 2.9 dal quale risulta che la deviazione dalla linearità della curva carichi-pressioni è di modestissima entità.

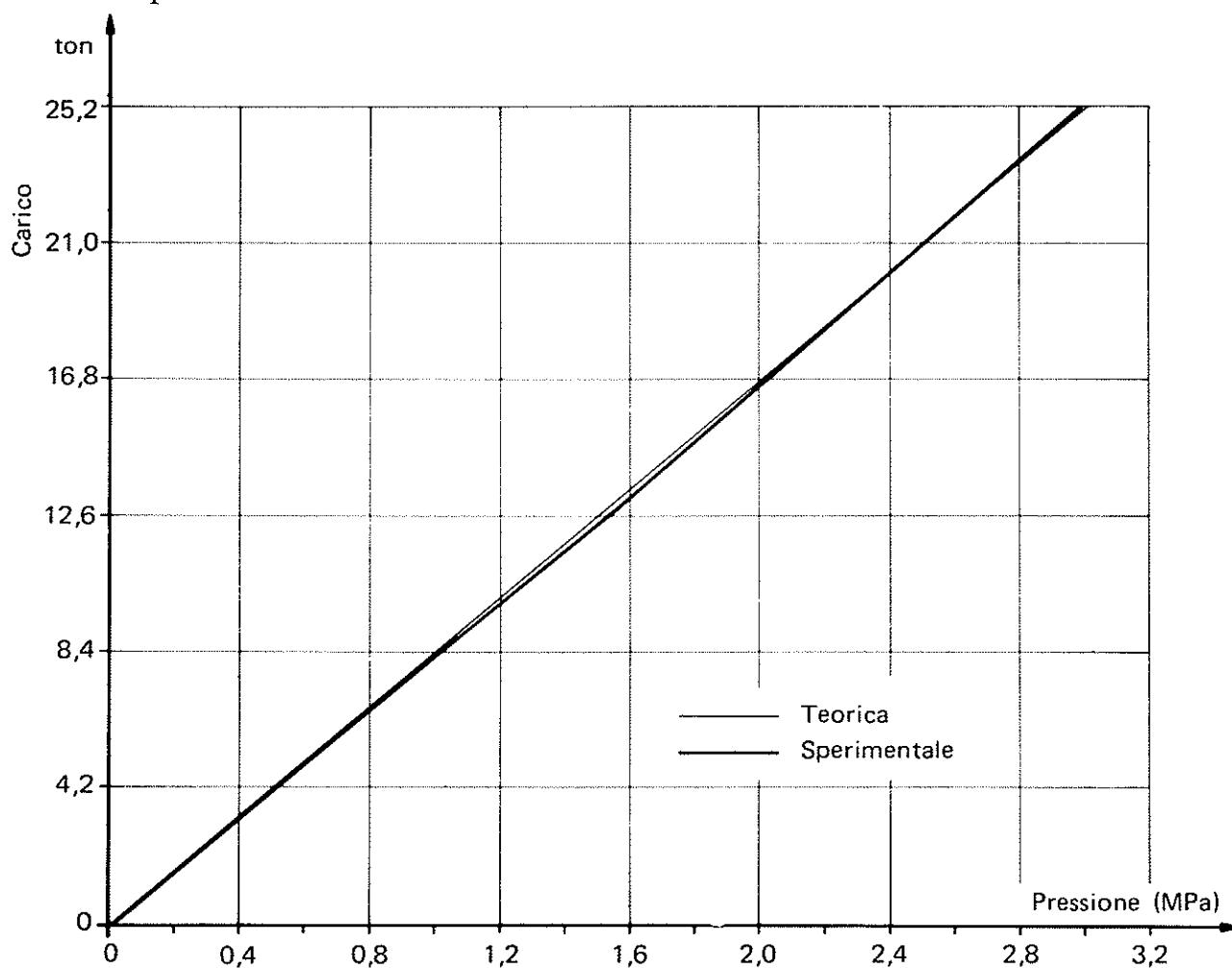


Fig. 2.9

Curva di taratura di un martinetto piatto di dimensioni 40x20 cm, spessore 10 mm.

La prova proposta può fornire anche una stima della resistenza a compressione della muratura. E' possibile, con opportune cautele, avvicinarsi al limite di rottura della muratura attraverso progressivi incrementi del carico applicato dai martinetti piatti e valutare la resistenza a compressione mediante estrapolazione della curva carichi-deformazioni.

Ultimo, non trascurabile vantaggio di questa tecnica di prova è costituito dalla possibilità di lasciare i martinetti piatti entro la muratura durante gli interventi di restauro in modo tale che funzionino come celle di pressione. E' possibile così rilevare tempestivamente eventuali improvvisi sovraccarichi indotti sulle strutture murarie dagli interventi di restauro.

2.5. Taratura della prova mediante modello fisico

Il campione di muratura sul quale viene eseguita la prova di carico mediante martinetti piatti presenta una sola faccia laterale libera mentre su tre lati è vincolato alla muratura circostante. Poiché le condizioni di vincolo del campione sono diverse da quelle della prova di compressione monoassiale di tipo convenzionale, più difficile risulta l'interpretazione dei risultati. Per questo motivo si è ritenuto indispensabile eseguire una taratura del metodo di prova proposto mediante un modello fisico (Figura 2.10). Questo studio, iniziato alcuni mesi fa e non ancora completato, si propone tra l'altro di verificare l'effetto sui risultati della prova delle dimensioni del martinetto e degli spessori dei corsi di mattoni e di malta che compongono la muratura.

Una prima prova di taratura è stata eseguita utilizzando una parete campione appositamente costruita, di dimensioni 140x140x60 cm. Per la confezione del campione è stata utilizzata una malta con scadenti caratteristiche meccaniche in strati di spessore 25 mm alternati a corsi di mattoni di spessore 50 mm. Mediante una grande pressa idraulica è stata applicata alla parete campione una sollecitazione monoassiale pari a 1,0 MPa e, dopo aver eseguito alcuni cicli di carico di assestamento, sono state determinate le caratteristiche di deformabilità della muratura. Il valore medio delle misure di deformazione eseguite su base 40 cm sulle due facce opposte della parete campione ha permesso di ricavare i seguenti valori del modulo di deformabilità della muratura:

INTERVALLI DI SOLLECITAZIONE (MPa)	MODULO DI DEFORMABILITA' E_c (MPa)
0 ÷ 0,5	2450
0,5 ÷ 1,0	3400

Mantenendo applicata al campione la sollecitazione di 1,0 MPa si è proceduto all'esecuzione delle due fasi di prova con martinetti piatti nella zona

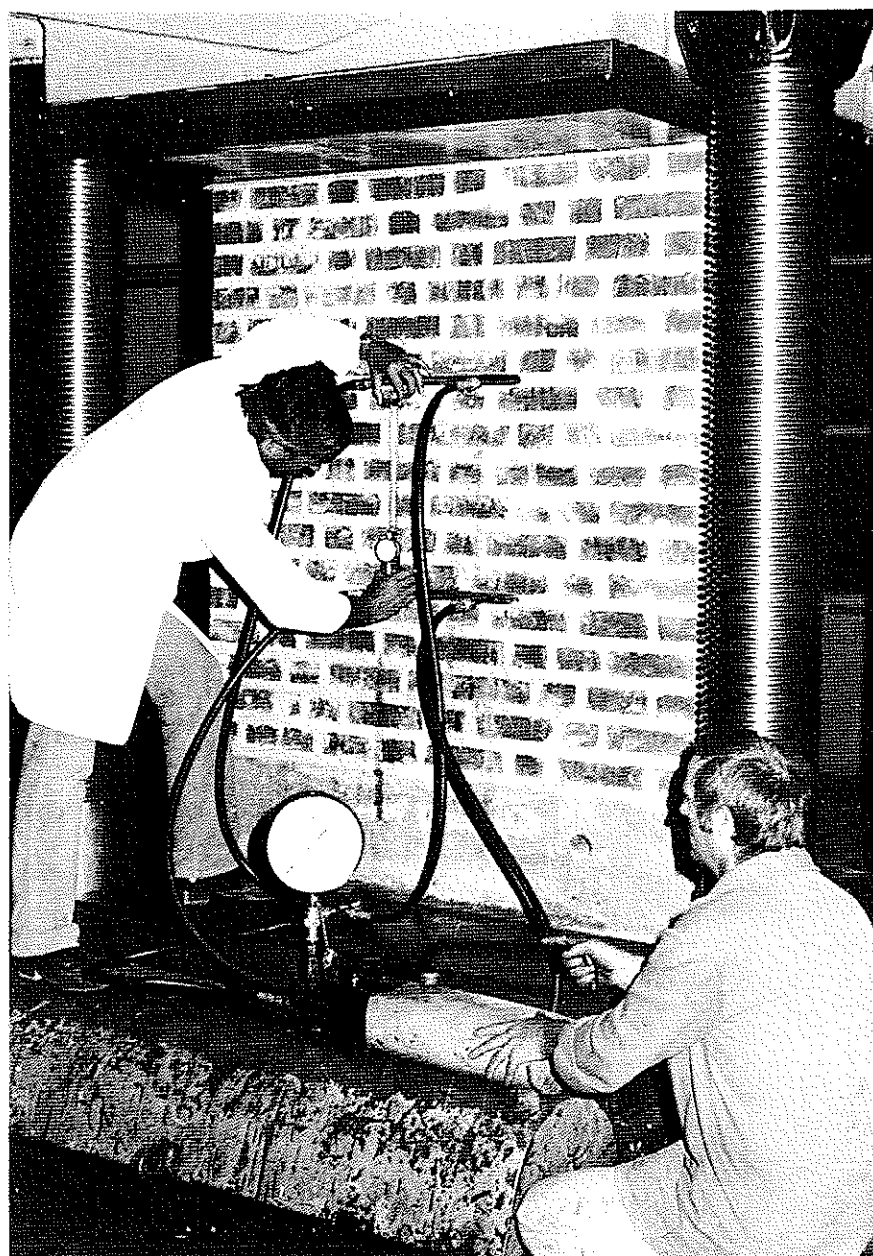


Fig. 2.10

Taratura della tecnica di prova con martinetti piatti, eseguita in laboratorio su un campione di muratura di grandi dimensioni 140x140x60 cm sottoposto a stato di compressione monoassiale.

centrale della parete per determinare sia lo stato di sollecitazione che le caratteristiche di deformabilità.

Nel corso della prima fase, la prova con un solo martinetto piatto ha fornito il seguente valore dello stato di sollecitazione applicato:

$$\sigma' = 1,15 \text{ MPa}$$

Il valore dello stato di sollecitazione misurato nel corso di questa prima prova è risultato superiore del 15% rispetto a quello imposto al campione di muratura. Questa differenza può essere imputabile a una non uniforme

distribuzione delle sollecitazioni nella sezione trasversale del campione legata ad un maggiore indurimento della malta in corrispondenza dello strato corticale della muratura che è proprio quello più direttamente interessato dalla prova.

Dopo aver inserito il 2° martinetto piatto, si è proceduto all'esecuzione della 2^a fase di prova per la determinazione del modulo di deformabilità (E_a) della muratura (Figura 2.10). I risultati della prova sono riassunti nella tabella allegata ove con E_c sono indicati i valori dei moduli di deformabilità determinati sulla parete campione mediante prova di compressione monoassiale convenzionale e con E_a i valori dei moduli ottenuti mediante la prova con martinetti piatti. Sono stati presi in esame due diversi intervalli della sollecitazione ($\Delta\sigma_m$) applicata mediante i martinetti piatti. I valori di E_a sono stati determinati nella fase di carico dopo aver eseguito alcuni cicli di assestamento con le stesse modalità adottate per il calcolo di E_c .

$\Delta\sigma_m$	E_a / E_c
0 ÷ 0,5 MPa	0,98
0,5 ÷ 1,0 MPa	1,10

Si può osservare che nell'intervallo di sollecitazione 0 ÷ 0,5 MPa esiste un buon accordo fra il modulo di deformabilità fornito dalla prova e quello misurato sulla muratura con prova di compressione di tipo convenzionale. Incrementando la pressione comincia a divenire più sensibile l'effetto del contenimento laterale del campione di muratura delimitato dai due martinetti piatti. Nell'intervallo di sollecitazione 0,5 ÷ 1,0 MPa si osserva infatti che il valore del modulo E_a è superiore del 10% rispetto al valore ottenuto mediante prova di compressione monoassiale convenzionale.

Appare chiaro che una sola prova non è sufficiente a fornire una taratura completa del metodo proposto in quanto il comportamento deformativo della muratura è legato allo schema geometrico, alle caratteristiche dei materiali componenti e alla sollecitazione applicata. Sarà quindi necessario prendere in esame diversi valori dei parametri in gioco verificando anche nel contempo l'effetto delle dimensioni del martinetto piatto rispetto agli spessori dei materiali componenti la muratura.

2.6. Confronto fra i risultati di prove distruttive e non-distruttive eseguite sulla stessa muratura

Nel corso delle indagini sperimentali eseguite per conto del Comune di Mi-

lano per la caratterizzazione meccanica delle murature dello stabile sito in Piazzale Dateo, si è presentata l'opportunità di eseguire in parallelo prove in sito non-distruttive mediante martinetti piatti e prove in laboratorio di tipo distruttivo su campioni estratti dalle murature. E' possibile mettere a raffronto i risultati dei due tipi di prova in quanto entrambi sono stati eseguiti sulle stesse strutture murarie e per di più su campioni aventi le stesse dimensioni (40x50x20 cm).

In laboratorio sono state eseguite prove di compressione monoassiale su n.5 campioni estratti mediante la tecnica illustrata in Figura 2.1. La sollecitazione è stata incrementata fino a rottura fornendo i legami sforzi-deformazioni riportati in Figura 2.3. Per diversi intervalli di carico ($\Delta\sigma$) si sono calcolati i valori medi del modulo di deformabilità (E_{lab}) riportati nella tabella allegata:

$\Delta\sigma$ (MPa)	E_{lab} (MPa)	Deviazione standard (MPa)
0 - 0,4	728,4	$\pm 179,6$
0,4 - 0,8	1143,7	$\pm 381,1$
0,8 - 1,2	1558,3	$\pm 156,7$

In considerazione dei valori dello stato di sollecitazione agente sulle strutture murarie in esame, l'attenzione verrà posta in particolare sull'intervallo di carico 0,8 - 1,2 MPa.

Le prove non-distruttive mediante martinetti piatti sono state eseguite in 10 diversi punti delle strutture murarie portanti.

Relativamente all'intervallo di carico 0,8 - 1,2 MPa, la media generale dei valori dei moduli di deformabilità assiale rilevati in sito (E_{sito}) è risultata:

$$E_{sito} = (2585,9 \pm 238,4) \text{ MPa}$$

Il rapporto tra i valori medi dei moduli di deformabilità calcolati mediante i due tipi di prova risulta:

$$\beta = \frac{E_{sito}}{E_{lab}} = 1,66$$

Questo rapporto risulta molto più elevato rispetto al valore determinato mediante la prova di taratura su modello fisico di cui al punto 2.5. Ciò porta a ritenere che i campioni estratti dalla muratura abbiano subito durante il prelievo, pur eseguito con le dovute cautele, alterazioni tali da ridurre in modo sensibile le caratteristiche meccaniche. Sulla base di questa

osservazione il valore del rapporto β sopra determinato deve intendersi come un valore decisamente cautelativo.

Si è quindi portati a ritenere che una caratterizzazione meccanica basata unicamente su prove di laboratorio di tipo distruttivo, anche se eseguite su campioni di grandi dimensioni, possa indurre a sottostimare il modulo di deformabilità della muratura in misura tanto più sensibile quanto più elevato è il grado di alterazione subito dai campioni in fase di prelievo.



Fig. 2.11
Palazzo della Ragione (Milano).

2.7. Esempi di impiego della tecnica di prova con martinetti piani

Di recente la tecnica di prova non-distruttiva con martinetti piatti è stata utilizzata con successo per la soluzione di problemi di restauro statico di alcuni edifici di interesse storico e monumentale.

Sono stati scelti tre esempi che illustrano tre diverse tipologie di intervento di restauro statico:

- restauro statico conservativo;
- restauro statico con modificazione delle strutture portanti;
- recupero edilizio di vecchi edifici a scopo abitativo.

2.7.1. *Palazzo della Ragione – Milano (Restauro statico conservativo)*

Il palazzo che risale al XIII secolo, subì profonde modificazioni strutturali ed architettoniche nel XVIII secolo a seguito degli interventi di ampliamento del Salone destinato ad Archivio Notarile. Il notevole appesantimento delle strutture causato dal sopralzo e dall'Archivio provocò cedimenti delle fondazioni accompagnati dall'apertura di lesioni sulle strutture murarie. La maggior parte delle lesioni è presente nelle pareti del XIII secolo ma talune di esse proseguono interessando anche il sopralzo. Per conto del Comune di Milano si è eseguita una vasta campagna di indagini sperimentali allo scopo di accertare le condizioni statiche dell'edificio e diagnosticare le cause del degrado in previsione di un intervento di restauro statico conservativo (Figura 2.11).

Nell'ambito di questa campagna di indagini vennero eseguite 6 prove non-distruttive con martinetti piatti in diversi punti delle strutture murarie sia per determinare le caratteristiche meccaniche dei due diversi tipi di muratura sia per misurare l'attuale stato di sollecitazione dell'edificio (Figura 2.12).

Lo stato di sollecitazione misurato nei diversi punti di prova risultò compreso fra 0,4 – 0,7 MPa.

I cicli di carico per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità vennero spinti fino a livelli di sollecitazione pari a 1,6 MPa. In Figura 2.13 sono riportati a titolo di esempio i diagrammi tipo delle deformazioni assiali e trasversali misurate per diversi livelli di carico sulla muratura del XIII secolo. Si può rilevare che, all'aumentare del livello di sollecitazione applicato al campione, si verifica un sensibile incremento delle deformazioni di tipo plastico e viscoso in corrispondenza dei corsi di malta. Come già osservato, incrementando progressivamente il carico, si può portare il campione in condizioni molto prossime alla rottura per cui dal diagramma sforzi-deformazioni si può ottenere per estrapolazione una indicazione, se pur approssimata, del limite di rottura della muratura nelle condizioni di confinamento laterale caratteristiche della prova in esame.

2.7.2. *Biblioteca Classense – Ravenna (Restauro statico modificativo)*

In questo importante edificio del XVI secolo è stato eseguito un delicato

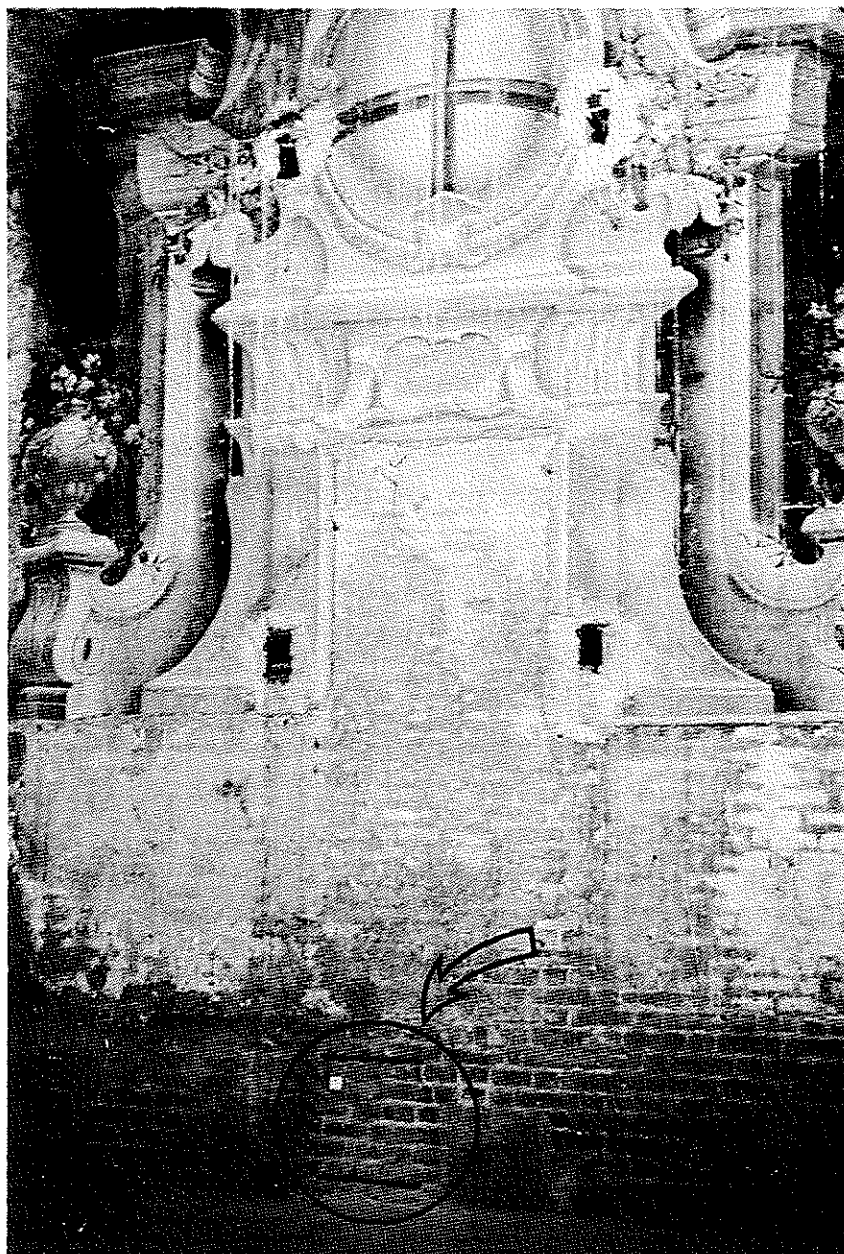
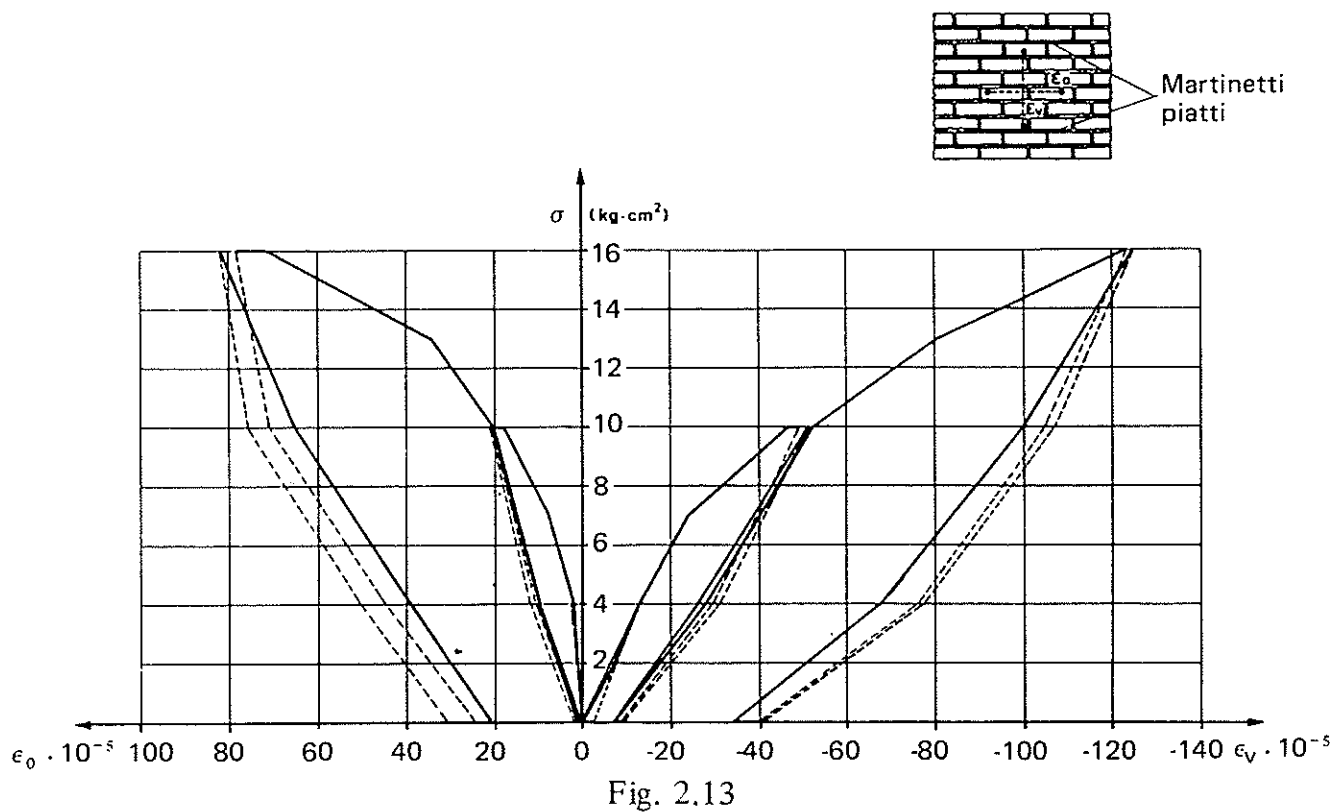


Fig. 2.12

Palazzo della Ragione (Milano) — Vista di un punto di prova sulla muratura del XIII secolo.

intervento di restauro statico che non si è limitato unicamente al consolidamento delle strutture esistenti, ma ha introdotto alcune modifiche nelle strutture portanti dell'edificio. Queste modifiche hanno interessato in particolare un tratto di muratura portante sostenuta da una serie di pilastri, nella quale sono stati aperti alcuni archi secondo lo schema indicato in Figura 2.14. Si è eseguito in primo luogo il consolidamento delle fondazioni dei pilastri in muratura che sostengono la parete in esame e, prima di procedere all'apertura degli archi, si è misurato mediante martinetti piatti lo stato di sollecitazione in corrispondenza di due pilastri, determi-



Diagrammi tipo delle deformazioni assiali e trasversali rilevate mediante prova con martinetti piatti sulle strutture murarie del Palazzo della Ragione (Milano).

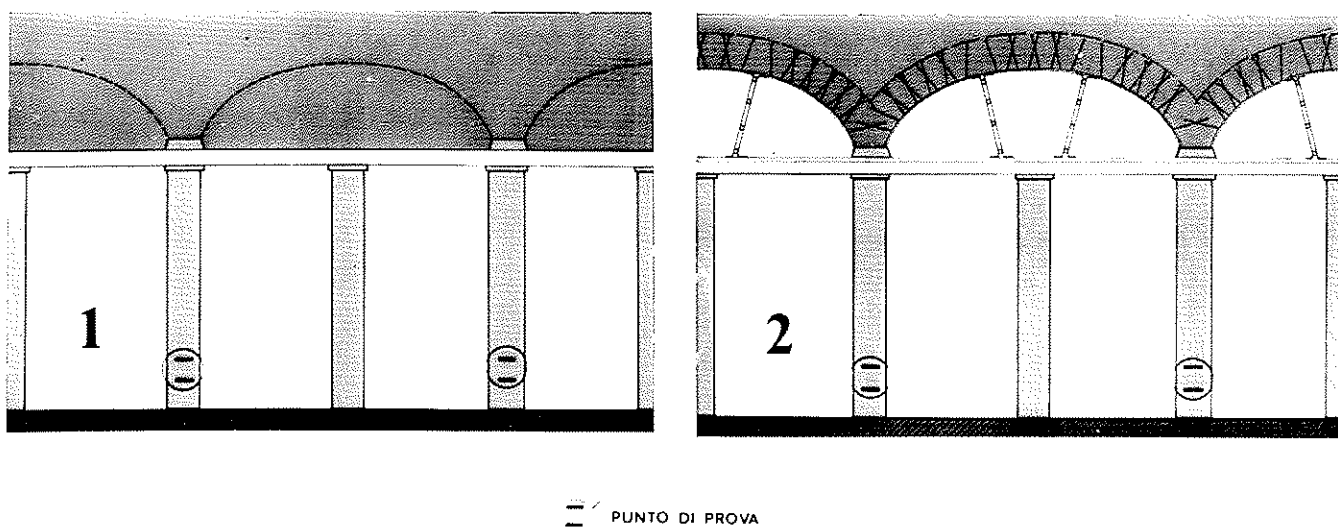


Fig. 2.14
Biblioteca Classense (Ravenna) – Schema dell'intervento di apertura degli archi in una delle murature portanti dell'edificio.

nando nel contempo il modulo di deformabilità della muratura (Figura 2.15). Il valore massimo dello stato di sollecitazione misurato nei pilastri è risultato pari a 2,0 MPa.



Fig. 2.15

Prova con martinetti piatti su uno dei pilastri in muratura della Biblioteca Classense (Ravenna).

Durante la fase di apertura degli archi si è tentato di misurare le variazioni dello stato di sollecitazione indotte dagli interventi di restauro. Allo scopo, i martinetti piatti utilizzati per la prova non-distruttiva sono stati lasciati all'interno della muratura con una pressione iniziale pari al valore dello stato di sollecitazione misurato prima degli interventi. I martinetti piatti erano collegati ad un manometro in modo da funzionare come celle di pressione. Purtroppo l'intervento di apertura degli archi ha richiesto un

tempo molto più lungo del previsto durante il quale si sono verificate variazioni termiche molto elevate che hanno influenzato in modo determinante le misure di pressione. Volendo utilizzare martinetti piatti come celle di pressione anche per periodi di tempo relativamente lunghi, occorrerà quindi porre particolare attenzione al problema delle variazioni di temperatura eseguendo una accurata taratura.

2.7.3. Recupero edilizio di un vecchio stabile in Milano

Il Comune di Milano ha inserito nel piano di recupero del patrimonio edilizio degradato un vecchio stabile a pianta quadrata di vaste dimensioni costruito nel 1905 a Piazzale Dateo (Figura 2.16). Prima di dare l'avvio al progetto di recupero edilizio dello stabile, il Comune ha affidato all'ISMES



Fig. 2.16

Indagini diagnostiche per il progetto di recupero edilizio dello stabile in Piazzale Dateo (Milano).

una vasta campagna di indagini diagnostiche volte a determinare le caratteristiche fisico-meccaniche delle strutture e dei terreni di fondazione per una valutazione il più possibile completa delle condizioni statiche dell'edificio.

Nell'ambito di queste indagini sono state eseguite 10 prove in sito con martinetti piatti (Figura 2.17) e 5 prove di laboratorio su campioni di grandi dimensioni nonché numerose misure di velocità sonica in vari punti delle strutture murarie. Questa vasta indagine sperimentale ha permesso di eseguire interessanti analisi di raffronto fra i risultati forniti dai diversi tipi di prova. Alcuni dei risultati più interessanti relativi alle caratteristiche di deformabilità e resistenza sono riportati nei paragrafi 2.2.2 e 2.6.



Fig. 2.17

Misura dello stato di sollecitazione sulla muratura d'ambito interna dello stabile in Piazzale Dateo (Milano).

Interessante risulta anche il confronto fra i valori dello stato di sollecitazione misurati in sito sui muri dello scantinato e del piano terreno e quelli fornite dall'analisi dei carichi.

Quest'ultima è stata eseguita nell'ipotesi che la copertura sia priva di sovraccarico accidentale, il sottotetto ed i solai siano interessati da 100 kg/m^2 di carico accidentale ed i balconi ne siano privi. Ciò al fine di interpretare la situazione di carico in atto durante le prove sperimentali, per poter effettuare confronti su basi realistiche. Nell'analisi dei carichi si è tenuto conto inoltre degli eventuali effetti flessionali locali legati alla non perfetta verticalità delle murature, ciò soprattutto in considerazione del fatto che la prova sperimentale interessa solo lo strato corticale di muratura e può quindi essere notevolmente influenzata da effetti flessionali.

Il valore medio della sollecitazione calcolata (σ_{cal}) è in buon accordo col valore medio delle sollecitazioni misurate sperimentalmente (σ_{sp}).

Risulta infatti:

$$\sigma_{cal} = 0,53 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sp} = 0,61 \text{ MPa}$$

Per quanto riguarda i muri di scantinato suddivisi tra muro d'ambito interno, muro d'ambito esterno e muro di spina, sono possibili i seguenti raffronti:

$$\begin{array}{l} \text{— muro d'ambito interno} \end{array} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{cal} = 0,45 \text{ MPa} \\ \sigma_{sp} = 0,44 \text{ MPa} \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} \text{— muro d'ambito esterno} \end{array} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{cal} = 0,43 \text{ MPa} \\ \sigma_{sp} = 0,53 \text{ MPa} \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} \text{— muro di spina} \end{array} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{cal} = 0,71 \text{ MPa} \\ \sigma_{sp} = 0,81 \text{ MPa} \end{array} \right.$$

Il buon accordo riscontrato fra i dati calcolati e quelli determinati sperimentalmente conferma pienamente la validità della tecnica di prova proposta e ne garantisce l'affidabilità. In questo particolare tipo di fabbricato l'analisi dei carichi può ritenersi infatti un valido strumento di verifica delle misure sperimentali sia per la semplicità dello schema strutturale dell'edificio che per l'assenza di lesioni significative legate a cedimenti differenziali delle fondazioni.

2.8. Caratterizzazione di un continuo equivalente alla muratura per mezzo di prove meccaniche non-distruttive

In alcune situazioni pratiche è opportuno studiare in dettaglio il comportamento tensio-deformativo a lastra di pareti in muratura. Un interessante esempio è costituito dalle indagini svolte in vista del restauro statico del Palazzo della Ragione di Milano [2.2].

Le indagini miravano ad interpretare il notevole quadro fessurativo della facciata allo scopo di poter meglio progettare le opere di rinforzo. A questo scopo sono state condotte delle analisi ad Elementi Finiti della facciata simulando cedimenti differenziali dei pilastri.

Nei calcoli la muratura è stata modellata come un continuo ortotropo. Tale scelta è la più naturale per la muratura, ma presenta il grosso inconveniente di accrescere sproporzionatamente il numero di parametri meccanici da determinare sperimentalmente (2 per mezzi isotropi, 5 per mezzi ortotropi in caso di analisi piana, 9 per mezzi ortotropi ed analisi tridimensionali).

In questa sezione si discuteranno le procedure numeriche che possono essere utilizzate per ottenere i valori delle costanti di ortotropia dalla sola prova con martinetto piatto [2.5].

E' ovvio che anche aumentando il numero di punti di misura la prova non può fornire valori attendibili per 9 costanti indipendenti in quanto ci possono essere effetti di compensazione (ad esempio riduzione alla rigidità assiale accompagnata da aumento della rigidità a taglio) che portano a spostamenti dei punti di misura equivalenti nell'ambito dell'errore sperimentale.

L'idea fondamentale sviluppata in [2.5] è che occorre introdurre nel processo di identificazione alcune informazioni aggiuntive note a priori. Infatti le 9 costanti d'ortotropia non sono completamente indipendenti nel caso di una specifica muratura in quanto devono esistere dei legami dovuti alla struttura intrinseca del materiale.

Ad esempio:

- a) La muratura è composta da due soli materiali disposti con regolarità. In [2.5] i moduli elastici della malta e dei mattoni sono stati assunti come incognite primarie. Sarebbe abbastanza semplice tuttavia misurare separatamente almeno la rigidità del mattone.
- b) La rigidità assiale nelle tre direzioni è senz'altro funzione del rapporto fra spessore di uno strato di malta e dimensione del mattone in quella direzione.

E' importante introdurre queste informazioni nel processo di determinazione delle costanti di ortotropia per evitare che un processo numerico basato solo sui dati misurati fornisca valori non compatibili con la struttura intrinseca della muratura. Per introdurre tali informazioni o per valutare le ortotropie che possono essere effettivamente esibite su grande scala dalle murature occorre creare un modello analitico del "continuo" muratura.

A questo scopo è stato individuato un modulo ripetitivo (Figura 2.18) costituito da un mattone e da tre strati di malta adiacenti a tre facce ortogonali del mattone. Il modulo ripetitivo non discrimina la muratura reale da quella fittizia indicata in Figura 2.19. Tale difficoltà può essere tuttavia facilmente risolta.

Ipotizzando una legge costitutiva per i due materiali componenti si può dedurre il comportamento deformativo del modulo ripetitivo sia per via analitica che con l'elaboratore.

A titolo di esempio descriveremo brevemente la procedura mostrata in [2.5] dove per semplicità di sviluppo analitico il mattone era considerato composto di materiale isotropo.

Le ipotesi del modello sono le seguenti:

- a) Entrambi i materiali sono isotropi. Il rapporto di Poisson è noto. Perciò le uniche due incognite sono i moduli di Young.
- b) Il materiale è elastico lineare. Si osservi che nel caso del Palazzo della Ragione e del livello di carico dovuto ai cedimenti differenziali ed al peso proprio tale ipotesi è adeguata.
- c) Gli 8 blocchi costituenti il modulo ripetitivo sono in uno stato di deformazione costante.
- d) Le deformazioni degli 8 blocchi sono compatibili.
- e) L'equilibrio è soddisfatto solo in media.

Sotto le ipotesi precedenti si può dedurre analiticamente in forma esplicita la legge di ortotropia per la muratura. A titolo di esempio consideriamo il modulo di rigidezza medio nella direzione di x_i . Utilizzando la notazione di Figura 2.18 ed indicando con ρ il rapporto fra il modulo di Young del mattone E_b e quello della malta E_m si ottiene:

$$E_i^* = E_m \frac{l_i l_j l_k + (\rho - 1) l_i a_j a_k}{l_i l_j l_k + (\rho - 1) t_i a_j a_k}$$

La formula precedente vale solo se il rapporto di Poisson della malta e del mattone è assunto nullo. Nel caso generale la formula diventa molto più complessa. Formule abbastanza semplici invece regolano il comportamento deformativo a taglio [2.5].

Senza entrare nel dettaglio del modello vediamo ora come esso può essere utilizzato per caratterizzare il materiale circostante il martinetto piatto. Anzitutto occorre creare un modello ad Elementi Finiti di una zona sufficientemente vasta (ad es. 1,50 x 1,50 metri) circostante il martinetto. Per simmetria solo un quarto del problema è modellato.

Ipotizzando dei valori per i moduli dei materiali componenti e utilizzando il modello analitico delle murature si ottiene una matrice di costanti di ortotropia che devono essere utilizzate nel modello ad Elementi Finiti. L'obiettivo è cercare quei valori dei moduli della malta e del mattone che conducono a spostamenti calcolati il più possibile uguali a quelli misurati.

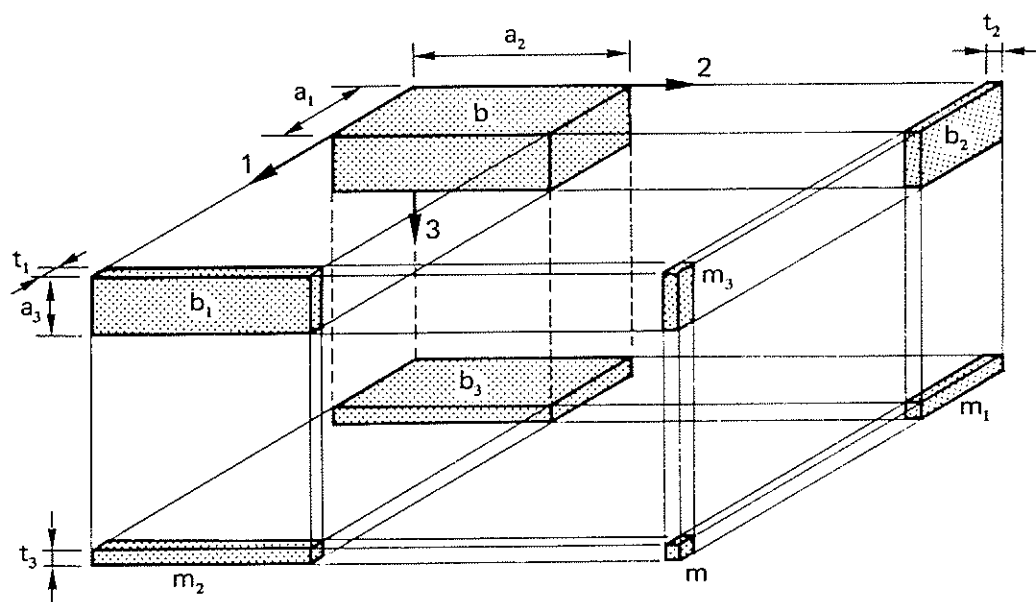


Fig. 2.18

Scomposizione del modulo ripetitivo in un mattone (b) e in sette blocchi di malta.

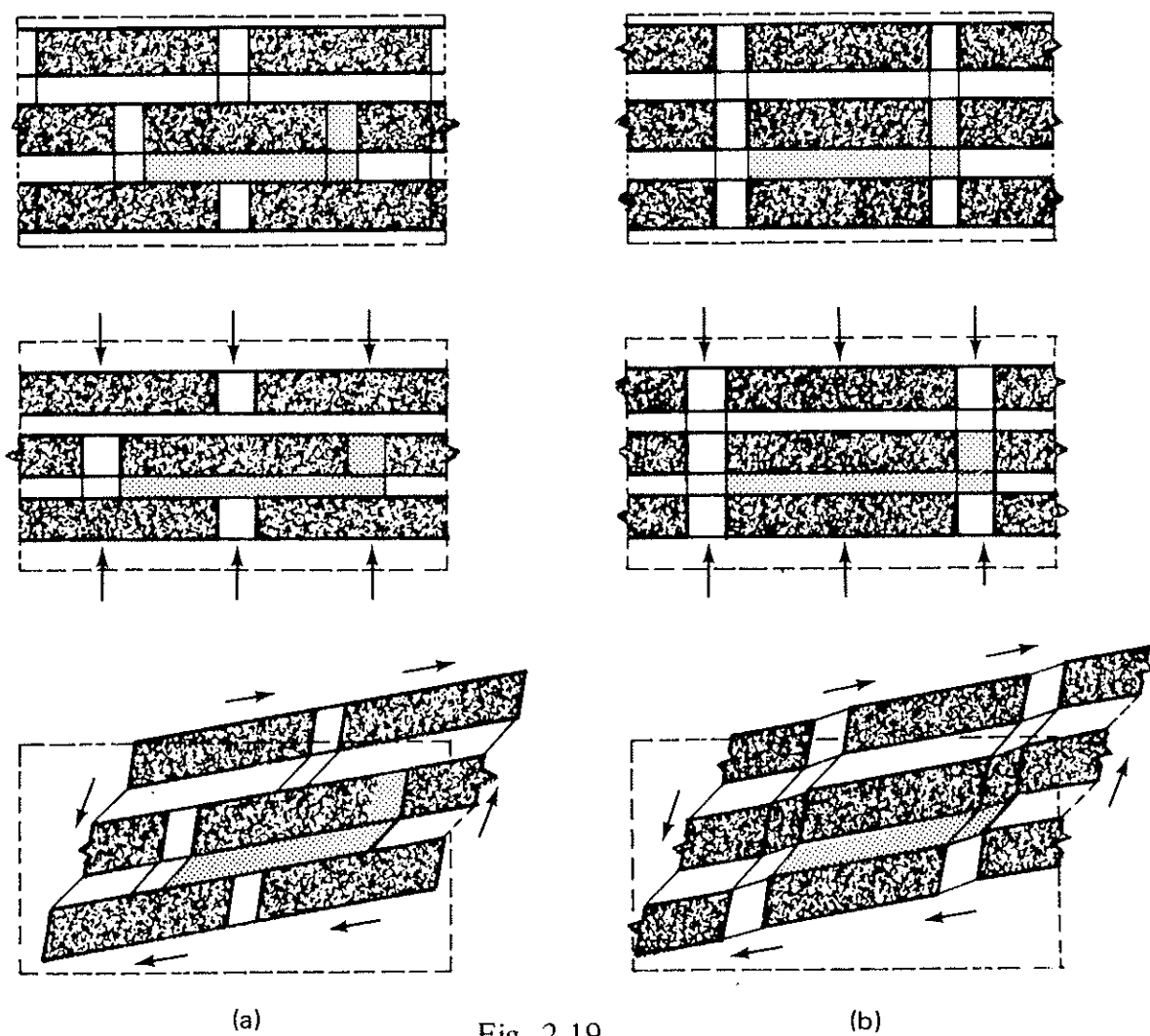


Fig. 2.19

Deformazione della struttura a compressione e a taglio: a) muratura reale; b) muratura fittizia, che può ottenersi con lo stesso modulo ripetitivo.

Evidentemente una ricerca per tentativi richiederebbe un grande numero di calcoli. In [2.5] è utilizzata una procedura di identificazione dei valori ottimali che è molto rapida in quanto sfrutta il fatto che le incognite (E_m ed E_b) entrano linearmente nei calcoli. Perciò data la soluzione per una particolare coppia di incognite, le soluzioni corrispondenti ad incognite moltiplicate per una costante arbitraria α si ottengono dividendo per α gli spostamenti calcolati.

Il valore di α che rende minimo lo scarto quadratico medio fra gli spostamenti calcolati e spostamenti misurati può essere ottenuto in modo elementare. Perciò una singola analisi ad elementi finiti consente di trovare il valore ottimale delle incognite E_b ed E_m col vincolo che il rapporto ρ sia lo stesso utilizzato nel calcolo. Occorre quindi fare più di un'analisi per qualche valore di ρ allo scopo di individuare l'ottimo assoluto.

In Figura 2.20 si mostra una procedura grafica per la ricerca dell'ottimo assoluto. Nell'esempio si sono individuati separatamente i valori di α che minimizzano l'errore nelle deformazioni verticali ed in quelle trasversali. Collegando i punti corrispondenti agli ottimi relativi si ottengono rispettivamente due linee la cui intersezione determina il valore cercato dei moduli.

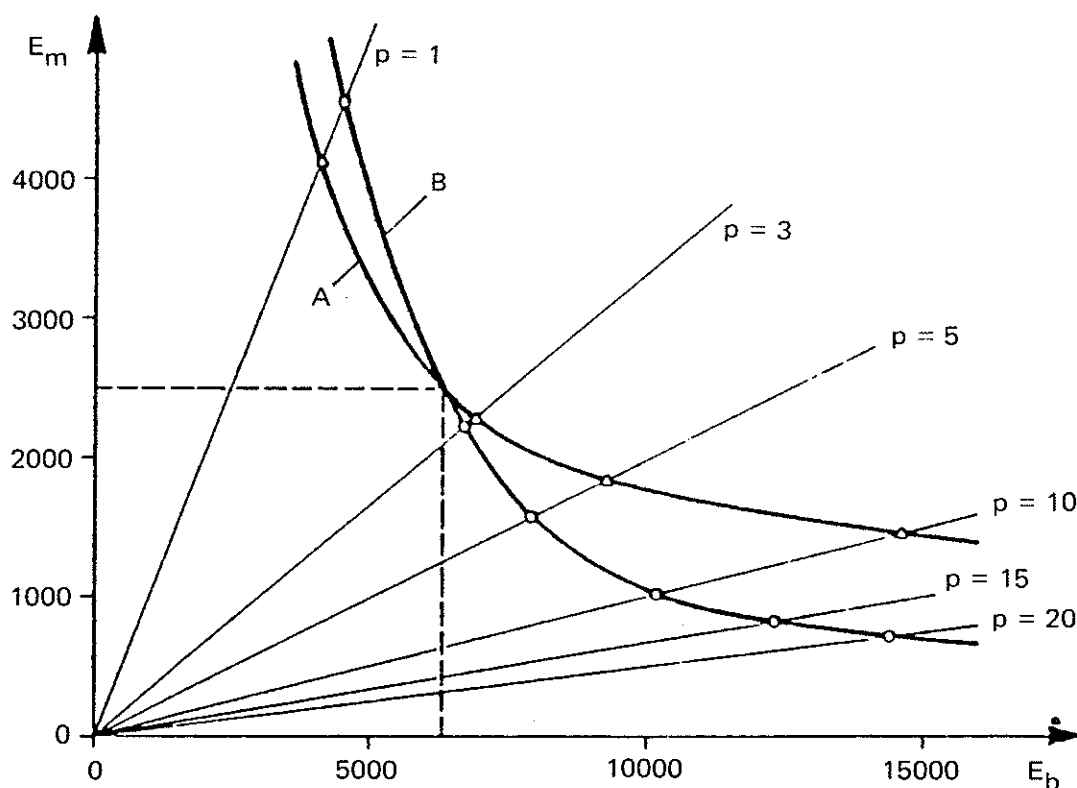


Fig. 2.20

Identificazione parametrica di moduli equivalenti per la malta e per il mattone: (A) utilizzando le deformazioni verticali; (B) utilizzando le deformazioni orizzontali.

Concludendo si osservi che la procedura numerica non è molto onerosa. Infatti il grosso della preparazione dati è costituita dal reticolo ad Elementi Finiti, che rimane lo stesso per tutte le applicazioni a meno di facili ritocchi per aggiustare lo spessore del muro. Il tempo di calcolo attualmente

è di circa 1-2 ore di CPU su elaboratore Digital VAX 11/780. Se la prova diventasse di uso molto frequente può essere conveniente tabulare il risultato del calcolo una volta per tutte.

2.9. Prove non-distruttive con metodi sonici

Un metodo di indagine delle caratteristiche delle murature, di applicazione relativamente semplice e rapida, è costituito dalle misure della velocità di propagazione delle onde elastiche longitudinali attraverso le pareti. Generalmente questo metodo viene indicato come “metodo sonico” di indagine non-distruttiva.

Oltre alle misure delle velocità sono da comprendere nei metodi sonici le indagini basate sulle caratteristiche locali di vibrazione delle murature; questo metodo è stato dapprima sperimentato molti anni fa al Politecnico di Milano ed è stato recentemente ripreso dall'ISMES con criteri e strumenti più avanzati.

Infine sono da comprendere nei metodi sonici anche i controlli delle “emissioni acustiche” delle murature conseguenti al verificarsi di lesioni od al progredire di lesioni già esistenti. E' questo un metodo di controllo di “tipo passivo” in quanto i segnali sonici vengono generati dalla muratura stessa, a differenza di quanto avviene per i due metodi precedentemente citati i quali sono di “tipo attivo” poichè le murature vengono sollecitate con segnali appositamente generati da trasduttori elettromeccanici.

2.9.1. Misure di velocità sonica

Nell'interno di un corpo solido si propagano due tipi di onde elastiche: le onde longitudinali (o di compressione) e le onde trasversali (o di taglio). La velocità di propagazione delle prime (V_l) è maggiore di quella delle seconde, (V_t) ed il rapporto tra di esse è funzione del coefficiente di Poisson del materiale. Tra le velocità di propagazione ed i moduli elastici valgono le note relazioni:

$$E = V_l^2 d \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \text{ dove } d \text{ è la densità}$$

$$G = d V_t^2$$

$$\text{dove } \nu = \frac{r^2/2 - 1}{r^2 - 1} \text{ con } r = V_l/V_t$$

Queste relazioni valgono per i corpi perfettamente elastici cioè omogenei ed isotropi a comportamento lineare e reversibile mentre le murature di pietra o di mattoni costituiscono un mezzo eterogeneo ed anisotropo; non è quindi conveniente considerare le misure soniche come un metodo indi-

retto per misurare gli effettivi moduli di deformabilità poiché i risultati dei calcoli potrebbero portare a valori notevolmente errati in eccesso. Inoltre le indagini si limitano normalmente alla misura della velocità longitudinale, poiché l'istante di arrivo delle onde trasversali, più lente, è generalmente assai difficile da valutare sugli oscillogrammi.

Ciò premesso, le indagini soniche vanno considerate come un utile metodo di esplorazione delle murature avente lo scopo di ricavare delle informazioni qualitative sulle variazioni delle caratteristiche elastiche del materiale costituente la struttura e per localizzare la presenza di eventuali fessure intersecanti i percorsi di misura.

Le misure soniche permettono quindi una verifica della distribuzione dello stato di degrado, normalmente non uniforme, nelle murature dei vecchi edifici e costituiscono un utile complemento alle indispensabili e fondamentali prove di tipo statico.

L'utilità principale dei rilievi sonici consiste nella possibilità di estendere, mediante misure di confronto, le valutazioni ottenute con le prove di tipo statico, necessariamente limitate ad alcuni punti delle murature di un edificio, ad un numero di punti assai maggiore e comunque sufficiente a definire le caratteristiche complessive della struttura.

Le misure soniche vengono eseguite attraverso le murature applicando, per mezzo di un trasduttore piezoelettrico, un impulso su una superficie e ricevendo il segnale sonico sulla superficie opposta per mezzo di un ricevitore (accelerometro o piccolo geofono); i punti di ricezione e di emissione dei segnali sono disposti generalmente sulla stessa perpendicolare alle superfici della muratura.

Qualora sia accessibile solo una superficie, i rilievi possono essere eseguiti con i punti di emissione e di ricezione sulla stessa superficie e disposti lungo dei profili rettilinei di misura; tuttavia la efficienza delle indagini viene notevolmente ridotta a causa della scarsa penetrazione dei percorsi di misura ed a causa della presenza degli intonaci. Generalmente si misura la velocità delle onde superficiali, più lente ma più ampie delle onde di compressione; i risultati sono in questo caso di scarsa utilità per la caratterizzazione dei materiali costituenti la muratura.

Considerando quindi le misure che attraversano i muri (misure per trasparenza), i rilievi si eseguono appoggiando sulle pareti in punti prestabiliti il trasmettitore ed il ricevitore; tra di essi e le pareti si interpone un sottile strato di stucco per migliorare l'accoppiamento acustico.

Il ricevitore è collegato ad un amplificatore ed ad un oscilloscopio.

Il trasmettitore è collegato ad un apparecchio generatore di impulsi elettrici che si ripetono con cadenza costante ad intervalli di $1/5 \div 1/20$ di secondo; essi vengono trasformati dal trasmettitore in impulsi sonici che si ripetono con la stessa cadenza.

Altri impulsi elettrici a bassa tensione (triggers) vengono emessi dal generatore contemporaneamente ai precedenti e servono a comandare la partenza della traccia dell'oscilloscopio, sincronizzandola con l'emissione degli impulsi sonici.

Sullo schermo dell'oscilloscopio appare l'oscillogramma dei segnali, che a causa dell'emissione ripetitiva, assume un aspetto permanente: l'inizio corrisponde all'istante di emissione dell'impulso sonico del trasmettitore ed il tratto rettilineo corrisponde al tempo impiegato dalle onde di compressione ad attraversare la muratura. La Figura 2.21 mostra l'aspetto di un oscillogramma sullo schermo di un oscilloscopio. L'oscilloscopio mostrato nella figura è di tipo digitale e permette di rappresentare sullo schermo il risultato finale della somma mediata di un certo numero di misure, migliorando il rapporto segnale/disturbo.

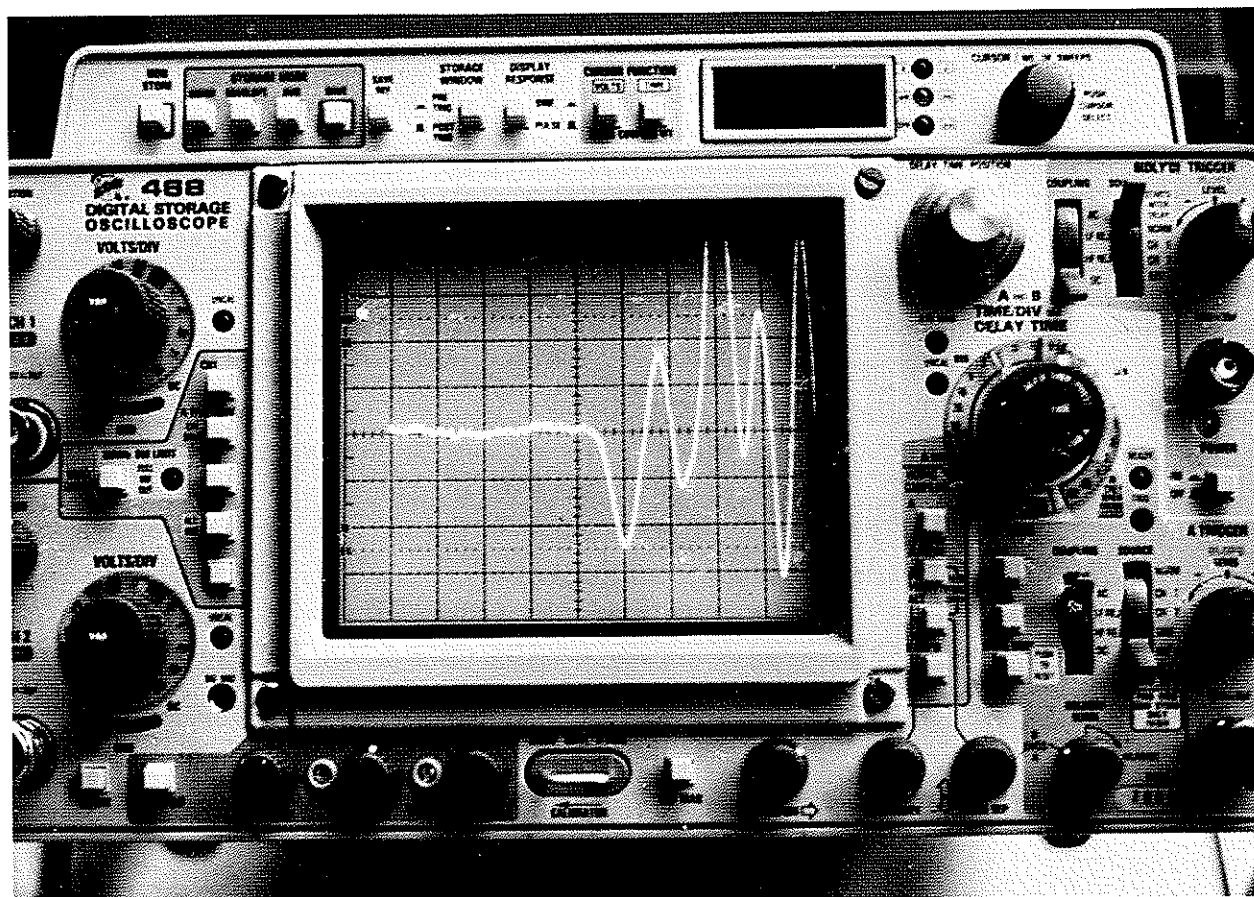


Fig. 2.21
Oscillogramma di un segnale sonico.

Esso inoltre è dotato di un dispositivo di misura digitale di intervalli di tempo; la misura del tempo percorso delle onde attraverso la muratura appare nel display in alto a destra della figura e viene ottenuta disponendo delle marche luminose all'inizio ed alla fine del tratto rettilineo dell'oscillogramma.

La velocità di propagazione delle onde di compressione si ottiene dividendo lo spessore del muro per il tempo di percorso così ottenuto.

Oltre al valore della velocità, gli oscillogrammi danno informazioni sulla intensità e sulla frequenza dei segnali sonici ricevuti; entrambe queste grandezze sono influenzate dalle caratteristiche del materiale ed in particolare

dalla presenza di discontinuità lungo il percorso di misura.

In presenza di lesioni si verificano diminuzioni della velocità di propagazione e, in misura particolarmente evidente, dell'ampiezza dei segnali ricevuti; inoltre scompaiono le componenti a frequenza più elevata dei segnali ricevuti.

Un'indagine sonica deve essere sviluppata seguendo dei criteri aventi validità generale:

- a) eseguire misure soniche in tutti i punti delle murature nei quali sono state eseguite le prove statiche non-distruttive (Figura 2.22)
- b) rilevare un grande numero di valori di velocità distribuendo i punti di misura tra i vari piani e nei sotterranei con particolare riguardo alle strutture portanti
- c) eseguire prove di confronto sui campioni delle murature sottoposti a prove di carico sia sui singoli mattoni (Figure 2.23).

L'obiettivo è quello di estendere, mediante una correlazione tra i risultati delle prove statiche ed i valori della velocità, le valutazioni sulle caratteristiche dei materiali ottenute con le prove di carico ai punti delle murature esplorati con le misure soniche.

Nelle Figure 2.24 e 2.25 sono mostrati i risultati riassuntivi delle misure di velocità eseguite su un vecchio edificio da ristrutturare; i valori ottenuti sono variabili entro ampi limiti, da un minimo di 1200 m/s ad un massimo di 2500 m/s con una media di $1650 \div 1700$ m/s.

Misure eseguite su mattoni avevano fornito valori compresi tra 1800 e 2100 m/s.

I risultati sono stati trattati con metodi statistici: nelle Figure 2.24 e 2.25 sono riportati rispettivamente l'istogramma ed il diagramma di distribuzione della velocità sonica. Nella Figura 2.24 è anche riportato il diagramma della distribuzione normale y (Z) avente la stessa media e lo stesso scarto quadratico medio in funzione dello scarto quadratico. Da questi diagrammi si possono ricavare le seguenti considerazioni:

- a) I valori di velocità più frequenti sono compresi tra 1500 e 1700 m/s.
- b) Il valore di 1450 m/s può essere considerato un limite inferiore per la muratura in condizioni normali.
Per il 20% delle misure la velocità risulta minore di questo limite; quindi si può dedurre che il 20% circa delle murature presenta fenomeni di degrado
- c) Il 30% delle misure dà valori superiori a 1750 m/s, in funzione delle caratteristiche dei mattoni impiegati nella costruzione.

Infine nella Figura 2.26 sono riportati i diagrammi delle velocità in funzione del carico ottenuti su un campione di muratura nel corso di prove statiche alla pressa.

Da essi si ricava che i valori della velocità sonica ottenuti in direzione del carico tendono inizialmente a valori più elevati col crescere del carico per



Fig. 2.22

Misure della velocità sonica in una postazione per le prove con i martinetti piatti.

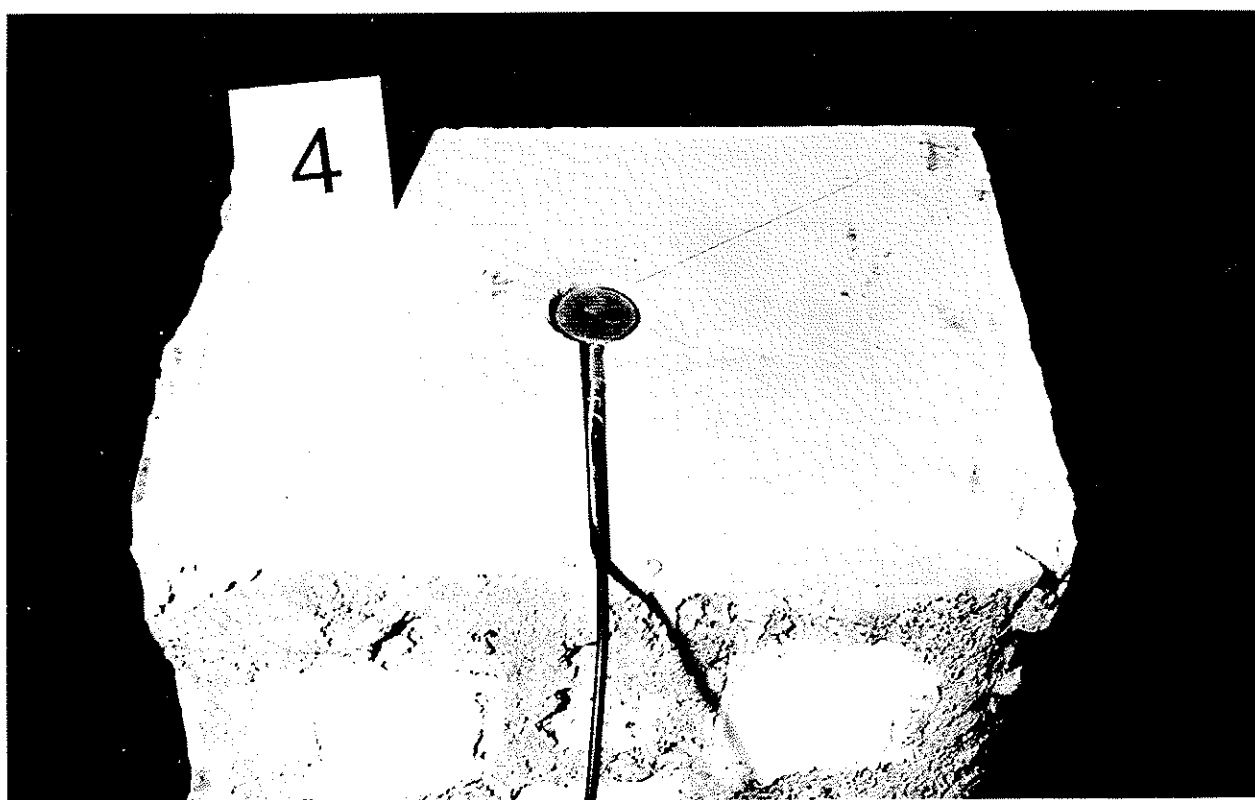


Fig. 2.23

Campione di muratura per prova di compressione monoassiale: alloggiamento di un trasduttore per misure di velocità sonica in direzione del carico assiale.

MISURA DELLE VELOCITA' SONICHE PER TRASPARENZA
ISTOGRAMMA DELLE VELOCITA' MISURATE

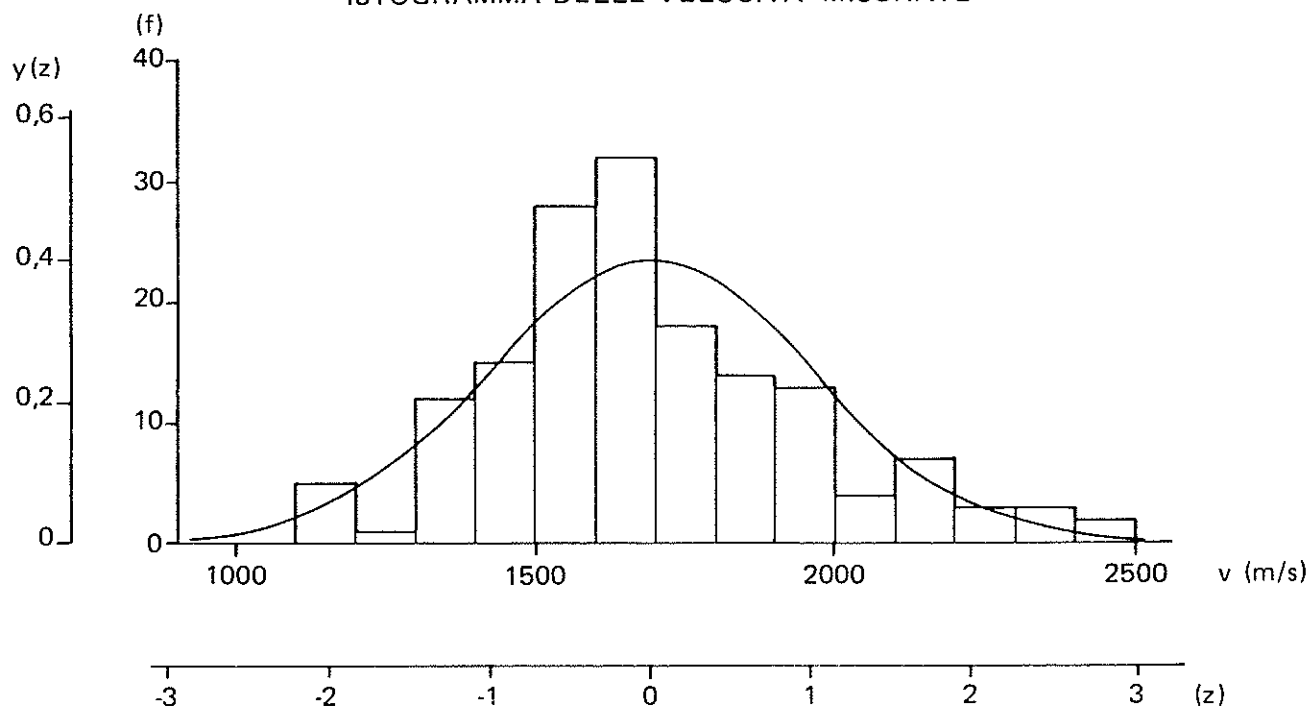


Fig. 2.24

MISURA DELLE VELOCITA' SONICHE PER TRASPARENZA
DIAGRAMMA DI DISTRIBUZIONE

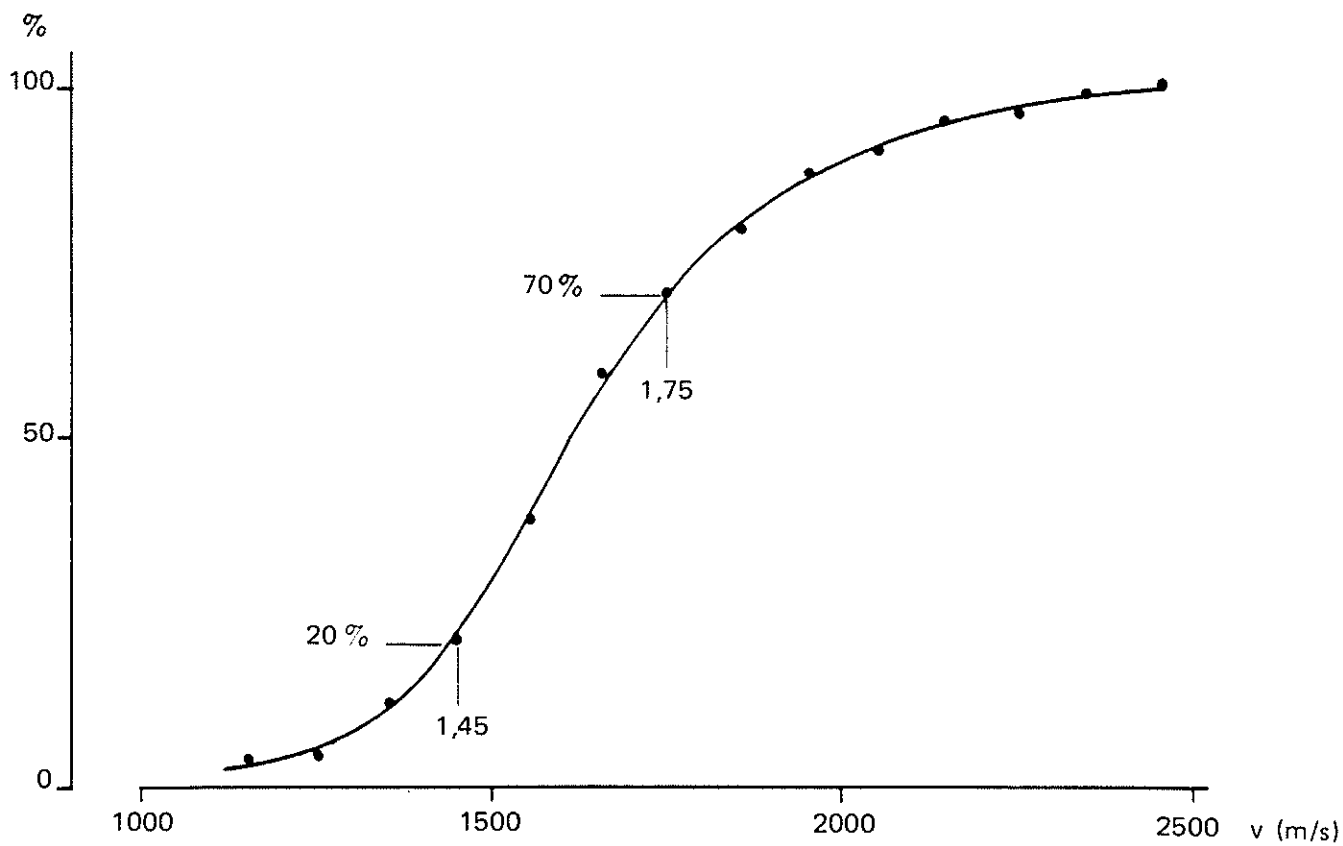


Fig. 2.25

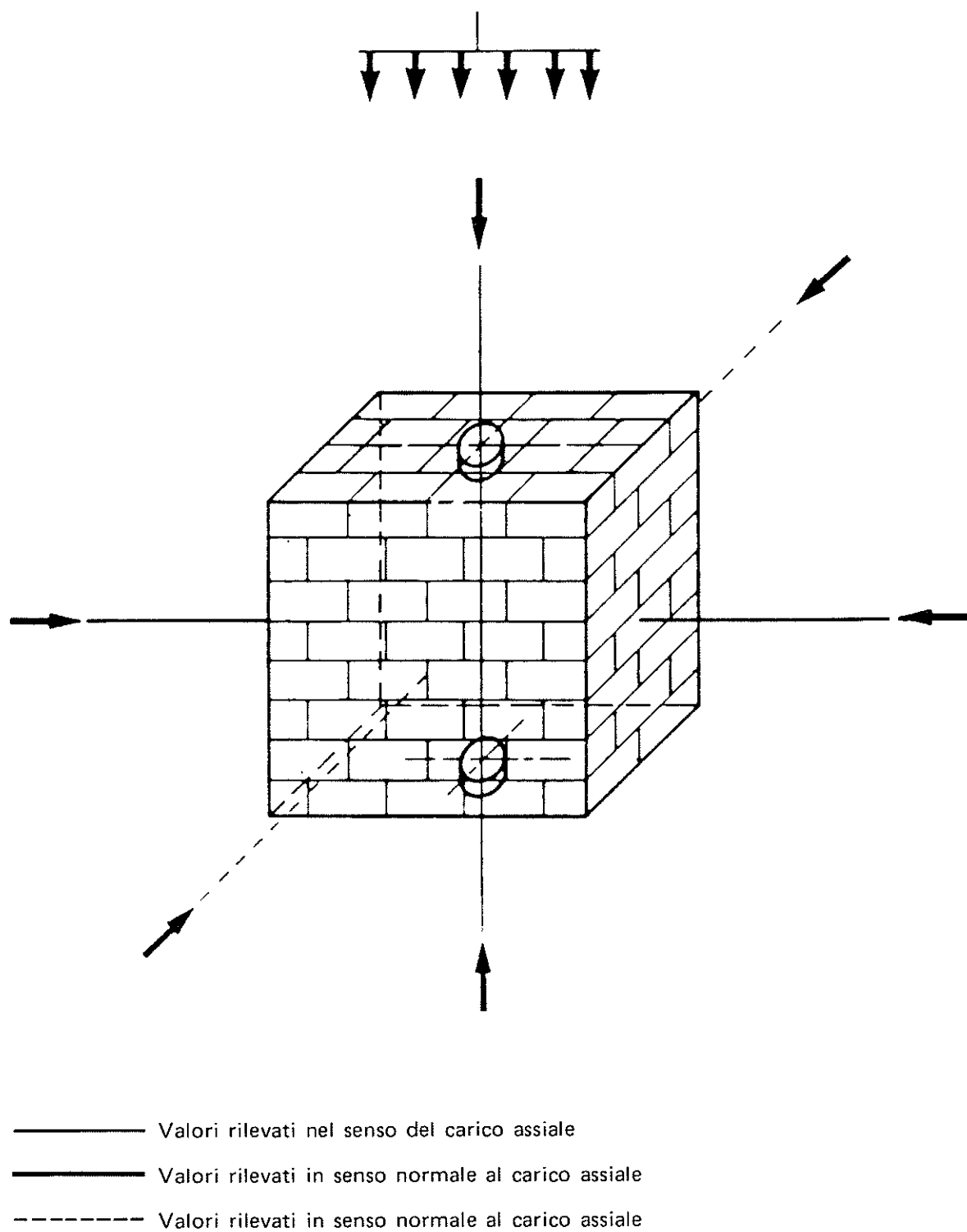
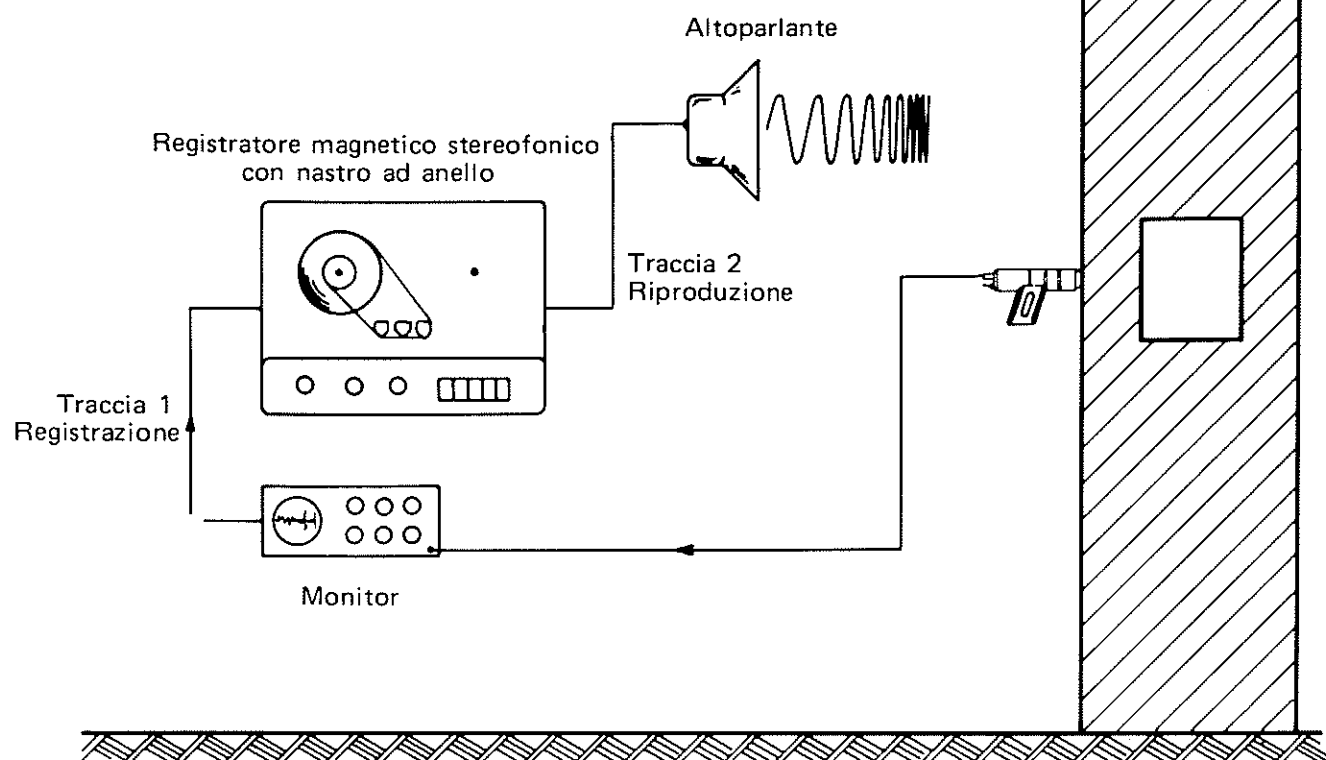


Fig. 2.26
Prove di compressione monoassiale su campioni di muratura.

PRIMA TRASMISSIONE



SECONDA TRASMISSIONE

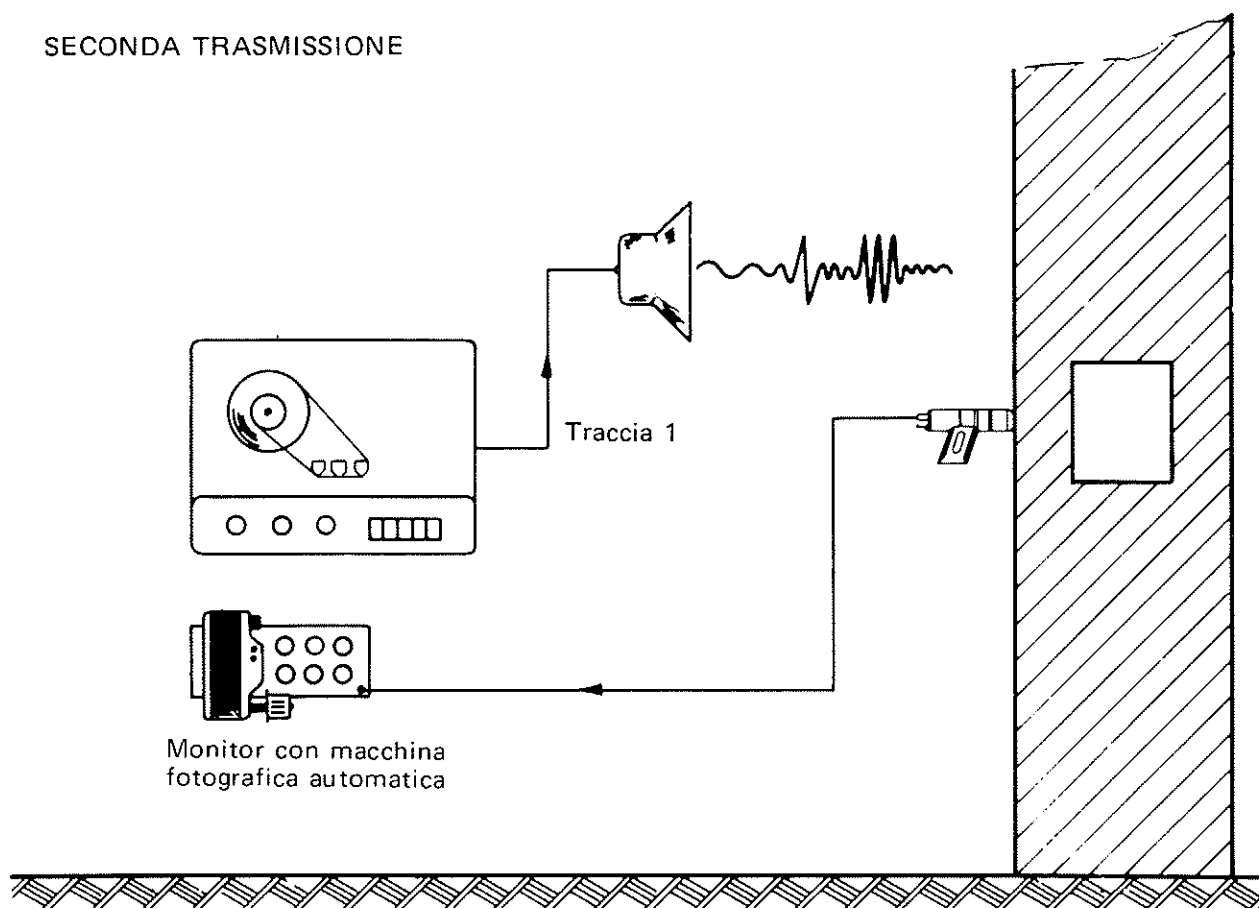


Fig. 2.27

poi stabilizzarsi ad un valore praticamente costante fino al collasso del campione.

La velocità in senso normale al carico presenta, dopo un aumento iniziale, una certa stabilità di valori per un ampio campo di sollecitazioni ($10 - 18 \text{ kg/cm}^2$) per poi ridursi sensibilmente ai carichi superiori per la fessurazione laterale del campione.

2.9.2. *Rilievi di spettroscopia sonora*

Nelle indagini sulle proprietà delle murature di vecchi edifici è importante rilevare la presenza e le dimensioni di cavità quali le canne fumarie, che riducono l'effettiva sezione resistente delle strutture portanti.

Un metodo sonico per la ricerca delle cavità era stato studiato e sperimentato molti anni fa presso la Fondazione Lerici del Politecnico di Milano. Esso consisteva nel generare in aria un suono di frequenza variabile e di intensità costante eccitando le vibrazioni della parete e di registrare le oscillazioni in vari punti della muratura.

E' noto che i suoni attraversano le murature con il seguente meccanismo: le onde in aria incidono sulla parete e vengono in gran parte riflesse ma contemporaneamente mettono in vibrazione la muratura; le vibrazioni si propagano nella muratura, giungono alla parete opposta e quest'ultima trasmette all'aria dell'ambiente retrostante le oscillazioni sonore.

L'intensità del suono trasmesso dipende dalla frequenza del suono, dallo spessore, dalla densità superficiale (massa di un m^2 di parete), dallo smorzamento e dalle caratteristiche elastiche (cioè dalla velocità di propagazione delle onde elastiche) della muratura.

Alle basse frequenze il fenomeno è controllato dalla rigidità della parete, cioè la densità e lo smorzamento hanno poca importanza; alle altre frequenze le vibrazioni sono invece funzione della massa.

In un campo di frequenze intermedio si verificano fenomeni di risonanza per cui l'attenuazione dei suoni trasmessi è ridottissima e la muratura diventa praticamente trasparente ai suoni. Alle frequenze di risonanza si hanno le massime ampiezze di vibrazione delle murature.

Il fenomeno in effetti è molto complesso poiché nella muratura si formano anche onde flessionali che si propagano con velocità che aumentano con la frequenza; a frequenze elevate, al di sopra di una certa frequenza critica e per certi angoli di incidenza del suono si ottiene un effetto di coincidenza tra la lunghezza d'onda delle onde flessionali nel muro e la proiezione sulla parete della lunghezza d'onda del suono in aria; questo fenomeno porta ad una maggiore trasmissione di energia sonora cioè a più ampie vibrazioni della muratura.

Tuttavia, ciò che interessa agli effetti della ricerca della cavità è che le caratteristiche di vibrazione locale di una muratura eccitata da onde sonore dipende, oltre che dalle caratteristiche della muratura stessa, dallo spessore. E' ovvio quindi che in presenza delle cavità, lo "spettro" di vibrazione locale della muratura cambi radicalmente rispetto agli spettri di vibrazione

del muro pieno. Praticamente si ottengono dei notevolissimi aumenti dell'ampiezza di vibrazione che segnalano senza incertezze la presenza della cavità.

Per accentuare il fenomeno delle risonanze, utilizzando suoni a bassissimo livello, il procedimento di ricerca veniva svolto in due fasi:

- Durante una prima fase si procedeva a registrare su nastro magnetico le vibrazioni di una serie di punti predisposti sulla parete producendo in aria, per ogni punto e per mezzo di un altoparlante, un suono di frequenza variabile con continuità tra 100 e 1200 Hz.
- Nella seconda fase si ripetevano le misure negli stessi punti e nello stesso ordine riproducendo nell'altoparlante come suoni le vibrazioni registrate punto per punto durante la prima fase. Si otteneva così un'esaltazione dei fenomeni di risonanza aumentando notevolmente la sensibilità del metodo di ricerca.

Nelle Figure 2.27 e 2.28 sono illustrati il metodo di ricerca ed alcuni dei risultati sperimentali.

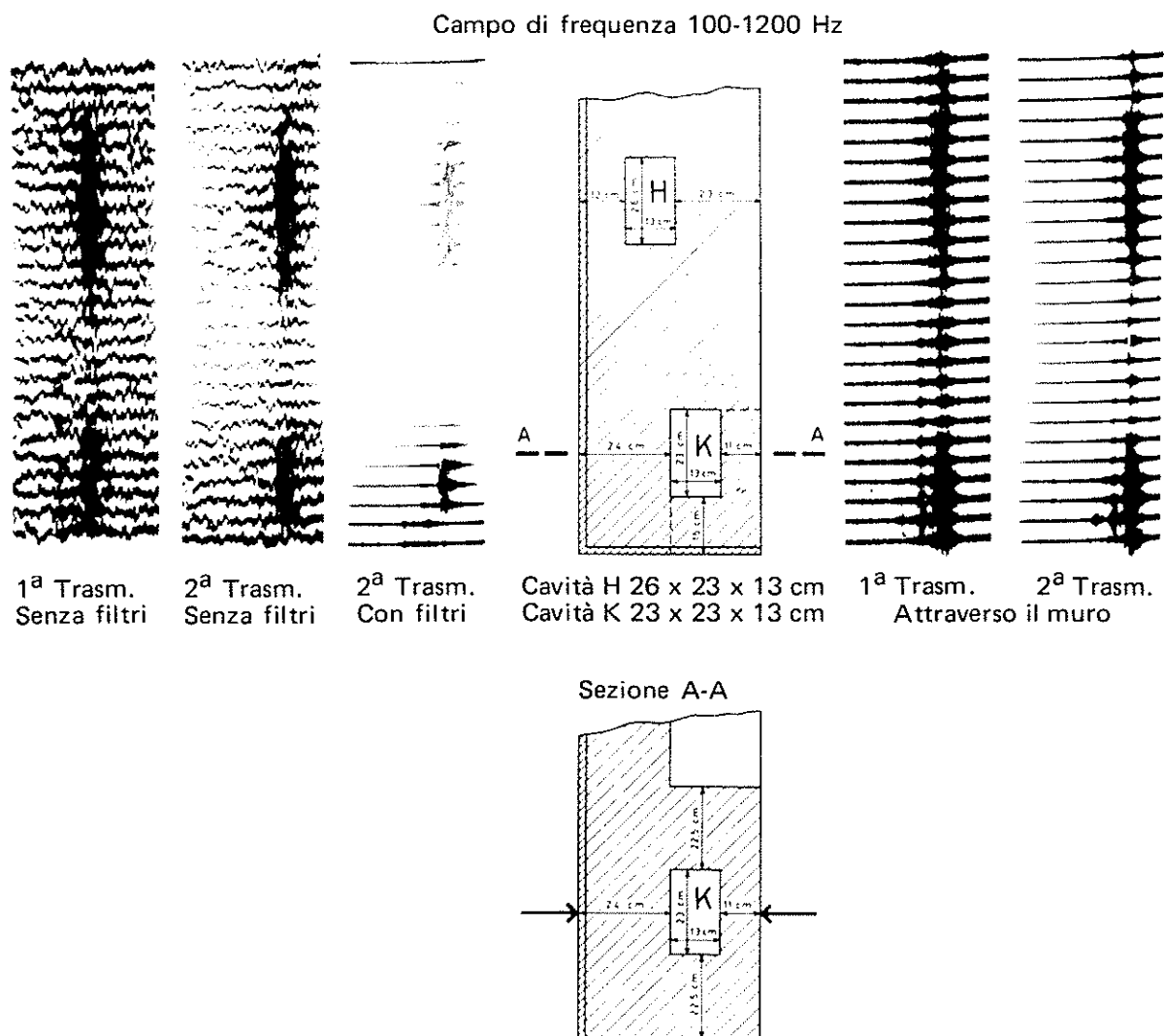


Fig. 2.28

Attualmente, presso l'ISMES, questo metodo è stato semplificato nell'esecuzione e migliorato nei risultati mediante l'impiego di strumentazioni assai più sofisticate di quelle usate un tempo.

Per mezzo di un altoparlante, viene prodotto in aria un "rumore bianco" nella banda 0 – 3000 Hz; esso consiste in una specie di fruscio continuo che emette tutte le frequenze della banda in modo random. La potenza del segnale emesso è costante per tutte le componenti di frequenza ed il diagramma dello spettro è una linea orizzontale.

In una serie di punti della parete da esplorare viene appoggiato per breve tempo e nella successione desiderata un accelerometro collegato ad un preamplificatore e ad un analizzatore di segnali HP 5420 A. Questo strumento visualizza lo spettro di potenza della vibrazione e lo registra in digitale su cassetta magnetica. La presenza delle cavità viene immediatamente rilevata dall'operatore. La registrazione magnetica viene utilizzata successivamente in laboratorio per il plottaggio, secondo la successione dei punti rilevati, degli spettri di potenza a scopo di documentazione.

Nella Figura 2.29 è raffigurata la strumentazione impiegata nel corso di un rilievo di canne fumarie in un vecchio edificio da ristrutturare e nella Figura 2.30 sono riprodotti i risultati ottenuti su una delle pareti esplorate.

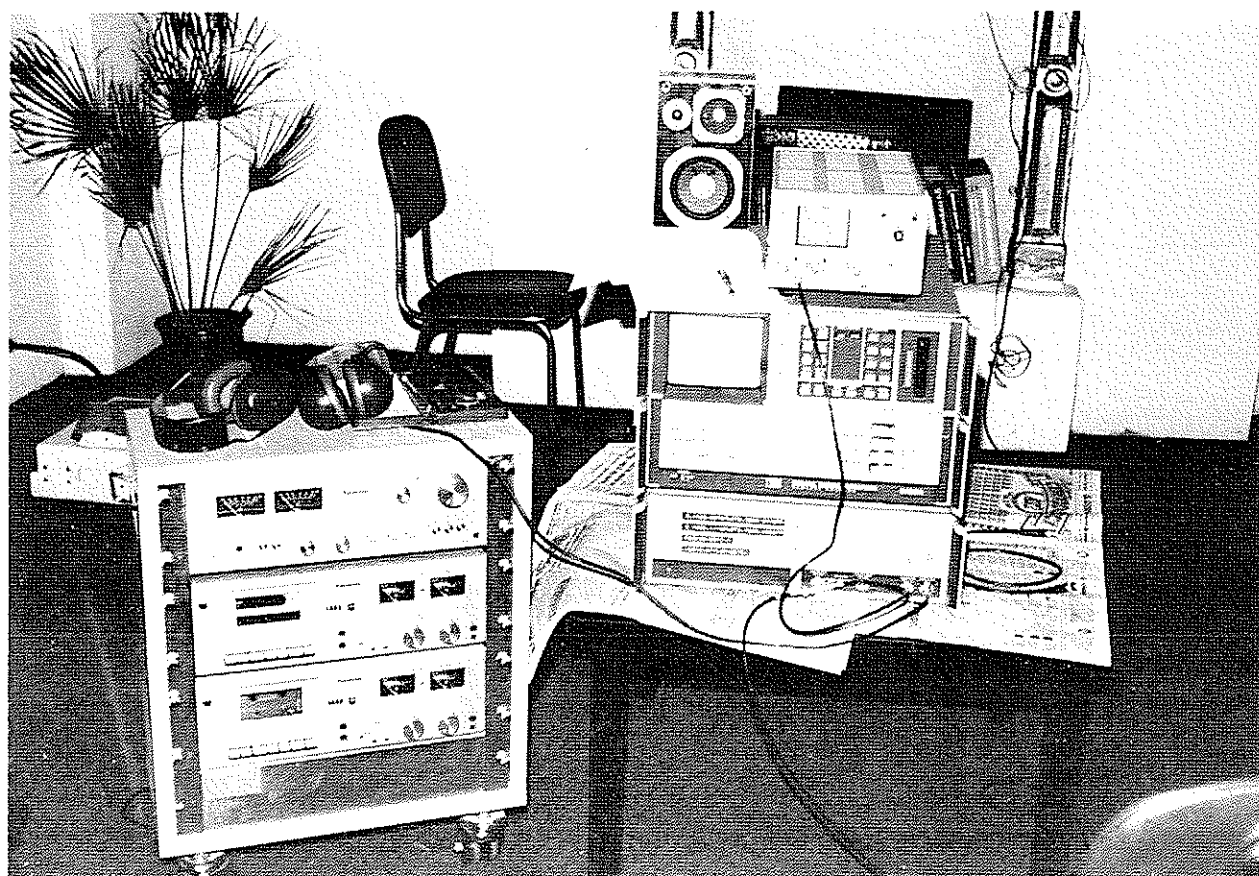


Fig. 2.29
Attrezzatura impiegata per la ricerca delle canne fumarie.

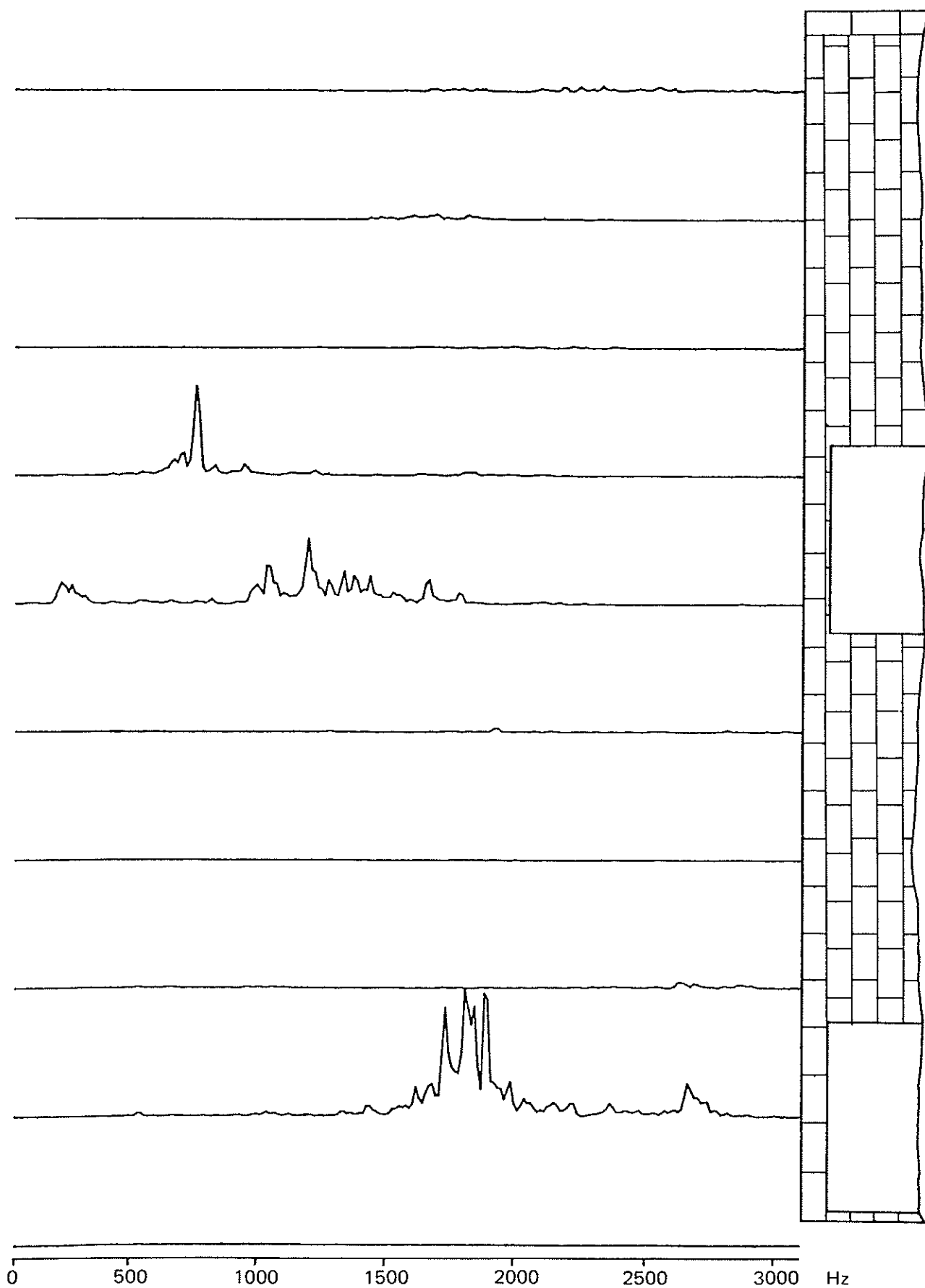


Fig. 2.30

La presenza di due canne fumarie è stata facilmente rilevata da un evidente aumento delle ampiezze di vibrazione; in questa figura gli spettri sono riportati tutti nella stessa scala e, dato l'elevatissimo rapporto tra le ampiezze di vibrazione in corrispondenza delle cavità e quelle del muro pieno gli spettri relativi a quest'ultimo praticamente non sono visibili.

Tuttavia l'analizzatore rappresenta di norma gli spettri variando automaticamente la scala ed adeguandola alla massima ampiezza di ogni singolo spettro. Risulta quindi possibile eseguire un rilievo delle caratteristiche elastiche e dello stato di integrità delle murature di spessore costante analizzando l'aspetto e l'intensità degli spettri di vibrazione.

Questo metodo di controllo, non ancora sperimentato, dovrebbe trovare un'utile applicazione nello studio di dettaglio di murature di particolare importanza ed accessibili solo su una parete; in particolare, di murature sopportanti affreschi, considerando la minima sollecitazione provocata dai suoni nella struttura. Una mappatura per bande di frequenza ristrette delle caratteristiche di vibrazione nei vari punti potrebbe rilevare la presenza di discontinuità e di lesioni interne e comunque dare delle utili indicazioni qualitative sulle condizioni delle murature.

Tuttavia, questo metodo richiede ancora una adeguata sperimentazione su modelli che ne verifichi l'utilità e la sensibilità.

2.9.3. Controlli non-distruttivi con metodi passivi: emissioni acustiche

I metodi di indagine e di controllo considerati finora sono "metodi attivi" poiché i segnali sonici dei quali si analizzano le caratteristiche di trasmissione vengono generati appositamente durante i rilievi.

Un metodo di controllo di tipo "passivo" è quello impiegato per la sorveglianza di murature nelle quali si teme il prodursi di lesioni od il progredire di lesioni esistenti. La comparsa di lesioni, fessure o discontinuità è sempre accompagnata dalla emissione di onde elastiche che si propagano nella muratura e possono essere captate in superficie.

Applicando quindi alla struttura una rete di ricevitori (in generale degli accelerometri) opportunamente disposti e collegati ad una apparecchiatura di registrazione si possono captare e registrare le eventuali emissioni acustiche e controllare il verificarsi di lesioni.

La posizione del punto di emissione delle onde elastiche (fuoco) può essere determinata se si dispone di un sufficiente numero di ricevitori distribuiti intorno alla zona di emissione.

Il minimo numero di ricevitori necessario per localizzare il "fuoco" è di quattro; tuttavia a causa delle imprecisioni nella misura dei tempi di arrivo delle onde è necessario disporre di un numero maggiore di ricevitori ed impiegare dei metodi di calcolo basati sul principio dei minimi quadrati.

Bibliografia

- [2.1] P.P. Rossi, *Prove distruttive e non-distruttive per la caratterizzazione meccanica dei materiali*, ISMES Bollettino n. 130, 1980.
- [2.2] P. Bonaldi, L. Jurina, P.P. Rossi, *Indagini sperimentali e numeriche sui dissesti del Palazzo della Ragione di Milano*, Atti del XIV Congresso Nazionale di Geotecnica, Firenze, Ottobre 1980, ISMES Bollettino n. 156, 1981.
- [2.3] P.P. Rossi, *Analysis of mechanical characteristics of brick masonry by means of non-destructive 'in situ' tests*. Atti del 6° Congresso Internazionale sulle murature in mattoni, Roma, Maggio 1982.
- [2.4] L. Binda, G. Baldi, E. Carabelli, P.P. Rossi, G. Sacchi Landriani, *Evaluation of the statical decay of masonry structures: methodology and practise*, Atti del 6° Congresso Internazionale sulle murature in mattoni, Roma, Maggio 1982.
- [2.5] L. Jurina, A. Peano, *Characterization of brick masonry stiffness by numerical modelling and in situ flat-jack test results*, Atti del 6° Congresso Internazionale sulle murature in mattoni, Roma, Maggio 1982.
- [2.6] E. Carabelli, *A new tool for archaeological prospecting: the sonic spectroscope for the detection of cavities*, Prospezioni Archeologiche, Roma, 1966.