

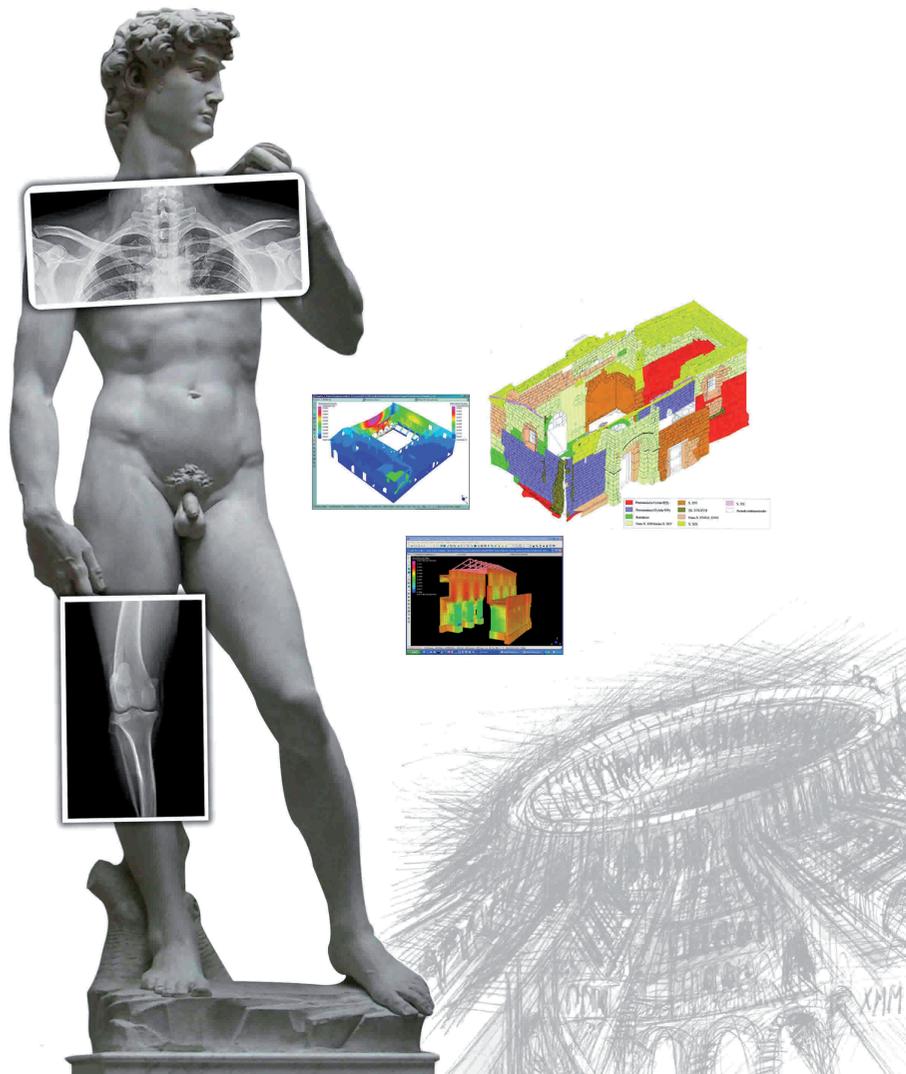


UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
DICEA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura



# INDAGINI DIAGNOSTICHE

Il primo passo per comprendere i meccanismi del costruito e le sue problematiche



## INTRODUZIONE

*La diagnostica riveste un ruolo fondamentale per un corretto intervento di recupero o di restauro. Il primo passo, e forse il più delicato, è quello di capire di cosa soffre una struttura per poter agire nel modo più corretto. Gli strumenti in possesso dei tecnici per poter affrontare un esame accurato consistono in varie prove, di cui alcune invasive (distruttive) e altre meno (non distruttive), ma tutte allo stesso modo importanti. Spetta alla bravura ed all'esperienza del tecnico decidere quali prove eseguire basandosi sullo stato del degrado, sulla tipologia costruttiva, ecc.*

*La AhRCOS® S.r.l. ha da sempre investito sulla diagnostica e sull'importanza che riveste.*

*Negli anni abbiamo acquisito mezzi tecnici e formato personale specializzato accumulando una esperienza tale da renderci tra le aziende più preparate e affidabili del settore. Ma non basta, il nostro obiettivo è divenire l'impresa di riferimento.*

*Di seguito verranno evidenziate le principali tipologie di prove presenti sul mercato e che la AhRCOS® effettua abitualmente, divise per tipologia di applicazione: prove su cls e muratura.*



## NORMATIVA

### NUOVE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI (NTC 08)

Il DM 14.01.2008 (NTC 2008) e la successiva Circolare esplicativa n. 617/2009 definiscono la misura del rilievo dei dettagli costruttivi e di prove da eseguire sugli edifici in c.a. e muratura per la determinazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali.

In tale contesto si inseriscono le Prove Distruttive e Non che non arrecando alcun danno alla struttura, o un danno limitato, consentono di migliorare il “livello di conoscenza” aumentando la stima della resistenza, la qualità e l’omogeneità del calcestruzzo, e di apparati murari, la posizione ed il diametro delle barre d’armatura, diventano fondamentali in previsione di un progetto di miglioramento o adeguamento sismico o in seguito a mutata destinazione d’uso.

### RICHIAMI DELLE NTC08 E DELLA CIRCOLARE N. 617

Le Norme Tecniche per le Costruzioni, emanate con D.M. 14/01/08, e la relativa Circolare n. 617 del 02/02/09 danno indicazioni utili per la progettazione del piano di prove strutturali da eseguire. Il D.M. 14/01/08 specifica che *“Il rilievo deve individuare l’organismo resistente della costruzione, tenendo anche presente la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costitutivi”* e che *“Per conseguire un’adeguata conoscenza delle caratteristiche dei materiali e del loro degrado, ci si baserà su documentazione già disponibile, su verifiche visive in situ e su indagini sperimentali. Le indagini dovranno essere motivate, per tipo e quantità, dal loro effettivo uso nelle verifiche; nel caso di beni culturali e nel recupero di centri storici, dovrà esserne considerato l’impatto in termini di conservazione del bene”*.

Per le strutture in cemento armato, la Circolare n. 617 prevede che, indipendentemente dal livello di conoscenza che si vuole raggiungere, si possano effettuare prove sui materiali mediante verifiche limitate, estese o esaustive.

Tipicamente è possibile effettuare la valutazione della sicurezza globale basandosi su verifiche limitate (1 provino di cls per 300 mq di piano dell’edificio, 1 campione di armatura per piano dell’edificio; per verifiche esaustive i provini di cls da estrarre sono 3 così come i campioni di armatura).

In taluni casi (ad esempio nel caso di strutture con elevato numero di piani oppure nel caso di strutture giuntate costituite da corpi di fabbrica realizzati in tempi diversi), è possibile:

- a) ridurre ulteriormente il numero di carote di calcestruzzo sfruttando quanto suggerito dalla Circolare n. 617 per cui *“Ai fini delle prove sui materiali è consentito sostituire alcune prove distruttive, non più del 50%, con un più ampio numero, almeno il triplo, di prove non distruttive, singole o combinate, tarate su quelle distruttive”*;
- b) valutare la possibilità di ridurre il numero dei prelievi di campioni di armatura, in considerazione della delicatezza e della laboriosità dell’estrazione e del successivo ripristino; ciò è tipicamente possibile quando è nota con buona approssimazione l’epoca di costruzione e quindi la relativa classe dell’acciaio utilizzato come barre di armatura.

Per le strutture in muratura, come si evince dalla Tabella C8A.1.1 della Circolare n. 617, nel caso in cui si voglia raggiungere un livello di conoscenza LC2, è possibile limitare al minimo le prove distruttive e debolmente distruttive, una volta che si è identificata con accettabile certezza il tipo di muratura in esame, in modo da poter effettuare l’analisi e le verifiche utilizzando i valori medi di resistenza e modulo elastico relativo alla corrispondente muratura in Tabella C8A.2.1. Se, a valle di preliminari saggi visivi, la muratura presenta una tessitura molto irregolare, è necessario valutare la possibilità di realizzare idonee superfici di taglio, nel caso di esecuzione di martinetti piatti. Se il progettista ritiene che tali condizioni sussistano, l’esecuzione delle prove va comunque subordinata alla selezione del livello di conoscenza che si mira ad ottenere.

| Livello di Conoscenza | Geometria   | Dettagli costruttivi                  | Proprietà dei materiali  | Metodi di analisi | FC   |
|-----------------------|---|---------------------------------------|--|-------------------|------|
| LC1                   | Rilievo muratura, volte, solai, scale. Individuazione carichi gravanti su ogni elemento di parete Individuazione tipologia fondazioni. Rilievo eventuale quadro fessurativo e deformativo | verifiche in situ limitate            | Indagini in situ limitate<br>Resistenza: valore minimo di Tabella C8A.2.1<br>Modulo elastico: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1   | Tutti             | 1.35 |
| LC2                   |   | verifiche in situ limitate            | Indagini in situ estese<br>Resistenza: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1<br>Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1   |                   | 1.20 |
| LC3                   |   | verifiche in situ estese ed esaustive | Indagini in situ esaustive<br>- caso a) (disponibili 3 o più valori sperimentali di resistenza)<br>Resistenza: media dei risultati delle prove<br>Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1<br>- caso b) (disponibili 2 valori sperimentali di resistenza)<br>Resistenza: se valore medio sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, valore medio dell'intervallo di Tabella C8A.2.1;<br>se valore medio sperimentale maggiore di estremo superiore intervallo, quest'ultimo;<br>se valore medio sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore medio sperimentale.<br>Modulo elastico: come LC3 – caso a).<br>- caso c) (disponibile 1 valore sperimentale di resistenza)<br>Resistenza: se valore sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, oppure superiore, valore medio dell'intervallo;<br>se valore sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore sperimentale.<br>Modulo elastico: come LC3 – caso a). |                   | 1.00 |

**Tabella C8A.1.1** - Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti valori dei fattori di confidenza per edifici in muratura.

| Tipologia di muratura   | $f_m$<br>(N/cm <sup>2</sup> ) | $\tau_0$<br>(N/cm <sup>2</sup> ) | E<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | G<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | w<br>(kN/m <sup>3</sup> ) |
|---|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|   | Min-max                       | Min-max                          | Min-max                   | Min-max                   |                           |
| Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)                  | 100<br>180                    | 2,0<br>3,2                       | 690<br>1050               | 230<br>350                | 19                        |
| Muratura a conci sbazzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno              | 200<br>300                    | 3,5<br>5,1                       | 1020<br>1440              | 340<br>480                | 20                        |
| Muratura in pietre a spacco con buona tessitura   | 260<br>380                    | 5,6<br>7,4                       | 1500<br>1980              | 500<br>660                | 21                        |
| Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)                                 | 140<br>240                    | 2,8<br>4,2                       | 900<br>1260               | 300<br>420                | 16                        |
| Muratura a blocchi lapidei squadriati   | 600<br>800                    | 9,0<br>12,0                      | 2400<br>3200              | 780<br>940                | 22                        |
| Muratura in mattoni pieni e malta di calce  | 240<br>400                    | 6,0<br>9,2                       | 1200<br>1800              | 400<br>600                | 18                        |
| Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤ 40%)         | 500<br>800                    | 24<br>32                         | 3500<br>5600              | 875<br>1400               | 15                        |
| Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)                               | 400<br>600                    | 30,0<br>40,0                     | 3600<br>5400              | 1080<br>1620              | 12                        |
| Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%) | 300<br>400                    | 10,0<br>13,0                     | 2700<br>3600              | 810<br>1080               | 11                        |
| Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)        | 150<br>200                    | 9,5<br>12,5                      | 1200<br>1600              | 300<br>400                | 12                        |
| Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)                              | 300<br>440                    | 18,0<br>24,0                     | 2400<br>3520              | 600<br>880                | 14                        |

**Tabella C8A.2.1** - Valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura, riferiti alle seguenti condizioni: malta di caratteristiche scarse, assenza di ricorsi (listature), paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata, tessitura (nel caso di elementi regolari) a regola d'arte;

$f_m$  = resistenza media a compressione della muratura;

$\tau_0$  = resistenza media a taglio della muratura,  
E = valore medio del modulo di elasticità normale;

G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale;

w = peso specifico medio della muratura

## PROVE PER STRUTTURE IN CLS ARMATO

### LE PROVE NON DISTRUTTIVE

Le Prove non Distruttive (PnD) sono il complesso di esami, prove e rilievi condotti impiegando metodi che non alterano il materiale e non richiedono la distruzione o l'asportazione di campioni dalla struttura in esame e quindi non ne pregiudicano la futura utilizzabilità. AhRCOS® ripone grandi aspettative in questa tipologia di prove, dato che la loro poca invasività si sposa perfettamente con il concetto del minor impatto possibile sul costruito.

### PROVE PACOMETRICHE

Consistono nella misura del campo magnetico determinato dalla presenza di armature di acciaio in vicinanza della superficie del calcestruzzo degli elementi strutturali (travi, pilastri, setti).

Tali prove consentono di "proiettare" sulla superficie di calcestruzzo, la posizione delle armature, così da consentire una stima della misura dell'interfero e del copriferro delle armature longitudinali e del passo delle staffe inoltre l'apparecchio fornisce il relativo diametro delle armature.

La prova pacometrica consente anche di individuare le zone dell'elemento prive di armatura nelle quali eseguire le indagini finalizzate alla conoscenza delle caratteristiche del calcestruzzo, quali, ad esempio, il prelievo di carote, le prove sclerometriche e quelle ultrasoniche.



Ne consegue che l'indagine pacometrica deve essere preliminare a qualsiasi altro tipo di indagine, distruttiva e non, condotta su elementi in cemento armato. Negli anni la Restauri Innovativi Tecnologici® ha utilizzato con successo tale tipologia di indagini, soprattutto in strutture complesse dove la posizione delle armature non era sempre certa.

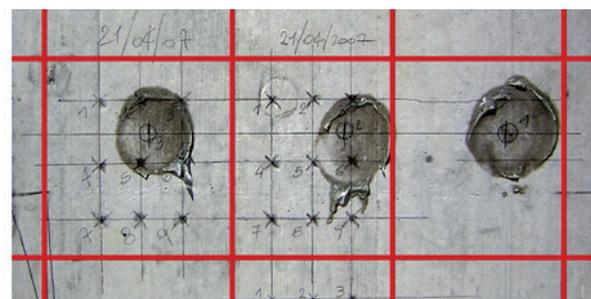
### PROVE SCLEROMETRICHE

Sono finalizzate alla determinazione della resistenza del calcestruzzo tramite misura della durezza superficiale, mediante valutazione del rimbalzo di una sfera metallica contenuta in apposito cilindro cavo.

Sono le prove più comunemente utilizzate, sebbene i valori che restituiscono, se non abbinati alle prove ultrasoniche (**metodo combinato SonReb**) e a opportune



correlazioni con risultati di schiacciamenti diretti su carote, risultano, spesso, essere meno significativi. Su ogni faccia delle superfici di calcestruzzo indagate vanno eseguite almeno n°9 misurazioni (o battute) non sovrapposte (generalmente se ne eseguono 10) e distanti non meno di 25 mm tra loro o dal bordo di eventuali difetti superficiali presenti e da ferri d'armatura, preventivamente localizzati. Il risultato della prova è fornito in termini di indice di rimbalzo medio IR ed è riportato per ogni punto di indagine.



Se, per ciascun punto, oltre il 20% di tutte le misure si discosta dalla media per più di 6 unità, deve essere scartata l'intera serie di misure.

L'indice di rimbalzo dovrà essere valutato eseguendo la misura con lo sclerometro in posizione orizzontale, qualora ciò non sia possibile, al fine di determinare l'equivalente indice di rimbalzo misurato in orizzontale, si deve far ricorso alle curve di ragguglio indicate dalla casa costruttrice dello strumento.

Si evidenzia, inoltre, che in presenza di calcestruzzi molto carbonatati la durezza superficiale può risultare più alta di quella comunemente misurata e, pertanto, è opportuno ridurre il valore di riferimento medio dell'indice di rimbalzo IR, tramite un opportuno coefficiente correttivo.

Un'indicazione dei valori entro cui è compreso il coefficiente può essere:

- 0.95 (per profondità di carbonatazione comprese tra i 50 e 60mm)
- 0.90 (per profondità maggiori o uguali ai 60 mm),

salvo casi particolari in cui l'indice di rimbalzo perde addirittura di significatività.

La funzionalità dello sclerometro va periodicamente verificata e calibrata (quando lo strumento non consente la calibrazione e risulta starato va sostituito) eseguendo le misure su un'apposita massa detta incudine di taratura.

AhRCOS® possiede le capacità tecniche e gli adeguati strumenti per compiere correttamente tutte le verifiche sulla strumentazione.



## PROVE ULTRASONICHE, METODO COMBINATO SONREB

### Descrizione del metodo

Le prove non distruttive con ultrasuoni (US) si basano sulla propagazione di onde elastiche all'interno del materiale. In questo modo è possibile avere una stima delle caratteristiche meccaniche della struttura da indagare poiché la velocità di propagazione delle onde in un materiale dipende dalla sua densità, dal modulo elastico e dal coefficiente di Poisson.

Con l'applicazione di questa tecnica si possono ottenere informazioni sulle caratteristiche elasto-meccaniche del mezzo, ossia: il livello di omogeneità del materiale, la sua qualità ed eventuale grado di deterioramento, l'individuazione di "anomalie" quali vuoti o inclusioni. Questa metodologia di indagine è particolarmente utile per monitorare le strutture, l'efficacia nel tempo di interventi di risanamento e il miglioramento delle caratteristiche meccaniche del mezzo.

Lo strumento utilizzato per le misure ultrasoniche è il PUNDIT (Portable Ultrasonic Not-Distrctive Digital indicatine Tester). Tale strumento è dotato di un trasduttore trasmittente (che trasmette l'impulso ultrasonico al materiale oggetto di studio), e di uno ricevente (che capta l'impulso ultrasonico che ha attraversato il mezzo, trasformandolo in segnale elettrico).

Il servizio di indagine strutturale prevede l'eventuale applicazione di tre tecniche d'acquisizione dei dati: trasmissione diretta, semi-diretta, ed indiretta.

## DETERMINAZIONI POSSIBILI

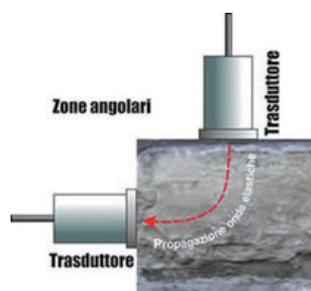
### La trasmissione diretta

La trasmissione diretta consiste nell'esaminare l'elemento strutturale in tutto il suo spessore: i trasduttori sono posti sulle due superfici opposte dell'elemento. Con il rilievo ultrasonico si misura il tempo di propagazione del fascio d'onde e misurata la distanza tra i due trasduttori (ossia lo spessore del mezzo indagato) i dati acquisiti ci permettono di calcolare la velocità effettiva delle onde nel mezzo investigato con la successiva caratterizzazione fisico-meccanica del materiale.



### La trasmissione semi-diretta

La trasmissione è semi-diretta quando i trasduttori si posizionano, nel materiale da investigare, su due superfici adiacenti che formano tra loro un certo angolo  $\alpha$ . Questa tecnica è utilizzata per determinare lo stato di conservazione di particolari elementi strutturali del manufatto oggetto di studio. Il procedimento è lo stesso della trasmissione diretta.

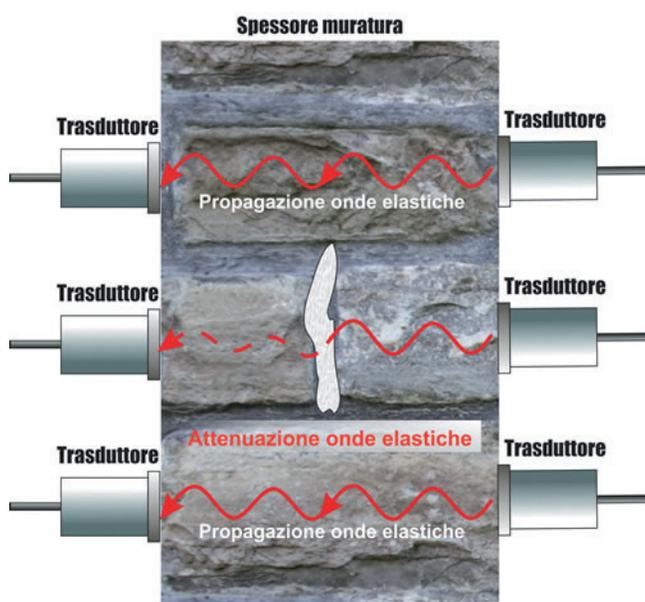


### La trasmissione indiretta

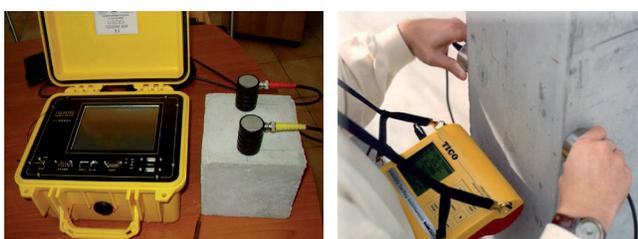
La trasmissione è indiretta quando i trasduttori si posizionano sullo stesso piano d'appoggio. La trasmissione indiretta è utilizzata per ottenere delle informazioni sullo stato di conservazione degli strati più superficiali del manufatto.



Determinazione, mediante trasmissione diretta, della presenza di difetti strutturali.



Mediante il rilievo in trasmissione diretta, riusciamo a determinare con buona approssimazione, la presenza di eventuali difetti strutturali, localizzandone la posizione.



L'eventuale presenza di difetti produrrà un ritardo dei tempi di propagazione dei segnali ultrasonici nel mezzo materiale. Quindi confrontando i tempi, e ricavando le velocità relative ai vari percorsi, possiamo identificare in modo preciso le varie zone di debolezza. Questa tipologia di indagine è particolarmente complessa poiché se eseguita da tecnici poco esperti può dare risultati scarsamente significativi; la *AhRCOS*<sup>®</sup> in anni di prove e sperimentazioni si è attestata ad un livello qualitativo elevatissimo, arrivando a conseguire risultati eccellenti in ogni sua indagine.

Il metodo (SONREB) si basa sulla combinazione dei risultati ottenuti, nelle stesse zone di prova, con prove sclerometriche ed ultrasoniche, correlando l'indice di rimbalzo (REBound) con la velocità delle onde ultrasoniche (SONic), con la resistenza a compressione del calcestruzzo, attraverso una opportuna correlazione della relazione che lega queste tre grandezze, effettuata mediante regressione statistica dei valori sperimentali.

La validità del metodo SONREB deriva dalla compensazione delle imprecisioni dei due metodi non distruttivi utilizzati. Infatti, si è notato che il contenuto di umidità fa sottostimare l'indice sclerometrico e sovrastimare la velocità ultrasonica, e che, all'aumentare dell'età del calcestruzzo, l'indice sclerometrico aumenta mentre la velocità ultrasonica diminuisce. La correlazione tra la resistenza e l'indice di rimbalzo e la velocità ultrasonica si esprime, generalmente, mediante la seguente formula:

$$R_c = \alpha \cdot IR^\beta \cdot V^\gamma$$

dove:

$R_c$  è la resistenza stimata associata al punto indagato;  
 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sono i coefficienti che consentono di correlare al meglio i dati sperimentali diretti;

$V$  è la velocità ultrasonica;

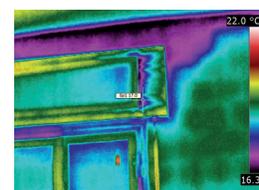
$IR$  è l'indice di rimbalzo

Eseguendo delle prove di compressione su campioni prelevati negli stessi punti in cui sono state eseguite le prove non distruttive, si determinano i valori da assegnare ai tre coefficienti, così da poter utilizzare la formula sopra detta in tutti gli altri punti in cui non si eseguono indagini distruttive.

### INDAGINI TERMOGRAFICHE

L'indagine termografica, basata sull'acquisizione dei dati termici con attrezzature sensibili ai raggi infrarossi, e sull'analisi, la valutazione e l'interpretazione dei risultati eseguita da personale specializzato, permette di trovare le cause di numerose tipologie di problemi con un notevole risparmio di tempo e denaro.

La *AhRCOS*<sup>®</sup> s.r.l. effettua prove termografiche con operatore specializzato per valutazioni dello stato conservativo dei materiali utilizzati soprattutto nel



campo dell'edilizia. Attraverso prove ed indagini termica - tecnica non intrusiva né distruttiva - siamo infatti in grado, con gli strumenti in nostra dotazione, di diagnosticare e definire patologie e livello di degrado strutturale di impianti, opere architettoniche e strutture edilizie.

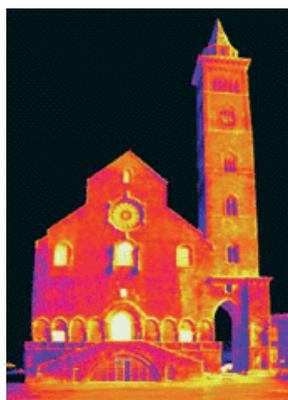
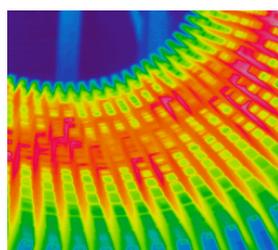
Il principio dell'indagine termografica all'infrarosso effettuata con l'utilizzo di termocamere, si basa sulla misura della distribuzione



delle temperature superficiali di un determinato corpo sottoposto a sollecitazione termica.

La termocamera rileva dunque le temperature del corpo analizzato attraverso la misurazione dell'intensità di radiazione infrarossa emessa dal corpo in esame. Per effetto dei differenti valori di questi parametri, specifici per ciascun materiale, i diversi componenti di un manufatto, quale una muratura, assumeranno differenti temperature sotto l'azione di sollecitazioni termiche.

Tale caratteristica è sfruttata dalla termografia per visualizzare, con appositi sistemi, i differenti comportamenti termici dei materiali.



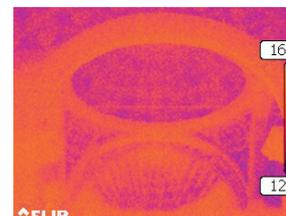
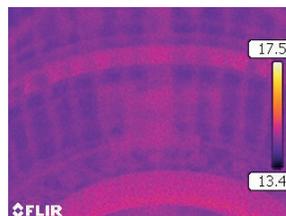
Le indagini termografiche vengono utilizzate con successo sia per le strutture in c.c.a. che per quelle in muratura, comprese volte, archi, ecc.

I principali campi di applicazione della termografia nell'edilizia sono:

- Certificazione Energetica degli edifici.
- Verifica dello stato delle strutture, della trama muraria, delle impermeabilizzazioni e delle coibentazioni.
- Verifica dello stato di intonaci, rivestimenti ed elementi architettonici delle facciate e del loro possibile distacco.
- La precisa individuazione di perdite d'acqua anche se internamente a strutture murarie.
- L'individuazione di filtrazioni ancora non visibili, fornendo dati sulla provenienza e sulla propagazione.

- Il rilevamento dell'umidità nelle murature e la sua provenienza.
- L'individuazione di tubazioni di acqua calda e fredda all'interno di muri, nei solai e sotto terra.

La limitazione di queste indagini è di non poter dare significative informazioni per pareti molto spesse, rimanendo molto attendibile per lo strato superficiale.



## LE PROVE DISTRUTTIVE

Come detto, le indagini non distruttive, spesso, necessitano di particolari "tarature" (sfruttando risultati ottenuti da prove distruttive) al fine di pervenire ad una conoscenza delle caratteristiche reali dei materiali.

### PROVE DI COMPRESSIONE SU CAROTE DI CLS

Consistono nell'estrazione di campioni di calcestruzzo (carote) direttamente dalla struttura, nella preparazione del provino per la prova di compressione (rettifica facce, cappatura) e nello schiacciamento a compressione dello stesso, da parte di un Laboratorio autorizzato dal Ministero dei lavori Pubblici, per la determinazione della resistenza a compressione ( $R_c$ ). La *AhRCOS*® oltre a possedere tecnici e mezzi adeguati per tale tipologia di prove, collabora da anni con laboratori autorizzati, raggiungendo con loro un iter procedurale "snello" che consente di portare a termine tale campagna di prove nel minor tempo possibile. Nel caso in cui le prove distruttive sono integrate con prove non distruttive tipo SONREB, queste ultime in numero superiore al fine di ottenere un quadro più ampio dello stato del calcestruzzo della struttura, sarà opportuno eseguire i carotaggi in corrispondenza dei punti in cui sono state eseguite alcune delle prove sclerometriche ed ultrasoniche, al fine di ricavare le corrette correlazioni con i risultati delle indagini non distruttive. Le operazioni di prelievo devono scongiurare l'inclusione di armature metalliche nelle carote. Il diametro delle carote, come indicato dalle norme



UNI, deve essere almeno pari a tre volte il diametro massimo dell'inerte presente nel calcestruzzo. Quando il campione ha un rapporto altezza/diametro pari a due, è possibile passare dalla resistenza cilindrica ( $f_c$ ) che scaturisce dalla prova di compressione alla resistenza cubica ( $R_c$ ) utilizzando la seguente relazione riportata in molte normative:

$$R_c = \frac{f_c}{0,83}$$

Nel corso delle operazioni di prelievo delle carote è opportuno misurare anche la **profondità di carbonatazione** del calcestruzzo, così da valutare il potenziale grado di protezione alla corrosione delle barre di armatura. La misura della profondità di carbonatazione è regolata dalla norma **UNI 9944:92**. Essa avviene osservando il viraggio di una soluzione di fenoftaleina, che, in ambiente basico, ovvero in assenza di carbonatazione, si colora di rosso - violetto. Pertanto, spruzzando sulla superficie cilindrica del campione, immediatamente dopo l'estrazione, una soluzione di fenoftaleina all'1% in alcol etilico, è osservabile il calcestruzzo carbonatato come quella parte che non mostra una colorazione rosso-violetto. La profondità di carbonatazione andrà misurata con la precisione del millimetro.



## PROVE DI TRAZIONE SU BARRE D'ACCIAIO

Si tratta della classica prova di trazione su barre d'armatura, così come regolata dalle NTC 2008 e dalla norma **UNI EN 10002/1**. Contrariamente al calcestruzzo, l'acciaio, essendo un prodotto industrializzato, possiede un'elevata stabilità di comportamento e le sue caratteristiche, all'epoca della realizzazione della struttura, sono accertate già presso lo stabilimento di produzione. Pertanto, soprattutto per le strutture recenti, quando ne è nota la provenienza e si dispone delle certificazioni, potrebbe risultare superfluo eseguire prelievi di barre d'armatura. In ogni caso appare opportuno limitarne il numero, data la notevole invasività dell'operazione e, per quanto detto, l'usuale buona costanza di caratteristiche dell'acciaio.

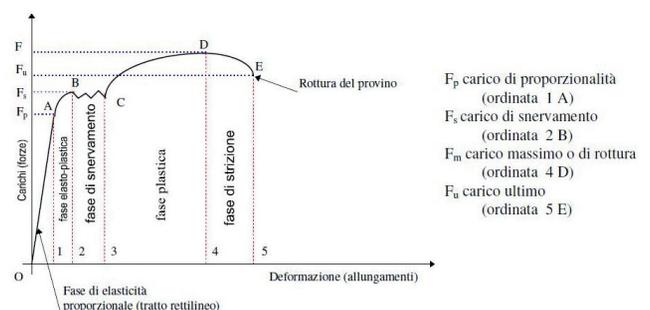
Lo spezzone di barra da prelevare deve avere una lunghezza pari a circa 450 mm, per poter essere sottoposto alla prova di rottura per trazione in conformità alla norma **UNI EN 10002/1**.

È importante che il prelievo venga effettuato su elementi poco sollecitati, e dunque preferibilmente nei sottotetti o nell'ultimo piano, ovviamente laddove si abbia la certezza che il tipo di acciaio sia lo stesso in tutta la struttura.



È inoltre preferibile che la barra, se prelevata da un pilastro, non sia una barra d'angolo, essendo la sua funzione strutturale sicuramente più importante di quella delle eventuali barre intermedie. Analogamente, se si opera su una trave, sarà opportuno prelevare da barre non sollecitate a trazione.

Particolare cura dovrà essere posta nel ripristino della capacità resistente originaria dell'elemento strutturale, verificando la saldabilità delle barre in opera, adottando l'opportuno tipo di elettrodo ed effettuando la saldatura tra il nuovo spezzone e la barra esistente con cordoni d'angolo di adeguata lunghezza, in ogni caso non mediante saldatura di testa.



# PROVE PER STRUTTURE IN MURATURA

## PROVE NON DISTRUTTIVE

### **PROVE DI RILIEVO CON ONDE ULTRASONICHE SU LATERIZI E BLOCCHI LAPIDEI**

Si tratta di un esame di indagine non distruttivo al fine di individuare nei materiali anomalie, fessure, porosità, cavità e rilevare la presenza di discontinuità all'interno dei materiali esaminati, con applicazione codificata da norme UNI per gli acciai e nel calcestruzzo (l'esame è perfettamente utilizzabile per indagare materiali lapidei, malte, legno, muratura, ecc) L'esame ultrasonico non si limita a segnalare l'eventuale presenza di discontinuità ma è in grado di fornire:

1. Grado di omogeneità
2. La presenza di vuoti, fessure od altre imperfezioni
3. Entità della discontinuità
4. Localizzazione di zone alterate prima che le modificazioni della materia siano visibili ad occhio nudo
5. Variazioni delle proprietà dei materiali nel tempo
6. Il valore del modulo elastico dinamico del materiale
7. Resistenza del materiale

Nel caso della muratura deve essere comunque limitato ai singoli materiali che la compongono, cioè: laterizi, malte, pietre. Il principio fisico di funzionamento è secondo vibrazioni meccaniche (elastiche) il cui campo di frequenza si estende da valori superiori a 20 kHz sino a 1000 MHz, non sono udibili.

Le tipologie di indagine possono essere suddivise in: indagine a riflessione (metodo che impiega una sola sonda e che opera sia come sorgente di emissione dell'impulso ultrasonico, che da ricevitore del segnale), a trasmissione (metodo che impiega due sonde di cui una costituisce la sorgente di emissione dell'impulso ultrasonico l'altra riceve il segnale) o a trasmissione diretta (metodo che prevede che le sonde siano applicate sull'oggetto da indagare, in due punti speculari tra loro su facce opposte).

## INDAGINI DEBOLMENTE DISTRUTTIVE

### **INDAGINI VISIVE DELLE CONNESSIONI MURARIE**

Si tratta di un esame visivo della superficie muraria, condotto dopo la rimozione di una zona di intonaco di

circa 1m x 1m. È da eseguirsi, preferibilmente, in corrispondenza delle connessioni tra strutture murarie principali, al fine di verificare tecnologie costruttive tessiture e tipologie di materiali, dettagli costruttivi, informazioni qualitative sullo stato di conservazione e sulla presenza di difetti costruttivi.

Sono fondamentali se si vuole limitare al massimo gli interventi distruttivi o semidistruttivi o raggiungere i livelli di conoscenza minimi richiesti.



### **INDAGINI ENDOSCOPICHE**

L'indagine endoscopica consente l'ispezione visiva diretta di cavità, o parti altrimenti inaccessibili della muratura, all'interno dello spessore murario. Mediante l'inserimento di una piccola sonda endoscopica in fori di almeno 20 mm di diametro si può studiare la superficie del foro per cercare di ricostruire la stratigrafia muraria, inclusa la tipologia di materiali presenti e la presenza di larghi vuoti. I risultati del controllo visivo possono essere registrati mediante un sistema di ripresa video, su file immagine o video.

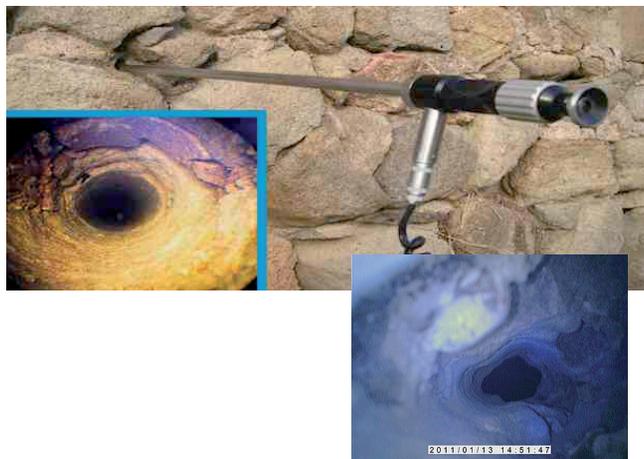
L'esecuzione prevede l'utilizzo di apparecchiature flessibili o rigide, articolate o non, con illuminazione a luce calda o a fibre ottiche.



A seconda del tipo di apparecchiatura può cambiare la profondità massima di ispezione, il diametro minimo del foro d'ispezione (a seconda dello spessore della sonda) ed il diametro massimo (fori più grandi richiedono fonti di illuminazione più potenti per dare immagini con buona risoluzione e visibilità). Anche il campo di visione della sonda, rispetto alla visione diretta in avanti, può essere variabile.

Durante l'esecuzione delle indagini endoscopiche, è utile adottare dei riferimenti metrici che indichino la posizione lungo la profondità del foro, sia per le annotazioni effettuate in corso di esecuzione della prova, sia per eventuali osservazioni che avvengano in un secondo momento, in seguito a visione delle immagini salvate durante l'indagine.

L'impresa ritiene questa una delle prove fondamentali da eseguire prima di qualsiasi intervento, infatti tale indagine si pone alla base di qualsiasi intervento ben riuscito.



## INDAGINI STRATIGRAFICHE

Per determinare la storia costruttiva di un edificio è necessario, prima di tutto, individuare l'*esito materiale di ogni singola azione costruttiva omogenea* o Unità Stratigrafica (US). Il tipo di unità più frequente è, ovviamente, quella muraria (USM), "cioè una struttura caratterizzata da un'unica volontà costruttiva, realizzata in massima parte con il medesimo materiale o con gli stessi strumenti, adibita ad una funzione specifica". Oltre alle Unità Stratigrafiche positive (di volume) esistono poi quelle negative (di superficie) come, ad esempio, il taglio praticato nella muratura per aprire una nuova finestra. I danni del complesso architettonico come i crolli (distacchi del paramento murario) e le lesioni - causati da difetti di progettazione, fenomeni di invecchiamento o eventi di carattere straordinario (es.: eventi sismici, alluvioni, nubifragi, fulmini) - possono essere considerati US negative. Esistono infine US positive particolari, cioè le superfici che delimitano le aperture, i fori e i vani. Queste superfici possono essere riempite pur non essendo unità negative (es.: quando una finestra viene tamponata). La registrazione delle evidenze stratigrafiche operata sulle strutture edilizie prevede, come prima fase del lavoro, una completa *restituzione di tipo fotografico* dei paramenti e delle sezioni murarie. Sulle basi fotografiche, usate al posto dei tradizionali grafici realizzati a diretto contatto con la muratura, si disegnano i perimetri di US (visibili sul manufatto come una

variazione dei caratteri murari o una vera e propria discontinuità fisico-strutturale) e i *simboli* relativi ai rapporti stratigrafici riconosciuti durante le osservazioni dirette (*copre, si appoggia, taglia, riempie e si lega*). Al confine tra due unità stratigrafiche murarie si riscontrano le variazioni dei seguenti caratteri:

1. materiali degli elementi rigidi (litici o laterizi) e delle malte;
2. tecniche di produzione dei materiali da costruzione;
3. dimensioni degli elementi rigidi e dei componenti delle malte;
4. forme e tecniche di esecuzione dei paramenti.

La ricerca del perimetro si svolge, pertanto, seguendo la continuità della superficie e, contestualmente, individuando la discontinuità che la delimita. Una variazione di questi caratteri non indica sempre il confine tra murature di età differenti ma può essere una particolarità della tecnica impiegata oppure può dipendere da una fornitura di materiale eterogeneo. Per questo motivo la conoscenza delle modalità costruttive diffuse nei diversi periodi storici e nelle varie aree culturali può incrementare la precisione e la velocità del tecnico impegnato nell'analisi delle evidenze stratigrafiche.

È opportuno ricordare come la possibilità di realizzare una restituzione fotografica ad altissima definizione dei paramenti murari stia modificando la strategia operativa sul campo. Quando sono disponibili foto ad altissima definizione la lettura stratigrafica può avvenire principalmente al monitor e la necessaria verifica autoptica (a diretto contatto con le murature) si opera soltanto per i punti veramente necessari - ovvero per i punti che devono essere analizzati a distanza molto ravvicinata - o per effettuare il prelievo di campioni di materiale da analizzare.

Il manufatto architettonico è però un volume e i caratteri che vengono individuati nel corso delle analisi (informazioni stratigrafiche, metriche e formali) si distribuiscono nelle tre dimensioni. Adottare pertanto le sole restituzioni fotografiche bidimensionali delle superfici murarie (es.: il fotopiano, il fotomosaico) significa perdere informazioni sulla componente tridimensionale delle evidenze stratigrafiche. Per ottenere una registrazione grafica dello svolgimento geometrico dei perimetri di US nello spazio tridimensionale è possibile utilizzare la tecnica di rilievo fotogrammetrico stereoscopico. Il rilievo tridimensionale di tutte le superfici visibili (paramento interno, esterno e - quando possibile - della sezione muraria) offre inoltre

il vantaggio di elaborare assonometrie utili alla comprensione del processo di posa in opera degli elementi costruttivi. Le rappresentazioni tridimensionali si possono utilizzare anche per valutare l'efficacia meccanica della struttura muraria e di conseguenza tentare una stima della sapienza tecnica dei costruttori.

Affinché la documentazione archeologica possa essere utilizzata per indirizzare gli interventi di restauro o consolidamento dell'edificio in esame, è necessario analizzare lo stato di conservazione delle strutture murarie operando la registrazione grafica dei perimetri delle lesioni, degli spancamenti e dei crolli (distacchi del paramento).

I rilievi stratigrafici realizzati sul campo si rivedono e correggono in laboratorio durante la loro redazione in forma digitale. Il modello schematico della struttura architettonica con resa fotografica della superficie muraria e sovrapposizione dei perimetri di US può rendere più efficace la comunicazione dei risultati dell'analisi. Sfruttando i punti per il raddrizzamento delle prese fotografiche si possono "appoggiare" sulle superfici del modello architettonico i rilievi stratigrafici e i due fotomosaici relativi al paramento esterno ed interno della struttura muraria.

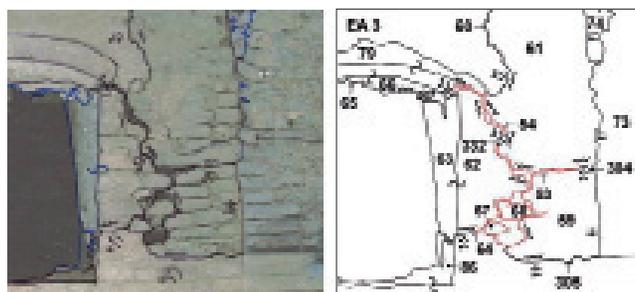


All'individuazione dei contorni delle Unità Stratigrafiche si accompagna la registrazione, in apposite schede alfanumeriche, delle caratteristiche materiali essenziali. La scheda è "il corrispettivo architettonico dell'elenco delle Unità Stratigrafiche, così come viene ancora utilizzato nei cantieri di scavo archeologico".

Per ordinare in una sequenza relativa ogni singolo evento costruttivo in successione, dal più antico al più recente, si utilizzano i significati temporali (*anteriorità*, *posteriorità*, *contemporaneità*) espressi dai rapporti stratigrafici (copre, si appoggia, taglia, riempie e si lega) che intercorrono tra le singole US. I rapporti di cronologia relativa vengono formalizzati da uno schema grafico chiamato *diagramma stratigrafico* o *matrix*, costruito manualmente o con l'ausilio di

applicazioni informatiche.

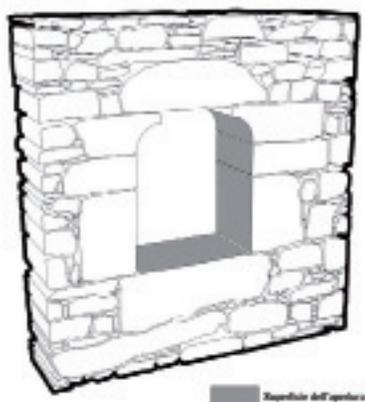
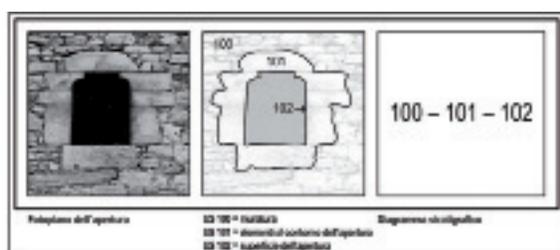
All'analisi stratigrafica segue quella delle *tecniche costruttive* delle murature, delle aperture e degli elementi decorativi. Per quanto riguarda le murature questa analisi ha come primo obiettivo la determinazione dei componenti della struttura, l'individuazione delle tecniche di trasformazione dei materiali (dalla fonte di approvvigionamento alla lavorazione a pié d'opera) ed, infine, il riconoscimento delle modalità di posa in opera. L'identificazione di queste caratteristiche viene agevolata impiegando tavole di confronto, mentre per la registrazione delle informazioni si utilizzano schede corredate della documentazione fotografica (il fotopiano) e grafica (il disegno della forma dei singoli elementi costruttivi e, quando possibile, del profilo del giunto di malta).



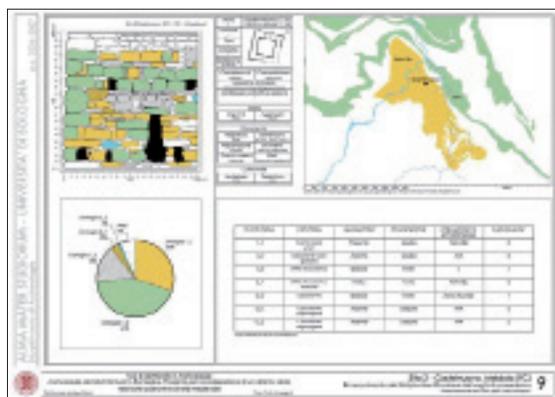
Queste informazioni si possono utilizzare, da un lato, per effettuare confronti fra le varie parti dell'edificio - potendo valutare se esistono *analogie* e quindi elementi sufficienti ad attribuire *rapporti indiretti di contemporaneità* (uguale per identità, per tipo di forma e tecnica costruttiva) - e, dall'altro, per determinare il periodo di costruzione delle murature attraverso il confronto con quelle locali di cronologia già nota. Per di più il riconoscimento dei litotipi e l'identificazione dei luoghi di provenienza del materiale costruttivo può mettere in luce diversi aspetti sociali. Ottenuta una classificazione delle tecniche murarie si procede con l'elaborazione delle diverse tipologie e varianti. Il tipo "raggruppa le caratteristiche formali di un certo numero di murature, a loro volta esemplificative dell'archetipo mentale dei costruttori e dei committenti e quindi indirettamente rapportabili alla loro cultura". In genere sono indicativi per questa operazione solo alcuni dei parametri utilizzati nella classificazione (es.: la posa in opera, la finitura delle superfici, il materiale da costruzione o il tipo di legante). L'analisi si conclude con l'elaborazione di piante dell'intero complesso architettonico con evidenziata la distribuzione delle diverse tipologie murarie. Dalla fase analitica si passa a quella propriamente interpretativa che prevede l'identificazione nel *dia-*

gramma stratigrafico di tutte le unità che appartengono alla stessa *attività costruttiva* (azioni che seguono una medesima finalità costruttiva) e in seguito di tutte le attività (o gruppi di attività) che appartengono ad una stessa fase costruttiva (la sequenza complessiva delle operazioni costruttive di ogni singolo cantiere). L'ultima fase del procedimento interpretativo consiste nell'*integrazione della cronologia relativa con i dati provenienti da altre fonti* al fine di *trasformare le datazioni da relative ad assolute*.

La sequenza costruttiva viene segnalata (in pianta, in sezione, nei rilievi stratigrafici dei prospetti e sul modello tridimensionale) da una diversa caratterizzazione grafica delle murature per appartenenza alla fase edilizia.



Tale indagine è importantissima per il restauro storico-artistico di un bene tutelato e non è una impresa come la Restauri Innovativi Tecnologici®, che primeggia nel campo del recupero di edifici storici, è particolarmente sensibile a tale aspetto conoscitivo.



## PROVE DEBOLMENTE DISTRUTTIVE

### PROVE CON MARTINETTI PIATTI

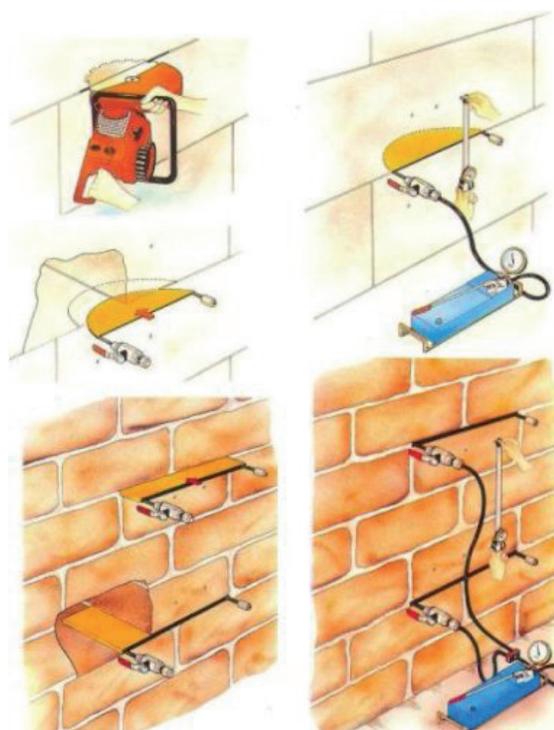
La prova con *martinetto piatto singolo* permette di stimare lo stato di tensione locale presente nelle strutture murarie.

La tecnica di prova si basa sulla variazione dello stato tensionale in un punto della struttura provocato da un taglio piano eseguito in direzione normale alla superficie della muratura.

Il taglio viene generalmente realizzato mediante sega idraulica con lama circolare o mediante la punta di un trapano.



Il rilascio delle tensioni che si manifesta provoca una parziale chiusura del taglio, che viene rilevata tramite misure di variazione relativa fra coppie di punti posti in posizione simmetrica rispetto al taglio stesso. Viene quindi inserito all'interno del taglio un martinetto piatto, realizzato mediante sottili lamiere di acciaio saldate, che viene collegato al circuito idraulico di una pompa. La pressione interna viene gradualmente aumentata fino ad annullare la deformazione misurata successivamente all'esecuzione del taglio. In queste condizioni la pressione all'interno del martinetto è uguale in prima approssimazione alla sollecitazione preesistente nella muratura in direzione normale al piano del martinetto, a meno di una costante sperimentale che tiene conto del rapporto tra l'area del martinetto e l'area del taglio (kA), ed a meno di una costante che tiene conto della rigidità intrinseca di ogni martinetto (kM).



La prova con *martinetto piatto doppio* consente di determinare le caratteristiche di deformabilità della muratura, nonché di fornire una indicazione sul valore di resistenza della stessa. La prova consiste nell'effettuare un secondo taglio, parallelo al primo ad una distanza variabile (che dipende dagli elementi resistenti della muratura investigata e dalla larghezza del martinetto utilizzato), entro cui viene inserito un altro martinetto.

Ciò consente di delimitare un campione di muratura rappresentativo per dimensioni del comportamento meccanico della stessa.



I due martinetti paralleli - opportunamente messi in pressione - applicano al campione interposto uno stato di sollecitazione monoassiale, e le deformazioni risultanti nella porzione muraria vengono misurate da un numero adeguato di sensori di spostamento in direzione ortogonale e parallela ai piani di inserimento dei martinetti, al fine di determinare il diagramma tensione deformazione della muratura indagata.



### PROVA DI STRAPPO NORMALE (PULL-OFF)

L'obiettivo di tali indagini è la verifica dell'adesione tra gli strati di finitura e/o la coesione degli stessi. Il principio è quello di applicare un carico crescente su una superficie determinata ed isolata sino a rottura dell'elemento: si rileva il valore di carico massimo e la modalità di frattura che può essere per adesione o per coesione.

Carico di rottura e diametro medio permettono di calcolare l'aderenza o forza di adesione con la seguente formula:

$$f_h = (4F_h) / (\pi D^2)$$

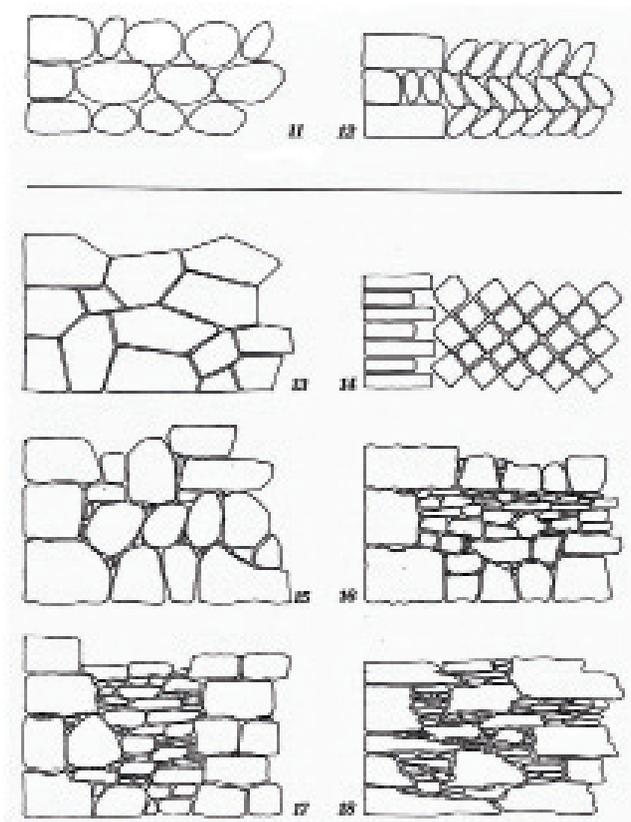
dove:

$f_h$  è la forza di adesione ( $N/mm^2$  o  $MPa$ );

$F_h$  è il carico determinato alla rottura ( $N$ );

$D$  è il diametro medio del campione estratto ( $mm$ ).

NOTA: è buona norma prevedere, all'atto del rinforzo e in parti della struttura in cui la rimozione del rinforzo non comporti alterazione dei meccanismi di collasso, zone aggiuntive (testimoni), realizzate con gli stessi materiali e con le medesime modalità previste per il rinforzo principale, sulle quali verranno svolte le prove.



## PROVE DI VIBRAZIONE SULLE CATENE

In fase di restauro o di valutazione dello stato di sicurezza e funzionalità di edifici storici quali chiese, conventi o più in generale edifici con archi tirantati, il progettista deve sapere quale sia il tasso di lavoro cui le catene sono sottoposte. Tale parametro è infatti fondamentale per capire quanto un arco sia caricato e per decidere se e come intervenire sull'edificio.

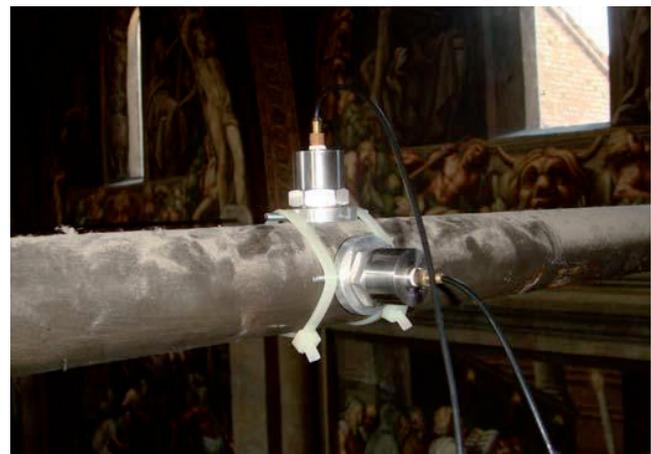
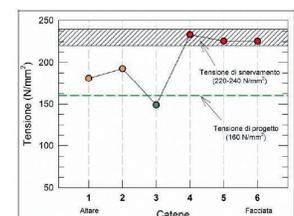
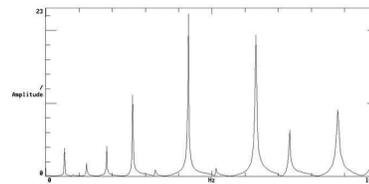
Tra le possibili tecniche di indagine studiate in questi anni, le tecniche basate sull'analisi dinamica sono le più promettenti sia per la rapidità con la quale possono essere effettuate, sia soprattutto per la loro completa non invasività. Grazie allo sviluppo delle tecnologie informatiche ed elettroniche, tali tecniche possono oggi essere applicate a costi nettamente inferiori che in passato.



Le prove di vibrazione sono condotte strumentando la catena con trasduttori di accelerazione di tipo capacitivo ad elevata sensibilità posizionati su tutta la sua lunghezza e percuotendo sia in direzione orizzontale che in direzione verticale tramite un martello non strumentato. Tali trasduttori, sviluppati presso il laboratorio ELSA (European Laboratory for Structural Assessment - Laboratorio Europeo per le Verifiche Strutturali) del Centro Comune di Ricerca della Commissione Europea a Ispra (VA), presentano un bassissimo consumo di energia ed una elevata sensibilità. L'apparato sperimentale consiste in diversi sensori accelerometrici bidirezionali, solitamente 5, collegati ad una scatola di interconnessione e alimentazione. Tale scatola è alimentata da un apposito alimentatore stabilizzato collegato alla rete elettrica. Dalla scatola fuoriesce un cavo piatto che si interfaccia con la scheda di acquisizione collegata al computer portatile. Un software di acquisizione sviluppato ad hoc per l'indagine dinamica di catene permette di registrare i segnali rilevati dai sensori. Per ogni prova effettuata viene compilata una apposita scheda contenente tutte le caratteristiche salienti. I dati vengono memorizzati in una base di dati strutturata in modo analogo alle

basi dati dei grossi laboratori di ricerca (per esempio l'ELSA). Tali dati vengono poi analizzati mediante procedure di calcolo dedicate ed i risultati salvati in documenti in formato PDF.

Tramite tali elaborazioni è possibile poi risalire alle frequenze proprie della catena e da queste risalire ad una stima della tensione di tiro in essa presenti



AhRCOS® S.r.l.  
Tel. 051 / 72 .57. 63  
C.F. e P.iva 01907030389  
Capitale sociale: € 50.000 i.v.  
Iscr. Reg Imprese Ferrara n° 01907030389  
info@restauroeconsolidamento.it · info@ahrcos.it

*Sede Legale:*

Via Statale, 88/1 - 44042 - CENTO (FE)

*Sede Amministrativa e Uffici Tecnici:*

Via Secci, 5 - 40132 - BOLOGNA (BO)

*Laboratorio specialistico ricerca e sviluppo e Deposito:*

Via Secci, 7 - 40132 - BOLOGNA (BO)

*Sede operativa:*

Piazza San Venceslao 776/4 - Václavské náměstí 776/4  
110 00 - PRAHA 1 (CZECH REPUBLIC)

*Sede operativa:*

Via L. Da Vinci, s.c. - 67100 - L'AQUILA (AQ)

*Deposito e centro raccolta materiali:*

Via Argentina, s.c. - 44042 - CENTO (FE)

*Deposito:*

Preslova, 652/19  
150 00 - PRAHA 5 (CZECH REPUBLIC)

*Sede operativa e punto assistenza:*

Křižovnická, 86/6 - 110 00 - PRAHA 1 (CZECH REPUBLIC)

*Sede operativa:*

Via Castelfidardo, 6 - 61121 - PESARO (PU)



Attestazione SOA: OG01 CL. IV-BIS · OG02 CL. IV-BIS – OS21 CL. III-BIS – OG05 CL. I – OS7 CL. I – OS8 CL. I

Certificazione di qualità ISO 9001:2008

Certificazione secondo Linee Guida Inail per il sistema della gestione della salute e della sicurezza sul lavoro (SGSL).

Certificazione ISO 14001 certificazione di Sistema di Gestione Ambientale - Impegno tutela per l'ambiente



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**  
DICEA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

Via Breccie Bianche - 60130 - Ancona  
Tel. +39 071 2204248 · Fax: +39 071 2204378



member of  
**assorestauro** ASS.I.R.C.CO.