



**Riabilitazione del costruito e adeguamento sismico**

Salone d'onore della Facoltà di Ingegneria - Genova, 22 ottobre 2010

**Caratterizzazione di calcestruzzo e muratura: confronto fra metodi NDT e MDT**

Prof. Ing. Antonio Brencich Ph.D.

Direttore Tecnico del Sistema dei Laboratori DICAT

| Indice   | pag. |
|--|------|
| 1. Introduzione .....  | “ 1  |
| 2. Prove Non Distruttive .....   | “ 2  |
| 2.1 Caratterizzazione del calcestruzzo .....   | “ 2  |
| 2.2 Caratterizzazione della muratura di mattoni pieni .....                            | “ 6  |
| 3. Prove Moderatamente Distruttive .....   | “ 11 |
| 3.1 Caratterizzazione del calcestruzzo .....   | “ 11 |
| 3.2 Caratterizzazione della muratura di mattoni pieni .....                            | “ 16 |
| 4. Affidabilità e precisione delle prove: alcune considerazioni .....                  | “ 26 |
| 5 Esempi .....   | “ 29 |
| 5.1 Caratterizzazione del calcestruzzo di una costruzione esistente .....              | “ 29 |
| 5.2 Caratterizzazione della muratura di mattoni pieni di una costruzione storica ..... | “ 35 |
| Riferimenti bibliografici .....  | “ 48 |

**1. Introduzione**

La caratterizzazione dei materiali da costruzione è questione che si pone frequentemente nella pratica professionale in almeno due circostanze: i) per acquisire una sufficiente conoscenza preliminare di strutture esistenti da sottoporre ad analisi strutturali di dettaglio; ii) per verificare in sito la qualità dei materiali impiegati nelle opere di nuova costruzione quando le usuali prove di laboratorio facciano sospettare livelli qualitativi non adeguati. Il primo dei due casi è forse quello più frequente e si pone quando sia richiesto l'adeguamento sismico di strutture esistenti o, comunque, la verifica di strutture ed infrastrutture esistenti. Il secondo caso è meno frequente ma è tecnicamente interessante in quanto consente un diretto confronto tra le prestazioni di diverse tecniche sperimentali.

La caratterizzazione dei materiali procede in genere su due diversi livelli: i) un livello minimo in cui si determina la caratteristica meccanica di riferimento per la classificazione del materiale (tipicamente: la resistenza); ii) un livello dettagliato in cui vengono determinati per via sperimentale anche altri parametri per una migliore caratterizzazione del materiale e/o con specifici fini progettuali. Se si considera il calcestruzzo, questi due aspetti appaiono evidenti: la resistenza a compressione è il parametro necessario alla sua classificazione, mentre altri parametri servono o per una migliore conoscenza del materiale (ad esempio: profondità di carbonatazione) o per impieghi strutturali specialistici (ad esempio: il modulo elastico). In entrambe i casi è necessario tenere conto di due circostanze: i) per la disomogeneità dei materiali le misure sperimentali dei diversi parametri sono destinate ad essere disperse e differenti nelle diverse parti delle strutture; ii) il significato meccanico che l'Ingegneria Strutturale attribuisce ai parametri meccanici, ovvero il significato non di valori puntuali ma di valori medi. Si consideri, ad esempio, il modulo elastico del

calcestruzzo, che è un parametro necessario alla determinazione teorica dello spostamento atteso in una prova di carico: il valore di cui l'Ingegnere ha bisogno è un valore medio che sia in grado di rappresentare la risposta complessiva della struttura.

Queste semplici considerazioni evidenziano una caratteristica di ogni campagna di prove sperimentali mirate alla caratterizzazione dei materiali: all'Ingegnere servono valori medi dei parametri meccanici, ma li può determinare solo attraverso prove sperimentali localizzate in materiali disomogenei.

La caratterizzazione dei materiali si accompagna sempre alla necessità di non danneggiare, o di danneggiare in misura limitata e facilmente riparabile, le strutture oggetto delle indagini. Questo ha condotto a diverse *Prove Non Distruttive* e *Prove Moderatamente Distruttive*. Tali esigenze limitano le possibilità sperimentali alla misura di alcuni parametri meccanici, talvolta nemmeno i parametri più significativi, e impongono di stimare i parametri rilevanti mediante interpolazioni o relazioni empiriche talvolta anche fortemente discutibili dal punto di vista concettuale.

In questo lavoro si fa riferimento a due materiali da costruzione: il calcestruzzo, impiegato nella maggior parte delle costruzioni moderne, e la muratura di mattoni pieni che, seppure non più usata, costituisce il materiale dei ponti ad arco, che ancora oggi costituiscono la spina dorsale del sistema ferroviario europeo, oltre che in diversi manufatti comuni. Per questi due materiali si discutono due campagne d'indagine in cui diverse tecniche hanno consentito di caratterizzare i materiali fornendo utili informazioni sia sull'affidabilità delle campagne sperimentali che sulle diverse tecniche d'indagine.

## **2 Prove Non Distruttive**

Con il termine Prove Non Distruttive viene indicato il complesso di esami, prove e rilievi che non alterano il materiale e non richiedono la distruzione o l'asportazione di campioni dalla struttura; si usa spesso l'acronimo NDT, derivato dall'espressione inglese Non Destructive Tests.

Le PND stimano la resistenza dei materiali in modo indiretto, misurando grandezze elastiche (il modulo elastico nel caso delle prove ultrasoniche) o misurando la durezza superficiale dei materiali (sclerometro). Questo approccio, insito nel concetto di prova non distruttiva, introduce una rilevante ed insanabile contraddizione concettuale: la resistenza è la caratteristica meccanica di un materiale che si realizza nel momento in cui i fenomeni non lineari hanno raggiunto la loro massima rilevanza. Le grandezze elastiche, invece, descrivono quella parte della risposta di un materiale in cui non vi sono fenomeni non lineari: è evidente che non è concettualmente giustificabile porre in correlazione grandezze in fase elastica e resistenza dei materiali. In generale, le PND assumono implicitamente che sia vero l'assunto:

materiali di buona qualità  $\Leftrightarrow$  elevati valori dei diversi parametri meccanici.

Ne deriva, ad esempio, che a moduli elastici elevati si faccia corrispondere una resistenza elevata, sebbene tale correlazione appaia concettualmente del tutto non giustificabile.

### 2.1 Caratterizzazione del calcestruzzo

In questo paragrafo vengono descritte le prove sperimentali per la caratterizzazione del calcestruzzo più comuni e più affidabili.

### Prove sclerometriche (Schmidt Hammer Tets)

Lo sclerometro, figura 1, è uno strumento per prove NDT speditive su calcestruzzo, roccia e muratura che stima la resistenza a compressione del materiale a partire dalla sua durezza superficiale. A causa dell'incertezza nella correlazione empirica tra resistenza a compressione e durezza superficiale, la prova *sclerometrica* è riconosciuta solo da alcune normative tecniche ed è da considerarsi come una prova a basso livello di dettaglio e di ridotta precisione. Umidità, snellezza dell'elemento strutturale, inadeguata levigatura e pulitura della superficie di battuta, carbonatazione del calcestruzzo, imperfetta taratura dello strumento, strumento non ortogonale alla superficie da provare, presenza di armature più meno superficiali possono alterare i risultati della prova.

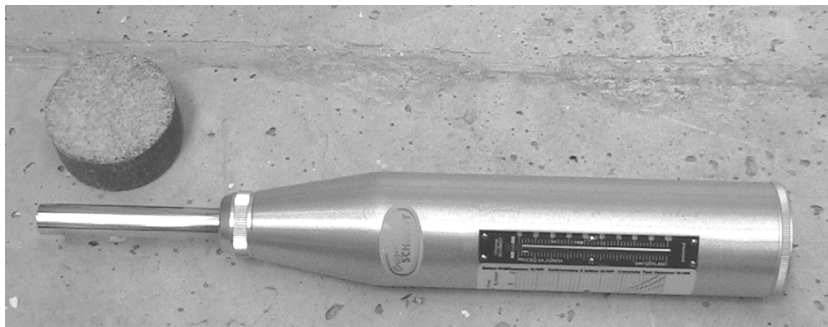


Figura 1. Sclerometro Schmidt ad ago estratto.

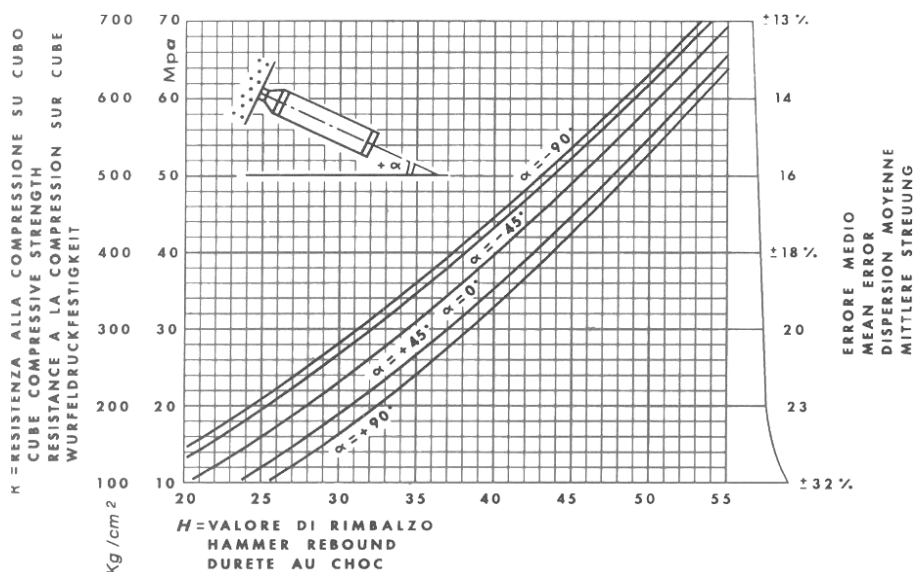


Figura 2. Curva di taratura.

La durezza superficiale viene stimata sulla base del rimbalzo di una massa nota che colpisce la superficie del materiale con energia predefinita<sup>1</sup>. L'impatto avviene tramite un'asta (comunemente detta *ago*) estratto dal corpo dello sclerometro, mentre la massa battente rimane nella carcassa dello strumento, figura 1. Quanto maggiore è il rimbalzo tanto minore è l'energia assorbita dalla

<sup>1</sup> L'energia dello sclerometro standard è pari a 2.207 N\*m per il modello standard (modello N, resistenza da 10 a 70 MPa), 0.735 per il modello da roccia (modello L depotenziato), 29.43 N\*m per il modello da pavimentazione stradale in cls (modello M potenziato).

superficie e tanto maggiore ne è la durezza. Pertanto, a rimbalzo maggiore viene fatta corrispondere una migliore qualità del materiale da cui si deduce, poi, una resistenza maggiore. Le curve di correlazione rimbalzo (detto anche *indice sclerometrico*) – resistenza a compressione del materiale sono non lineari con equazione del tipo:

$$R_c = aR^b \quad (1)$$

in cui  $a$  e  $b$  sono i coefficienti di taratura e  $R$  è l'indice di rimbalzo misurato dallo sclerometro. La precisione della prova e la ridotta non linearità della curva di taratura, figura 2, rendono accettabili anche curve di taratura di tipo lineare.

Una volta pulita una superficie di circa 25x25 cm nell'area dove eseguire la prova, la misura sclerometrica consiste in 9 misurazioni (dette *battute*) equispaziate su una su una maglia di 9cm di lato (entro un quadrato di 18x18cm); il risultato finale è la media di 7 valori esclusi i due estremi.

I risultati della relazione (1) devono poi essere moltiplicati per coefficienti correttivi, tabella 1, per tenere conto dell'età del calcestruzzo e dell'umidità al momento della prova.

**Tabella 1.** Coefficienti correttivi della relazione (1)

| Età del cls | Coefficiente correttivo | Umidità nel cls | Coefficiente correttivo |
|-------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|
| < 57gg      | 1.00                    | Secco           | 0.85                    |
| 57 – 180gg  | 0.95                    | Umido           | 1.00                    |
| 181-360gg   | 0.93                    | Saturo d'acqua  | 1.05                    |
| >360gg      | 0.90                    |                 |                         |

Limiti della procedura: La correlazione tra la resistenza a compressione e la durezza superficiale del materiale è empirica e del tutto ingiustificata da un punto di vista teorico in quanto pone in relazione caratteristiche meccaniche essenzialmente diverse. Pertanto, è opportuno utilizzare la prova *sclerometrica* per una verifica diffusa di omogeneità del materiale per confronto tra i risultati delle prove in diverse parti della struttura; l'uso della prova sclerometrica in termini assoluti (determinazione della resistenza a compressione) è giustificata solo in un primo approccio di larga massima alla caratterizzazione del materiale ma non può costituire un dato progettuale. E' comunque innegabile la velocità esecutiva della prova e la sua grande economicità.

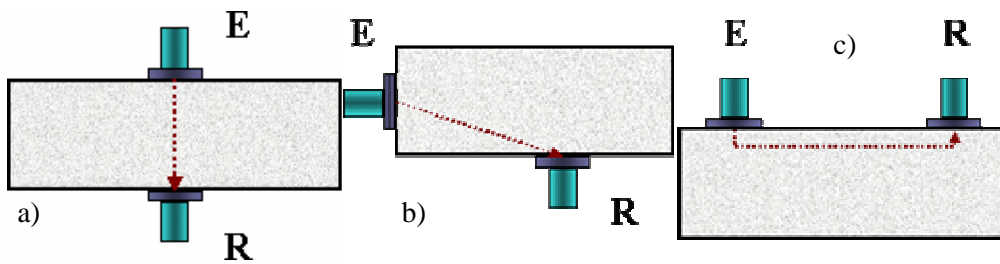
Standard internazionale di prova: ASTM C 805 - BS 1881:202 - DIN 1048 - prEN 12398:1996 - UNI EN 12504-2:2001

#### *Prove soniche / ultrasoniche*

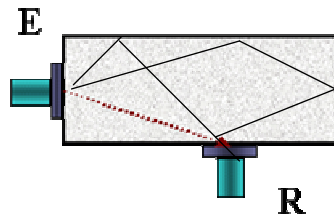
Si tratta di prove NDT che pongono in correlazione la velocità di propagazione di onde elastiche di compressione, opportunamente immesse nell'elemento strutturale, con la resistenza a compressione del materiale.

La sonda emettitrice, figura 3, produce degli impulsi sonici o ultrasonici (in funzione della frequenza) con frequenza prestabilita che, captati dalla sonda ricevente, consentono di misurare il tempo di transito mediante un contatore al quarzo. Noto lo spessore dell'elemento strutturale, il calcolo della velocità di propagazione è immediato.

La precisione della misurazione dipende da diversi parametri: i) densità del materiale attraversato; ii) presenza di umidità nel materiale (l'acqua è un buon veicolo di propagazione delle onde ultrasoniche); iii) presenza di armature metalliche; iv) riflessioni multiple sulle superfici dell'elemento strutturale, figura 4; v) cavità e superfici di discontinuità, porosità.



**Figura 3.** Schema di esecuzione della prova sonora. Trasmissione a) diretta; b) semidiretta; c) indiretta.  
E: emettitore; R: ricevitore.



**Figura 4.** Riflessioni multiple sulle superfici dell'elemento strutturale.

La determinazione della resistenza del materiale avviene per via indiretta empirica a partire dalla velocità di propagazione di un'onda elastica in un mezzo omogeneo elastico ed isotropo e dal modulo elastico dinamico  $E_d$ :

$$E_d = \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} V^2, \quad (2)$$

in cui  $V$  è velocità dell'onda in  $\text{ms}^{-1}$ ,  $\nu$  il modulo (dinamico) di Poisson,  $\rho$  la densità del mezzo in  $\text{kN/m}^3$ . Nella propagazione l'onda elastica perde energia sia per effetto della propagazione sferica del fronte d'onda sia per riflessione e rifrazione parziale dell'onda sulle interfacce di discontinuità (ad esempio nelle riprese di getto). Di solito vengono usate onde sonore per murature e ultrasoniche per calcestruzzo, legno e pietra.

Esistono alcune correlazioni, sempre di tipo empirico, che consentono di desumere la resistenza del calcestruzzo dalla velocità di propagazione delle onde sonore del tipo:

$$R_c = ae^{bV} \quad (3.a)$$

$$R_c = cV^d \quad (3.b)$$

$$R_c = E_d / 1250 \quad (3.c)$$

in cui  $a$  e  $b$  sono i coefficienti di taratura e  $V$  è la velocità di propagazione delle onde ultrasoniche ( $a=1.88\text{E-}22$ ,  $b=6.184$  e  $c=3.8\text{E-}5$ ,  $d=9.66$  in due delle più comuni curve d'interpolazione). Tuttavia, si tratta di relazioni empiriche che correlano grandezze concettualmente non correlabili (modulo elastico e resistenza di un materiale), affette da errori talora anche significativi e che non trovano altra giustificazione se non l'associazione logica:

Elevata velocità di propagazione delle onde ultrasoniche ⇔

⇔ materiale di buone caratteristiche ⇔

⇔ resistenza a compressione elevata.

Per questi motivi si preferisce, nel caso delle prove ultrasoniche, limitare il giudizio a stime meno dettagliate, come quelle di tabella 2.

**Tabella 2.** Velocità di propagazione delle onde ultrasoniche e resistenza del calcestruzzo (Zocca, DiLena, 1986)

| Velocità onde ultrasoniche | Resistenza stimata del cls |
|----------------------------|----------------------------|
| < 2400 m/s                 | < 15 MPa                   |
| 2400 – 3000 m/s            | 15 – 20 MPa                |
| 3000 – 3600 m/s            | 20 – 25 MPa                |
| 4600 – 4200 m/s            | 25 – 30 MPa                |
| > 4200 m/s                 | > 30 MPa                   |

Limiti della procedura: la velocità di propagazione delle onde elastiche consente la determinazione del modulo elastico per materiali elastici isotropi ed omogenei. Poiché i materiali da costruzione soddisfano questi requisiti solo in parte, già la determinazione del modulo elastico del materiale risulta affetta da una certa approssimazione. La correlazione tra la resistenza a compressione del materiale ed il suo modulo elastico è discutibile in quanto pone in relazione una proprietà elastica (il modulo elastico) con una caratteristica del materiale (la resistenza) che si manifesta in avanzata fase non lineare. Secondo alcuni ricercatori, non è possibile dedurre la resistenza a compressione dalla velocità di propagazione delle onde elastiche, il che limiterebbe la significatività delle prove soniche ed ultrasoniche ad una verifica di omogeneità del materiale e, eventualmente, all'individuazione di superfici di discontinuità del materiale.

Standard internazionali di prova: ACI 228.2R-98 - ASTM C 597 - ASTM C 1383 - NF P 18-418 - prEN ISO 8047 - UNI 9524:1989 - UNI EN 12504-4:2005 - EN 12668-1:2000/A1 - EN 12668-3:2000/A1 - EN 1330-4 - EN 13554:2002/A1 - UNI 8555:1984 - UNI 9094:1987 - UNI EN 12223:2001 - UNI EN 12668-2:2004 - UNI EN 13860-2:2003 - UNI EN 14127:2004 - UNI ENV 583-6:2001 - UNI EN 1330-9:2002 - UNI EN 13477-1:2003 - UNI EN 13477-2:2003 - UNI EN 583-1:2004 - UNI EN 583-2 :2004 - UNI EN 583-3:1998 - UNI EN 583-4:2004 - UNI EN 583-5:2004

*Prove combinate sclerometro-ultrasuoni (Metodo Sonreb):*

Combinando prove sclerometriche e ultrasoniche è possibile compensare parzialmente l'errore sperimentale, ottenendo una stima più attendibile della resistenza del calcestruzzo. La possibilità di compensare gli errori delle due tecniche deriva dalle loro caratteristiche intrinseche: i) il rimbalzo dello sclerometro è influenzato dalle proprietà dello strato superficiale; ii) la velocità degli ultrasuoni è influenzata prevalentemente dalle proprietà della parte interna del materiale; iii) l'umidità induce errori per difetto nello sclerometro e per eccesso nelle tecniche ultrasoniche.

La combinazione delle due prove viene eseguita mediante relazioni del tipo (Di Leo e Pascale, 1994):

$$R_c = a R^\alpha V^\beta \text{ [MPa]} \quad (4)$$

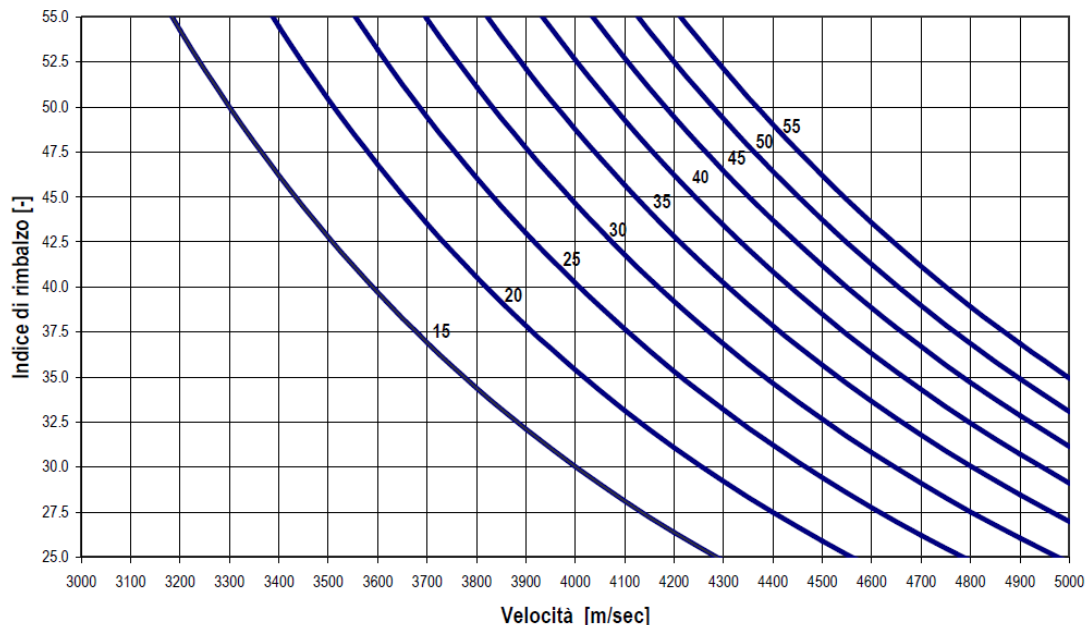
dove:  $R_c$  è la resistenza cubica del calcestruzzo,  $R$  è il rimbalzo medio dello sclerometro misurato su 10 battute;  $V$  è la velocità di propagazione dell'ultrasuono, in m/s,  $C$  è un *coefficiente globale d'influenza* di valore diverso da quello unitario quando la procedura venga calibrata per raffronto con almeno una prova di compressione diretta su carota o almeno tre prove di estrazione (*pull out*) eseguite nella stessa zona (o in zona vicina) dove sono state eseguite le prove sclerometriche e ultrasoniche. Le curve di isoresistenza di figura 5 sono dedotte da relazioni del tipo (4).

In letteratura le interpolazioni SONREB più diffuse sono elencate di seguito

$$R_c = 2.86 * 10^{-2} R^{1.246} V^{1.85} \text{ [MPa, km/s]} \quad \text{J. Gašparik (1984)} \quad (5)$$

$$R_c = 1.2 * 10^{-9} R^{1.058} V^{2.446} \text{ [MPa, m/s]} \quad \text{A. Di Leo, G. Pascale (1994)} \quad (6)$$

|  |             |   |
|--|-------------|---|
| $R_c = 7.695 * 10^{-11} R^{1.4} V^{2.6}$     | [MPa, m/s]  | R. Giacchetti, L. Lacquaniti (1980) (7) |
| $R_c = 1.53 * 10^{-3} (R^3 V^4)^{0.611}$     | [MPa, km/s] | E. Arioğlu, O. Köylüoğlu (1996) (8)     |
| $R_c = 4.40 * 10^{-7} (R^2 V^3)^{0.5634}$    | [MPa, m/s]  | E. Del Monte et al. (2004) (9)          |
| $R_c = 2.756 * 10^{-10} R^{1.311} V^{2.487}$ | [MPa, m/s]  | Bocca e Cianfrone (1983) (10)           |
| $R_c = 9.27 * 10^{-11} R^{1.4} V^{2.6}$      | [MPa, m/s]  | RILEM (1989) (11)                       |



**Figura 5.** Curve di correlazione velocità di propagazione delle onde sonore – resistenza del calcestruzzo.

Limiti della procedura: essenzialmente gli stessi delle prove sclerometriche e ultrasoniche. E' necessario sottolineare la notevole variabilità dei coefficienti delle interpolazioni Sonreb; se ne deduce che l'impiego dei coefficienti reperibili in letteratura deve essere considerato con molta attenzione. L'applicazione di questo metodo combinato, invece, fornisce ottimi risultati se impiegato sullo stesso materiale su cui sono stati determinati i coefficienti e gli esponenti d'interpolazione, che però richiede una vasta campagna sperimentale di taratura e, quindi, costituisce un raro esempio d'interpolazioni Sonreb.

Standard internazionali di prova: gli stessi delle prove sclerometriche e ultrasoniche CLS

### 2.2 Caratterizzazione della muratura di mattoni pieni

E' noto che la resistenza a compressione della muratura dipende dalle caratteristiche dei materiali e dalle modalità di posa. Allo stato attuale delle conoscenze, non sembra possibile individuare una teoria consolidata che consenta di dedurre la resistenza della muratura di mattoni dalla resistenza dei singoli componenti.

#### *Analisi elastica*

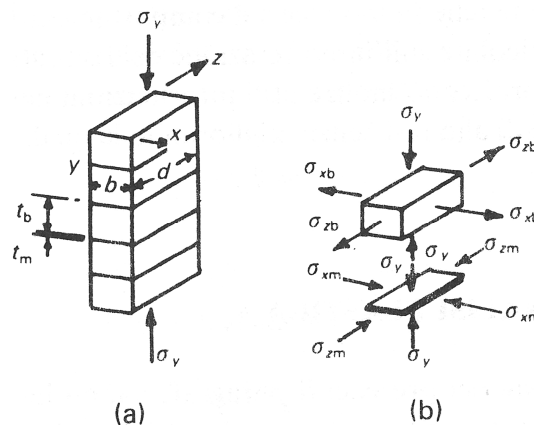
L'osservazione sperimentale evidenzia che il meccanismo di collasso della muratura di mattoni pieni non interessa, forse inaspettatamente, il materiale più debole, ovvero la malta, ma il mattone, figura 6. In particolare, il collasso è attivato dalla rottura trasversale del mattone secondo una linea

di frattura diretta nella direzione di carico. Poiché ogni rottura avviene per il superamento della resistenza a trazione del materiale su una superficie costituita dalle due facce della frattura, questa modalità di rottura è definita “*per trazione trasversale indotta*”.

Per comprendere questo fenomeno, si consideri un prisma di muratura, formato da un assemblaggio di malta e mattoni, uniformemente compresso sulle basi mediante vincoli lisci e soggetto ad una tensione verticale uniforme  $\sigma_y$ , figura 7.



**Figura 6** – Collasso della muratura di mattoni pieni: rottura del mattone per trazione trasversale.



**Figura 7.** Tensioni nella muratura e nei suoi componenti in fase elastica (Hendry, 1986).

Si consideri un mattone non di estremità ed il giunto di malta adiacente, figura 7.b: entrambe sono sollecitati dalla stessa componente di tensione verticale  $\sigma_y$ . La malta è il materiale più deformabile e quindi tenderebbe a dilatarsi trasversalmente in misura maggiore rispetto al mattone, dotato di maggiore rigidità e minore coefficiente di Poisson. Tuttavia il giunto di malta ed il mattone non sono separati ma strettamente connessi all'interfaccia malta/mattone per cui, fino a che viene conservata l'aderenza tra la malta ed il mattone, all'interfaccia gli spostamenti relativi devono essere nulli. Di conseguenza, assimilando il campione di muratura ad un mezzo stratificato illimitato, il mattone risulta soggetto ad una componente di trazione sul piano orizzontale  $\sigma_{zb}$  e  $\sigma_{xb}$  mentre la malta risulta sottoposta ad una componente di compressione  $\sigma_{zm}$  e  $\sigma_{xm}$ , ovvero ad uno stato di compressione triassiale in cui la resistenza è superiore rispetto a quella monoassiale. Il mattone, invece, è interessato da uno stato di tensione triassiale di compressione-trazione-trazione nel quale la resistenza a compressione è inferiore rispetto alla resistenza monoassiale. Questi



stati triassiali di tensione nei singoli componenti giustificano l'osservazione sperimentale che la resistenza della muratura è superiore a quella monoassiale della malta ed inferiore a quella monoassiale del mattone.

Imponendo la congruenza degli spostamenti all'interfaccia malta/mattone, l'equilibrio in direzione orizzontale ed introducendo le equazioni costitutive di un materiale elastico lineare isotropo, si definisce la resistenza del prisma murario ed il suo modulo elastico in funzione della resistenza del mattone e delle frazioni volumetriche di malta e mattone oltre ad alcune grandezze geometriche:

$$\frac{f_M}{f_b^c} = \frac{1}{1 + \frac{\frac{f_b^c}{f_b^t} (\beta v_m - v_b)}{(1 - v_b) - \alpha \beta (1 - v_m)}} \quad (12.a)$$

$$E_M = \frac{1}{\left[ \frac{\eta_b}{E_b} + \frac{\eta_m}{E_m} + 2\eta_m\eta_b \frac{v_b E_m - v_m E_b}{\eta_m (1 - v_b) E_m + \eta_b (1 - v_m) E_b} \left( \frac{v_m}{E_m^2} - \frac{v_b}{E_b^2} \right) \right]} \quad (12.b)$$

$$v = \eta_m v_m + \eta_b v_b, \quad (12.c)$$

dove i termini  $\eta_m$  e  $\eta_b$  rappresentano le frazioni volumetriche delle due fasi (malta e mattoni):

$$\eta_m = \frac{t_m}{t_m + t_b}, \quad \eta_b = \frac{t_b}{t_m + t_b} \quad (13.a, b)$$

### Analisi Limite

Imponendo l'equilibrio del prisma in condizioni limite, ovvero nell'istante ultimo prima del collasso della muratura, la resistenza a compressione della muratura  $f_M$  può essere espressa in funzione dei singoli componenti indipendente dalle loro caratteristiche elastiche:

$$f_M = \frac{\alpha \frac{f_b^t}{f_b^c} + \frac{f_m^t}{f_m^c}}{\alpha \frac{f_b^t}{f_b^c} + \frac{f_m^t}{f_m^c}} \quad (14)$$

dove  $\alpha$  è il rapporto  $t_b/t_m$  fra tra altezza del mattone  $t_b$  e lo spessore del giunto di malta  $t_m$ .

### Eurocodice 6

Sulla base di un approccio fenomenologico alla resistenza della muratura di blocchi quadrati, l'Eurocodice 6 definisce le caratteristiche meccaniche della muratura sulla base delle relazioni fenomenologiche riportate nel seguito.

#### MURATURA DI MATTONI PIENI

$$f_k = 0.50 f_b^c{}^{0.65} f_m^c{}^{0.25}, \quad (15)$$

con  $f_b^c \leq 20$  MPa e  $f_m^c \leq 2 f_b^c$  ed essendo  $f_b^c$  e  $f_m^c$  la resistenza a compressione normalizzata del mattone e della malta rispettivamente.

#### MURATURA DI BLOCCHI DI PIETRA

$$f_k = 0.8 f_{bk}^c{}^{0.85}, \quad (16)$$

con  $f_{bk}^c \leq 50$  MPa e  $f_m^c \leq 5 f_b^c$  ed essendo  $f_b^c$  e  $f_m^c$  la resistenza a compressione normalizzata del blocco di pietra e della malta rispettivamente.

PER ENTRAMBE I TIPI DI MURATURA

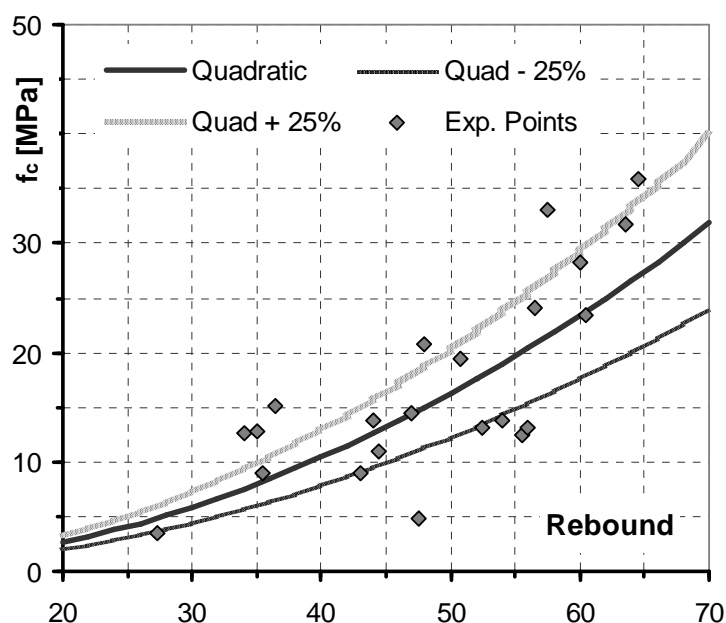
$$E_M = 1000 f_{ck} \text{ [MPa]} \text{ agli Stati Limite Ultimi} \quad (17.a)$$

$$E_M = 600 f_{ck} \text{ [MPa]} \text{ agli Stati Limite di Esercizio} \quad (17.b)$$

$$G = 0.4 E \text{ [MPa]}. \quad (17.c)$$

Le relazioni (15) e (16) sono oggetto di dibattito in sede scientifica in quanto non riproducono adeguatamente i risultati delle prove sperimentali disponibili. Le relazioni (17) non trovano alcun riscontro sperimentale e devono essere considerate relazioni provvisorie destinate a diversa determinazione in futuro. Per altro, le relazioni (17) sono affette dal grave limite concettuale di cui si è discusso nelle pagine precedenti: correlano una caratteristica elastica, il modulo elastico, con la resistenza del materiale.

*Prove sclerometriche (Schmidt Hammer test)*



**Figura 8.** Muratura: curva di taratura per sclerometro tipo N.



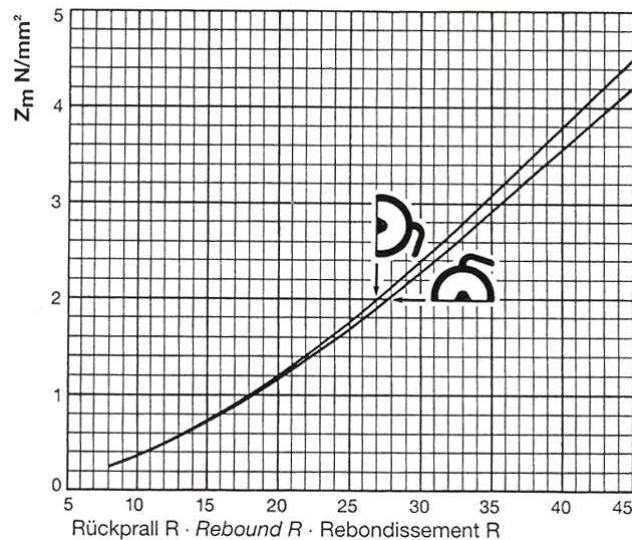
**Figura 9.** Sclerometro a pendolo.

Come si può osservare dalle relazioni (12.a) e (14), il meccanismo di collasso della muratura di mattoni pieni è innescato dalla rottura per trazione trasversale indotta nei mattoni. Semplificando i termini del problema, quindi, la resistenza complessiva della muratura è correlata alla resistenza a trazione del laterizio<sup>2</sup>. Se si suppone, più su basi empiriche che su basi concettuali, che la resistenza a trazione possa essere correlata alla durezza superficiale del mattone, è possibile stimare la resistenza a compressione della muratura con prove sclerometriche del tutto analoghe a quelle per il calcestruzzo. E' stato suggerito d'impiegare per la muratura sclerometri a ridotta energia d'impatto (tipo L, energia d'impatto 0.72 NM) ma la ricerca degli ultimi anni ha consentito di elaborare curve di taratura per gli sclerometri ordinari da calcestruzzo (tipo N, energia d'impatto 2.2 Nm). In questo modo, lo stesso strumento può essere impiegato sia su calcestruzzo che su muratura, pur di fare riferimento a curve di taratura opportune (in figura 8 è riportata la curva di taratura DICAT-BOVIAR basata su Brencich e Sterpi, 2007). Il rapporto tra il rimbalzo ottenuto con sclerometri diversi è sostanzialmente uguale al rapporto tra le energie d'impatto.

<sup>2</sup> Questo non è vero solo nel caso di malte particolarmente degradate e povere quali si riscontrano molto di rado anche nell'edilizia povera.

Per le murature è possibile impiegare anche un diverso tipo di sclerometro, lo sclerometro a pendolo, che non differisce concettualmente ma solo tecnologicamente da quello tradizionale per calcestruzzo, figura 9. Lo sclerometro a pendolo può essere impiegato anche sul solo giunto di malta per stimarne la resistenza a compressione con opportune curve di taratura, figura 10.

Precisione complessiva:  $\pm 25\%$ .



**Figura 10.** Malta: curva di taratura per sclerometro a pendolo. a) bassi e b) alti valore di rimbalzo.

Limiti della procedura: quelli intrinseci alle prove sclerometriche, cfr. prove sclerometriche su cls

Standard internazionali di prova: UIC-Fiche 778-3E, UNI 10766:1999 - ASTM C 805 - BS 1881:202 - DIN 1048 - prEN 12398 - UNI EN 12504-2:2001 quelli per le prove su calcestruzzo.

### *Prove soniche / ultrasoniche*

Si rimanda a quanto già discusso per il calcestruzzo.

## **3 Prove Moderatamente Distruttive**

Con il termine Prove Moderatamente Distruttive viene indicato il complesso di esami, prove e rilievi che richiedono prelievi di piccole quantità di materiale oppure che realizzano prove a rottura localizzate in zone di estensione ridotta. Obiettivo di tutte le prove PMD è quello di ottenere stime affidabili delle proprietà dei materiali realizzando danni strutturali irrilevanti e danni funzionali di facile riparazione. Questo requisito impone, talvolta, di dedurre alcuni parametri meccanici in modo indiretto, come ad esempio la resistenza a compressione del calcestruzzo che la prova di *pull-out* stima sulla base di una misura diretta della resistenza a trazione del materiale. Spesso viene usato l'acronimo MDT, derivato dall'espressione inglese Moderately Destructive Tests.

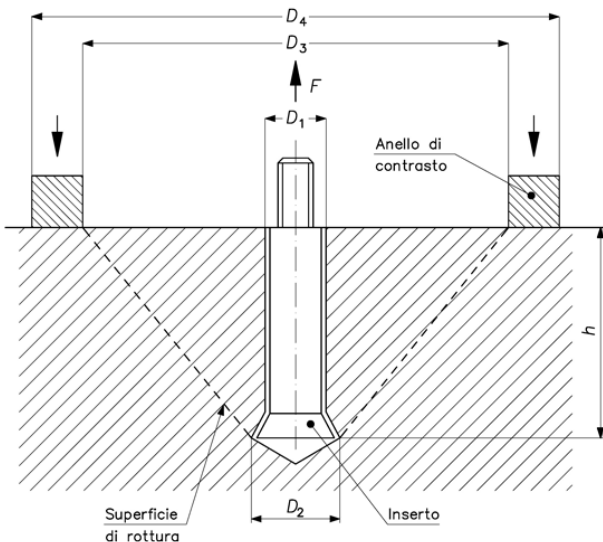
Anche queste prove misurano alcune proprietà meccaniche dei materiali localmente; la definizione di caratteristiche dei materiali medie globali, quindi, rimane una questione da definire a valle delle prove sperimentali.

### 3.1 Caratterizzazione del calcestruzzo

#### *Pull-Out*

La prova consiste nell'estrazione da un elemento strutturale in calcestruzzo di una barra metallica inserita nella struttura dopo il getto ed a questo ancorata mediante un tassello metallico

ad espansione, figura 11. La barra viene estratta insieme ad un cono di calcestruzzo, figure 11 e 12, evidenziando come la condizione di collasso del materiale sia per superamento della resistenza a trazione sulla superficie laterale del cono di calcestruzzo. La prova, quindi, consiste in una misura diretta della resistenza a trazione da cui, con correlazioni essenzialmente empiriche, viene dedotta la resistenza a compressione del calcestruzzo.



**Figura 11.** Schema della prova di *pull out*.



**Figura 12.** Martino idraulico di estrazione e coni di calcestruzzo estratti (Arch. G. Stagno, STD Genova)

La resistenza a compressione del calcestruzzo viene stimata sulla base di relazioni del tipo:

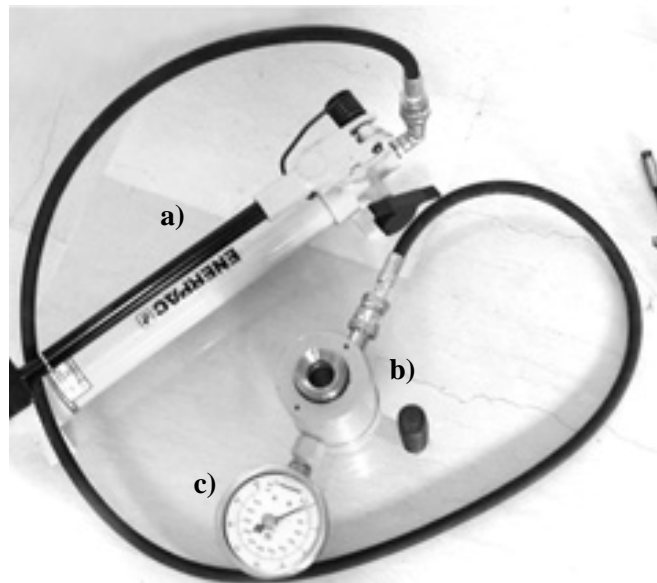
$$R_c = aF + b \quad [\text{MPa}] \quad (18)$$

$$R_c = \frac{cF^2 + dF + e}{f} \quad [\text{MPa}] \quad (19)$$

in cui  $F$  è la forza di estrazione del tassello e le costanti ( $a$  e  $b$ ) e ( $c$ ,  $d$ ,  $e$  ed  $f$ ), sono funzione del tipo di tassello d'ancoraggio ( $a=0.0094$  e  $b=9.6$  per tasselli Fisher Zykon M10TCP, maggiormente impiegati,  $c = -12.5E-6$ ,  $d = 0.157$ ,  $e = 10$ ,  $f = 10$ , da [www.4emme.it](http://www.4emme.it)).

L'affidabilità della prova è fortemente influenzata da tutti i parametri che possano disturbare l'estrazione del cono di calcestruzzo, come la presenza di armature e di bordi liberi della struttura. Per questo motivo, la prova di *pull out* viene usualmente eseguita negli strati superficiali degli elementi strutturali potrebbe fornire dati falsati in presenza di degrado del materiale.

Inoltre, la prova è stata tarata per elementi strutturali in c.a. prevalentemente compressi, come i pilastri, i muri di sostegno, etc. Quando questa tecnica sperimentale viene applicata in elementi strutturali con un prevalente stato tensionale di trazione, come ad esempi all'intradosso delle travi, anche a distanza relativamente ridotta dagli appoggi, il risultato della prova può essere affetto da notevole errore. In taluni casi, l'estrazione del cono di calcestruzzo non si verifica e viene estratto il solo tassello di ancoraggio: in questi casi la resistenza a compressione del materiale non può essere determinata e le relazioni (18 e 19), quando vi si inserisca la forza di estrazione del solo tassello ad espansione, fornisce un minorante della resistenza a compressione del materiale.



**Figura 13.** Apparecchiatura per la prova di *pull out*; a) pompa manuale; b) martino idraulico di estrazione; c) manometro per la misurazione della pressione

Limiti della procedura: A differenza delle prove descritte in precedenza, la prova di *pull out* rileva direttamente la resistenza a trazione del materiale. La resistenza a compressione, quindi, viene dedotta con correlazioni empiriche ma affette da minor margine di errore rispetto alle prove precedenti. E' possibile stabilire anche teoricamente una correlazione tra la resistenza a trazione di un materiale e quella a compressione. Rilevanti errori possono derivare da condizioni di prova diverse da quelle originali di taratura delle formule (18 e 19), come si verificano quando la prova viene eseguita in parti di strutture interessate da uno stato di tensione prevalente di trazione.

Standard internazionali di prova:

ASTM C900 - UNI 9536:1986 - UNI 10157:1992 - UNI EN 12504-3:2003 - pr EN 12399:1996

#### *Sonda Windsor*

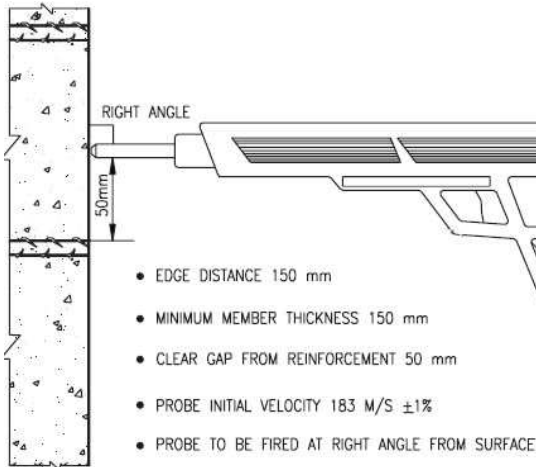
Il sistema Windsor stima la resistenza del calcestruzzo in sito in funzione della profondità di penetrazione di una sonda metallica sparata con energia nota contro l'elemento di calcestruzzo, in direzione ortogonale alla sua superficie, figura 14. L'energia cinetica trasmessa alla sonda viene convertita in energia di deformazione del calcestruzzo sia nell'intorno del punto di penetrazione sia nell'intorno della punta della sonda, figura 15, e si distribuisce in parte nella rottura della pasta di cemento ed in parte nella rottura degli aggregati, per i quali l'energia assorbita è funzione della loro durezza. Pertanto, la stima eseguita con il metodo Windsor misura la profondità di penetrazione della sonda e la durezza degli aggregati del calcestruzzo secondo la scala di Mohs sulla base di tabelle di derivazione empirica, figure 16 e 17. La prova Windsor stima la resistenza del materiale sulla base della media di 3 prove di penetrazione.

Limiti della procedura: La tabella di taratura considera la profondità di penetrazione con una precisione di 0.5mm. L'intero sistema di prova, tuttavia, non riesce a garantire tale precisione nella misurazione per diversi motivi: i) errori nell'ortogonalità delle sonde<sup>3</sup>; ii) difficoltà a rilevare la profondità di penetrazione con precisione di 0.5mm per effetto del materiale disgregato nell'intorno della sonda; iii) precisione di misura sul campo inferiore a 0.5mm. Inoltre, si tratta di una prova

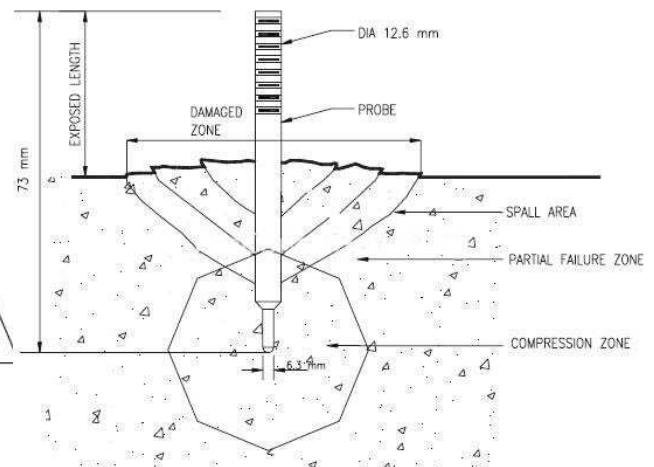
<sup>3</sup> I dispositivi di guida non riescono comunque a garantire la perfetta ortogonalità delle sonde.

pericolosa in quanto la pistola di lancio della sonda ha struttura e principio di funzionamento molto vicini a quelli di un'arma.

Standard internazionali di prova: ASTM C803, ANSI A.10-3, ACI 347-78, BS 1881 PART 207



**Figura 14.** Schema della prova Windsor



**Figura 15.** Infissione della sonda Windsor

| Exposed Probe (inches) | PSI        |            | Mpa        |            | PSI        |            | Mpa        |            | PSI        |            | Mpa        |            |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                        | Mohs' NO.3 | Mohs' NO.3 | Mohs' NO.4 | Mohs' NO.4 | Mohs' NO.5 | Mohs' NO.5 | Mohs' NO.6 | Mohs' NO.6 | Mohs' NO.7 | Mohs' NO.7 | Mohs' NO.7 | Mohs' NO.7 |
| 1.275                  | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.3                    | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.325                  | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.35                   | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.375                  | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.4                    | 3000       | 20.6       | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.425                  | 3175       | 21.9       | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.45                   | 3325       | 22.9       | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.475                  | 3500       | 24.1       | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.5                    | 3675       | 25.3       | 3000       | 20.6       | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.525                  | 3825       | 26.3       | 3175       | 21.9       | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.55                   | 4000       | 27.5       | 3350       | 23.1       | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.575                  | 4175       | 28.8       | 3525       | 24.3       | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.6                    | 4325       | 29.8       | 3700       | 25.5       | 3050       | 21.0       | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.625                  | 4500       | 31.0       | 3875       | 26.7       | 3225       | 22.2       | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.65                   | 4675       | 32.2       | 4050       | 27.9       | 3400       | 23.4       | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.675                  | 4825       | 33.2       | 4225       | 29.1       | 3600       | 24.8       | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| 1.7                    | 5000       | 34.4       | 4400       | 30.3       | 3775       | 26.0       | 3000       | 20.6       | -          | -          | -          | -          |
| 1.725                  | 5175       | 35.7       | 4575       | 31.5       | 3950       | 27.2       | 3200       | 22.0       | -          | -          | -          | -          |
| 1.75                   | 5325       | 36.7       | 4750       | 32.7       | 4150       | 28.6       | 3400       | 23.4       | -          | -          | -          | -          |
| 1.775                  | 5500       | 37.9       | 4925       | 33.9       | 4325       | 29.8       | 3600       | 24.8       | -          | -          | -          | -          |
| 1.8                    | 5675       | 39.1       | 5100       | 35.1       | 4500       | 31.0       | 3800       | 26.2       | 3000       | 20.6       | -          | -          |
| 1.825                  | 5825       | 40.1       | 5275       | 36.3       | 4700       | 32.4       | 4000       | 27.5       | 3225       | 22.2       | -          | -          |
| 1.85                   | 6000       | 41.3       | 5450       | 37.5       | 4875       | 33.6       | 4200       | 28.9       | 3425       | 23.6       | -          | -          |
| 1.875                  | 6175       | 42.6       | 5625       | 38.8       | 5050       | 34.8       | 4400       | 30.3       | 3650       | 25.1       | -          | -          |

**Figura 16.** Tabella di taratura correlata alla prova Windsor.



**Figura 17.** Metodo Windsor: a destra: infissione della sonda; a sinistra: misurazione della profondità di penetrazione

*Prove combinate sclerometro-ultrasuoni-Windsor (Metodo Sonreb-Win):*

Il metodo consiste nell'estensione della procedura Sonreb alla prova Windsor mediante relazioni del tipo (Puccinotti et al., 2007):

$$R_c = a R^\alpha V^\beta L^\gamma \text{ [MPa]} \quad (20)$$

Dove  $L$  è la profondità d'infissione della sonda Windsor e gli altri parametri sono quelli già definiti per la prova Sonreb. Esiste pochissima letteratura tecnica e scientifica su questi metodi combinati; secondo Puccinotti et al., 2007)  $\alpha = 0.60$ ,  $\beta = 0.0401$ ,  $\gamma = 1.997$ ,  $a = 5.390 \cdot 10^{-3}$ .

Limiti della procedura: gli stessi delle prove sclerometriche, ultrasoniche e Windsor.

Standard internazionali di prova: gli stessi delle prove di base.

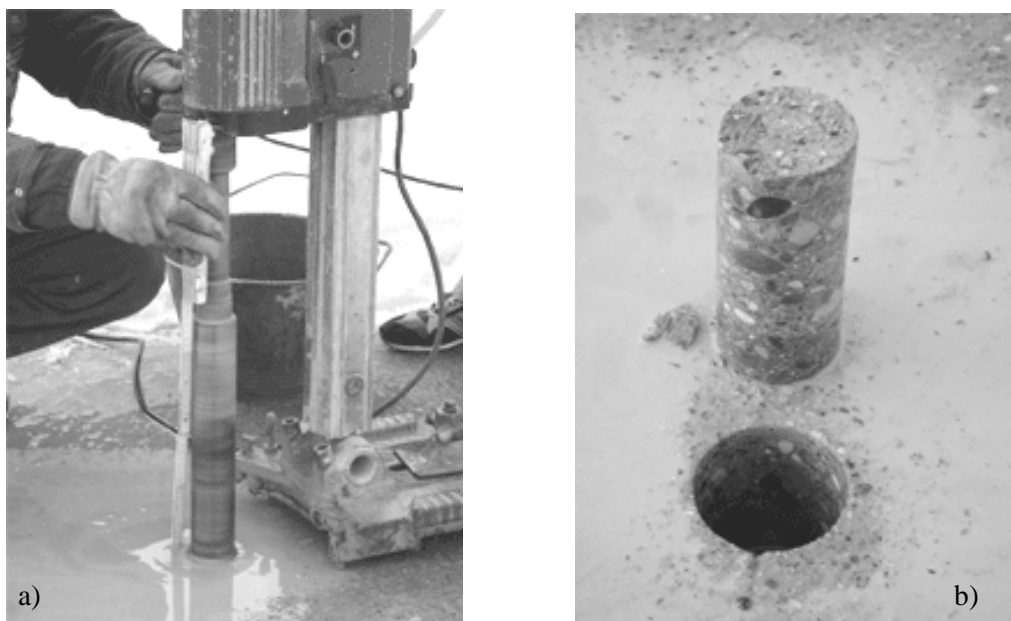
*Carotaggi.*

Il carotaggio consiste nell'estrazione di campioni cilindrici dall'elemento strutturale mediante perforazione con un tubo dotato ad un'estremità di corona diamantata, figura 18. L'operazione richiede il fissaggio alla struttura di una slitta sui cui viene montata la carotatrice; il raffreddamento del carotiere viene ottenuto con acqua, il che rende la carotatura operazione piuttosto invasiva se realizzata in edifici in esercizio. Recentemente sono stati messi sul mercato carotieri a secco, che non necessitano di acqua di raffreddamento, che sono caratterizzati da durate inferiori e da una velocità di carotatura che è 1/3 o inferiore rispetto ai carotieri ad acqua.

Il numero di carotaggi deve essere, di norma, non inferiore a tre. Su ciascuna carota saranno effettuate in laboratorio prove di compressione diretta (ed anche di altro tipo) per determinare la resistenza a compressione del materiale. Il cilindro da sottoporre a prova deve avere, di norma, altezza pari a due volte il diametro. E' possibile provare in compressione diretta anche cilindri con altezza inferiore ma questo richiede l'impiego di coefficienti correttivi che riducono l'affidabilità del risultato complessivo.

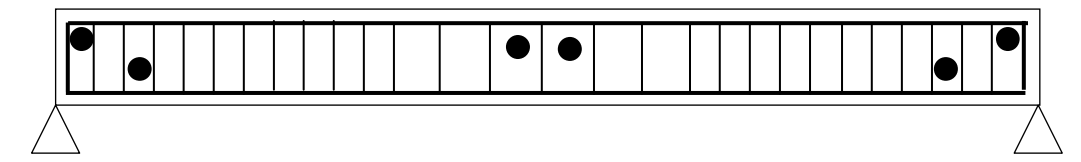
Il diametro delle carote è funzione della dimensione interna tipica  $d$  del materiale e deve essere significativamente maggiore di  $d$ ; per il calcestruzzo si può assumere  $d$  coincidente con il massimo diametro dell'inerte, mediamente 15-20mm, che richiede carote di diametro non inferiore a 50-60mm. Poiché l'asportazione di materiale da una struttura genera un danno non più riparabile, è necessario contenere quanto più possibile il diametro delle carote. Per prove su calcestruzzo il diametro di solito non eccede i 90mm.

L'esecuzione della prova di compressione sulla carota estratta viene preceduta dal taglio del campione prelevato e dalla rettifica delle sue basi, che devono essere piane e parallele.



**Figura 18.** Carotaggio in una struttura di calcestruzzo: a) macchina di perforazione (monta un carotiere da 200mm); b) carota estratta. .

Problema tipico dei carotaggi è l'individuazione delle zone delle strutture in cui eseguire il prelievo. E' necessario scegliere quelle parti delle strutture dove il calcestruzzo è meno sollecitato; esemplificando su una trave semplicemente appoggiata, le parti in cui eseguire i prelievi, figura 19, sono: i) a mezz'altezza in asse (nella zona baricentrica il calcestruzzo è sollecitato da tensioni tangenziali ma in asse ad una trave appoggiata il taglio è nullo); ii) sopra gli appoggi al di sopra della biella compressa del meccanismo arco-tirante; iii) nelle zone di cls al di sotto dell'asse neutro (cls in trazione) dove non vi sono ferri d'armatura ed nelle zone di sollecitazione meno intensa.



**Figura 19.** Trave semplicemente appoggiata: zone dove eseguire carotaggi con il minimo impatto strutturale

Limiti della procedura: Si tratta del metodo migliore per determinare la resistenza a compressione del calcestruzzo in quanto si tratta di una misurazione diretta sul materiale originario della struttura. Il limite al numero di carotaggi risiede, oltre che in limiti operativi ed economici, nel danno alla struttura che deve essere sempre limitato.

Standard internazionali di prova: ASTM C 39 - BS EN 12504-1:2000 - UNI EN 12504-1:2002 - UNI EN 12390-3:2003 - UNI 10766:1999 - ACI 214,4R-03 - DM 14.09.2005 - L. 1086/71

### 3.2 Caratterizzazione della muratura di mattoni pieni

Il meccanismo di collasso della muratura di mattoni pieni evidenzia come sia possibile fornire una stima della resistenza a compressione del materiale a partire dalla resistenza a trazione ed a compressione dei singoli costituenti, ovvero del mattone e della malta. La determinazione della resistenza a compressione della muratura, quindi, presenta due possibili percorsi: i) la determinazione sperimentale delle resistenze di mattoni e malta; ii) la determinazione diretta della



resistenza della muratura. In questo paragrafo verranno descritte le tecniche sperimentali di laboratorio applicate su campioni prelevati dai ponti.

### A- Prove di laboratorio

#### **MATTONI**

Le proprietà meccaniche di un materiale fragile, o quasi-fragile, come è il laterizio, vengono determinate mediante:

- i) prova di flessione su tre punti (Three-Point-Bending test) su un prisma di dimensioni 40x40x160mm ricavato dal mattone come mostrato in figura 20.a, per la determinazione della resistenza<sup>4</sup> a trazione  $f_b^t$  del materiale e del suo modulo elastico in trazione  $E_b^t$ , figura 20.b;
- ii) ciascuna delle due parti in cui il prisma viene spezzato dalla prova di flessione su tre punti, circa 80x40x40mm, viene sottoposta a prova diretta di compressione con piastre di carico quadrate di 40mm di lato, figura 20.c, per determinarne la resistenza  $f_b^c$  ed il modulo elastico  $E_b^c$  a compressione.

Poiché entrambe le prove non prevedono dispositivi idonei ad eliminare l'attrito, sui rulli laterali d'appoggio nel primo caso, sulle piastre di carico nel secondo, per dedurre le resistenze monoassiali teoriche, ovvero in assenza di attrito, come sono quelle considerate nelle eq.ni (12) e (14), è necessario ridurre del 30% i risultati ottenuti mediante le relazioni standard per questo tipo di prove, eq.ni (21) e (22). In assenza di correzioni, la resistenza della muratura verrebbe sovrastimata del 30% circa, come verificato sperimentalmente da diversi autori.

$$f_b^t = 0.7 \left( 1.5 \frac{F_{ult} l}{bh^2} \right) = 16.4 * 10^{-4} F_{ult} \quad [MPa] \quad (21)$$

$$f_b^c = 0.7 \frac{F_{ult}}{ba} = 4.38 * 10^{-4} F_{ult} \quad [MPa] \quad (22)$$

dove  $F_{ult}$  rappresenta il carico massimo applicato nelle prove.

#### **Note**

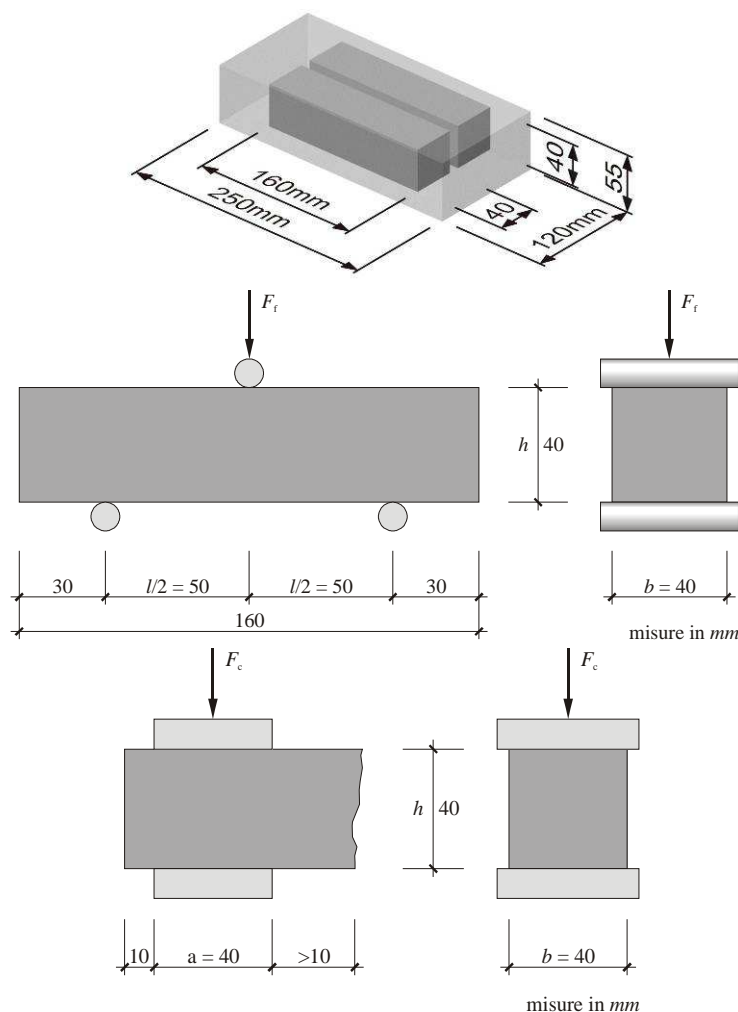
- i) Questa procedura può essere applicata, concettualmente anche alle malte; tuttavia, le dimensioni del prisma rendono questa procedura adeguata per malte di nuova realizzazione, mentre per malte storiche è necessario procedere secondo altre procedure discusse più avanti.
- ii) la prova è influenzata dalla geometria del prisma, in particolare dal parallelismo delle facce opposte;
- iii) la resistenza ed il modulo elastico in compressione possono essere determinati anche mediante prove di compressione diretta su carote di 50-60mm di diametro; tale tecnica, già discussa per il calcestruzzo, non consente però di determinare la resistenza a trazione del materiale;
- iv) la resistenza a trazione può essere determinata anche mediante prove brasiliane (compressione su una generatrice) su cilindri di 50mm di diametro;

Limiti della procedura: ricavare i prismi 40x40x160mm dal mattone può essere relativamente complesso, anche se l'operazione è eseguibile con strumentazione molto semplice.

Standard internazionali di prova: UNI EN 196-1, EN ISO 679, ASTM C109, ASTM C348, ASTM C349

---

<sup>4</sup> Con i pedici  $b$  ed  $m$  si indicano i mattoni (*brick*) e la malta (*mortar*). Tale nomenclatura può generare qualche confusione nella lingua italiana ma viene seguita per mantenere coerenza con la letteratura tecnico-scientifica internazionale e con gli Eurocodici.



**Figura 20.** a) Prismi per TPBt ricavati da un mattone; b) schema della prova TPBt; c) schema della prova di compressione.

### PIETRA

Le proprietà della pietra della muratura possono essere determinate mediante prove di compressione diretta su carote, il cui diametro minimo è funzione della struttura interna della roccia.

Le prove di compressione su carota, per roccia come per calcestruzzo, malta e mattone, possono essere condotte a controllo di spostamento o a controllo di forza<sup>5</sup>, con un gradiente tale da incrementare lo stato tensionale di 0.05 MPa/s.

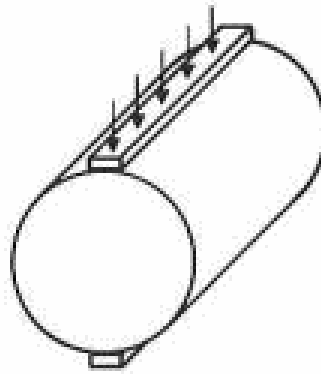
Per la pietra come per altri materiali, sarebbe possibile, concettualmente, eseguire le prove di caratterizzazione della risposta a compressione su terne di cubetti 40x40x40mm di lato impilati l'uno sull'altro. Sebbene la prova sia rivolta ad eliminare gli effetti dell'attrito all'interfaccia malta/mattone, i risultati sono piuttosto dispersi in quanto dipendono fortemente dalla planarità delle facce e dal parallelismo di quelle opposte.

### Prova di trazione indiretta, o prova brasiliana

La resistenza a compressione può anche essere dedotta a partire dalla resistenza a trazione fornita dalla prova brasiliana<sup>6</sup>. Il cilindro, di 50mm di diametro, viene compresso ai due lati opposti

<sup>5</sup> Nel primo caso è possibile riprodurre la fase post-critica della risposta, che invece sfuma nel corso di un controllo del materiale.

di uno stesso diametro lungo strisce di larghezza non inferiore al 5%-10% del diametro  $\phi$  (ottimale:  $\phi/12$ ), figura 21. La prova misura direttamente la resistenza a trazione la quale può essere dedotta indirettamente mediante correlazioni empiriche con la resistenza a trazione. Per materiali fragili, come calcestruzzo ed assimilati, la resistenza a compressione può essere da 5 a 25 volte la resistenza a trazione del materiale, anche se un valore pari a circa 4 è stato rilevato sperimentalmente varie volte.



**Figura 21.** Prova brasiliana

$$f_c = \alpha f_t \text{ [MPa]} \qquad f_t = \frac{2F_{ult}}{\pi \phi l} \text{ [MPa]} \qquad (23.a, .b)$$

dove  $\alpha \in [4, 25]$ , usualmente si assume  $\alpha = 10$ ;  $F_{ult}$  è il carico di collasso;  $\phi$  è il diametro del cerchio;  $l$  è la lunghezza del campione.

#### Note

- i) Questa procedura può essere applicata, concettualmente anche alle malte; tuttavia, le dimensioni del cilindro rendono questa procedura applicabile a malte nuove mentre per malte storiche è necessario procedere secondo altre procedure discusse più avanti.
- ii) Questo tipo di prova non viene usualmente impiegata per determinare la resistenza a trazione del laterizio non per difficoltà concettuali ma per la difficoltà tecnica di ottenere cilindri di 50mm di diametro a partire da mattoni di 55mm di spessore.
- iii) L'affidabilità della prova non è garantita per diametri inferiori a 50mm che, pertanto, non dovrebbero essere impiegati.

Limiti della procedura: sono legati alla disponibilità di campioni cilindrici con diametro di almeno 50mm. In murature storiche è applicabile solo alla pietra, se i blocchi hanno dimensioni sufficienti, ma non alle malte né ai laterizi.

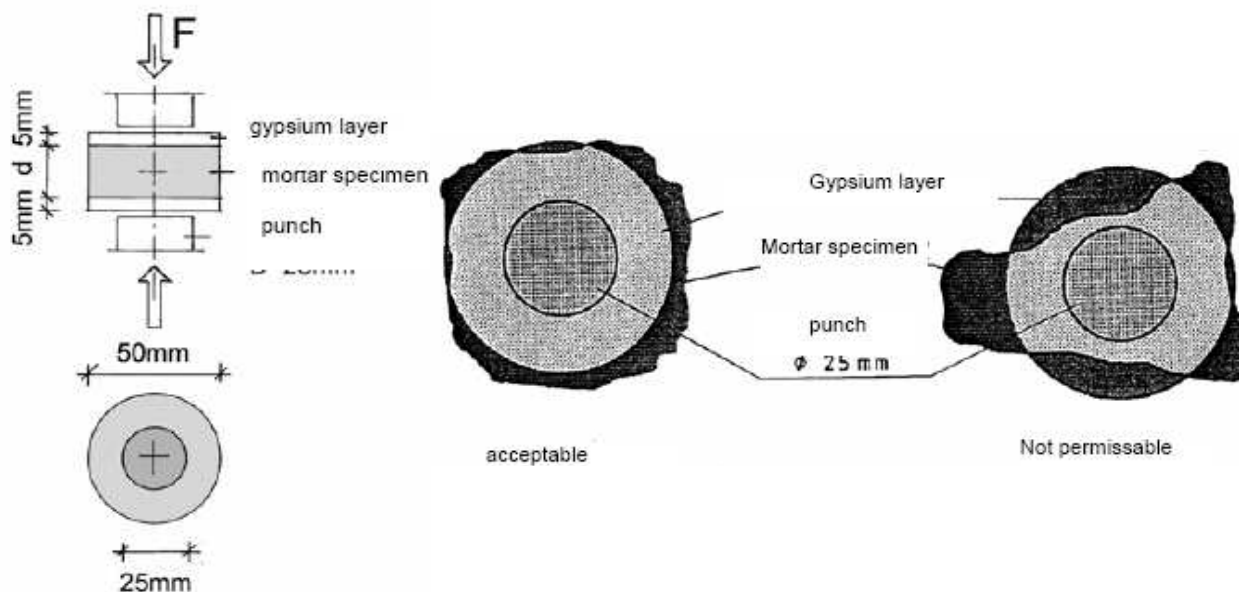
Standard internazionali di prova: ASTM D 3967-2005

#### MALTA

La caratterizzazione della malta di una muratura è resa difficile da due circostanze: i) il ridotto spessore dei giunti, mediamente di 10-15mm ma con spessori non costanti; ii) la difficoltà a prelevare dei campioni dovuti all'aderenza tra la malta ed il mattone.

La stima della resistenza della malta può essere eseguita con lo sclerometro a martello e con opportune curve di taratura, come già discusso.

<sup>6</sup> Termine del gergo tecnico per indicare la compressione a rottura lungo una generatrice di un cilindro di non meno di 50mm di diametro.



**Figura 22.** Prova di punzonamento (punching test) su campioni di malta: a) schema della prova; b) limiti di ammissibilità dei campioni di malta (Pauser, 2004).

In alternativa, è stato proposto e calibrato una prova su piccoli campioni di malta prelevata dalla demolizione di limitate porzioni di muratura, detta *punching test* ovvero *prova di punzonamento*, figura 22. La prova consiste nella compressione di uno strato di malta spesso da 10 a 25mm (tanto quanto un giunto orizzontale) con cilindri di 20-30mm di diametro (consigliato 25mm). La planarità delle superfici d'appoggio viene garantita con una cappatura di gesso (malta imbevuta a rifiuto prima dell'esecuzione della cappatura). Perché la prova sia affidabile, la parte del campione sottoposta a cappatura deve avere un diametro di almeno 50mm, anche se la compressione interesserà un diametro di soli 20-30mm. La prova deve essere eseguita in controllo di spostamento con velocità di circa  $0.0075 \text{ mm s}^{-1}$  mentre per processi di carico in controllo di forza la velocità di carico deve essere di  $0.05 \text{ MPa s}^{-1}$ . Si tratta, quindi, di prove piuttosto lente.

La resistenza a compressione è definita come:

$$f_m^c = 1.96 \frac{F_{ult}}{\pi \phi^2}, \quad (24)$$

dove  $\phi$  è il diametro del punzone.

*Note*

- i) L'eq.ne (24) include gli effetti dell'attrito all'interfaccia punzone/campione e fornisce la resistenza a compressione monoassiale della malta.
- ii) 30 è numero minimo di prove necessario per una elaborazione statistica dei dati; 10 è il numero minimo di prove da eseguire per dedurre una stima della resistenza a compressione della malta.
- iii) Nessuna informazione può essere ricavata sul modulo elastico della malta.

Limiti della procedura. La facilità di esecuzione della prova di compressione, che non richiede attrezzature particolari, è compensata dalla difficoltà di estrazione di porzioni di giunti di malta sufficientemente estesi da poter effettuare la prova. Quando è agevole estrarre i campioni di malta da demolizioni di porzioni limitate di muratura, l'aderenza malta/mattone è così carente da rendere pressoché inutile la prova, in quanto la resistenza a compressione della muratura ne risulta molto bassa.

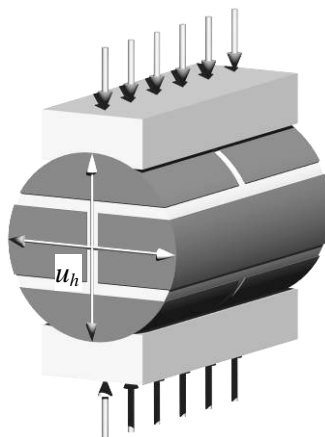
Standard internazionali di prova: UIC 778-3R

## MURATURA DI MATTONI PIENI

Le prove su carote di calcestruzzo consistono in prove di compressione sulle basi di cilindri di 70-100mm di diametro, con diametri il più possibile contenuti per limitare il danno alla struttura. Diametri così piccoli possono essere usati in quanto la dimensione caratteristica del calcestruzzo è, al più, pari alla massima dimensione dell'inerte, ovvero 15-20mm in genere. Inoltre, comprimere la carota sulle basi, ovvero in direzione diversa da quella in cui agisce il carico nella struttura reale, è giustificato dalla sostanziale omogeneità, almeno in media, del materiale.

Per le murature, invece, la dimensione caratteristica è pari alla dimensione trasversale del mattone, ovvero di circa 55-110mm. Pertanto la dimensione di carote rappresentative della muratura, tenuto conto della necessità di limitare i danni alla struttura, è di 150mm. L'impiego di carote di diametro 70-100mm è privo di significato per murature di mattoni pieni: a seconda della posizione di carotaggio la carota può essere rappresentativa del laterizio (che interessa la maggior parte, ma non la totalità della carota) ovvero non essere rappresentativa di nulla.

Poiché la muratura è un materiale fortemente anisotropo, la prova di compressione non è significativa se non viene eseguita nella medesima direzione in cui il carico sollecita la muratura nella struttura d'origine della carota. Poiché le carote vengono prelevate orizzontalmente nelle murature verticali e radicalmente negli archi, la compressione delle carote non può essere applicata sulle basi ma deve essere applicata sulla superficie laterale, figura 23.



**Figura 23.** Prova di compressione laterale su cilindri di grosso diametro (150mm).

Tra la superficie laterale, sostanzialmente regolarizzata dal processo di carotaggio ma non dotata della regolarità necessaria per una compressione uniforme, e la piastra curva di prova viene interposto uno strato di piombo. La velocità di carico deve essere costante e non superiore ad 1/120 del carico massimo previsto per secondo, in modo da arrivare a collasso in circa 2 minuti. Ovviamente la velocità di carico può essere solo stimata in fase iniziale poiché la resistenza della muratura ed il carico massimo, non sono noti.

La resistenza della muratura è fornita dalla relazione:

$$f_M = q \frac{F_{ult}}{\phi l}, \quad (25)$$

dove  $q$  è un fattore di correzione nell'intervallo [1.8, 2.2],  $\phi$  è il diametro del cilindro ed  $l$  la sua lunghezza (valore tipico per  $l$ : 100 - 240 mm). Il valore 1.8 per  $q$  è tipico dei mattoni ordinari e di media resistenza; il valore 2.2 è riferito a mattoni ad alta resistenza (oltre 40 MPa). Sostanzialmente, il fattore  $q$  è pari al fattore di sicurezza  $\gamma_M$  sul materiale

### Note

- i) Prove su carote di diametri inferiori a 100mm non sono significative per la muratura; carote di diametro 40-50mm possono essere significative per il solo laterizio.
- ii) A causa della disomogeneità del materiale e alle ridotte dimensioni<sup>7</sup> del campione la stima del modulo elastico e del coefficiente di Poisson, citati da alcuni riferimenti tecnici e normativi, non è possibile.
- iii) Per le difficoltà operative e tecniche del prelievo, il numero minimo di campioni è 3 ma 6 è il numero di carotature consigliato per una caratterizzazione affidabile della muratura.
- iv) Può essere impiegata anche su muratura di blocchi squadrate di pietra.

Limiti della procedura. I limiti derivano dalle dimensioni della carota che determinano sia un certo indebolimento della struttura (se di dimensioni non massicce), sia tempi di prelievo elevati. Per ridurre i tempi di prelievo spesso viene aumentata la velocità di rotazione del carotiere, ma questo danneggia l'integrità del campione prelevato.

Standard internazionali di prova: UIC 778-3R

### MURATURA DI BLOCCHI DI PIETRA

Può essere caratterizzata con la prova su cilindri di 150mm di diametro se la sua dimensione caratteristica interna è inferiore a 150mm. Altrimenti, è necessario caratterizzare i materiali ed impiegare o le formule fornite dall'Eurocodice 6 (murature) o le tabelle riportate sotto.

### MURATURA IRREGOLARE

Nessuna prova affidabile è disponibile per la muratura irregolare (usualmente di pietrame).

### *Prove con martinetti piatti*

Le prove con martinetti piatti singoli possono essere impiegate per la determinazione lo stato tensionale della muratura, le prove con martinetti doppi per determinare anche la resistenza a compressione  $f_M$  ed il modulo elastico equivalente  $E_M$ .

### *Martinetto piatto singolo*

La prova consiste concettualmente nell'asportazione di un giunto orizzontale di malta, che causa la deformazione della muratura, per decompressione, in prossimità del giunto, nell'inserimento nel giunto di un martinetto piatto<sup>8</sup> e nell'aumento della pressione dell'olio al suo interno fino a ripristinare lo stato di spostamento iniziale della muratura. Tale pressione coincide, a meno di fattori correttivi, con lo stato tensionale originario della muratura. La misurazione degli spostamenti conseguenti lo svuotamento del giunto consente di definire il modulo elastico della muratura come rapporto tra deformazione media e tensione misurata. La misurazione degli spostamenti deve essere eseguita predisponendo dei riferimenti fissi sulla struttura muraria. Operativamente, la prova con martinetto piatto singolo può essere suddivisa in fasi successive:

- i) individuazione di un giunto di malta orizzontale in cui inserire, successivamente, il martinetto piatto;
- ii) circa 200mm al di sopra e altrettanti al di sotto del giunto vengono dei riferimenti fissi vengono ancorati alla muratura, tipicamente basi deformometriche oppure riscontri per LVDT, figura 24;

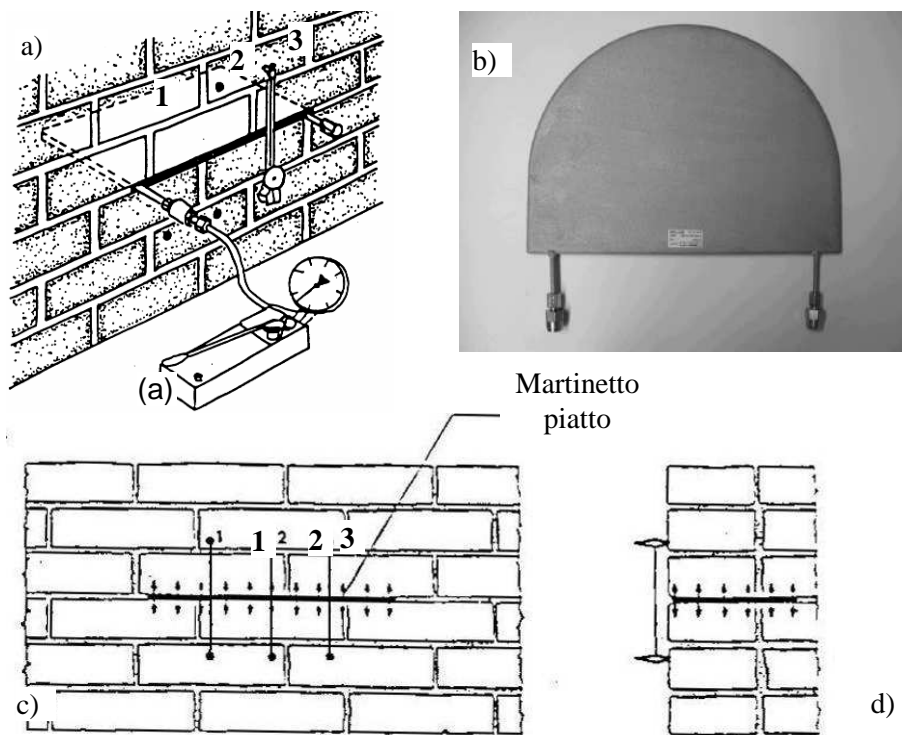
<sup>7</sup> Carote di 150mm di diametro non sono piccole in senso assoluto, lo sono per la determinazione di grandezze che descrivono il comportamento deformativo medio globale del materiale, come le caratteristiche elastiche.

<sup>8</sup> Il termine *martinetto piatto* deriva dal ridotto spessore di questi dispositivi che consente loro di essere inseriti all'interno di un giunto di malta.

- iii) si misura la posizione relativa dei riferimenti (precisione non inferiore a 0.01mm);
- iv) il giunto di malta viene svuotato con un disco al widia;
- v) si misura la posizione relativa dei riferimenti, che risultano essersi avvicinati in quanto la muratura, prima compressa, in corrispondenza del giunto di malta svuotato, si decompri-me nel mentre il giunto di malta viene svuotato;
- vi) nello spazio creato all'interno del giunto di malta, si inserisce il martinetto piatto e si incrementa la pressione del circuito idraulico fino a che le misurazioni della posizione relativa dei riferimenti fissi non dimostrano che lo stato di spostamento originario della muratura non è stato ripristinato. Detta  $p$  la pressione nel circuito idraulico a questo punto della prova, la tensione  $\sigma_c$  nella muratura viene calcolata mediante due coefficienti correttivi:

$$\sigma_c = K_m \cdot K_a \cdot p, \quad (26)$$

dove  $K_m$  è la costante del martinetto piatto (fornita dal produttore del martinetto),  $K_a = A_{\text{martinetto piatto}} / A_{\text{taglio}}$  è il rapporto tra l'area  $A_{\text{taglio}}$  del taglio (giunto di malta svuotato) e la superficie  $A_{\text{martinetto piatto}}$  del martinetto (sempre inferiore alla superficie del taglio).



**Figura 24.** Martinetto piatto singolo: a) schema generale della prova - assonometria; b) martinetto piatto semicircolare; c) schema generale della prova - vista frontale; d) schema generale della prova - sezione.



**Figura 25.** Martinetto piatto singolo: a) esecuzione del taglio; b) inserimento del martinetto piatto; c) aumento della pressione idraulica.

I martinetti piatti consistono essenzialmente in due lamiere metalliche saldate lungo il perimetro con due fori per il collegamento idraulico. Cruciale per la tenuta dello strumento è l'efficacia delle saldature e le deformabilità delle due lamiere. I martinetti piatti possono essere semicircolari ( $\phi=350\text{mm}$ , spessore 4mm) o rettangolari (400x200mm, 240x120mm; 400x120mm).

#### *Martinetto piatto doppio*

La prova con martinetti piatti doppi rappresenta un'estensione concettuale della prova con martino singolo tramite l'impiego di due martinetti sovrapposti verticalmente di 50-100cm, figura 26. I riferimenti vengono disposti tra i due martinetti, con tre riferimenti verticali disposti simmetricamente rispetto ai tagli ed un quarto riferimento orizzontale. Lo stato tensionale viene misurato secondo la medesima procedura già descritta per il martinetto piatto singolo. In più, aumentando la pressione dei due martinetti si può determinare la resistenza a compressione della muratura portando a collasso la porzione di muratura collocata tra i due martini.

Il processo di carico dei due martini non deve essere monotono ma ciclico con carico massimo crescente, figura 27; la curva carico-spostamento viene determinata come involuppo dei picchi dei diversi cicli. Il collasso della muratura viene identificato con il livello di carico cui corrisponde tangente orizzontale, o quasi, nella curva d'involuppo, che non sempre corrisponde ad un collasso visibile sulla muratura.

Il modulo elastico viene determinato dal rapporto tensione/deformazione media della muratura:

$$E_{sec} = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}, \quad (27)$$

dove  $\sigma_i$  ed  $\varepsilon_i$  sono la tensione e la deformazione in corrispondenza dei picchi di carico di ciascun ciclo. Per la difficoltà ad eseguire le misure della posizione relativa dei riferimenti fissi tra i due martinetti, non è possibile determinare il modulo elastico tangente ma solo il modulo secante al termine di ogni ciclo di carico. Ovviamente, i cicli che evidenziano una rigidità nulla del materiale, ovvero che identificano la rottura, non possono essere usati per la determinazione del modulo elastico.

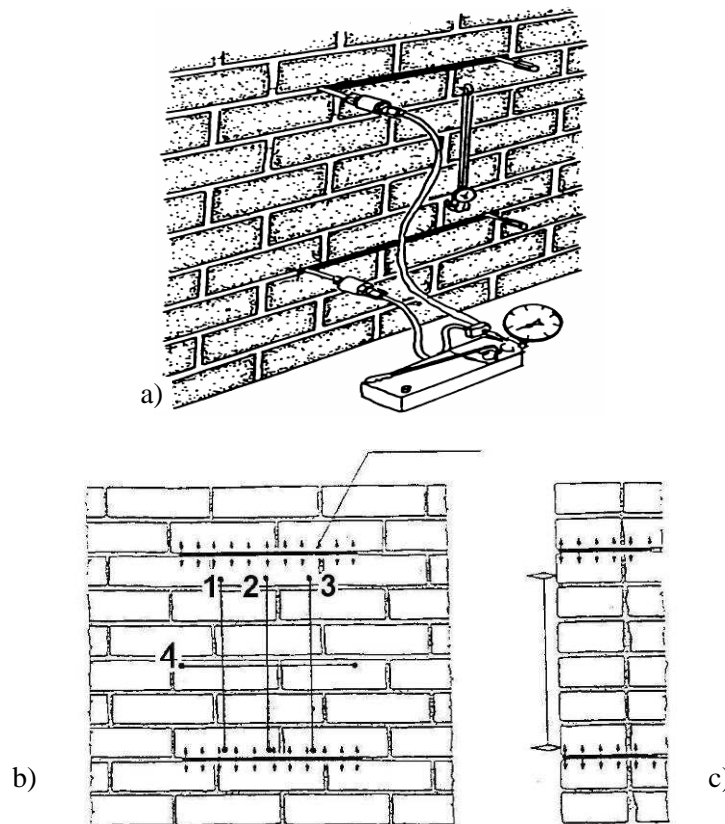
Poiché la porzione di muratura compresa tra i due martinetti non è libera ma connessa, almeno a tergo, con la rimanente parte della muratura, la prova con martinetti piatti non riproduce condizioni monoassiali e conduce a sovrastimare della resistenza a compressione del 10-15% rispetto alle condizioni monoassiali.

Elementi d'incertezza su questa prova derivano da alcune circostanze tecniche:

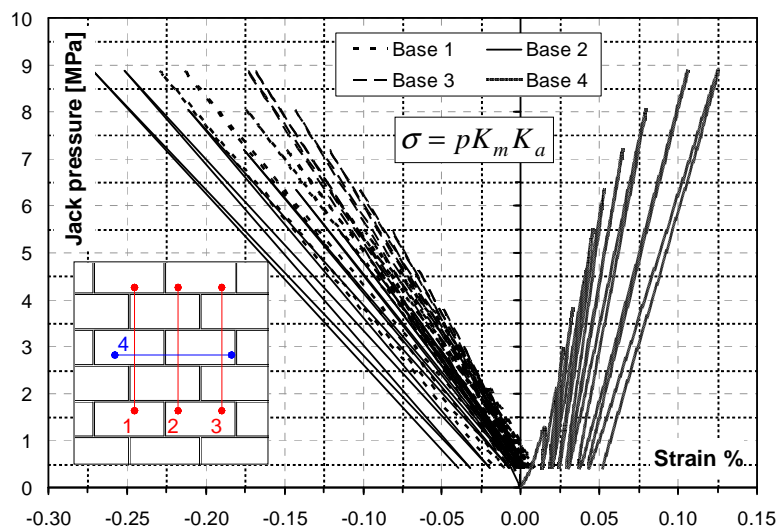
- (i) i riferimenti fissi non tornano mai nella posizione iniziale originaria, per cui la determinazione dello stato tensionale deve essere riferito ad un recupero dello stato di spostamento iniziale inteso in media sui 4 riferimenti;
- (ii) la costante strumentale  $K_m$  non è costante ma varia da 0.8 per bassa pressione a 0.95 per alta pressione nel circuito idraulico;
- (iii) la resistenza a compressione della muratura viene identificata come il livello tensionale a cui corrisponde una rigidità nulla (picchi dei cicli orizzontali, cfr. figura 27), ovvero viene identificata strumentalmente;
- (iv) la rottura della muratura posta tra i martinetti non deve essere considerate come un evento ordinario per questo tipo di prova;



(v) talvolta, per ridurre i tempi ed i costi della prova, i martinetti vengono posti a distanza ravvicinata ed i riferimenti vengono collocati sopra e sotto i martinetti; si tratta di una procedura non standard la cui affidabilità non è dimostrata in quanto la verifica dello stato di spostamento non può avvenire nello spazio tra i due martinetti.



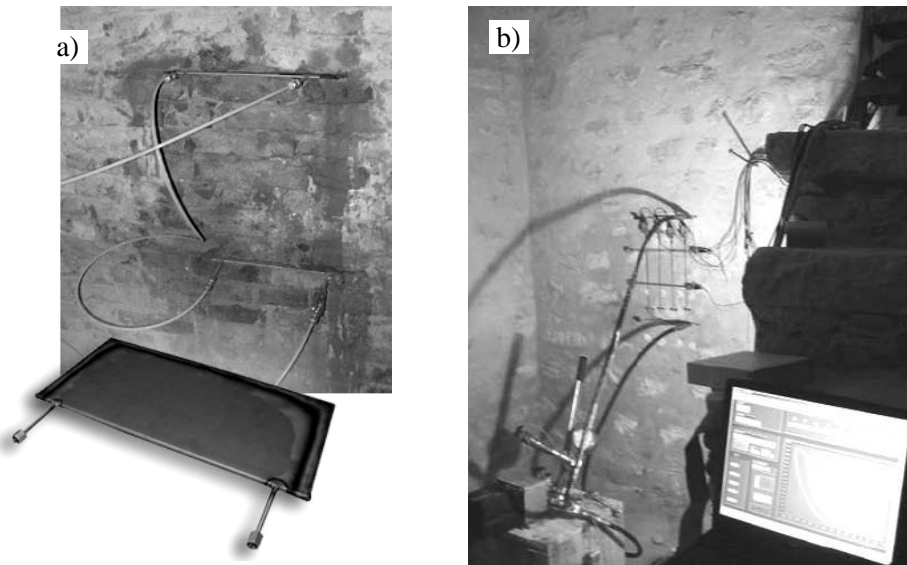
**Figura 26.** Martinetto piatto doppio: a) schema generale della prova - assonometria; c) schema generale della prova - vista frontale; d) schema generale della prova - sezione.



**Figura 27.** Tipica risposta della prova con martinetti piatti doppi.

Limiti della procedura: le prove devono attenersi agli standard internazionali (particolarmente ASTM C1196-91) per fornire risultati significativi. Per evitare macroscopici errori, devono sempre essere accoppiata ad altre tecniche sperimentali per la stima della resistenza della muratura. In taluni casi, con procedure di prova non standardizzate e senza termini di confronto, le prove con martinetti piatti hanno fornito errori superiori al 100%.

Standard internazionali di prova: martinetto piatto singolo: RILEM TC 76, LUM D.2, ASTM C 1196-92, martinetto piatto doppio: RILEM TC 76, LUM D.3, ASTM C 1197-91



**Figura 28.** a) Martinetto piatto rettangolare e posizionamento di due martinetti (riferimenti fissi non visibili); b) dispositivo di prova complessivo, con lettura degli spostamenti sopra e sotto i martinetti.

#### **4. Affidabilità e precisione delle prove: alcune considerazioni**

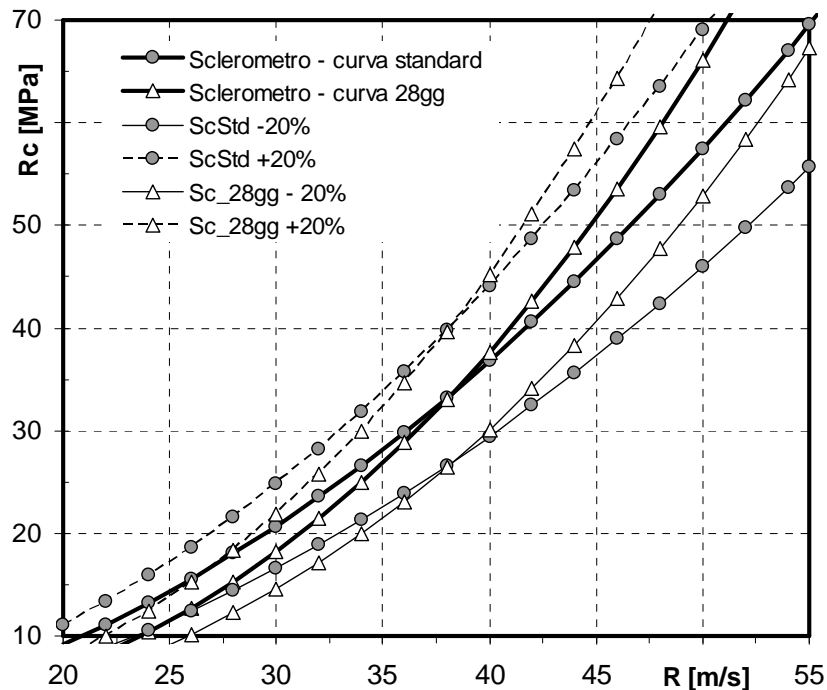
L'affidabilità dei risultati delle prove NDT e MDT su calcestruzzo e muratura di mattoni pieni è legata: i) alla grandezza misurata; ii) agli aspetti tecnologici della prova.

Le prove NDT eseguono misurazioni di grandezze elastiche (modulo elastico e densità di un materiale per le prove ultrasoniche) o di grandezze non direttamente correlabili con la caratteristica meccanica stimata (durezza superficiale nel caso dello sclerometro). Le interpolazioni che correlano i dati misurati alla resistenza a compressione del materiale sono empiriche e basate su una specifica base dati di riferimento. La variabilità dei materiali, calcestruzzi ad altre prestazioni, con diversa granulometrica, ovvero di mattoni con diverso grado e modalità di cottura per la muratura, costituiscono elementi che differenziano gli specifici casi analizzati dalla base dati di riferimento. Ad esempio, la figura 29 riporta la curva d'interpolazione dei dati sclerometrici usata comunemente ed una curva ottenuta recentemente all'Università delle Marche su calcestruzzo a 28gg di maturazione.

Si osserva come nonostante la significativa differenza tra le due curve, evidentemente dovuta ad una taratura eseguita su calcestruzzi di diversa natura, rientri all'interno della fascia di confidenza  $\pm 20\%$ .

Le interpolazioni Sonreb introducono la velocità delle onde ultrasoniche come ulteriore parametro di valutazione della resistenza del calcestruzzo. Le figure 30-32 riportano un confronto delle stime dello sclerometro e dei metodi Sonreb (eqq. 5-10) per un indice di rimbalzo sclerometrico pari a 28mm (figura 30) e per velocità ultrasoniche pari a 4000 e 4400 m/s (figure 31 e 32 rispettivamente). La figura 30 evidenzia che nell'intervallo 3500-4500m/s, quello che realisticamente può essere associato ad un rimbalzo di 28mm, la differenza tra le stime Sonreb e quelle dello sclerometro sono contenute. Le figura 31 ( $v=4000$  m/s) evidenzia come il secondo parametro della stima, la velocità di propagazione delle onde ultrasoniche, consenta di correggere le stime dello sclerometro in misura generalmente contenuta all'interno dell'intervallo di confidenza dello sclerometro. La figura 32 evidenzia invece come, per velocità ultrasoniche relativamente

elevate, le interpolazioni Sonreb siano in grado di correggere in aumento le stime dello sclerometro.



**Figura 29.** Curve d'interpolazione sclerometrica e relativi margini di confidenza ( $\pm 20\%$ )

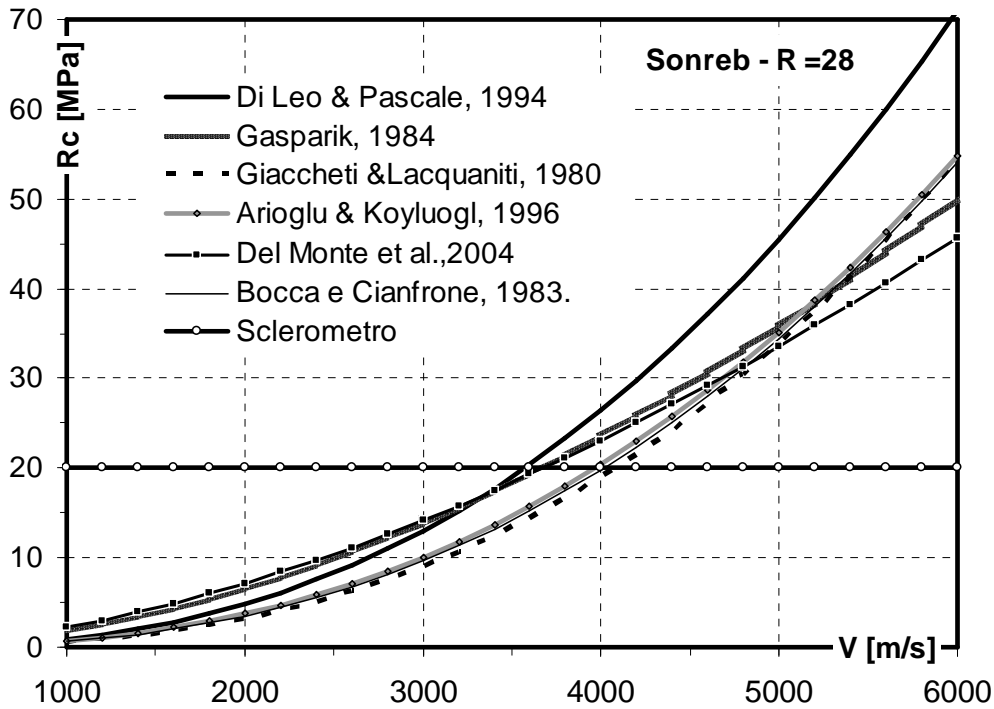
In tutti questi casi, appare evidente come curve di correlazione diverse forniscano risultati sensibilmente diversi conseguenza in parte dell'errore intrinseco in questo tipo di prove, ed in parte della differenza tra i materiali impiegati per la taratura delle curve.

Si ricorda come le prove NDT siano accomunate da un'irrisolvibile contraddizione concettuale: stimano la resistenza sulla base di parametri meccanici in fase elastica o di parametri che con la resistenza di un materiale non hanno correlazione.

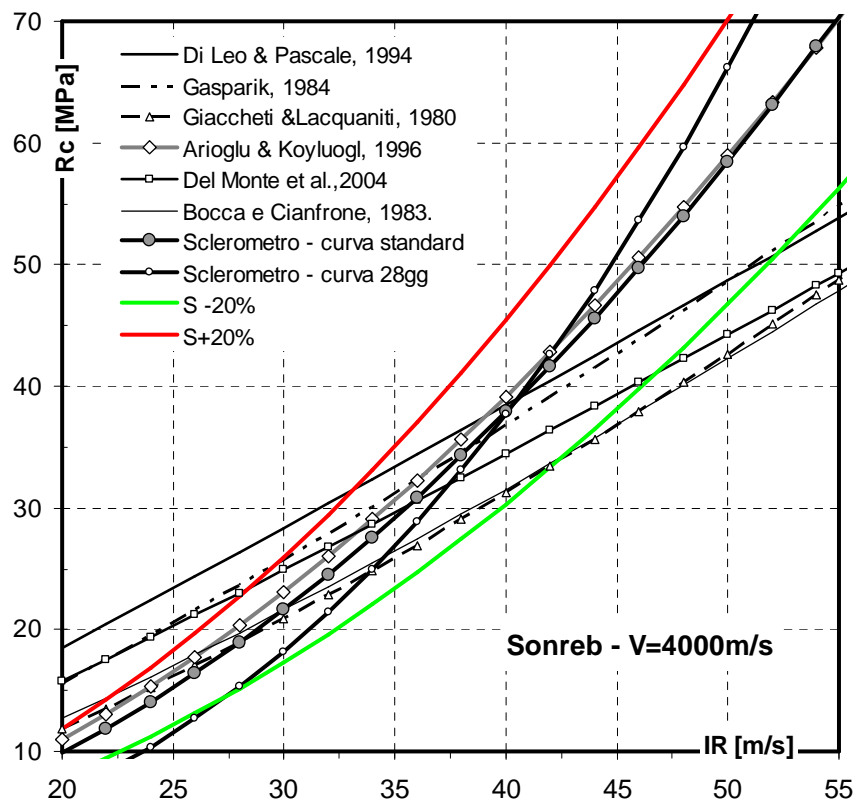
Le prove MDT, invece, consentono di giungere ad una condizione limite ultima del materiale anche se in zone limitate, ed in genere superficiali, dell'elemento strutturale. Sebbene anch'esse spesso misurino proprietà diverse dalla resistenza a compressione (ad esempio: il *pull out* stima la resistenza a trazione del calcestruzzo) possono presentare buona precisione ed affidabilità. Poiché, come si è già discusso, la taratura di una specifica prova sperimentale è strettamente correlata alla base dati di riferimento per la taratura, non è possibile conoscere a priori l'errore di una prova MDT in quanto non è possibile conoscere la differenza tra il materiale oggetto d'indagine ed il materiale della taratura.

Sulla muratura, poi, le incertezze derivate dalla disomogeneità del materiale e dalle specifiche modalità esecutive introducono ulteriori elementi d'incertezza. La prova con martinetti piatti, che è l'unica che stima direttamente la resistenza a compressione della muratura, è affetta da errori legati alle modalità operative: regolarità nel taglio della muratura, deformabilità dei martinetti piatti, disomogeneità della tessitura muraria che possono essere alla base di una risposta irregolare della muratura.

I Metodi Combinati a tre parametri sono ancora in fase sperimentale in quanto le esperienze sul campo sono ancora limitate. Per altro, le indagini con sonda Windsor non trovano quella vasta applicazione nel settore che sarebbe necessario ad una adeguata taratura dei metodi combinati a tre parametri.



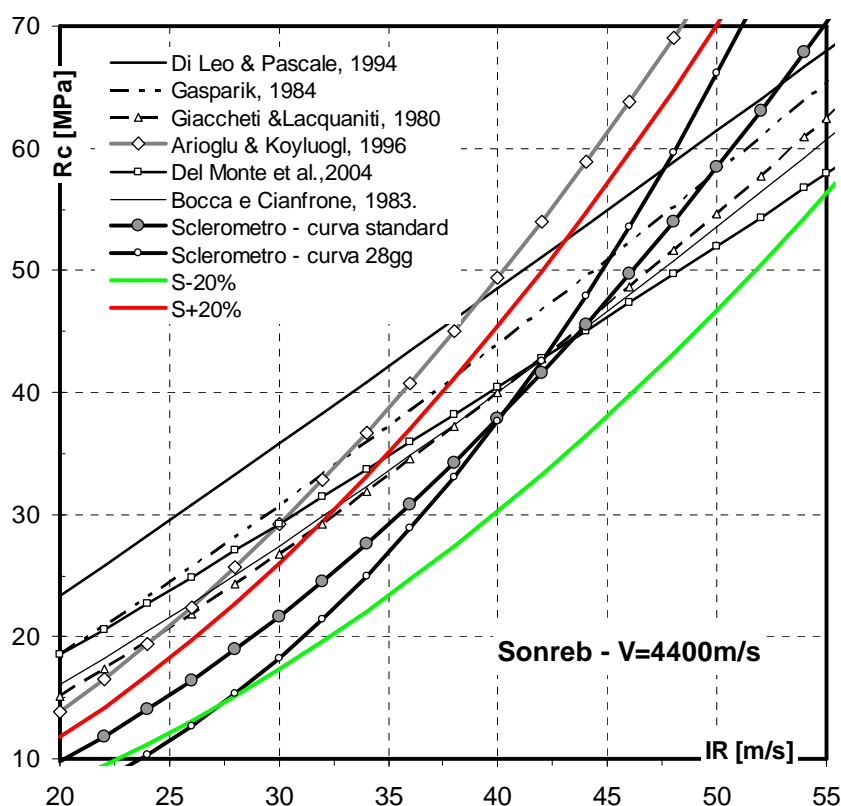
**Figura 30.** Resistenza a compressione del cls per un rimbalzo sclerometrico R=28mm da prove Sonreb e sclerometriche



**Figura 31.** Resistenza a compressione del cls con velocità ultrasonica di 4000 m/s in funzione del rimbalzo sclerometrico

E' necessario che da ogni prova sperimentale in sito si chieda una precisione adeguata alle specifiche modalità di prova. Tra le prove MDT, quelle con sonda Windsor possono essere assunte come riferimento significativo.

Come già discusso, la prova consiste nell'infissione di un "ago" di acciaio nel calcestruzzo sparato da una pistola per mezzo di una carica esplosiva con una tecnica che è esattamente quella delle armi da fuoco. L'entità dell'infissione dipende dall'ortogonalità della traiettoria dell'"ago" rispetto alla superficie del calcestruzzo, ortogonalità che neppure i diversi dispositivi di guida possono garantire. Inoltre, l'impatto con il calcestruzzo determina la distruzione del materiale in un intorno del punto d'impatto, figure 15 e 35, per cui la misurazione richiede l'interposizione di una piastra metallica che scavalchi il cratere formato dall'impatto, figura 17. E' evidente che in queste condizioni, assumendo la superficie del calcestruzzo esterno al cratere d'impatto come riferimento della misurazione, superficie che è mediamente piana ma non esattamente piana, la misurazione della profondità di penetrazione non può avere precisione superiore al valore delle asperità della superficie di calcestruzzo, che è dell'ordine di qualche mm e non di 0.5mm, come il manuale d'uso della sonda Windsor vorrebbe sostenere<sup>9</sup>.



**Figura 32.** Resistenza a compressione del cls con velocità ultrasonica di 4400 m/s in funzione del rimbalzo sclerometrico

## 5. Esempi

In questo paragrafo vengono discussi due esempi di applicazione di alcune delle tecniche NDT e MDT discusse nelle pagine precedenti, uno su calcestruzzo esistente ed uno su muratura di mattoni pieni.

### 5.1 Caratterizzazione del calcestruzzo di una struttura esistente

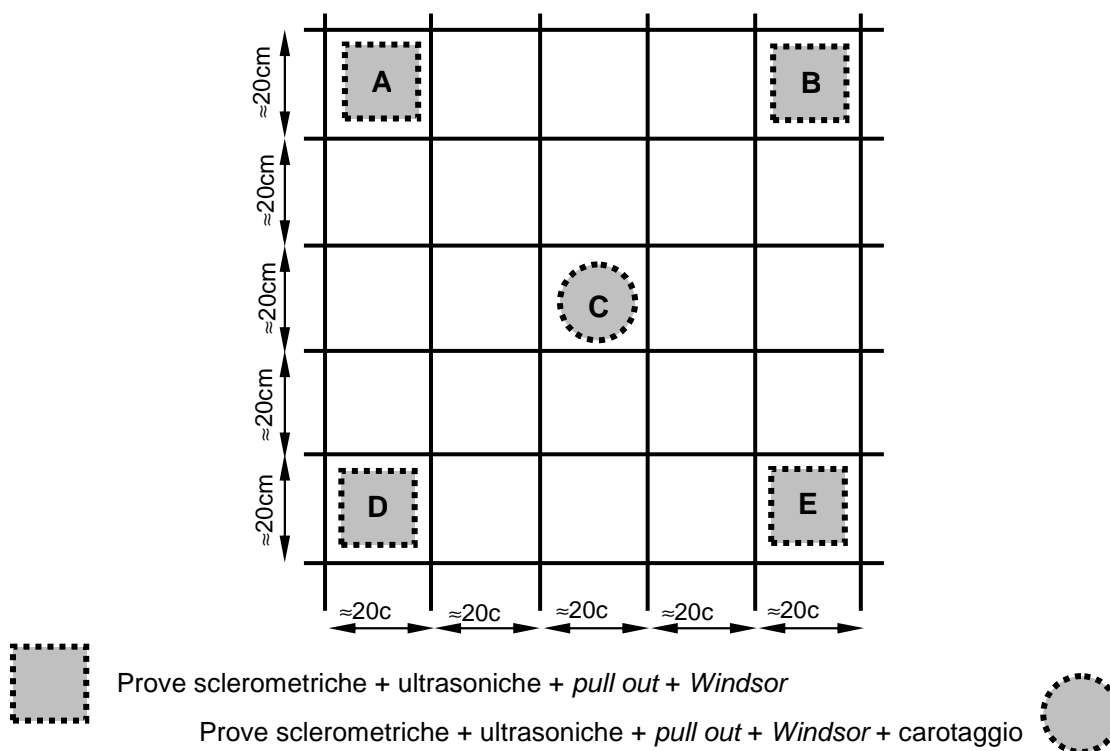
In una struttura esistente in c.a. si è reso necessario caratterizzare la resistenza del calcestruzzo in opera. La struttura, essendo di recente costruzione, presenta diversi aspetti che la

<sup>9</sup> Taluni manuali riportano un intervallo di scansione della profondità di penetrazione di 0.25mm, con una corrispondente scansione degli intervalli di resistenza del calcestruzzo di 0.5MPa, figura 16.

rendevano un ottimo banco di prova per confrontare diverse tecniche NDT e MDT: i) pareti di taglio estese che consentivano di operare su vaste aree senza arrecare danni significativi alla loro resistenza; ii) in fase di costruzione era stata eseguita una vasta campagna di verifiche sui materiali; iii) gli aspetti tecnici degli accertamenti erano considerati prevalenti su quelli economici.

Nelle pareti di taglio, di spessore non inferiore a 30cm, vennero individuate 5 zone da sottoporre a prove NDT (sclerometriche ed ultrasoniche) e MDT (*pull out*, sonda Windsor e carotaggi). In ciascuna delle aree scelte, individuate le armature con l'ausilio di un pacometro, ( $\phi 12$  disposte con maglia quadrata di 20cm di lato) le prove vennero eseguite secondo lo schema di figura 33. All'interno di un quadrato di lato 1m, vengono individuate 5 aree, A, B, C, D ed E disposte come in figura 33. In ogni zona sono state eseguite, nell'ordine, le prove: sclerometriche, ultrasoniche, di *pull out* e con sonda Windsor. Nel punto centrale C è stata prelevata anche una carota di 75mm di diametro.

La preventiva individuazione dei ferri d'armatura ha consentito sia di collocare le diverse prove lontano dalle bare metalliche sia di eseguire i carotaggi senza intercettare e tranciare alcuna barra d'armatura. Il diametro massimo degli aggregati del cls è risultato di 20mm, cosicché il diametro di 75mm delle carote è risultato adeguato alla dimensione degli inerti. Inoltre, la lunghezza delle carote estratte, tutte eseguite con foro passante nei diversi setti, ha consentito di ricavare cilindri con altezza pari a  $2\phi$  dopo la spianatura delle basi; a questo modo, le prove di compressione su carota hanno consentito di desumere direttamente la resistenza cilindrica del calcestruzzo e di ricavarne quella cubica con l'usuale fattore di conversione 1/0.83.



**Figura 33.** Schema generale di localizzazione dei punti di prova.

Nella zona C, la prova di *pull out* è stata eseguita a breve distanza dalla zona prevista per il carotaggio per non compromettere l'altezza della carota estratta. In taluni casi, le prove hanno dovuto essere spostate rispetto alle posizioni previste per evitare interferenze con le barre d'armatura o con zone di calcestruzzo con evidenti disomogeneità.

Le prove con sonda Windsor sono state eseguite, conformemente agli standard di prova, sui tre vertici di un triangolo equilatero al cui centro è stata poi eseguita la prova di *pull out*, figure 34 e 35. La figura 35 evidenzia i crateri d'impatto, di diametro di 4-5cm ca.

La breve distanza tra le diverse prove consente un confronto diretto dell'affidabilità delle diverse prove.

Le tabelle 3-7 riportano il dettaglio delle battute sclerometriche nelle 5 zone; la tabella 8 riassume le prove ultrasoniche e di *pull out*, mentre le tabelle 9-12 sintetizzano i risultati delle prove con sonda *Windsor*. L'elevato numero di prove ha consentito di calcolare alcuni dati statistici per ciascuna prova, particolarmente la deviazione standard ed il coefficiente di variazione (percentuale del valore medio che definisce la deviazione standard).

Nella zona 3 non è stato possibile eseguire prove ultrasoniche in quanto uno dei due lati della parete di taglio non era accessibile



**Figura 34.** Una delle 5 zone d'indagine al termine delle prove.



**Figura 35.** Dettaglio delle prove di *pull out* e delle prove con sonde *Windsor*.

**Tabella 3. Battute sclerometriche della zona 1.**

| ZONA 1   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------|----------------|------------------|----------------|
| <b>serie 1-A</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 32 | 34 | 30 | 29 | 33 | 30 | 34 | 33 | 34 | 35 | 33 | 32 | 32.5        | 28.2           | 6.42             | 23             |
| <b>serie 1-B</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 32 | 33 | 25 | 34 | 33 | 33 | 36 | 32 | 30 | 31 | 32 | 32 | 32.2        | 27.8           | 6.38             | 23             |
| <b>serie 1-C</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 32 | 36 | 37 | 31 | 33 | 32 | 33 | 33 | 36 | 33 | 33 | 36 | 33.7        | 30             | 6.5              | 22             |
| <b>serie 1-D</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 32 | 32 | 36 | 34 | 34 | 32 | 34 | 33 | 32 | 34 | 33 | 33 | 33.1        | 29.5           | 6.45             | 22             |
| <b>serie 1-E</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 32 | 32 | 37 | 33 | 32 | 36 | 32 | 36 | 35 | 18 | 35 | 32 | 33.6        | 30             | 6.5              | 22             |
| <b>Resistenza [MPa] media della zona 1: 29.1</b> |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |

Nella zona 4 non è stato possibile eseguire prove con sonda *Windsor*.

**Tabella 4. Battute sclerometriche della zona 2.**

| ZONA 2   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------|----------------|------------------|----------------|
| <b>serie 2-A</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 34 | 30 | 37 | 35 | 25 | 32 | 36 | 24 | 34 | 34 | 33 | 33 | 32.6        | 29.2           | 6.42             | 22             |
| <b>serie 2-B</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 30 | 28 | 31 | 36 | 27 | 33 | 30 | 28 | 32 | 31 | 30 | 31 | 30.4        | 25             | 6.25             | 25             |
| <b>serie 2-C</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 36 | 34 | 31 | 34 | 28 | 32 | 33 | 34 | 34 | 21 | 32 | 35 | 32.7        | 29.2           | 6.42             | 22             |
| <b>serie 2-D</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 33 | 27 | 17 | 31 | 27 | 23 | 33 | 32 | 33 | 34 | 29 | 32 | 30          | 24             | 6.3              | 26             |
| <b>serie 2-E</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 34 | 30 | 32 | 32 | 33 | 30 | 35 | 39 | 33 | 33 | 28 | 35 | 32.7        | 29.2           | 6.42             | 22             |
| <b>Resistenza [MPa] media della zona 2: 27.3</b> |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |

**Tabella 5. Battute sclerometriche della zona 3.**

| ZONA 3   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------|----------------|------------------|----------------|
| <b>serie 3-A</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 35 | 26 | 33 | 31 | 37 | 32 | 36 | 32 | 32 | 37 | 27 | 24 | 32.1        | 27.5           | 6.42             | 23             |
| <b>serie 3-B</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 30 | 33 | 30 | 28 | 31 | 34 | 32 | 32 | 25 | 32 | 32 | 25 | 30.5        | 25             | 6.05             | 24             |
| <b>serie 3-C</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 26 | 30 | 32 | 32 | 33 | 30 | 31 | 31 | 27 | 39 | 30 | 31 | 30.7        | 25             | 6.05             | 24             |
| <b>serie 3-D</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 31 | 24 | 29 | 28 | 34 | 31 | 37 | 29 | 36 | 33 | 33 | 31 | 31.5        | 27             | 6.35             | 24             |
| <b>serie 3-E</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 37 | 35 | 34 | 37 | 35 | 34 | 36 | 35 | 32 | 36 | 36 | 31 | 35          | 32             | 6.6              | 21             |
| <b>Resistenza [MPa] media della zona 3: 27.3</b> |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |

**Tabella 6. Battute sclerometriche della zona 4.**

| ZONA 4   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------|----------------|------------------|----------------|
| <b>serie 4-A</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 25 | 20 | 30 | 26 | 24 | 20 | 35 | 30 | 30 | 28 | 24 | 25 | 26.2        | 18             | 5.7              | 32             |
| <b>serie 4-B</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 29 | 28 | 28 | 23 | 31 | 23 | 25 | 21 | 29 | 20 | 32 | 29 | 26.6        | 18.5           | 5.85             | 32             |
| <b>serie 4-C</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 20 | 28 | 23 | 23 | 28 | 31 | 28 | 21 | 23 | 23 | 23 | 24 | 24.4        | 16             | 5.5              | 34             |
| <b>serie 4-D</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 21 | 20 | 18 | 23 | 22 | 19 | 22 | 23 | 22 | 29 | 28 | 20 | 22          | 12.5           | 4.9              | 39             |
| <b>serie 4-E</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | Resistenza MPa | Errore medio MPa | Errore medio % |
| Rimbalzo   | 25 | 23 | 19 | 28 | 20 | 29 | 21 | 17 | 23 | 20 | 18 | 19 | 21.6        | 11             | 4.8              | 44             |
| <b>Resistenza [MPa] media della zona 4: 15.2</b> |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                |                  |                |



**Tabella 7. Battute sclerometriche della zona 5.**

| ZONA 5   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                       |                         |                       |  |
|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|--|
| <b>serie 5-A</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                       |                         |                       |  |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | <b>Resistenza MPa</b> | <b>Errore medio MPa</b> | <b>Errore medio %</b> |  |
| Rimbanzo   | 32 | 29 | 26 | 25 | 29 | 22 | 33 | 28 | 25 | 29 | 30 | 31 | <b>28.4</b> | <b>23</b>             | 6.15                    | 27                    |  |
| <b>serie 5-B</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                       |                         |                       |  |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | <b>Resistenza MPa</b> | <b>Errore medio MPa</b> | <b>Errore medio %</b> |  |
| Rimbanzo   | 28 | 27 | 26 | 24 | 26 | 28 | 30 | 30 | 26 | 32 | 34 | 30 | <b>28.3</b> | <b>23</b>             | 6.15                    | 27                    |  |
| <b>serie 5-C</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                       |                         |                       |  |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | <b>Resistenza MPa</b> | <b>Errore medio MPa</b> | <b>Errore medio %</b> |  |
| Rimbanzo   | 30 | 30 | 26 | 31 | 35 | 28 | 35 | 27 | 33 | 30 | 35 | 30 | <b>30.9</b> | <b>24</b>             | 6.2                     | 26                    |  |
| <b>serie 5-D</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                       |                         |                       |  |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | <b>Resistenza MPa</b> | <b>Errore medio MPa</b> | <b>Errore medio %</b> |  |
| Rimbanzo   | 31 | 27 | 23 | 29 | 27 | 24 | 26 | 28 | 31 | 27 | 29 | 29 | <b>27.7</b> | <b>21</b>             | 6.05                    | 29                    |  |
| <b>serie 5-E</b>                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                       |                         |                       |  |
| Battuta n.                                       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Media su 10 | <b>Resistenza MPa</b> | <b>Errore medio MPa</b> | <b>Errore medio %</b> |  |
| Rimbanzo   | 22 | 23 | 26 | 28 | 27 | 24 | 26 | 29 | 21 | 31 | 29 | 27 | <b>26.1</b> | <b>18</b>             | 5.7                     | 32                    |  |
| <b>Resistenza [MPa] media della zona 5: 21.8</b> |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |                       |                         |                       |  |

Nella tabella 13 sono riassunti i valori medi della resistenza del calcestruzzo ottenuti con le diverse tecniche NDT e MDT unitamente ad una valutazione della loro affidabilità mediante il calcolo del coefficiente di variazione. Sono riportate anche le stime della resistenza ottenute con i metodi ultrasonici e Sonreb discussi nelle pagine precedenti.

**Tabella 8. Velocità ultrasonica e stima della resistenza con la prova ultrasonica (eq. 3.c) e di pull out nelle diverse zone.**

| ZONA 1                        |             |      |            |      |      |       |
|-------------------------------|-------------|------|------------|------|------|-------|
| Area                          | 1-A         | 1-B  | 1-C        | 1-D  | 1-E  | Media |
| Velocità <i>m/s</i>           | <b>3207</b> | 4463 | 4406       | 4412 | 4529 | 4453  |
| Resistenza cubica <i>MPa</i>  | 24.4        | 47.2 | 46.0       | 46.1 | 48.6 | 46.9  |
| P martino ( <i>pull out</i> ) | 135         | 133  | 134        | 108  | 128  |       |
| Resistenza cubica <i>MPa</i>  | 50          | 49.5 | 50         | 42.5 | 48   | 48    |
| ZONA 2                        |             |      |            |      |      |       |
| Area                          | 2-A         | 2-B  | 2-C        | 2-D  | 2-E  | Media |
| Velocità <i>m/s</i>           | 4594        | 4689 | /          | 4692 | 4801 | 4689  |
| Resistenza cubica <i>MPa</i>  | 50.0        | 51.6 | /          | 52.1 | 54.6 | 52.1  |
| P martino ( <i>pull out</i> ) | <b>146</b>  | 152  | <b>145</b> | 146  | 168  |       |
| Resistenza cubica <i>MPa</i>  | >52         | 54.5 | >52        | 51.5 | 59   | 55    |
| ZONA 3                        |             |      |            |      |      |       |
| Area                          | 3-A         | 3-B  | 3-C        | 3-D  | 3-E  | Media |
| Velocità <i>m/s</i>           | /           | /    | /          | /    | /    | /     |
| Resistenza cubica <i>MPa</i>  | /           | /    | /          | /    | /    | /     |
| P martino ( <i>pull out</i> ) | 112         | 120  | <b>62</b>  | 126  | 130  |       |
| Resistenza cubica <i>MPa</i>  | 43.5        | 45.5 | >28        | 47   | 49   | 46.25 |
| ZONA 5                        |             |      |            |      |      |       |
| Area                          | 5-A         | 5-B  | 5-C        | 5-D  | 5-E  | Media |
| Velocità <i>m/s</i>           | 4405        | 4399 | /          | 4142 | 4357 | 4326  |
| Resistenza cubica <i>MPa</i>  | 45.9        | 45.8 | /          | 40.6 | 44.9 | 44.3  |
| P martino ( <i>pull out</i> ) | 135         | 133  | 134        | 108  | 128  |       |
| Resistenza cubica <i>MPa</i>  | 50          | 49.5 | 50         | 42.5 | 47.5 | 47.9  |

**Tabella 9. Prove con la sonda Windsor nella zona 1.**

| ZONA 1                   |       |       |       |             |  |       |       |       |              |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------------|--|-------|-------|-------|--------------|
| <b>serie 1-A</b>         |       |       |       |             | <b>serie 1-B</b>                                     |       |       |       |              |
| Prova n.                 | 1     | 2     | 3     | Media su 3  | Battuta n.   | 1     | 2     | 3     | Media su 3   |
| Penetrazione             | 19.00 | 18.25 | 17.25 | <b>18.2</b> | Penetrazione   | 18.50 | 16.75 | 18.75 | <b>18.0</b>  |
| Resistenza stimata [MPa] | 46.9  | 43.6  | 39.2  | <b>43.2</b> | Resistenza stimata [MPa]                             | 44.7  | 37.3  | 45.8  | <b>42.6</b>  |
| <b>serie 1-C</b>         |       |       |       |             | <b>serie 1-D</b>                                     |       |       |       |              |
| Battuta n.               | 1     | 2     | 3     | Media su 3  | Battuta n.   | 1     | 2     | 3     | Media su 3   |
| Penetrazione             | 18.00 | 16.75 | 18.75 | <b>17.8</b> | Penetrazione   | 17.50 | 17.75 | 19.00 | <b>18.1</b>  |
| Resistenza stimata [MPa] | 42.5  | 37.3  | 45.8  | <b>41.9</b> | Resistenza stimata [MPa]                             | 40.9  | 41.6  | 46.9  | <b>43.1</b>  |
| <b>serie 1-E</b>         |       |       |       |             |  |       |       |       |              |
| Battuta n.               | 1     | 2     | 3     | Media su 3  | <b>Resistenza [MPa] media della zona 1:</b>          |       |       |       | <b>42.33</b> |
| Penetrazione             | 17.25 | 17.75 | 17.75 | <b>17.6</b> | <b>Deviazione standard [MPa]:</b>                    |       |       |       | <b>3.24</b>  |
| Resistenza stimata [MPa] | 39.2  | 41.6  | 41.6  | <b>40.8</b> | <b>Coefficiente di variazione [%]:</b>               |       |       |       | <b>7.7</b>   |
|                          |       |       |       |             | <b>Resistenza [MPa] caratteristica della zona 1:</b> |       |       |       | <b>41.4</b>  |

**Tabella 10. Prove con la sonda Windsor nella zona 2.**

| ZONA 2                   |       |       |       |             |  |       |       |       |              |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------------|--|-------|-------|-------|--------------|
| <b>serie 2-A</b>         |       |       |       |             | <b>serie 2-B</b>                                     |       |       |       |              |
| Prova n.                 | 1     | 2     | 3     | Media su 3  | Battuta n.   | 1     | 2     | 3     | Media su 3   |
| Penetrazione             | 17.25 | 19.00 | 18.00 | <b>18.1</b> | Penetrazione   | 18.50 | 17.75 | 19.00 | <b>18.4</b>  |
| Resistenza stimata [MPa] | 39.2  | 46.9  | 42.5  | <b>42.9</b> | Resistenza stimata [MPa]                             | 44.7  | 41.6  | 46.9  | <b>44.4</b>  |
| <b>serie 2-C</b>         |       |       |       |             | <b>serie 2-D</b>                                     |       |       |       |              |
| Battuta n.               | 1     | 2     | 3     | Media su 3  | Battuta n.   | 1     | 2     | 3     | Media su 3   |
| Penetrazione             | 18.25 | 18.25 | 18.50 | <b>18.3</b> | Penetrazione   | 18.50 | 18.50 | 19.75 | <b>18.9</b>  |
| Resistenza stimata [MPa] | 43.6  | 43.6  | 44.7  | <b>44.0</b> | Resistenza stimata [MPa]                             | 44.7  | 44.7  | 50.1  | <b>46.5</b>  |
| <b>serie 2-E</b>         |       |       |       |             |  |       |       |       |              |
| Battuta n.               | 1     | 2     | 3     | Media su 3  | <b>Resistenza [MPa] media della zona 2:</b>          |       |       |       | <b>44.92</b> |
| Penetrazione             | 18.50 | 19.00 | 19.50 | <b>19.0</b> | <b>Deviazione standard [MPa]:</b>                    |       |       |       | <b>2.78</b>  |
| Resistenza stimata [MPa] | 44.7  | 46.9  | 49.0  | <b>46.9</b> | <b>Coefficiente di variazione [%]:</b>               |       |       |       | <b>6.2</b>   |
|                          |       |       |       |             | <b>Resistenza [MPa] caratteristica della zona 2:</b> |       |       |       | <b>44.1</b>  |

**Tabella 11. Prove con la sonda Windsor nella zona 3.**

| ZONA 3                   |       |       |       |             |  |       |       |       |              |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------------|--|-------|-------|-------|--------------|
| <b>serie 3-A</b>         |       |       |       |             | <b>serie 3-B</b>                                     |       |       |       |              |
| Prova n.                 | 1     | 2     | 3     | Media su 3  | Battuta n.   | 1     | 2     | 3     | Media su 3   |
| Penetrazione             | 18.75 | 18.25 | 18.50 | <b>18.5</b> | Penetrazione   | 17.75 | 19.25 | 18.25 | <b>18.4</b>  |
| Resistenza stimata [MPa] | 45.8  | 43.6  | 44.7  | <b>44.7</b> | Resistenza stimata [MPa]                             | 41.6  | 48.0  | 43.6  | <b>44.4</b>  |
| <b>serie 3-C</b>         |       |       |       |             | <b>serie 3-D</b>                                     |       |       |       |              |
| Battuta n.               | 1     | 2     | 3     | Media su 3  | Battuta n.   | 1     | 2     | 3     | Media su 3   |
| Penetrazione             | 17.50 | 18.50 | 17.50 | <b>17.8</b> | Penetrazione   | 19.00 | 18.25 | 18.00 | <b>18.4</b>  |
| Resistenza stimata [MPa] | 40.9  | 44.7  | 40.9  | <b>42.2</b> | Resistenza stimata [MPa]                             | 46.9  | 43.6  | 42.5  | <b>44.3</b>  |
| <b>serie 3-E</b>         |       |       |       |             |  |       |       |       |              |
| Battuta n.               | 1     | 2     | 3     | Media su 3  | <b>Resistenza [MPa] media della zona 3:</b>          |       |       |       | <b>43.85</b> |
| Penetrazione             | 18.50 | 18.50 | 17.75 | <b>18.3</b> | <b>Deviazione standard [MPa]:</b>                    |       |       |       | <b>2.12</b>  |
| Resistenza stimata [MPa] | 44.7  | 44.7  | 41.6  | <b>43.7</b> | <b>Coefficiente di variazione [%]:</b>               |       |       |       | <b>4.8</b>   |
|                          |       |       |       |             | <b>Resistenza [MPa] caratteristica della zona 3:</b> |       |       |       | <b>43.2</b>  |

**Tabella 12. Prove con la sonda Windsor nella zona 5.**

| ZONA 5                   |       |       |       |             |  |       |       |       |              |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------------|--|-------|-------|-------|--------------|
| <b>serie 5-A</b>         |       |       |       |             | <b>serie 5-B</b>                                     |       |       |       |              |
| Prova n.                 | 1     | 2     | 3     | Media su 3  | Battuta n.   | 1     | 2     | 3     |              |
| Penetrazione             | 18.25 | 16.75 | 18.50 | <b>17.8</b> | Penetrazione   | 17.75 | 19.50 | 18.00 |              |
| Resistenza stimata [MPa] | 43.6  | 37.3  | 44.7  | <b>41.9</b> | Resistenza stimata [MPa]                             | 41.6  | 49.0  | 42.5  |              |
| <b>serie 5-C</b>         |       |       |       |             | <b>serie 5-D</b>                                     |       |       |       |              |
| Battuta n.               | 1     | 2     | 3     | Media su 3  | Battuta n.   | 1     | 2     | 3     |              |
| Penetrazione             | 19.00 | 18.25 | 19.50 | <b>18.9</b> | Penetrazione   | 16.75 | 18.00 | 18.25 |              |
| Resistenza stimata [MPa] | 46.9  | 43.6  | 49.0  | <b>46.5</b> | Resistenza stimata [MPa]                             | 37.3  | 42.5  | 43.6  |              |
| <b>serie 5-E</b>         |       |       |       |             |  |       |       |       |              |
| Battuta n.               | 1     | 2     | 3     | Media su 3  | <b>Resistenza [MPa] media della zona 5:</b>          |       |       |       | <b>43.27</b> |
| Penetrazione             | 18.25 | 18.50 | 17.25 | <b>18.0</b> | <b>Deviazione standard [MPa]:</b>                    |       |       |       | <b>3.54</b>  |
| Resistenza stimata [MPa] | 43.6  | 44.7  | 39.2  | <b>42.5</b> | <b>Coefficiente di variazione [%]:</b>               |       |       |       | <b>8.2</b>   |
|                          |       |       |       |             | <b>Resistenza [MPa] caratteristica della zona 5:</b> |       |       |       | <b>42.2</b>  |