

## 1.5 CATALOGO DELLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE E DEL LORO UTILIZZO

In base alle conoscenze maturate preventivamente dagli autori in oltre un decennio di ricerche e durante l'esperienza svolta in Lunigiana, Garfagnana ed Umbria è stato possibile mettere a punto una procedura da adottare sistematicamente per qualificare le murature e controllare le tecniche di intervento.

Tale procedura si può suddividere in due parti, come verrà descritto nel seguito. Anche per quanto riguarda le indagini, le conoscenze possono essere inserite in un catalogo che raccoglie i tipi di prove ed i risultati.

### 1.5.1 Indagini atte a qualificare le murature

Le indagini ritenute necessarie sono elencate qui di seguito.

#### 1.5.1.1 Rilievi geometrici e morfologici

- rilievo geometrico della struttura;
- rilievo del quadro fessurativo;
- rilievo delle sezioni murarie utilizzando scassi già esistenti o con piccoli scassi che permettano di ricostruire successivamente l'integrità della muratura;
- carotaggi: dovrebbero essere ridotti al minimo, in quanto difficilmente possono dare indicazioni per definire la tipologia della sezione; essi infatti danno solo una stratigrafia della sezione muraria. Per avere maggiori informazioni si dovrebbe usare un endoscopio o una sonda televisiva.

#### 1.5.1.2 Prove di laboratorio

La fase di prelievo di materiale per le prove di laboratorio deve essere svolta in modo da bilanciare le esigenze di significatività dei risultati e l'esigenza di non distruttività del campionamento.

La stessa tecnica di prelievo è importante; infatti, il campione prelevato, deve essere il più possibile indisturbato per essere effettivamente rappresentativo della situazione in situ.

Le finalità di queste prove possono essere molteplici. Possono interessare:

- la caratterizzazione dei materiali da un punto di vista chimico fisico o meccanico;
- l'individuazione dell'origine stessa del materiale, per impiegarne di simili nell'intervento di riparazione;
- la conoscenza della composizione della muratura;
- la misura del degrado e della durabilità o comunque della resistenza ad agenti aggressivi di nuovi materiali da impiegare nel restauro.

Data la difficoltà di campionamento di prismi di muratura di dimensioni significative, generalmente il prelievo interessa solo singoli elementi (malta, pietre o mattoni) o assemblaggi di limitate dimensioni.

*a) Prelievo di mattoni, pietre e malte.*

La metodologia di campionamento dipende direttamente dalle caratteristiche del singolo materiale. In linea generale, possono essere espressi alcuni principi guida:

1. il prelievo deve essere condotto nel rispetto dell'integrità dell'edificio;
2. la quantità di materiale prelevato deve essere compatibile con lo scopo della prova e le richieste in termini di affidabilità della tecnica sperimentale;
3. se il fine delle prove è la caratterizzazione e la verifica dell'estensione del danno, il prelievo di materiale deve essere effettuato su diverse parti dell'edificio; in questo modo è possibile individuare l'eventuale presenza di vari tipi di degrado;
4. il campionamento deve riguardare porzioni dell'edificio non soggette all'azione della pioggia o a precedenti riparazioni, specialmente se il fine dell'indagine è la caratterizzazione dei leganti e degli aggregati delle malte;
5. il numero di campioni deve essere sufficientemente alto, perchè' il risultato sia statisticamente significativo e rappresentativo della condizione della muratura.

*b) Prove sulle malte.*

Al momento, non esistono prove standardizzate per la definizione della composizione, delle caratteristiche chimico-fisico e meccaniche di malte prelevate da edifici esistenti. Spesso è molto difficile prelevare campioni di dimensioni sufficienti per l'esecuzione di prove meccaniche; quindi, le uniche informazioni attendibili, riguardano la composizione della malta e lo stato di degrado. Infatti, le analisi chimiche e petrografiche, meno costose di altri tipi di prove, possono individuare il tipo di legante e di aggregato, il rapporto legante aggregato, il grado e l'estensione della carbonatazione, la presenza di reazioni chimiche e di sostanze di nuova formazione (reazioni pozzolaniche, reazioni tra aggregati e leganti, reazioni alcali-aggregati ecc.) (Binda et al. 1998).

La granulometria e la distribuzione degli aggregati può essere misurata attraverso la separazione degli aggregati stessi dal legante, mediante trattamenti termici o chimici o con metodi ottici (Baronio et al. 1991).

La conoscenza della composizione di una malta anche se non esatta al 100% permette la riproduzione di malte o miscele da iniezione con caratteristiche simili a quelle originarie o comunque compatibili, da usare in eventuali operazioni di riparazione.

In Appendice 1 sono presentati i risultati della caratterizzazione di una malta; i dati sono esposti sotto forma di scheda, messa a punto da L. Binda e G. Baronio.

*c) Prove su pietre e mattoni, nuovi e danneggiati.*

Il degrado della muratura causato da agenti aggressivi non è mai uniforme; in alcuni casi, se il degrado è profonda ma limitato a pochi elementi, può essere necessaria la sostituzione degli elementi stessi.

In tali condizioni, le prove di laboratorio possono fornire utili indicazioni per la scelta dei nuovi materiali.

Quando l'operazione di sostituzione non è possibile, per esempio data l'estensione del degrado, può essere indicata l'applicazione di appositi trattamenti superficiali. Le prove di laboratorio, condotte su elementi deteriorati e non, forniscono, in questo caso, indicazioni sulla scelta del prodotto da utilizzare.

In particolare, possono essere effettuati i seguenti esami.

prove meccaniche: prove di compressione e di trazione indiretta (si caratterizza la parte non degradata e la degradata), durezza superficiale in diversi punti della superficie esterna e della sezione; con quest'ultima modalità si può valutare la profondità del degrado.

prove fisiche: misura del peso specifico, dell'assorbimento d'acqua per immersione totale o per risalita capillare; si tratta di parametri importanti nella valutazione della durabilità del materiale e degli effetti dei trattamenti superficiali; l'assorbimento iniziale di pietre e mattoni e la ritenzione d'acqua delle malte nuove, sono essenziali per la scelta di nuove malte o miscele da iniezione per operazioni di riparazione; la diffrattometria a raggi X può invece individuare il tipo di sale presente all'interno o sulla superficie di murature degradate; la porosimetria a mercurio è, invece, una tecnica in grado di valutare indirettamente la trattabilità o la presenza di trattamenti superficiali; i coefficienti di espansione termica e in acqua devono essere misurati, nel caso di sostituzione, sui nuovi elementi.

prove chimiche: possono essere condotte prove per l'individuazione di solfati alcalini. I sali devono essere prelevati a diverse profondità della muratura, per definirne la presenza e la quantità.

analisi ottiche

e mineralogiche: osservazioni ottiche (stereomicroscopio, SEM) devono essere eseguite per definire il degrado presente, le sue cause e la presenza di sali. Le osservazioni petrografiche su sezione sottile esaminano la dimensione e la distribuzione dei pori, la dimensione e la distribuzione degli aggregati, la provenienza geografica di argille e pietre, le temperatura di cottura dei mattoni. Le analisi al SEM servono soprattutto per ricerca e non sono normalmente utili.

prove di

durabilità:

le prove di gelo e disgelo e di cristallizzazione salina evidenziano le prestazioni attese e il tempo vita utile di nuovi materiali soggetti ad agenti aggressivi.

### 1.5.1.3 Prove in situ

#### Endoscopia

L'ispezione diretta è la tecnica più indicata per l'analisi della morfologia muraria. A volte può essere condotta effettuando un limitato scasso, rimuovendo cioè alcuni mattoni o blocchi di pietra e rilevando e fotografando la sezione del muro (Fig. 1.5.1.3.1).

In alcuni casi è possibile effettuare carotaggi nei punti più rappresentativi della muratura. All'interno delle perforazioni possono essere introdotti endoscopi per una visione diretta della sezione (Fig. 1.5.1.3.2). Occorre tuttavia ricordare che l'endoscopia da sola è in grado di fornire una stratigrafia della sezione e non dice come i paramenti sono eseguiti.

#### Martinetti piatti

La tecnica è stata originariamente applicata per determinare in situ i livelli di sforzo nella muratura. Successivamente il metodo è stato calibrato per rilevare le caratteristiche di deformabilità della muratura stessa. Già dalle prime applicazioni su monumenti storici (Rossi 1982), sono apparse chiaramente le notevoli potenzialità del metodo.

Si tratta di una tecnica, forse l'unica disponibile al momento, in grado di fornire informazioni attendibili sulle caratteristiche meccaniche di una muratura in termini di stato di sforzo, deformabilità e resistenza.

La prova è condotta introducendo un martinetto piatto in un taglio effettuato lungo un giunto di malta. La prova risulta in questo modo leggermente distruttiva. A fine prova lo strumento può essere facilmente rimosso e il giunto eventualmente risarcito (ASTM 1991).

Lo stato di sforzo può essere determinato grazie al rilassamento causato dal taglio perpendicolare alla superficie muraria; il rilascio, infatti, determina una parziale chiusura del taglio. La prova prosegue ponendo il martinetto piatto nell'apertura e aumentando la pressione in modo da riportare i lembi della fessura alla distanza originaria, misurata prima del taglio.

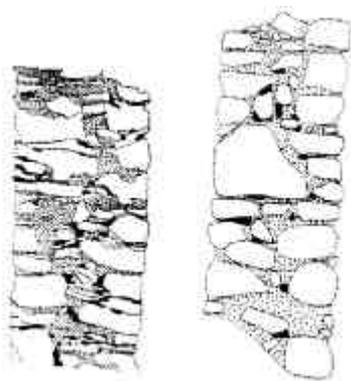


Fig. 1.5.1.3.1 - Sezioni di murature in pietra.

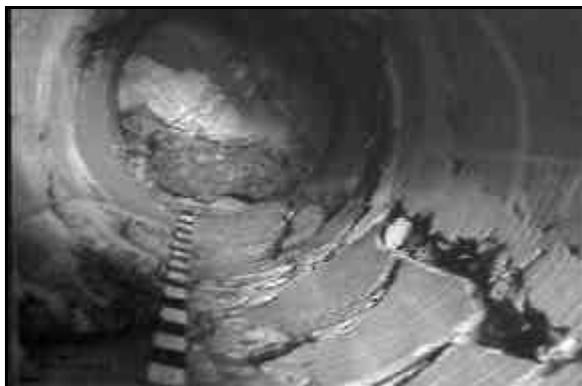


Fig. 1.5.1.3.2 – Endoscopia.

La parte interessata dall'operazione può essere strumentata con estensimetri rimovibili. In tal modo è possibile misurare con precisione gli spostamenti prodotti dal taglio e dal martinetto durante la prova.

Chiamando con  $P_f$  la pressione idraulica nel martinetto, corrispondente al pieno recupero delle deformazioni a cavallo del taglio, la relazione di equilibrio è data da:

$$S_f = K_j K_a P_f$$

dove,

$S_f$ : valore calcolato dello sforzo

$K_j$ : costante di calibrazione del martinetto (<1)

$K_a$ : costante di taglio e del martinetto (<1)

$P_f$ : pressione del martinetto piatto.

In una muratura di mattoni, il taglio può essere effettuato facilmente lungo i giunti orizzontali. Generalmente, per questa tipologia muraria, è utilizzato un martinetto rettangolare.

In altri casi, il taglio può essere fatto con un disco rotante, fornito di una lama diamantata. Il martinetto piatto avrà quindi la stessa geometria del taglio.

L'uso dei martinetti piatti su murature di pietra irregolare, non è semplice, data la difficoltà nell'individuazione di giunti continui regolari; il taglio e il successivo inserimento del martinetto, quindi, interesserà direttamente i corsi di pietra. È da sottolineare, inoltre, che nel caso di murature a più paramenti, la prova fornisce indicazioni concernenti esclusivamente gli strati più esterni.

Una richiesta fondamentale per quanto riguarda l'efficacia della prova, è l'affidabilità della misura della pressione di equilibrio.

Informazioni a riguardo poco attendibili, dovute ad esempio agli effetti di concentrazione di sforzi o di deformazioni non elastiche o nel caso di sforzi molto bassi, come frequentemente accade nel caso di edifici a 1 o 2 piani, possono compromettere se non inficiare tutta la procedura (Ronca et al. 1997), (Binda et al. 1999).

La prova può essere, inoltre, applicata per misurare la deformabilità della muratura.

In questo caso, un secondo martinetto piatto viene inserito in un taglio parallelo al precedente e distante circa 40-50 cm. I due martinetti delimitano una porzione di muratura non disturbata di dimensioni apprezzabili, su cui effettuare una vera e propria prova di compressione monoassiale.

Una apposita strumentazione posta sulla superficie, costituita da LVDT, collegati ad un PC, può fornire automaticamente la misura delle deformazioni verticali o laterali durante tutta la prova.

Il modulo elastico può essere determinato durante la prova, condotta a controllo di carico, nelle fasi di carico e scarico.

La Fig. 1.5.1.3.3 mostra l'applicazione dei martinetti piatti doppi nel caso di una muratura di mattoni con giunti normali (1÷1.5cm), alti (4 cm) e di una muratura irregolare in pietra.

Nel terzo caso, il taglio nelle pietre è stato effettuato con la speciale lama eccentrica descritta prima, data la scarsa consistenza e l'irregolarità dei giunti di malta. Il martinetto piatto utilizzato è di forma semicircolare.

È importante sottolineare come nel caso di edifici bassi (1 o 2 piani) lo svolgimento della prova sia difficile se non impossibile, a causa della mancanza di contrasto superiore, dati i bassi valori dello sforzo presente nella muratura. In questo caso può essere eseguito solo il controllo dello stato di sforzo attraverso la prova con il martinetto singolo; eventualmente la prova con i due martinetti può essere svolta con carichi molto bassi, traendo informazioni esclusivamente sui parametri elastici.

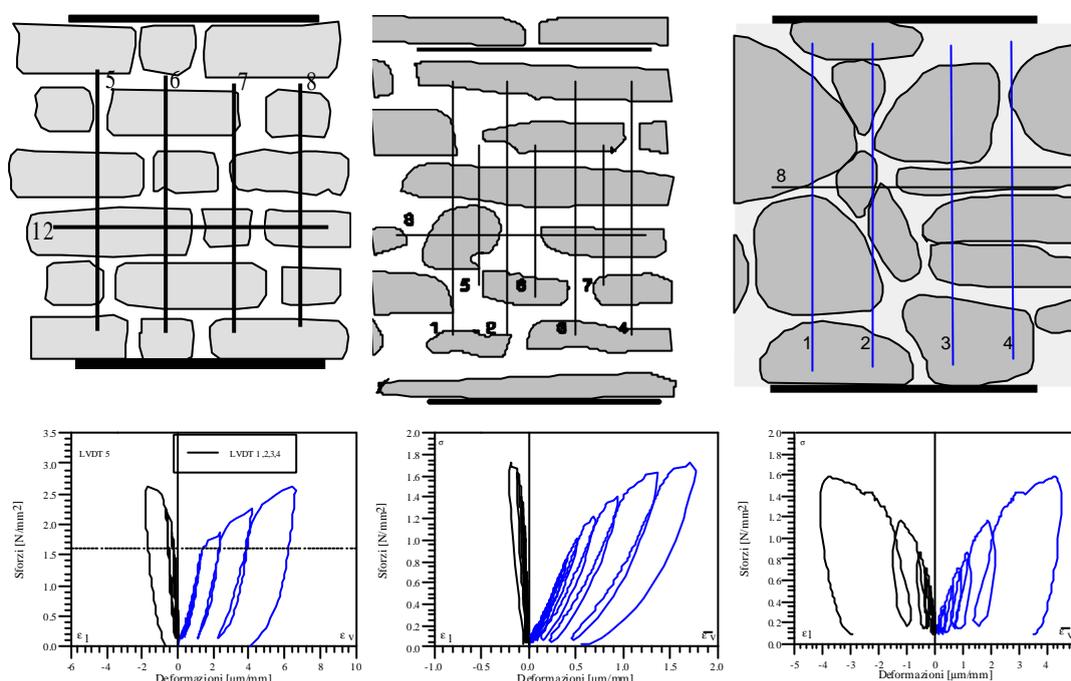


Fig. 1.5.1.3.3 - Prove con martinetti piatti doppi eseguite sul Campanile di Monza, a S. Vitale (Ravenna) e su un edificio di Castelletto (MS).

#### Durezza, penetrazione e pull-out test

In situ, oltre ai martinetti piatti possono essere utilizzate altre prove leggermente distruttive. Sostanzialmente si tratta di tecniche di penetrazione superficiale, utilizzabili facilmente come indagini preliminari. Tra queste, si possono ricordare:

- l'uso dello sclerometro a pendolo (Schmidt hammer rebound test) che verifica la qualità dei giunti di malte. I limiti della tecnica sono legati alla strumentazione disponibile, calibrata per malte di cemento e, quindi, spesso inadatta per malte di calce, caratterizzate da una minore resistenza;

- le prove di penetrazione da svolgere con differenti apparecchiature. Si basano su correlazioni tra la profondità di penetrazione di sonde e le proprietà meccaniche del materiale. In realtà la correlazione diretta con la resistenza delle malte è quasi sempre impossibile. Da qui nasce anche la difficoltà di effettuare una calibrazione adeguata delle prove;
- la prova di pull-out. Utilizzata per mattoni e pietre, è raramente impiegata per studiare giunti di malta, tranne nel caso di giunti alti.

Sono stati proposti altre prove superficiali, che spesso forniscono solo informazioni generali sulle condizioni superficiali della muratura. Tuttavia possono dare significative informazioni preliminari di tipo qualitativo sulla struttura. Costituiscono un apprezzabile sistema di controllo della qualità della muratura nuova (TC 127-MS 1998).

### Indagini soniche

Tra le tecniche non distruttive, le indagini soniche o ultrasoniche sono tra quelle più comunemente impiegate. I metodi di controllo sonici si collocano all'interno delle indagini non distruttive capaci di caratterizzare e descrivere qualitativamente la muratura.

La tecnica di indagine sonica si basa sulla generazione di impulsi sonici o ultrasonici in un punto della struttura, attraverso la percussione con appositi strumenti o con trasduttori elettrodinamici. L'elaborazione dei dati, invece, consiste nella determinazione del tempo e della velocità di attraversamento dell'impulso dato nella muratura.

Il principio generale dell'indagine sonica si basa su alcune relazioni che legano la velocità di propagazione delle onde elastiche, attraverso un mezzo materiale, alle proprietà elastiche del mezzo stesso. La velocità di propagazione delle onde elastiche è, a sua volta, direttamente correlabile alle caratteristiche meccaniche e fisiche del materiale provato, secondo la relazione:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

dove,  $\rho$  = densità del materiale

$E$  = modulo di Young

Questa relazione è valida a rigore solo per materiali elastici, omogenei ed isotropi.

Le onde elastiche sonore per indagini non distruttive (Fig. 1.5.1.3.4), sono caratterizzate da frequenze di 20-20.000 Hz generate da appositi trasduttori (ad esempio martelli strumentati) che producono vibrazioni nell'impatto con la superficie del materiale in prova. E' da ricordare che la velocità sonica è maggiore nei mezzi omogenei solidi e minima nell'aria.

La muratura presenta dei comportamenti caratteristici, rispetto alle indagini soniche, all'aumentare del livello di danneggiamento e quindi della presenza di

fessure e vuoti. In particolare, in presenza di lesioni o fratture o altri tipi di discontinuità, la velocità sonora diminuisce. Le fratture, infatti, sono caratterizzate da vuoti, dove l'onda è più lenta, e producono rifrazioni multiple del segnale cosicché il percorso si allunga e non risulta più quello diretto tra sorgente e ricevitore.

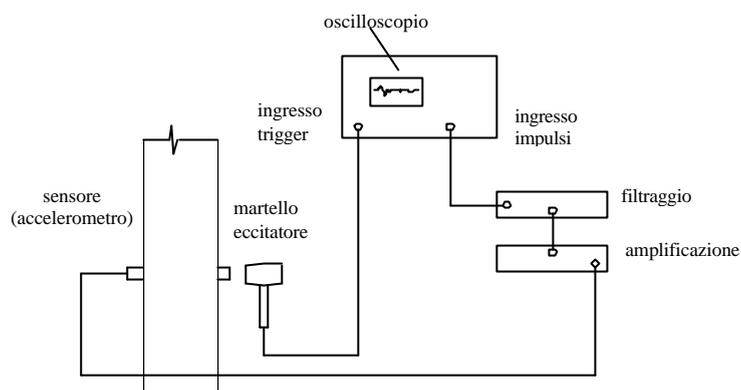


Fig. 1.5.1.3.4 - Schema dell'apparecchiatura per indagini soniche.

Le indagini soniche sono utilizzate nella diagnosi della muratura per:

- qualificare la morfologia della sezione, individuando la presenza di vuoti o difetti o lesioni;
- controllare le caratteristiche della muratura dopo interventi di consolidamento (iniezioni di malte e resine), verificando i cambiamenti delle caratteristiche fisiche dei materiali.

Le prime applicazioni delle indagini soniche alla muratura risalgono agli anni '60 (Aerojet 1967).

La difficoltà di interpretazione dei risultati, nel caso di materiali disomogenei come la muratura, è stata evidente fin dalle prime applicazioni. I risultati, infatti, devono essere considerati esclusivamente come caratteristiche qualitative e non quantitative della muratura. Recentemente sono state condotte ricerche nel tentativo di fornire altri parametri di valutazione dei dati (Abbaneo et al. 1995; Colla et al. 1997).

L'attrezzatura necessaria per condurre indagini soniche è costituita da un oscilloscopio, che analizza e registra le forme d'onda generate da un martello strumentato e rilevate da un accelerometro posizionato sul lato opposto del provino. In altri casi è stato utilizzato un di martello a pendolo; esso è costituito da una massa applicata ad un pendolo che, cadendo con un angolo costante rispetto alla verticale e dalla stessa distanza (Abbaneo et al. 1996; Suprenant et al. 1994) produce in teoria sempre lo stesso impulso. In realtà le irregolarità superficiali possono provocare delle variazioni di ampiezza dell'impulso e di contenuto in frequenza.

Gli accelerometri possono essere posti a diretto contatto con la superficie oppure, per migliorarne il contatto, si possono utilizzare piastrine di metallo di dimensioni 2,5x2,5 cm, attaccate con un particolare collante.

I dati vengono registrati e memorizzati su PC, per le successive elaborazioni.

Le misure soniche di velocità possono essere svolte secondo tre procedure:

- diretta o per trasparenza;
- di superficie;
- radiale.

Il metodo di trasmissione per trasparenza prevede la scelta dei punti di emissione e di ricezione del segnale acustico sui due lati opposti della muratura, alla stessa altezza dal suolo e in modo che la congiungente sia perpendicolare alle superfici. Nel caso fosse disponibile una sola superficie, si possono eseguire misure con punti di emissione e ricezione posti sullo stesso lato, lungo una linea retta (verticale o orizzontale).

Nel metodo di trasmissione radiale i trasduttori possono essere applicati su facce adiacenti del mezzo indagato.

La velocità sonora è influenzata da:

- frequenza di input, generata da diverse strumentazioni;
- numero di giunti attraversati. La velocità tende a diminuire con l'aumento del numero di giunti;
- presenza di fessure;
- caratteristiche del materiale superficiale. Per esempio, la presenza di intonaci o lesioni superficiali filtra le componenti in alta frequenza del segnale. Dato che la lunghezza d'onda è legata al rapporto tra velocità e frequenza, questo effetto tende ad aumentare la lunghezza d'onda e, quindi, diminuire la risoluzione della prova. Può accadere che la risoluzione non consenta che considerazioni generali sulla localizzazione di zone di bassa velocità nella muratura.

Le prove ultrasoniche mostrano limiti severi per indagini su materiali altamente porosi. Tuttavia, possono essere impiegati per caratterizzare singoli blocchi o malte poco porose.

Numerosi studi sono stati effettuati dagli autori nella difficile ricerca della correlazione tra parametri sonici e le caratteristiche meccaniche dei materiali. Tuttavia, le prove forniscono indizi significativi esclusivamente sullo stato generale della muratura.

I limiti delle indagini soniche sono legati a:

- il costo delle operazioni, dato l'elevato numero di misure richieste;
- l'elaborazione dei risultati, data la disomogeneità del materiale;
- necessità di una calibrazione dei valori per le differenti tipologie murarie.

Inoltre, i principi fondamentali della propagazione delle onde in un solido forniscono un ulteriore limite teorico alle possibilità della tecnica. La risoluzione della prova, in termini di dimensione minima del difetto riconoscibile, è legata alla lunghezza d'onda della frequenza dominante, e anche dalle dimensioni stesse dell'oggetto esaminato.

La lunghezza d'onda  $\lambda$  è legata alla velocità di trasmissione  $v$  e alla frequenza  $f$ , attraverso la semplice relazione  $\lambda = v/f$ .

Ne consegue che, per una data velocità, l'incremento della frequenza produce una diminuzione della lunghezza d'onda; ciò provoca l'aumento della risoluzione. Tuttavia, con l'aumento della frequenza, l'energia del segnale si attenua. Ne consegue, questa volta, che l'aumento della frequenza di indagine provoca anche l'aumento dell'attenuazione del segnale, diminuendo, quindi, la profondità della sezione muraria investigabile. La frequenza ottimale deve essere scelta valutando contemporaneamente le esigenze di risoluzione e l'attenuazione del segnale, legata allo spessore murario.

In generale, nel caso della muratura si possono utilizzare frequenze di input attorno ai 3.5 kHz. Gli ultrasuoni, come si è già detto, sono scarsamente penetranti nel caso della muratura, specie se disomogenea.

### ***1.5.2 Indagini atte a controllare l'efficacia di tecniche di consolidamento***

Il terremoto del 1997 in Umbria e Marche ha messo in evidenza l'importanza di un controllo preventivo dell'efficacia delle tecniche di intervento. Infatti parecchi casi di crolli avvenuti durante il terremoto hanno messo in evidenza che le tecniche di iniezione non erano sempre state utilizzate con efficacia. Pertanto per ogni tecnica sarebbe opportuno mettere a punto delle procedure di controllo.

In particolare si sono proposte indagini per il controllo di due tecniche:

#### ***a) Ristilatura profonda dei giunti***

- studio in laboratorio delle malte più adatte all'intervento. La scelta è conseguente ai risultati delle analisi eseguite sulle malte originali ed alle eventuali richieste dello strutturista;
- prova con il martinetto prima e dopo la stilatura;
- prova sonica prima e dopo la stilatura.

#### ***b) Iniezioni di miscela varie***

- prelievo di materiale all'interno della muratura e disposizione dello stesso in cilindri di plexiglas, avendo cura di imitare la disposizione originaria;
- prova in situ con il martinetto doppio su un'area campione;
- prova di iniettabilità di miscele alternative in laboratorio eseguita sui cilindri;
- scelta della miscela in base alla prova precedente;
- prova di iniezione della miscela in situ in zona campione;
- prova con martinetto doppio dopo l'iniezione;
- su più vaste aree di murature iniettate prova sonica prima e dopo l'iniezione.

Per la tecnica b) sono state suggerite prove messe a punto dagli autori nell'ambito di precedenti ricerche (Modena et al. 1997; Suprenant et al. 1994; Leafer et al. 1996; Binda et al. 1997) e lo schema di Fig. 1.5.2.1 mostra le procedure su elencate.

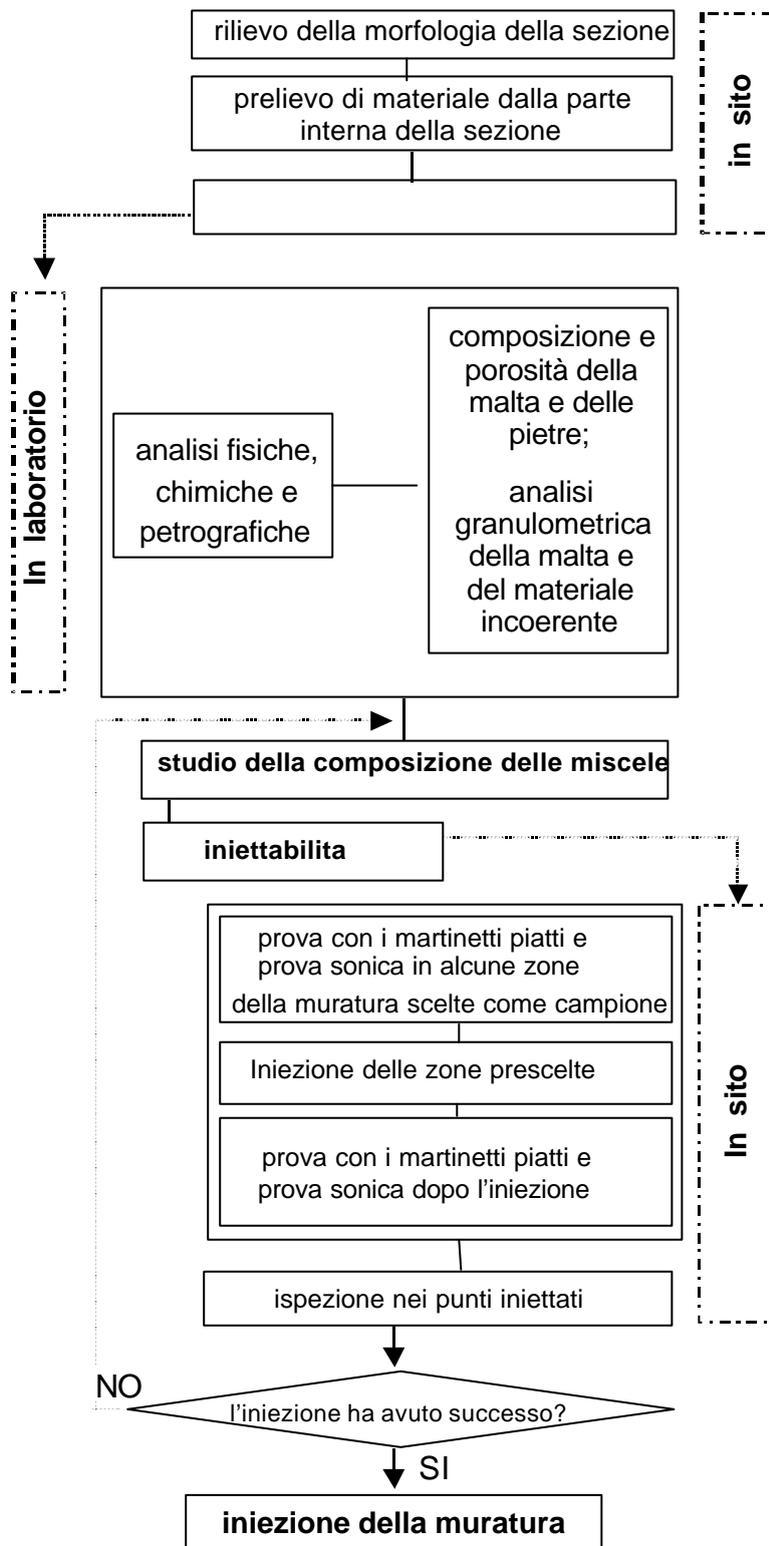


Fig. 1.5.2.1 - Procedura adottata per le prove di iniettabilità.