

Statica per l'edilizia storica

Università degli Studi di Cagliari
Corso di Laurea Magistrale in
Architettura
A.A. 2016-2017

Prof. ing. Antonio Cazzani, Dr. ing. Flavio Stochino

antonio.cazzani@unica.it

<http://people.unica.it/antoniocazzani/ses/>

Lezione 20 – Sperimentazione sulla muratura

Sommario

- Premessa
- Prove distruttive:
 - su componenti
 - su campioni di muratura
- Prove su micro-elementi
- Prove su macroelementi
- Metodi di indagine non distruttiva:
 - prove statiche con martinetti piatti
 - prove dilatometriche
 - analisi ultrasoniche
- Conclusione

Premessa

Per studiare il comportamento meccanico della muratura e/o per redigere un progetto di restauro è di importanza fondamentale determinare i parametri del materiale: il problema è complicato dalla marcata eterogeneità del materiale muratura, costituito, come visto, da elementi lapidei o laterizi e da malta.

L'approccio più semplice consisterebbe nello svolgere prove distruttive su campioni, il più possibile indisturbati, prelevati dalla struttura da esaminare.

Ciò si scontra con ovvie difficoltà:

- Per essere rappresentativi del comportamento globale, dovrebbero essere di notevoli dimensioni, non sempre prelevabili senza conseguenze negative sulla struttura muraria;
- Nel caso frequente di edifici di interesse storico o monumentale, anche il prelievo di campioni di piccole dimensioni può essere problematico o addirittura impossibile.

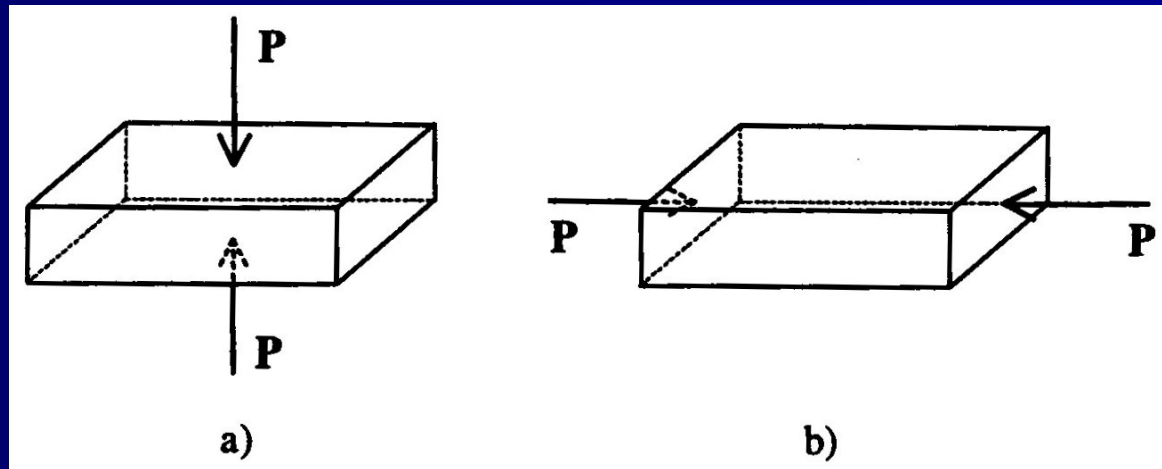
Queste restrizioni hanno richiesto lo sviluppo di tecniche di indagine *in situ* di tipo non distruttivo per potere caratterizzare in modo certo e agevole il comportamento della muratura: lo sviluppo di nuove tecniche ha dato forte impulso all'attività di ricerca in questo settore.

Prove distruttive su componenti (1/4)

Considerando una muratura in laterizi pieni (o, in alternativa, in pietra squadrata) se ne può caratterizzare il comportamento mediante prove meccaniche sui componenti: laterizi e malta.

Per i laterizi si eseguono:

1. Prove a compressione in direzione perpendicolare al letto di malta (verticale);
2. Prove a compressione in direzione parallela al letto di malta (orizzontale).



Le prove vanno eseguite su almeno 10 campioni e come resistenza si assume la media dei valori ottenuti, f_{bm} facendo riferimento alla sezione resistente lorda.

Prove distruttive su componenti (2/4)

Le facce dei laterizi devono essere rettificate preventivamente, così da ridurre i difetti di planarità (e le deformazioni flessionali delle piastre della macchina di prove) a meno di 0.05 mm.

Il carico deve essere centrato in corrispondenza del baricentro della sezione e la velocità di prova massima è pari a 0.5 MPa/s.

La resistenza caratteristica a compressione, f_{bk} , si determina dalla resistenza media a compressione, f_{bm} , in base alla relazione:

$$f_{bk} = k \cdot s \cdot f_{bm}$$

dove k è un coefficiente (di affidabilità) definito in funzione del numero n di campioni provati, s è lo scarto quadratico medio delle resistenze f_i dei singoli campioni,

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i^n (f_{bm} - f_i)^2}{(n-1)}}$$

e deve essere soddisfatta la seguente limitazione su coefficiente di variazione: $\delta = s/f_{bm} < 0.20$.

Tab. I – Valore di k in funzione del numero di laterizi.

n	6	8	10	12	20	>30
k	2,33	2,19	2,10	2,05	1,93	1,64

Prove distruttive su componenti (3/4)

Solitamente la resistenza caratteristica misurata è quella per la direzione parallela ai carichi verticali, secondo la disposizione dei laterizi in opera.

Quando occorre determinare (per esempio per le onde sismiche e per la valutazione della massima resistenza a taglio della muratura) anche la resistenza degli elementi isolati in direzione ortogonale ai carichi verticali nel piano della parete, f'_{bk} , il valore caratteristico è dato dalla relazione:

$$f'_{bk} = 0.70 f'_{bm}$$

dove f'_{bm} è il valore medio della resistenza dedotto da prove su almeno sei campioni.

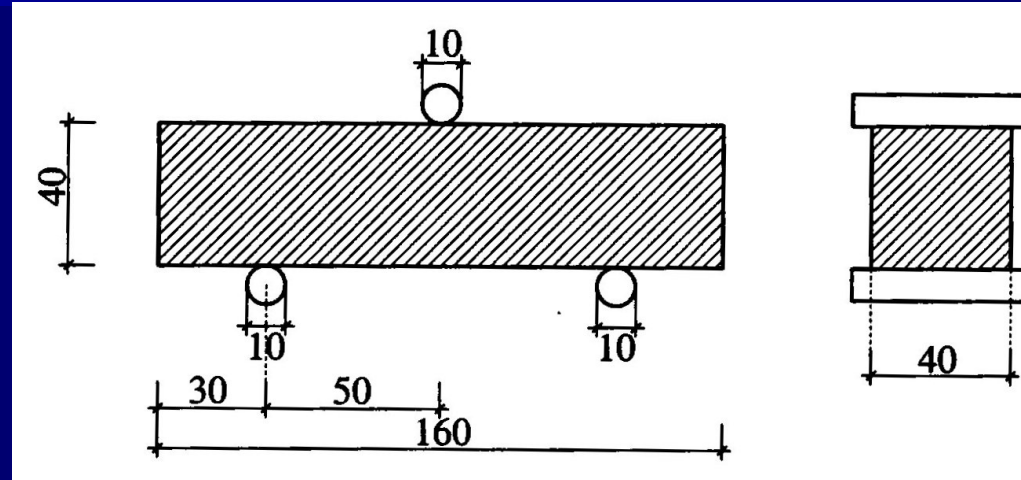
Per la malta si eseguono prove di compressione su provini prismatici di dimensioni 40×40×160 mm o cubici di spigolo pari a 100 o 150 mm.

Noto il carico di rottura a compressione, P_{rc} , di determina la resistenza a compressione, σ_{rc} , nota l'area, A , della superficie di contatto con le piastre della macchina di prova:

$$\sigma_{rc} = P_{rc}/A.$$

La resistenza a trazione della malta viene determinata attraverso prove di tipo indiretto come la prova a flessione su tra punti condotta su provini prismatici di dimensioni 40×40×160 mm, sottoposti a carico centrato in mezzeria; la velocità di carico è pari a 50 N/s fino a raggiungere la rottura.

Prove distruttive su componenti (4/4)



La resistenza a flessione, σ_f , si ottiene mediante la relazione:

$$\sigma_f = 1.5 \frac{P_f l}{b^2 l} \quad [*]$$

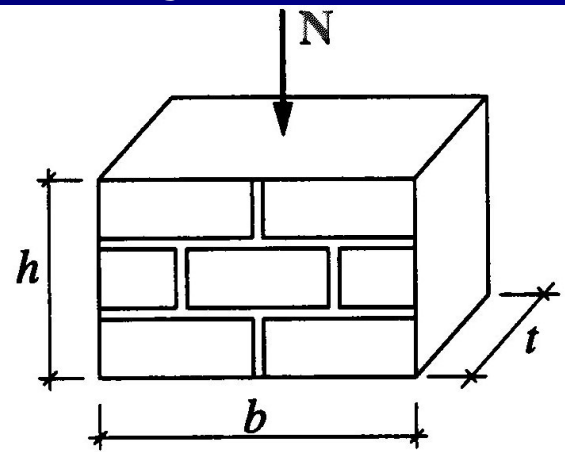
dove b è il lato della sezione quadrata, l la distanza fra gli appoggi e P_f il carico di rottura applicato al centro del prisma; espresse le quantità geometriche in mm e il carico in N, la [*] fornisce la resistenza a flessione in $\text{N/mm}^2 = \text{MPa}$.

La resistenza a compressione si può determinare sui semi-prismi ottenuti dalla prova a flessione a 3 punti; lo stesso schema di prova si può utilizzare per valutare la resistenza a flessione dei laterizi.

Prove distruttive sulla muratura (1/3)

Per determinare sperimentalmente la resistenza caratteristica a compressione semplice della muratura, f_k , si utilizzano campioni di muratura come indicato in figura.

$b \geq 2$ blocchi
 $h \geq 3$ blocchi
 $h/t = 2,4 - 5$
 $f = Nu/bt$
 $n \geq 6$ numerosità campione



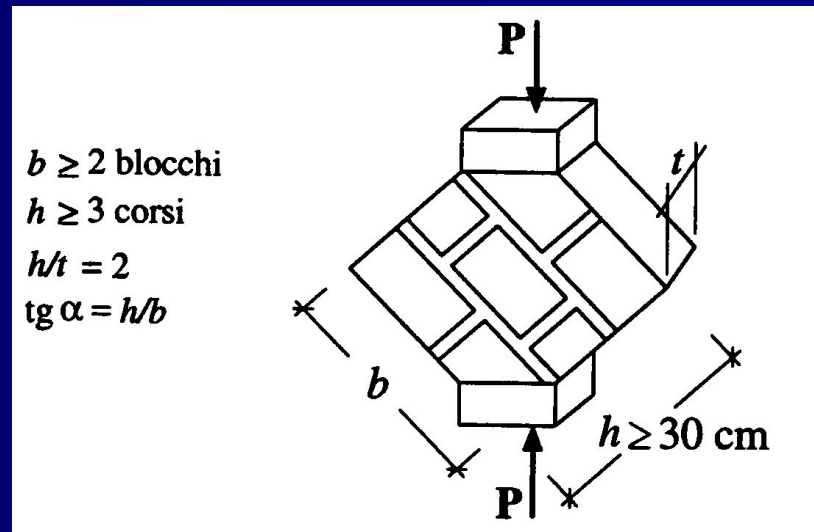
Il carico viene applicato uniformemente alle basi, spianate con gesso o malta di cemento, con velocità pari a 0.025 MPa/s.

La resistenza caratteristica è ancora data dalla relazione $f_k = f_m \cdot k \cdot s$, dove f_m è la resistenza media dei campioni, k un coefficiente di affidabilità (dipendente dalla numerosità dei campioni) e s lo scarto quadratico medio.

Se il campione viene strumentato con estensimetri si rilevano le deformazioni sulle facce opposte e si può così ricavare il legame costitutivo ($\sigma - \varepsilon$) della muratura.

Prove distruttive sulla muratura (2/3)

Per determinare la resistenza caratteristica a taglio della muratura si ricorre a una prova di trazione indiretta, applicando un carico di compressione diagonale a un elemento di muratura come quello indicato in figura.



I provini per la prova a taglio sono provvisti negli spigoli (opposti) inseriti nella macchina di prova, di un elemento di calcestruzzo armato atto a ripartire il carico.

In assenza di sforzo normale la tensione di taglio a rottura è data, in funzione del carico di rottura, P_u da:

$$f_{v0i} = \frac{P_u}{(b + h)t}$$

Prove distruttive sulla muratura (3/3)

La resistenza caratteristica a taglio in assenza di sforzo normale si determina da qui mediante la relazione:

$$f_{vk0} = 0.7 f_{vm0} ,$$

dove $f_{vm0} = (\sum f_{v0i})/n$ è la resistenza media a taglio in assenza di sforzo normale, determinata su n campioni.

La resistenza caratteristica a taglio della muratura in opera è definita come la resistenza dovuta all'effetto combinato delle forze orizzontali e dei carichi verticali agenti sul piano della parete (che danno origine nella sezione di verifica a una tensione media normale σ_0):

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0.4 \sigma_0 < f_{vk,lim} .$$

Il valore limite viene assunto pari a $f_{vk,lim} = 1.4 f'_{bk}$ dove f'_{bk} è il valore caratteristico della resistenza degli elementi isolati in direzione *orizzontale* e *nel piano* della parete.

In presenza di malte deboli (M3, M4) il cedimento per taglio si verifica usualmente in corrispondenza del letto di malta per valori di $f_{vk} = 0.1 \div 0.2$ MPa.

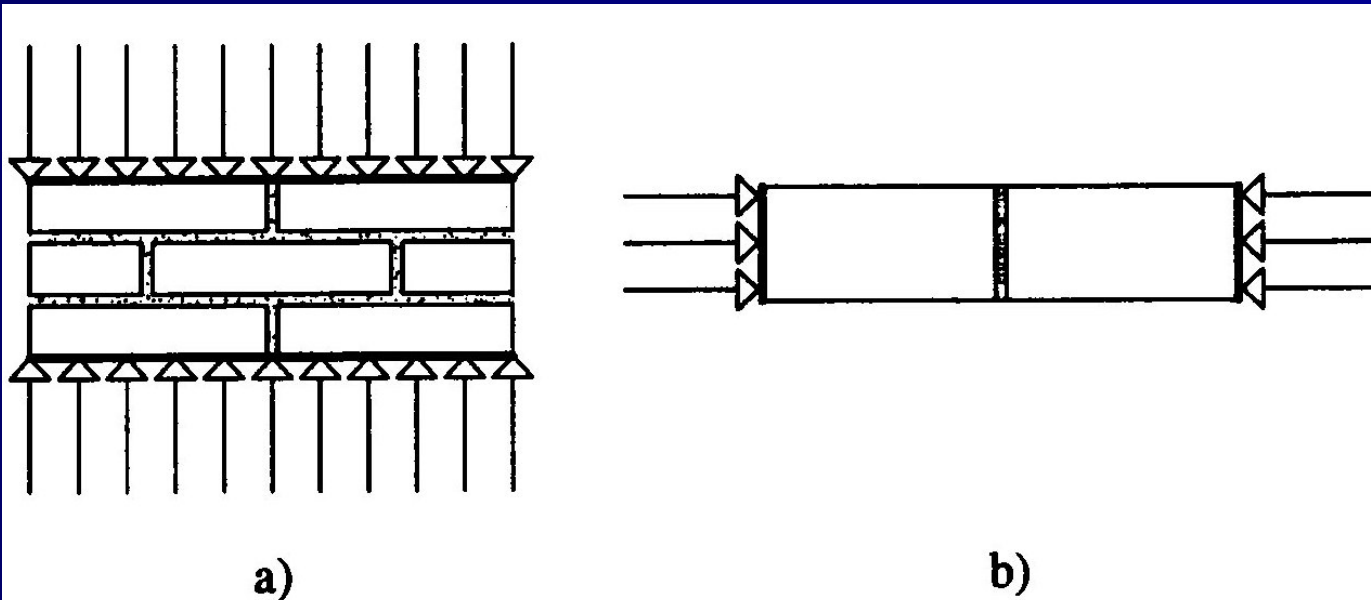
In modo meno preciso il valore di f_{vk0} può essere ottenuto da tabella in funzione della classe di malta e della resistenza f_{bk} di elementi isolati.

Tabella II – Valore di f_{vk0} in funzione della resistenza f_{bk} e del tipo di malta.

f_{bk} (MPa)	Classe	f_{k0} (MPa)
≤ 15	M1 – M2 – M3	0,20
> 15	M1 – M2 – M3	0,30

Prove distruttive su microelementi (1/2)

Sperimentazione su piccola scala su provini costituiti da poche unità rappresentative del materiale. Le prove più comuni sono quella di compressione su prismi o pilastrini (a) e quella di compressione su coppie di elementi in direzione parallela ai letti di malta (b).



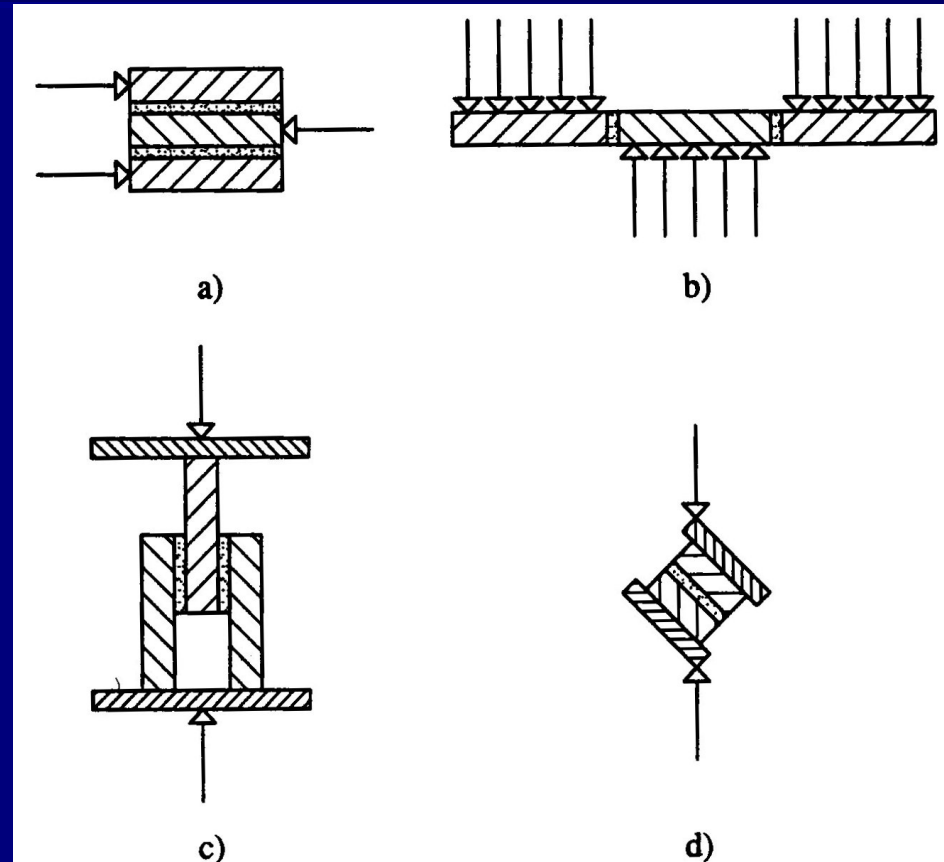
Prova di compressione su microelementi di muratura: a) normale ai letti di malta; b) parallela ai letti di malta.

Prove distruttive su microelementi (2/2)

A queste si vanno affiancando, nell'ambito di nuove tecniche di sperimentazione sulle murature, prove di maggiore complessità, ancora limitate, per ora all'ambito della ricerca.

Fra queste si annoverano:

- a) Prove di aderenza sui letti di malta;
- b) Prove di aderenza sui giunti di malta verticali;
- c) Prove di interazione dello sforzo normale sull'aderenza dei letti di malta;
- d) Prove di interazione taglio-trazione sull'aderenza dei letti di malta.



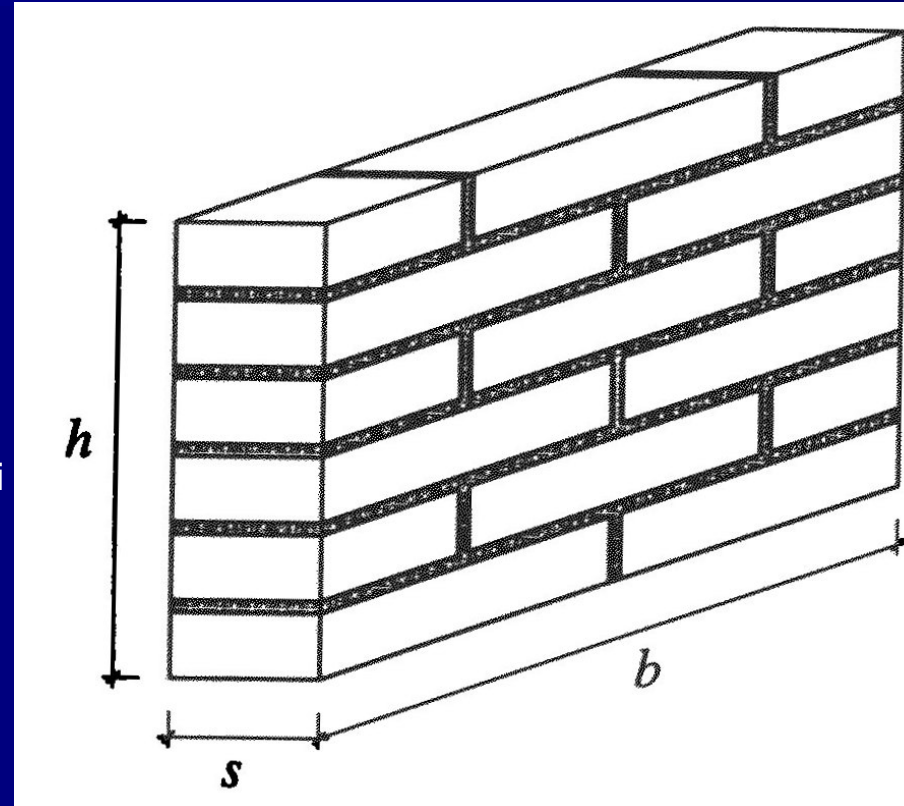
Prove distruttive su macroelementi (1/3)

Un macroelemento è un elemento di muratura costituito da almeno tre corsi di laterizi e che soddisfa inoltre le seguenti limitazioni dimensionali:

- Larghezza (b) almeno pari a 2 lunghezze di blocchi;
- Rapporto altezza spessore (h/s) compreso fra 2.4 e 5.0.

La prova più frequentemente eseguita su questi macroelementi è quella di compressione semplice eseguita con una macchina di prova azionata a una velocità di carico pari a 0.025 MPa/s.

Tuttavia, se si vogliono riprodurre le sollecitazioni che tipicamente si verificano nel piano medio di una tipica costruzione in muratura si possono eseguire su macroelementi le seguenti prove:

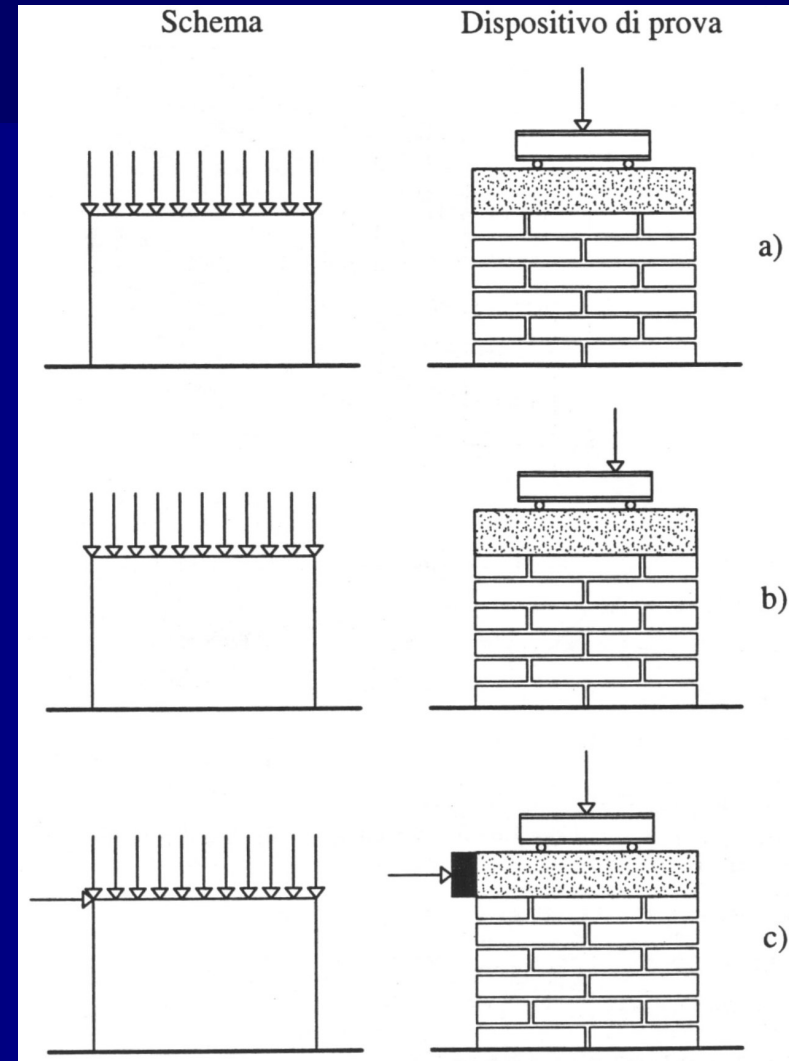


Prove distruttive su macroelementi (2/3)

a. Prova di compressione uniforme.

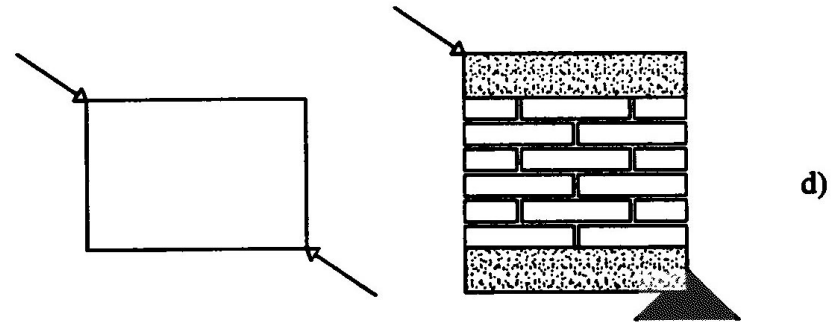
b. Prova di compressione eccentrica.

c. Prova di compressione e taglio.

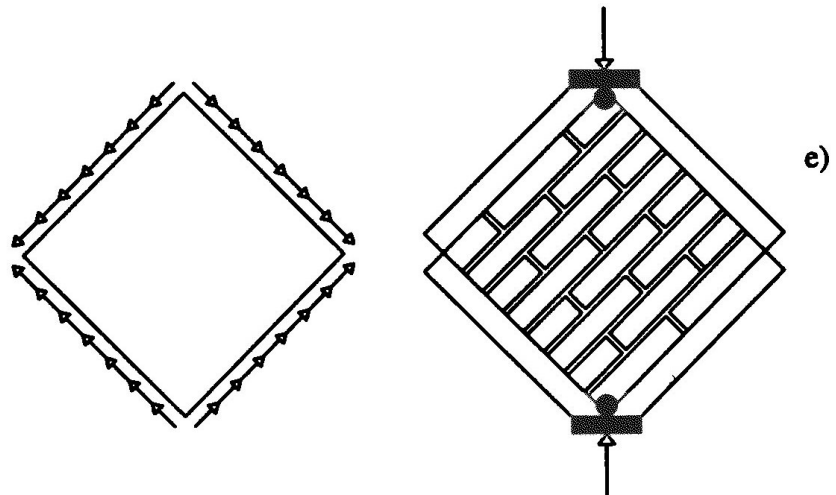


Prove distruttive su macroelementi (3/3)

d. Prova di compressione diagonale.



e. Prova di taglio.



Metodi di indagine non distruttivi (1/8)

Si sono sviluppati per ovviare le difficoltà connesse al prelievo di campioni rappresentativi di grandi dimensioni delle strutture murarie.

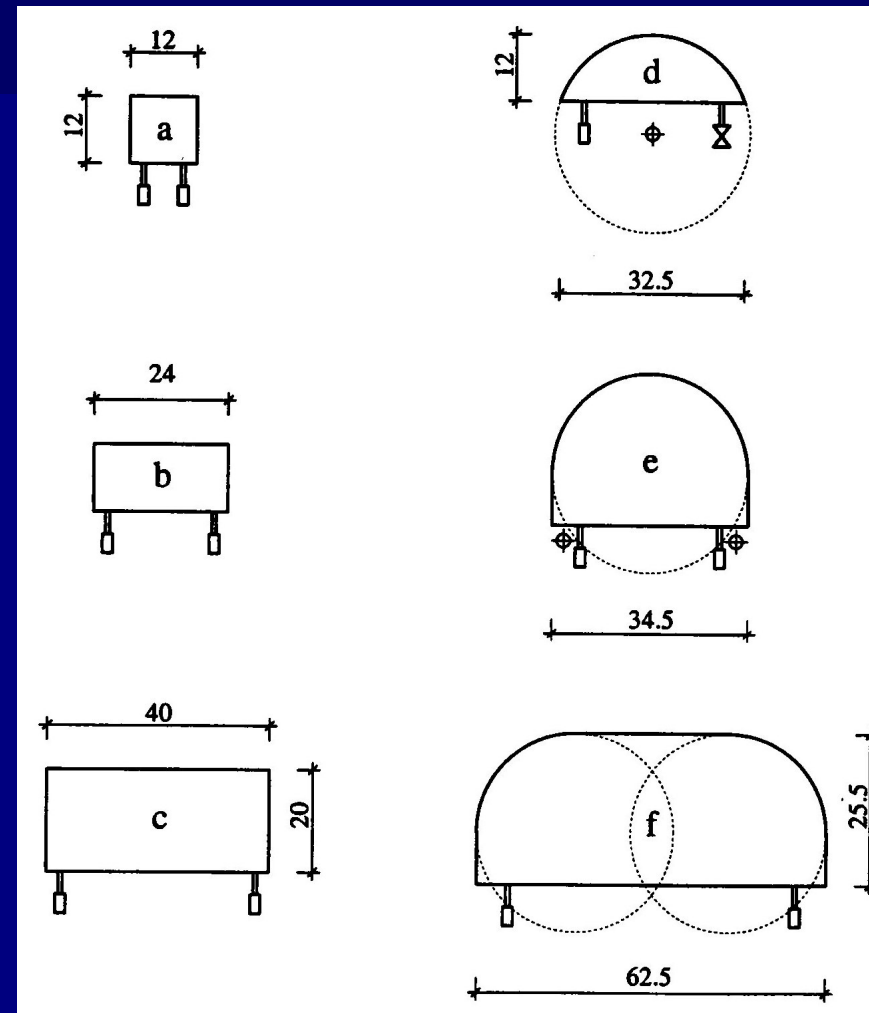
I tipi di controlli non distruttivi più diffusi sono attualmente:

1. Prove con martinetti piatti;
2. Analisi ultrasoniche e soniche.

Le analisi ultrasoniche e soniche sono ancora uno strumento in fase di sperimentazione, mentre l'uso dei martinetti piatti è ampiamente diffuso.

I martinetti piatti sono prevalentemente impiegati nella diagnostica su edifici e strutture murarie allo scopo di valutare sperimentalmente le reali condizioni statiche della muratura.

In figura i modelli per murature in laterizio (a sinistra) e quelli per murature in pietra (a destra)

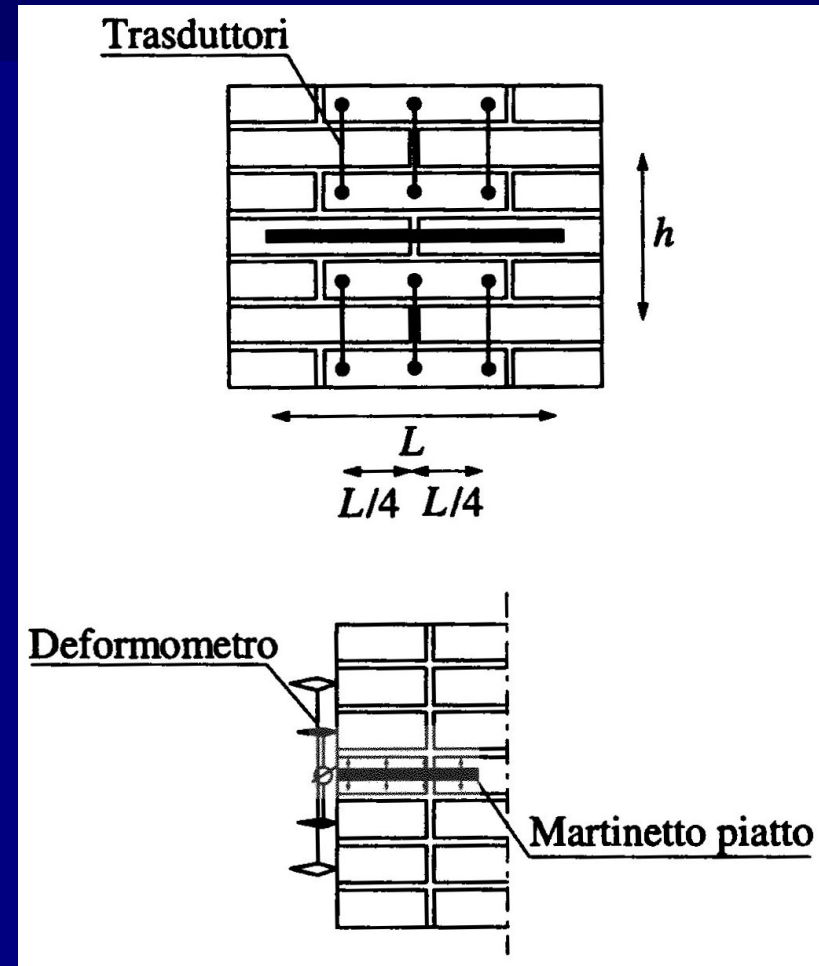


Metodi di indagine non distruttivi (2/8)

L'analisi può essere eseguita facendo uso di un singolo martinetto, valutando la variazione dello stato tensionale in un punto della struttura, oppure impiegando due martinetti per ricavare le caratteristiche di deformabilità su un prisma individuato all'interno della massa muraria.

Nella modalità a singolo martinetto si valuta la variazione dello stato di tensione nella muratura a seguito dell'esecuzione di un taglio in direzione normale alla superficie. Il rilascio delle tensioni provoca una chiusura dei lembi del taglio che può essere valutata attraverso misure di convergenza fra due o più punti, situati in posizione simmetrica rispetto al taglio, con l'ausilio di deformometri ad alta precisione.

Introducendo il martinetto piatto all'interno del taglio lo si porta in pressione fino ad annullare la convergenza precedentemente rilevata: in queste condizioni la pressione del martinetto risulta pari alla sollecitazione preesistente nella muratura.



Metodi di indagine non distruttivi (3/8)

A meno di costanti che tengono conto del rapporto fra l'area di carico del martinetto e quella del taglio e della rigidità del martinetto si ha:

$$\sigma = k_m k_a p ,$$

dove

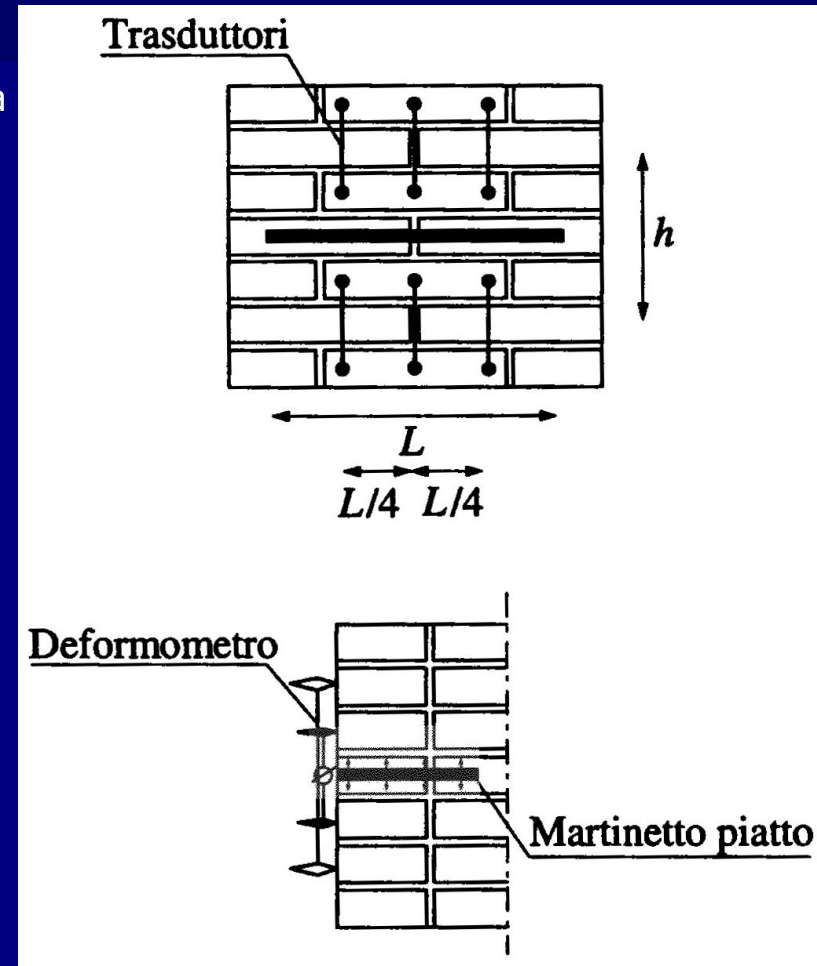
k_m è un coefficiente relativo alla rigidità del martinetto;

k_a è un coefficiente relativo all'area del taglio e all'impronta del martinetto;

p è la pressione del manometro.

Si può prevedere un'installazione a recupero dello strumento oppure un'installazione a perdere nel caso che esso venga cementato per un rilevamento a medio e lungo termine delle misure di pressione nel punto di contatto (monitoraggio).

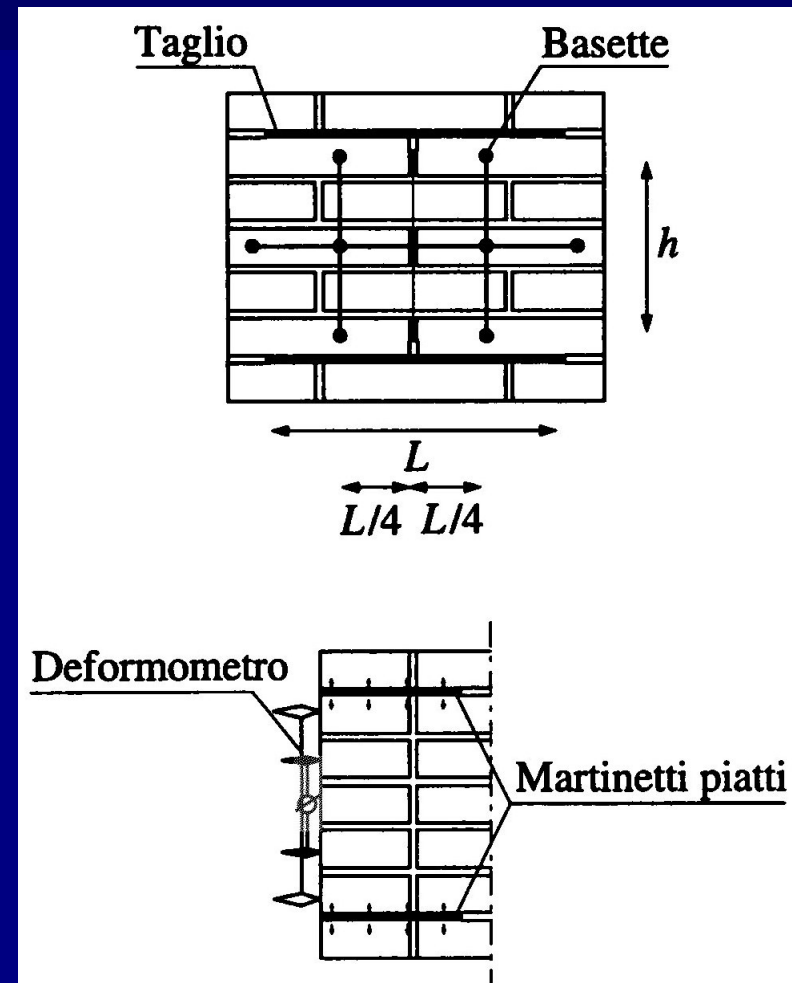
Questa tecnica di prova è utile per valutare eventuali eccentricità di carico su una parete o su un pilastro: è sufficiente eseguire la prova sui due paramenti contrapposti.



Metodi di indagine non distruttivi (4/8)

La modalità di prova con 2 martinetti consente di rilevare lo stato deformativo: gli strumenti vengono installati a circa 50 cm l'uno dall'altro e si sottopone il volume di muratura fra essi compreso a una prova monoassiale di compressione (in direzione normale al piano di posa dei mattoni) senza la necessità di asportare il campione. I vantaggi della tecnica di prova con martinetto piatto sono così riassumibili:

1. esecuzione di una prova non distruttiva;
2. acquisizione di risultati affidabili perché le caratteristiche di deformabilità sono relative a un campione non disturbato;
3. esecuzione della prova con attrezzature di facile impiego;
4. velocità di esecuzione (una prova a due fasi con uno e poi due martinetti si esegue in circa 6 ore);
5. possibilità (con 2 martinetti) di eseguire una prova quasi a rottura sulla muratura arrestandola all'apparire delle prime fessurazioni con limitato danno.

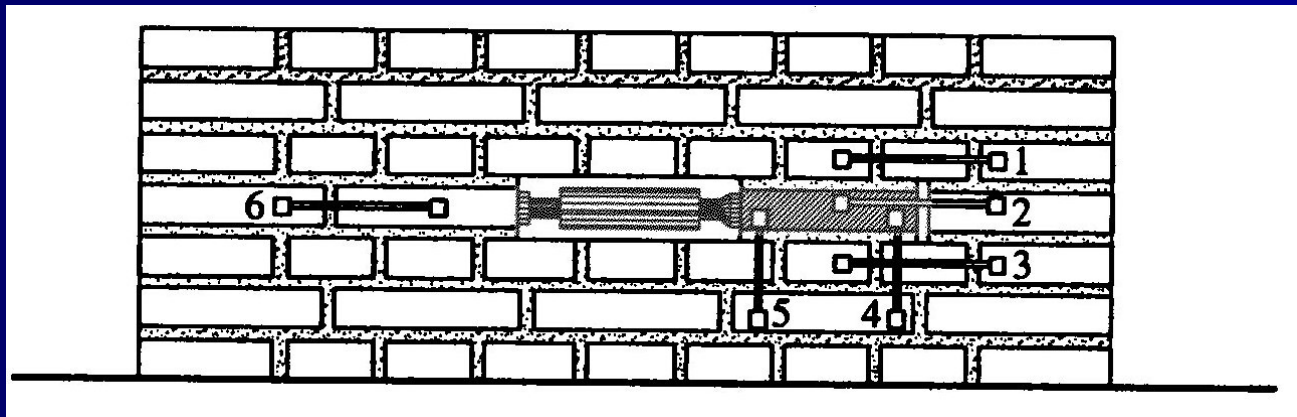


Metodi di indagine non distruttivi (5/8)

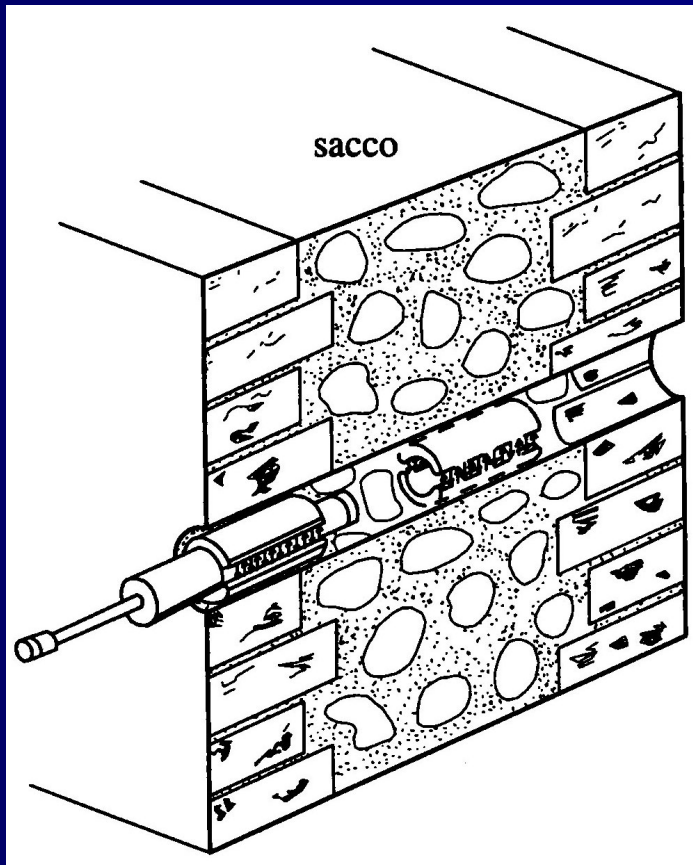
Mediante 2 martinetti piatti e un martinetto idraulico è anche possibile la determinazione *in situ* della resistenza a taglio lungo i corsi di malta.

Si procede a estrarre un mattone che viene sostituito da un martinetto idraulico: questo applica un'azione di taglio al mattone adiacente. La componente di sollecitazione normale ai corsi di malta viene invece applicata dai due martinetti piatti.

Mediante una serie di trasduttori elettrici si misurano gli scorrimenti relativi del mattone sottoposto a prova rispetto ai corsi di mattoni adiacenti e le deformazioni in direzione normale ai corsi di malta. Eseguendo alcune prove con diversi valori di pressione normale si può valutare l'angolo di attrito interno, ϕ , e il parametro di coesione, c , della malta.



Metodi di indagine non distruttivi (6/8)



Per determinare le caratteristiche meccaniche della parte interna di una muratura a sacco occorre adottare una sonda dilatometrica.

Questa consente di applicare una sollecitazione alla parete di un foro e di rilevare le conseguenti deformazioni: in questo modo si possono eseguire prove di carico sui diversi materiali che compongono la muratura.

Il risultato più importante che si può ottenere è il rapporto fra il modulo elastico della parte corticale della muratura e quello dello strato interno.

I risultati di una prova dilatometrica sono meno affidabili rispetto a quelli della prova con martinetti piatti, tuttavia solo mediante la prova dilatometrica si possono avere indicazioni sul comportamento meccanico della porzione interna della muratura.

Metodi di indagine non distruttivi (7/8)

Le prove non distruttive basate sull'impiego di ultrasuoni sfruttano il fenomeno di propagazione di onde elastiche nei solidi: si sfruttano in particolare onde con frequenza superiore a quella udibile dall'orecchio umano.

Si distinguono:

1. onde longitudinali (o di compressione), che si propagano a velocità v_l ;
2. onde trasversali (o di taglio), che si propagano a velocità v_t .

La velocità di propagazione delle onde longitudinali è maggiore di quella delle onde trasversali, sicché $v_l > v_t$; inoltre il rapporto fra queste velocità è funzione del coefficiente di Poisson.

In un mezzo elastico (lineare), omogeneo e isotropo sussistono queste relazioni fra le velocità di propagazione e i moduli elastici:

$$E = \gamma v_l^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}; \quad G = \gamma v_t^2; \quad \nu = \frac{(r^2 / 2) - 1}{r^2 - 1}$$

dove $r = v_l / v_t$.

Per il carattere disomogeneo e anisotropo della muratura i valori delle misurazioni ultrasoniche vanno considerati con cautela.

Costituiscono un utile metodo di indagine poiché forniscono informazioni qualitative sulle variazioni delle caratteristiche elastiche della muratura e consentono di localizzare la presenza di eventuali fessure che intersecano i percorsi di misura.

Si rilevano infatti le variazioni subite da un segnale ultrasonico quando attraversa, subendo riflessioni, modulazioni e attenuazioni per effetto delle disomogeneità, il materiale sottoposto a prova.

Metodi di indagine non distruttivi (8/8)

Si misura il tempo di transito dell'onda fra la sonda trasmittente e quella ricevente: da qui si ricava la velocità dell'onda e quindi le caratteristiche del materiale.

Le variazioni della velocità di propagazione permettono di individuare imperfezioni e difetti interni del materiale per la presenza di inclusioni e delle interfacce fra i diversi costituenti: questi fenomeni sono accentuati dalla presenza di danneggiamenti prodotti da un carico applicato.

Le misure ultrasoniche permettono così di verificare la distribuzione dello stato di degrado delle murature di vecchi edifici e costituiscono un ideale complemento delle prove statiche.

Per condurre un'indagine ultrasonica efficace conviene rifarsi a questi criteri:

- eseguire misure ultrasoniche in tutti i punti della muratura dove si sono eseguite prove statiche non distruttive;
- rilevare un grande numero di valori di velocità;
- eseguire prove di confronto sui campioni (sia di muratura, sia dei singoli componenti) che sono stati sottoposti a prove distruttive.

In questo modo si può determinare il grado di correlazione delle prove ultrasoniche e delle prove statiche.

Riferimenti bibliografici e iconografici

- I.V. Carbone, A. Fiore, G. Pistone, *Le costruzioni in muratura*, Hoepli: Milano, 2001.
- M. Como, *Statica delle costruzioni storiche in muratura. Archi, volte, cupole, architetture monumentali, edifici sotto carichi verticali e sotto sisma*, Aracne: Roma, 2010
- S. Mastrodicasa, *Dissesti Statici nelle Strutture Edilizie*, Hoepli: Milano, 1980.
- R. S. Olivito, *Statica e Stabilità delle Costruzioni Murarie*, Pitagora: Bologna, 2009².