



**Prove Non Distruttive e Prove Moderatamente Distruttive
per la caratterizzazione meccanica del calcestruzzo in opera**

Prof. Ing. Antonio Brenich Ph.D.

Direttore Tecnico del Sistema dei Laboratori DICCA

Indice	pag.
1. Introduzione.....	“ 1
2. Prove Non Distruttive.....	“ 2
2.1 Prove sclerometriche (Schmidt Hammer Tets).....	“ 2
2.2 Prove soniche/ultrasoniche.....	“ 5
2.3 Metodi combinati sclerometro-ultrasuoni: il metodo SONREB.....	“ 7
3. Prove Moderatamente Distruttive.....	“ 8
3.1 Prove di Pull-Out.....	“ 8
3.1.1 LOK e CAPO test.....	“ 11
3.2 Prove penetrometriche: la sonda Windsor.....	“ 12
3.3 Prove combinate sclerometro-ultrasuoni-Windsor (Metodo Sonreb-Win).....	“ 12
3.4 Pull Off (Bond Test).....	“ 15
3.5 Carotaggi.....	“ 16
4. Affidabilità e precisione delle prove: alcune considerazioni.....	“ 17
5 Esempio: Caratterizzazione del calcestruzzo di una costruzione esistente.....	“ 21
Riferimenti generali e normativi.....	“ 27

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 questa sede 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 – Non Destructive Tests

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 Prove sclerometriche (Schmidt Hammer Tests)

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.

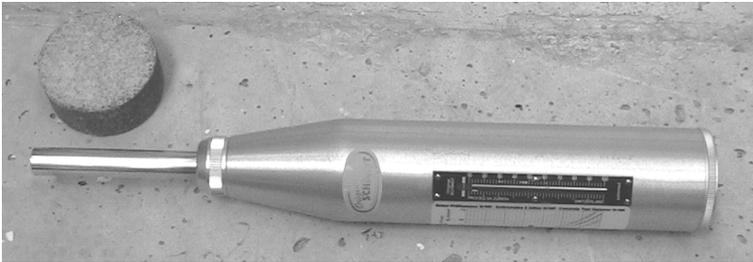


Figura 1. Sclerometro Schmidt ad ago estratto



Figura 2. Sclerometro post-impatto (superficie levigata) con indicatore a metà scala.

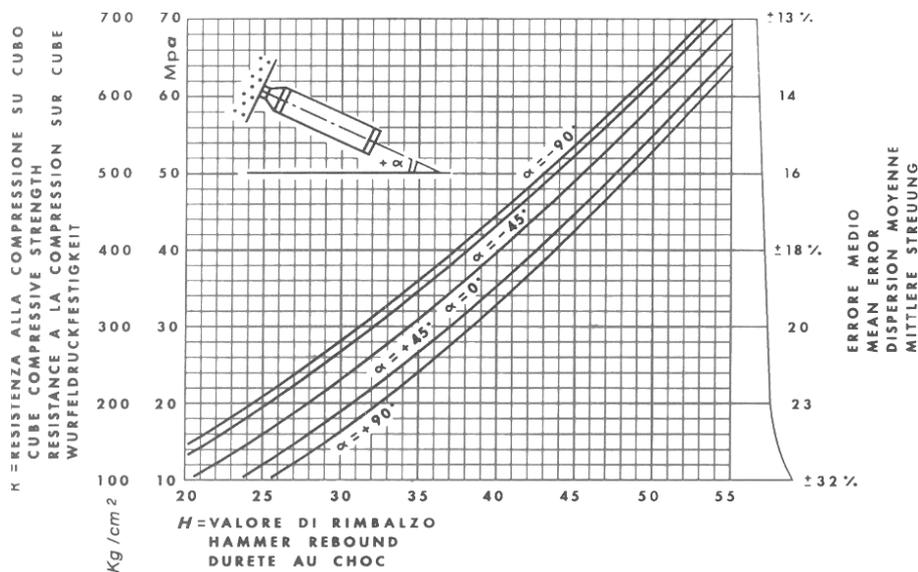


Figura 3. Curva di taratura.

La durezza superficiale viene stimata sulla base del rimbalzo di una massa nota che colpisce la superficie del materiale con energia predefinita¹. 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 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.

Pulita una superficie di circa 25x25 cm nell'area dove eseguire la prova, figura 2, 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.

Le curve di correlazione rimbalzo (detto anche *indice sclerometrico*) – resistenza a compressione del materiale sono non lineari con equazione del tipo:

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

¹ L'energia dello sclerometro è pari a 2.207 N*m per il modello N (standard per CLS, $R_c \in [10, 70]$ MPa, 0.735 N*m per il modello L depotenziato (da roccia), 29.43 N*m per il modello M potenziato (da pavimentazione stradale in cls).

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 3, rendono accettabili anche curve di taratura di tipo lineare ($b=1$).

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: Per quanto sia innegabile la velocità esecutiva della prova e la sua grande economicità, 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. La figura 4 confronta alcune curve di calibrazione reperibili in letteratura (quella classica di Schmidt, spesso riportata sullo stesso strumento, e l due curve estreme) con una serie di dati sperimentali: la differenza delle diverse curve di calibrazione ottenute e la dispersione dei dati rilevati dimostra che i fattori incontrollabili che incidono sulla prova sclerometrica sono numerosi e di rilevante impatto sul risultato finale, al punto che sorgono seri dubbi sull'effettiva utilità di questo tipo di prova.

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

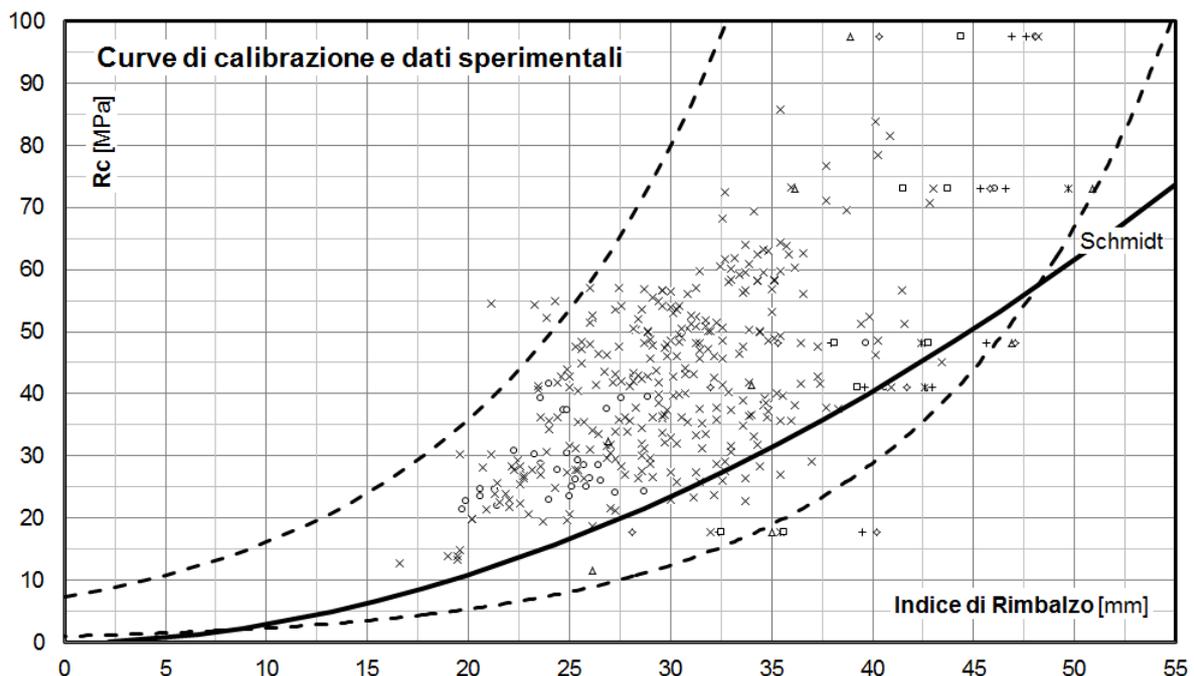


Figura 4. Dati sperimentali, curva di calibrazione di Schmidt e due alter curve (estreme) reperibili in letteratura.

2.2 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 5, 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 5; v) cavità e superfici di discontinuità, porosità.

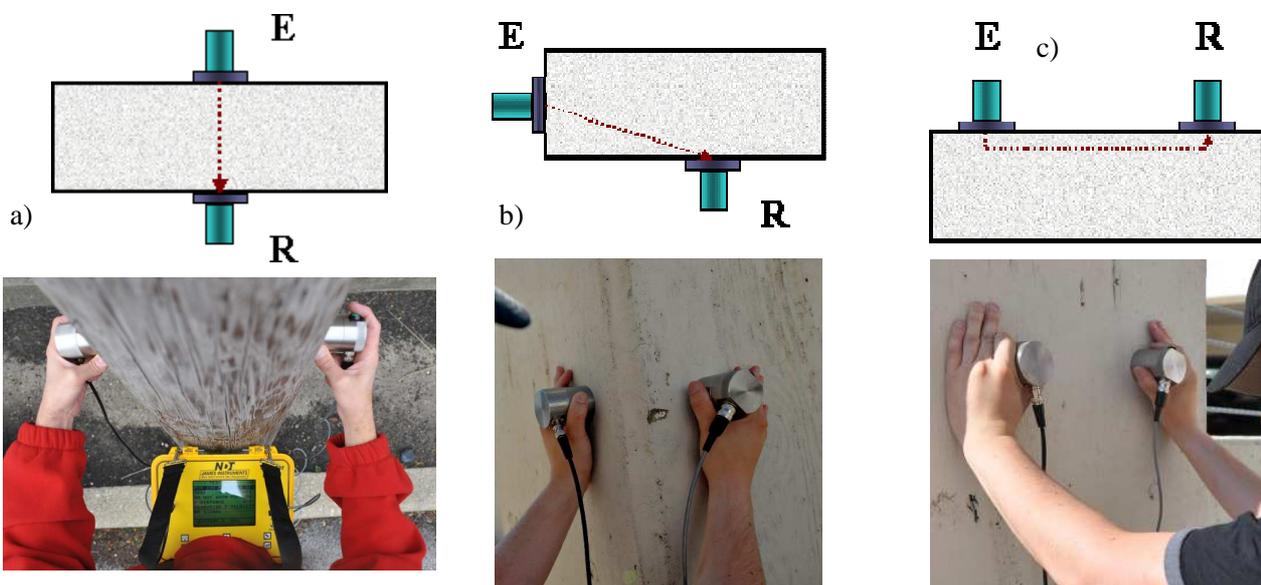


Figura 5. Schema di esecuzione della prova sonica. Trasmissione a) diretta; b) semidiretta; c) indiretta.
 E: emettitore; R: ricevitore.

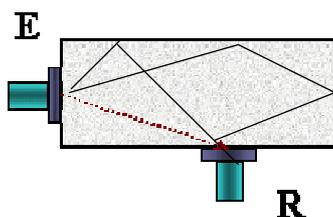


Figura 6. Riflessioni multiple sulle superfici dell'elemento strutturale.

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 ms^{-1} , ν il modulo (dinamico) di Poisson, ρ la densità del mezzo in 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 soniche 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 soniche 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 ($a=1.88E-22$, $b=6.184$ e $c=3.8E-5$, $d=9.66$ 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, le curve di correlazione reperibili nella letteratura scientifica, figura 6, non consentono d'individuare una curva unica. Pertanto, si preferisce, nel caso delle prove ultrasoniche, limitare il giudizio a stime meno dettagliate, come quelle di tabella 2.

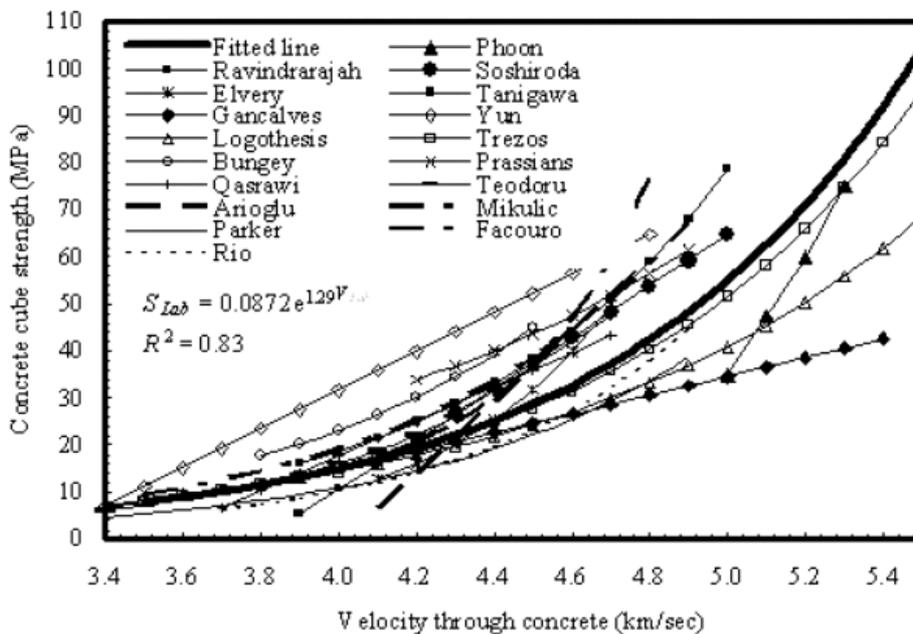


Figura 7. Curve di correlazione velocità ultrasonica-resistenza del calcestruzzo reperibili nella letteratura scientifica.

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 - 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 - EN 12223:2001 - EN 12668-2:2004 - EN 13860-2:2003 - EN 14127:2004 - ENV 583-6:2001 - EN 1330-9:2002 - EN 13477-1:2003 - EN 13477-2:2003 - EN 583-1:2004 - UNI EN 583-2 :2004 - EN 583-3:1998 - EN 583-4:2004 - EN 583-5:2004

2.3 Prove combinate sclerometro-ultrasuoni (Metodo SonReb):

Alcuni ricercatori ritengono che combinando prove sclerometriche e ultrasoniche (Sonic + Rebound) 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 con relazioni del tipo (Di Leo e Pascale, 1994):

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

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 8 sono dedotte da relazioni del tipo (4).

In letteratura le interpolazioni SonReb più diffuse sono elencate di seguito

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

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

$$R_c = 7.695 * 10^{-11} R^{1.4} V^{2.6} \quad [\text{MPa, m/s}] \quad \text{R. Giacchetti, L. Lacquaniti (1980)} \quad (7)$$

$$R_c = 1.53 * 10^{-3} (R^3 V^4)^{0.611} \quad [\text{MPa, km/s}] \quad \text{E. Arioğlu, O. Köylüoğlu (1996)} \quad (8)$$

$$R_c = 4.40 * 10^{-7} (R^2 V^3)^{0.5634} \quad [\text{MPa, m/s}] \quad \text{E. Del Monte et al. (2004)} \quad (9)$$

$$R_c = 2.756 * 10^{-10} R^{1.311} V^{2.487} \quad [\text{MPa, m/s}] \quad \text{Bocca e Cianfrone (1983)} \quad (10)$$

$$R_c = 9.27 * 10^{-11} R^{1.4} V^{2.6} \quad [\text{MPa, m/s}] \quad \text{RILEM (1989)} \quad (11)$$

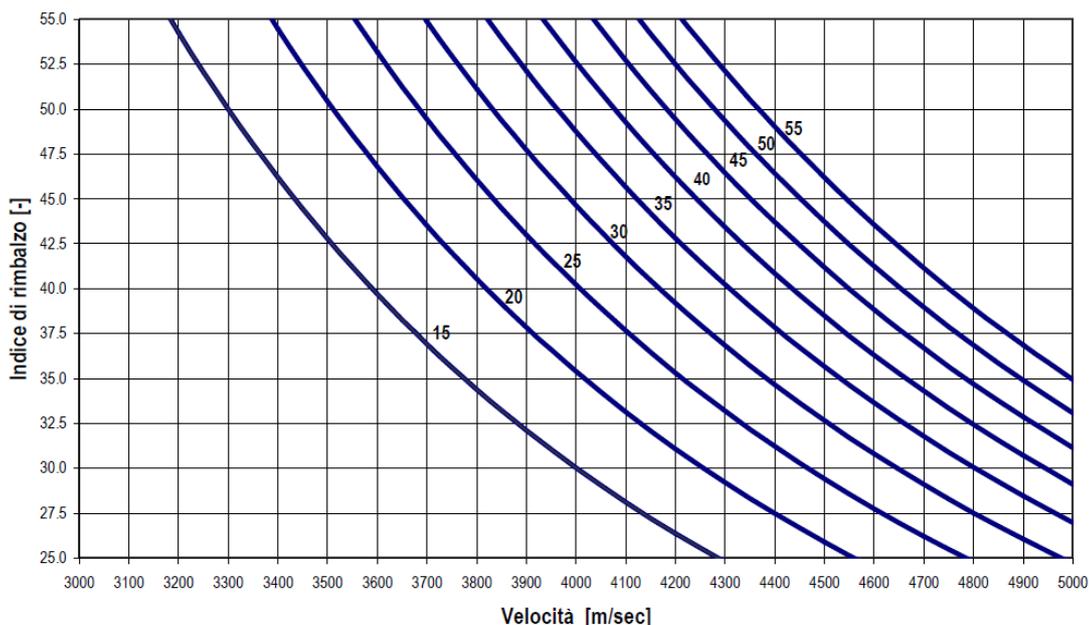


Figura 8. Curve di correlazione velocità di propagazione delle onde soniche – resistenza del calcestruzzo.

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

3 Prove Moderatamente Distruttive – Moderately Destructive Tests

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 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 9. La barra viene estratta insieme ad un cono di calcestruzzo, figura 10, 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. La figura 11 mostra l'attrezzatura impiegata.

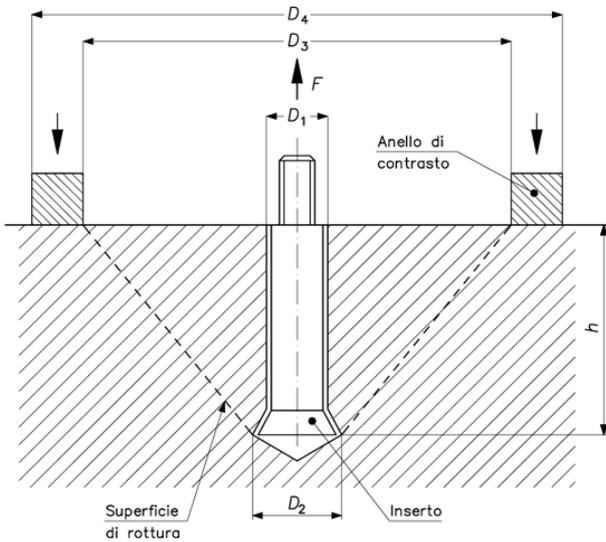


Figura 9. Schema della prova di *pull out*.



Figura 10. Martino idraulico di estrazione e coni di calcestruzzo estratti

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

$$R_c = aF + b \text{ [MPa]} \quad (12)$$

$$R_c = \frac{cF^2 + dF + e}{f} \text{ [MPa]} \quad (13)$$

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, $c = -12.5E-6$, $d = 0.157$, $e = 10$, $f = 10$).

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 errore: l'estrazione del cono di calcestruzzo potrebbe non verificarsi e con la sola estrazione del tassello di ancoraggio: in questi casi la resistenza a compressione del materiale non può essere determinata e le relazioni (12 e 13) che forniscono, al più, un minorante della resistenza a compressione del materiale.

Recentemente è stato messo a punto e commercializzato un diverso tipo di tassello (BOVIAR B15G) in grado di eseguire correttamente (con estrazione del cono) prove di pull-out anche all'intradosso delle travi (zona di cls fessurato), figura 12. Le curve di calibrazione sono distinte per diversi stati tensionali, figura 13.

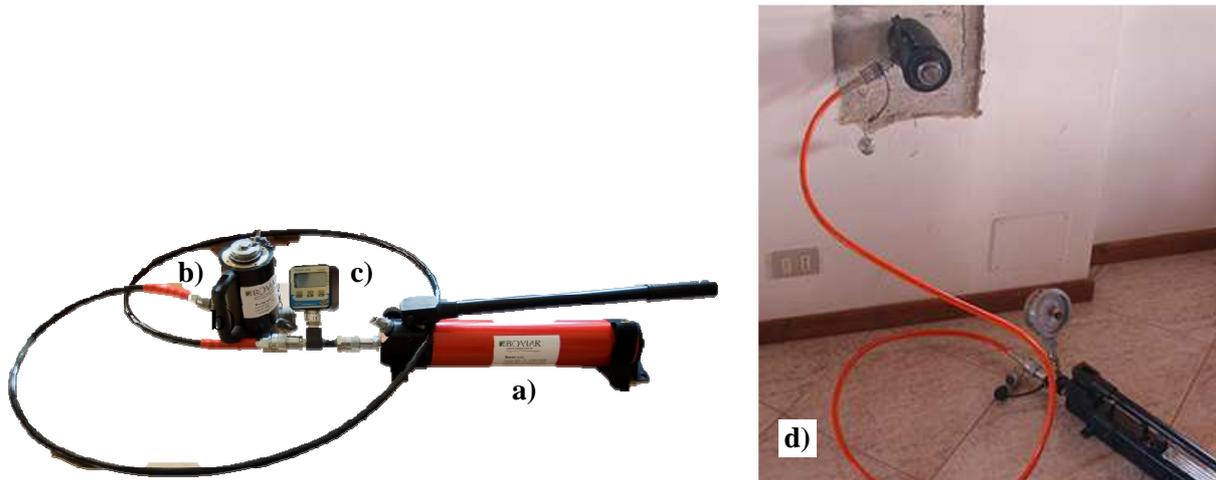


Figura 11. Apparecchiatura per la prova di *pull out*; a) pompa manuale; b) martino idraulico di estrazione; c) manometro per la misurazione della pressione; d) sistema in opera.



Figura 12. a) cono estratto; b) tassello BOVIAR B15G dopo l'estrazione.

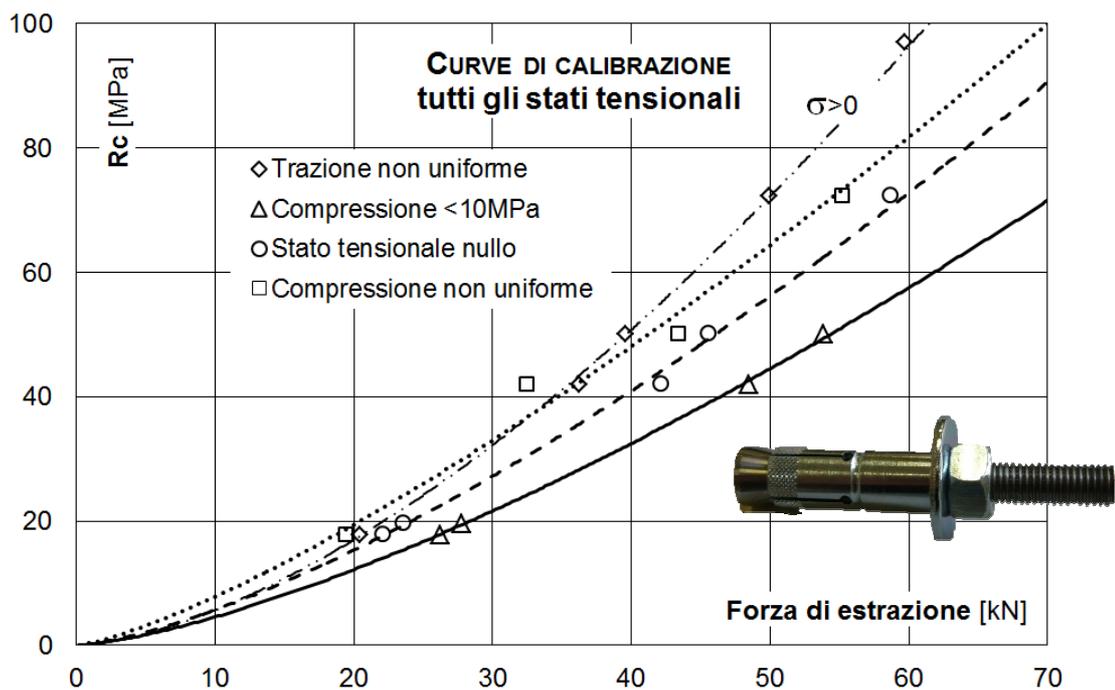


Figura 13. Curve di calibrazione del tassello BOVIAR B15G.
 Trazione e compressione non uniformi = intradosso ed estradosso delle travi.

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 (13 e 14). La rapidità di esecuzione, tuttavia, consente di ottenere una rappresentazione statistica della qualità del calcestruzzo nella struttura.

Standard internazionali di prova:

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

3.1.1 LOK e CAPO test

La prova di pull-out illustrata al paragrafo precedente si riferisce a tasselli ad espansione inseriti dopo la realizzazione della struttura (tasselli post-inseriti) diffusa in Italia. Originariamente, la prova è stata introdotta in Danimarca come estrazione di inserti collocati nella struttura prima del getto, figura 14.a, e nota come LOK test. Principio meccanico, principali dimensioni geometriche ed attrezzature sono le stesse del pull-out a tasselli post-inseriti del precedente paragrafo. La necessità d'inserire il tassello prima del getto, di mantenerlo nella posizione prevista e, soprattutto, il limite di utilizzo di questa tecnica alle sole strutture nuove hanno limitato il suo impiego a poco più che l'ambito accademico

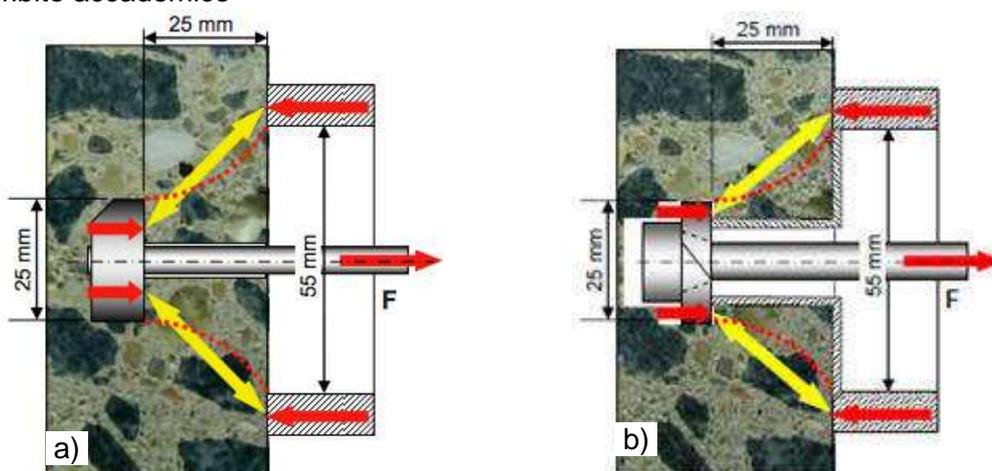


Figura 14. A) CAPO test; b) LOK test..

La necessità di estendere il LOK test a strutture esistenti ha condotto ad una versione post-inserita, nota come CAPO test, figura 14.b, in cui il foro viene eseguito con una speciale fresa e l'espansione del tassello avviene per apertura di un disco suddiviso a settori. Le due tecnologie sono accomunate dalla medesima curva di calibrazione, figura 15. L'elevato costo della strumentazione necessaria per l'esecuzione del CAPO test, nonché il tempo necessario alla preparazione del foro (che necessita di una fresatura per realizzare il sottosquadro), hanno limitato l'impiego di questo tipo di prova a pochi paesi, tra cui solo la Danimarca ne conosce un uso estensivo.

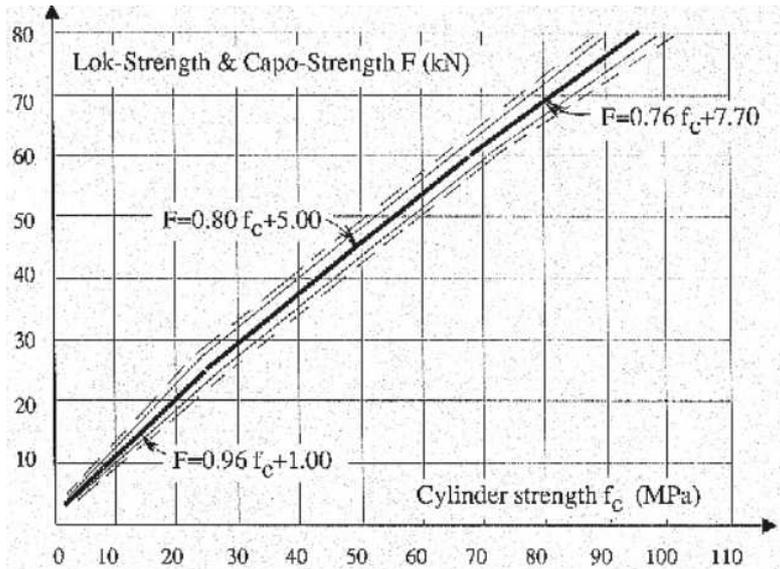


Figura 15. Curva di calibrazione per LOK e CAPO test.

3.2 Prove penetrometriche: la 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, figure 16 e 17. 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 18, 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 19 e 20. La prova Windsor stima la resistenza del materiale sulla base della media di 3 prove di penetrazione.

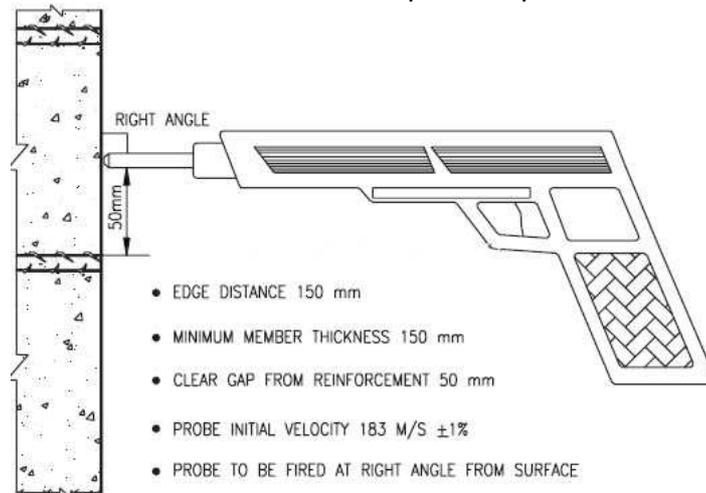


Figura 16. Schema della prova Windsor

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 sonde²; ii) difficoltà a rilevare la

² I dispositivi di guida non riescono comunque a garantire la perfetta ortogonalità delle sonde.

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 pericolosa in quanto la pistola di lancio della sonda ha struttura e principio di funzionamento molto vicini a quelli di un'arma, al punto che la pistola di sparo, figura 17.a, non è omologata CE (pertanto, a rigore, non può essere usata nell'U.E.).

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

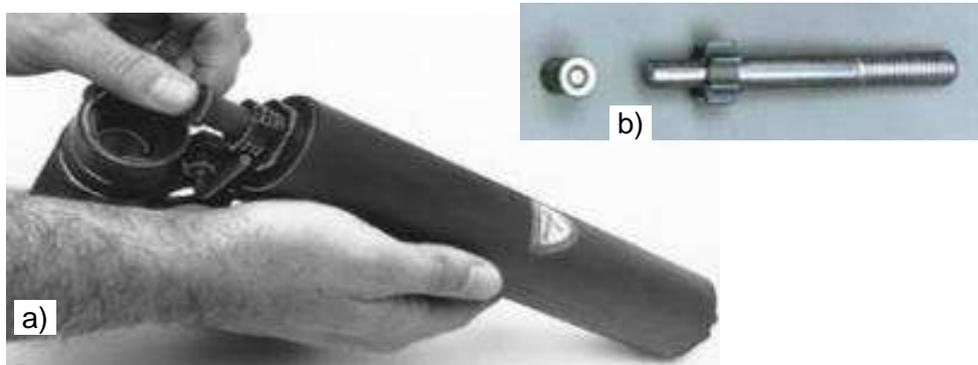


Figura 17. Sonda Windsor: a) caricamento della pistola; b) sonda e relativa carica esplosiva.

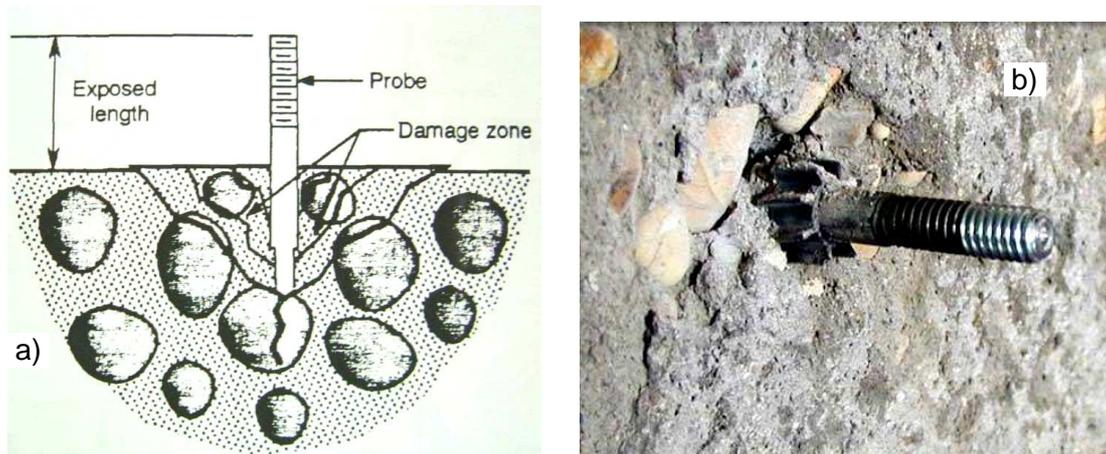


Figura 18. Infissione della sonda Windsor, a) disegno schematico della zona danneggiata dall'impatto; b) immagine ravvicinata della zona d'impatto.



Figura 19. Sonda Windsor: a destra: infissione della sonda; a sinistra: misurazione della profondità di penetrazione

Exposed Probe (inches)	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
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 20. Tabella di taratura correlata alla prova Windsor.

3.3 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):

$$R_c = a R^{\alpha} V^{\beta} L^{\gamma} \text{ [MPa]} \quad (14)$$

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.

3.4 Pull Off (Bond test)

La prova di pull-Off consiste in una prova di trazione monoassiale. Mediante una corona diamantata raffreddata ad acqua viene eseguito un taglio fino alla profondità di circa 50mm. Asciugata (con lampade ad infrarossi) l'area, sulla base superiore del cilindro viene incollato, mediante resine epossidiche, un disco in alluminio, $\phi = 75\text{mm}$, spessore non inferiore a 20mm, figura 21.a. Attesa la presa della resina (24 ore circa) il disco di alluminio viene connesso ad un'attrezzatura analoga a quella del Pull-Out (talvolta la stessa attrezzatura) che, tramite un martino idraulico contrastato sul calcestruzzo a lato del cilindro di prova, mette in trazione il disco fino al distacco del cilindro fino al suo distacco dalla struttura sottostante. Il meccanismo di rottura corretto è quello delle figure 21.b e 22, mentre le figure 21.c e 21.d rappresentano due meccanismi alterati da fenomeni locali: distacco dello strato superficiale e distacco della resina dalla struttura. A questo modo viene misurata direttamente la resistenza a trazione del materiale.

La resistenza a compressione del calcestruzzo viene dedotta dalla relazione:

$$R_c = \alpha f_t \quad [\text{MPa}], \quad (15)$$

In cui $\alpha \in [\sqrt{10}, 10]$. In genere, questa prova fornisce risultati di notevole affidabilità.

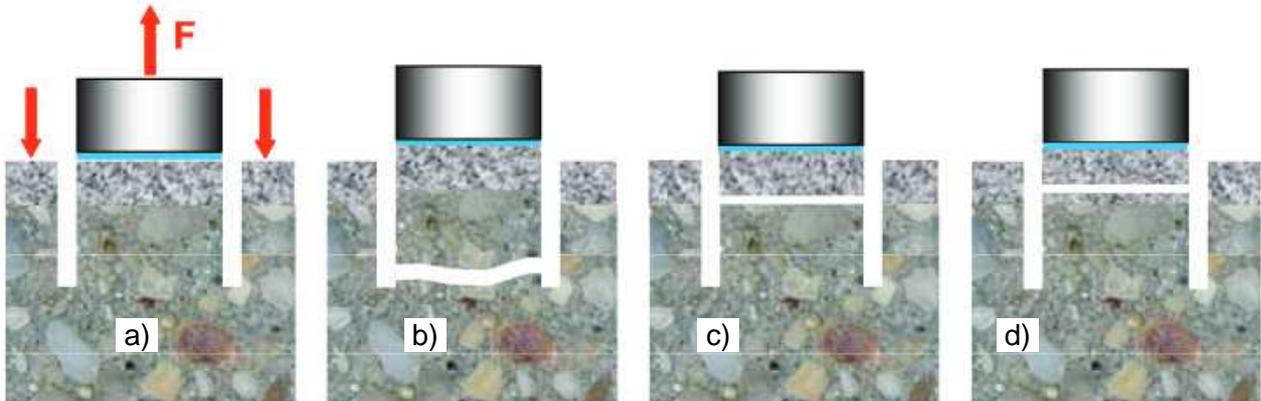


Figura 21. Prova di Pull-Off. a) prova standard; b) meccanismo di rottura corretto; c) rottura dell'interfaccia superficiale; d) rottura dell'adesivo.



Figura 22. Prova di Pull-Off con rottura corretta.

Limiti della procedura: i tempi necessari per la prova sono lunghi (2 giorni) e questo ne limita l'operatività e la diffusione.

Standard internazionali di prova: ASTM C1583 e C1583/M

3.5 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 23. 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 ed avere basi rettificate per evitare rotture anomale dovute a difetti di parallelismo o di planarità delle basi. 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 90-100mm.

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.

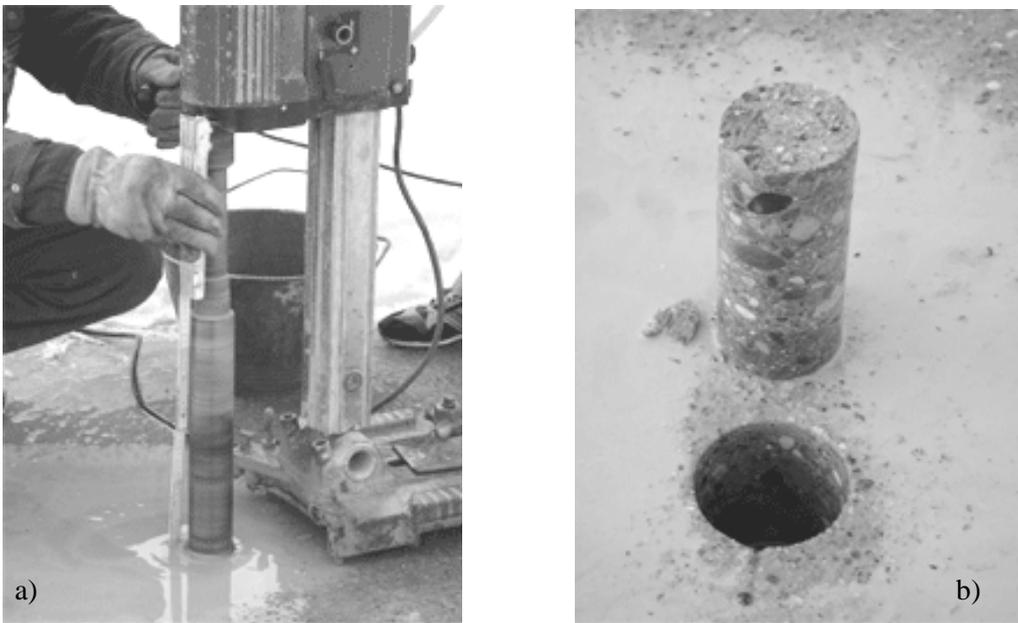


Figura 23. Carotaggio in una struttura di calcestruzzo: a) macchina di perforazione (monta un carotiere da 200mm); b) carota estratta. .

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 24, 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.

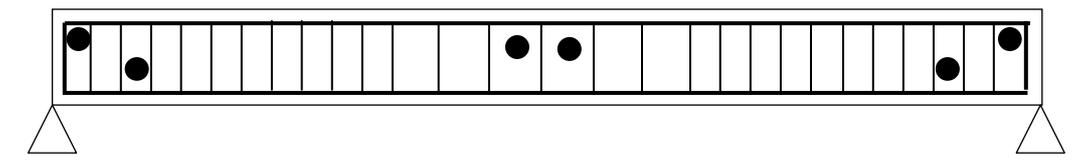


Figura 24. Trave semplicemente appoggiata: zone dove eseguire carotaggi con il minimo impatto strutturale

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. La correlazione tra la resistenza di una carota e la resistenza, cilindrica o cubica del calcestruzzo, misurata secondo le procedure standardizzate ben note, non è definibile in quanto dipende da molti fattori incontrollabili.

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

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 25 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 26-28 riportano un confronto delle stime dello sclerometro e dei metodi Sonreb (eqq. 5-10) per un indice di rimbalzo sclerometrico pari a 28mm (figura 26) e per velocità ultrasoniche pari a 4000 e 4400 m/s (figure 27 e 28 rispettivamente). La figura 26 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. La figura 21 ($v=4000$ 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 28 evidenzia invece come, per velocità ultrasoniche relativamente elevate, le interpolazioni Sonreb siano in grado di correggere in aumento le stime dello sclerometro.

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: la *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.

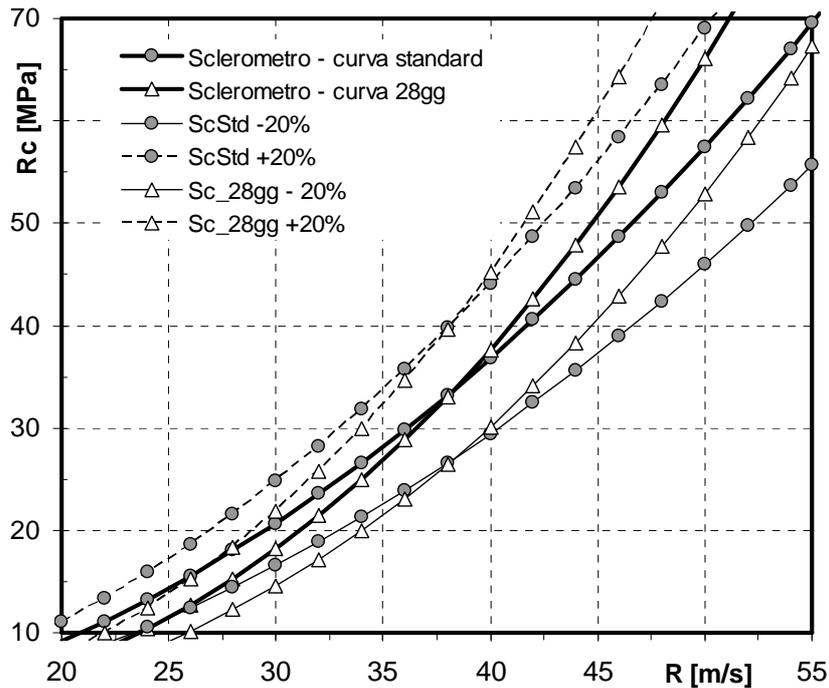


Figura 25. Curve d'interpolazione sclerometrica e relativi margini di confidenza ($\pm 20\%$)

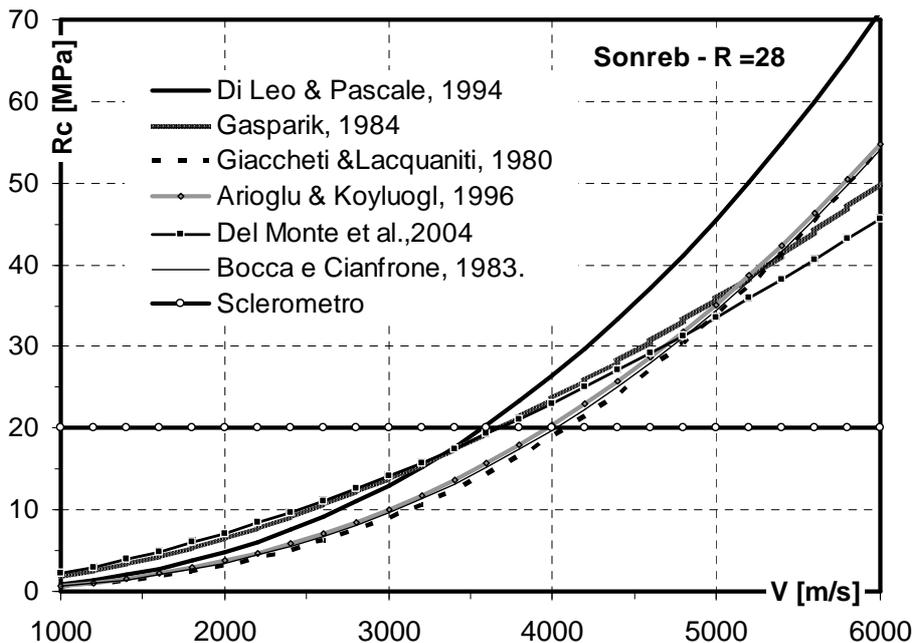


Figura 26. Resistenza a compressione del cls per un rimbalzo sclerometrico $R=28\text{mm}$ da prove Sonreb e sclerometriche

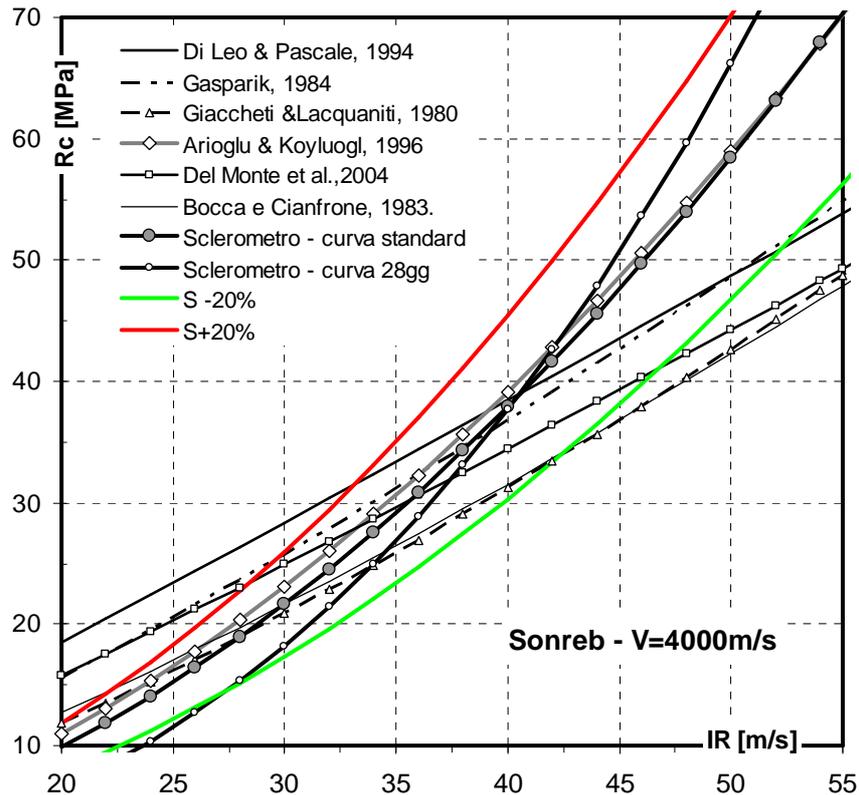


Figura 27. Resistenza a compressione del cls con velocità ultrasonica di 4000 m/s in funzione del rimbalzo sclerometrico

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.

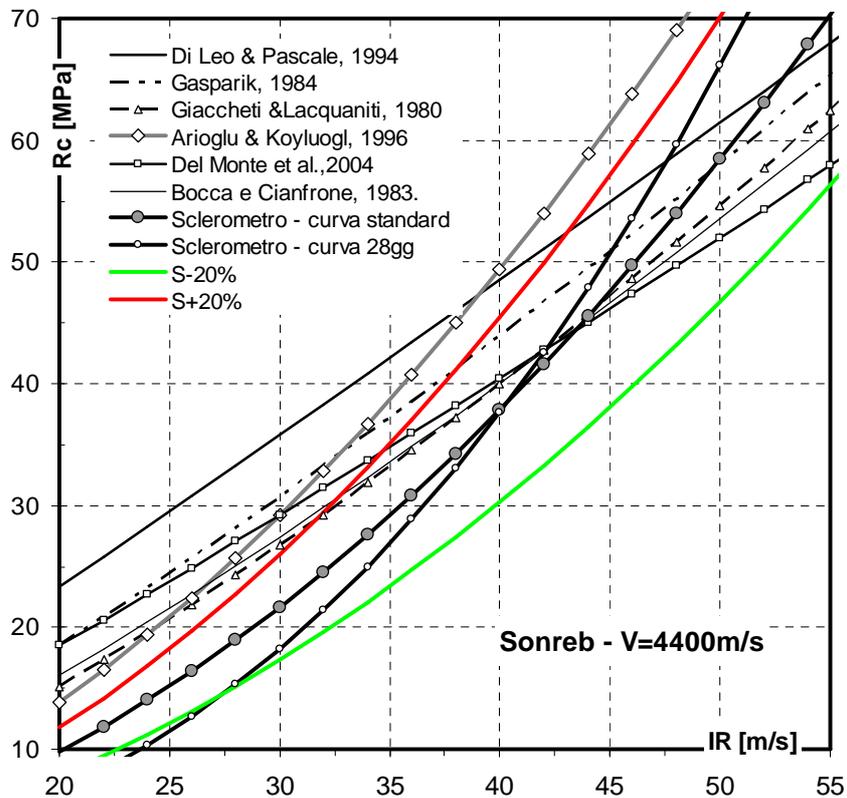


Figura 28. Resistenza a compressione del cls con velocità ultrasonica di 4400 m/s in funzione del rimbalzo sclerometrico

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 18 e 31, per cui la misurazione richiede l'interposizione di una piastra metallica che scavalchi il cratere formato dall'impatto, figura 19. 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 sostenere³.

5. Esempio

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 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 29. All'interno di un quadrato di lato 1m, vengono individuate 5 aree, A, B, C, D ed E disposte come in figura 29. 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 2ϕ 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.

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.

³ 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 17.

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 30 e 31. La figura 31 evidenzia i crateri d'impatto, di diametro di 4-5cm ca.

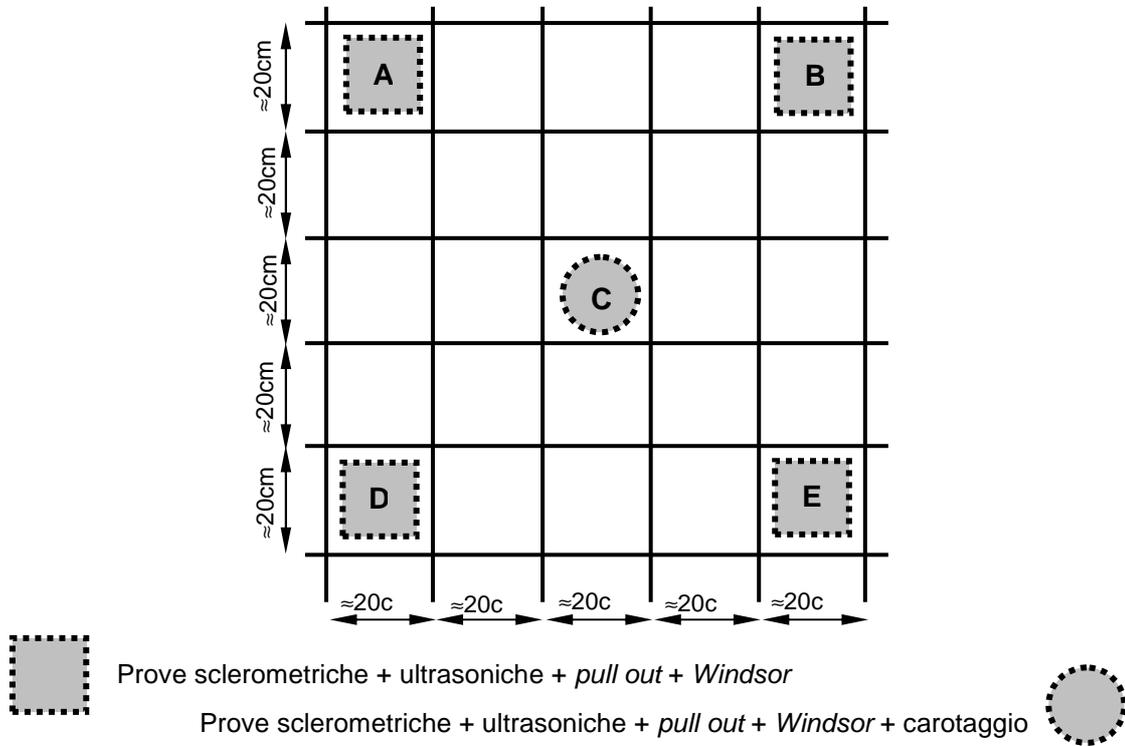


Figura 29. Schema generale di localizzazione dei punti di prova.



Figura 30. Una delle 5 zone d'indagine al termine delle prove.



Figura 31. Dettaglio delle prove di *pull out* e delle prove con sonde *Windsor*.

Tabella 3. Battute sclerometriche della zona 1.

ZONA 1																	
serie 1-A																	
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	
serie 1-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	
serie 1-C																	
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	
serie 1-D																	
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	
serie 1-E																	
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	
Resistenza [MPa] media della zona 1: 29.1																	

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

Tabella 4. Battute sclerometriche della zona 2.

ZONA 2																	
serie 2-A																	
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	
serie 2-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	
serie 2-C																	
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	
serie 2-D																	
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	
serie 2-E																	
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	
Resistenza [MPa] media della zona 2: 27.3																	

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

Tabella 5. Battute sclerometriche della zona 3.

ZONA 3																
serie 3-A																
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
serie 3-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
serie 3-C																
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
serie 3-D																
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
serie 3-E																
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
Resistenza [MPa] media della zona 3: 27.3																

Tabella 6. Battute sclerometriche della zona 4.

ZONA 4																
serie 4-A																
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
serie 4-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	5.65	32
serie 4-C																
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
serie 4-D																
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
serie 4-E																
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
Resistenza [MPa] media della zona 4: 15.2																

Tabella 7. Battute sclerometriche della zona 5.

ZONA 5																
serie 5-A																
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	29	26	25	29	22	33	28	25	29	30	31	28.4	23	6.15	27
serie 5-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	28	27	26	24	26	28	30	30	26	32	34	30	28.3	23	6.15	27
serie 5-C																
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	30	26	31	35	28	35	27	33	30	35	30	30.9	24	6.2	26
serie 5-D																
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	27	23	29	27	24	26	28	31	27	29	29	27.7	21	6.05	29
serie 5-E																
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	22	23	26	28	27	24	26	29	21	31	29	27	26.1	18	5.7	32
Resistenza [MPa] media della zona 5: 21.8																

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>	3207	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	4669	/	4692	4801	4689
Resistenza cubica <i>MPa</i>	50.0	51.6	/	52.1	54.6	52.1
P martino (<i>pull out</i>)	146	152	145	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	62	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									
serie 1-A					serie 1-B				
Prova n.	1	2	3	Media su 3	Battuta n.	1	2	3	Media su 3
Penetrazione	19.00	18.25	17.25	18.2	Penetrazione	18.50	16.75	18.75	18.0
Resistenza stimata [MPa]	46.9	43.6	39.2	43.2	Resistenza stimata [MPa]	44.7	37.3	45.8	42.6
serie 1-C					serie 1-D				
Battuta n.	1	2	3	Media su 3	Battuta n.	1	2	3	Media su 3
Penetrazione	18.00	16.75	18.75	17.8	Penetrazione	17.50	17.75	19.00	18.1
Resistenza stimata [MPa]	42.5	37.3	45.8	41.9	Resistenza stimata [MPa]	40.9	41.6	46.9	43.1
serie 1-E					Resistenza [MPa] media della zona 1: 42.33				
Battuta n.	1	2	3	Media su 3	Deviazione standard [MPa]: 3.24				
Penetrazione	17.25	17.75	17.75	17.6	Coefficiente di variazione [%]: 7.7				
Resistenza stimata [MPa]	39.2	41.6	41.6	40.8	Resistenza [MPa] caratteristica della zona 1: 41.4				

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

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

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

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

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

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

Tabella 13. Sintesi dei risultati delle prove eseguite. Resistenza del calcestruzzo [MPa].

		Zona	1	2	3	5
NDT	Sclerometro		29.1	27.3	27.3	21.8
	Ultrasuoni		46.9	52.1	/	44.3
	Sonreb		35.4	44.3	/	32.3
		<i>Pull out</i>	48	55	46	48
MDT	Sonda <i>Windsor</i> ⁽²⁾		42.3	44.9	43.8	43.3
	Sonreb-Win		19.6	20.6	/	17.9
	Compressione su carota		43.4	60.1	48.7	43.0

Per l'esame dei dati sintetici della tabella 13, si assume che il valore "reale" della resistenza sia costituito dal valore misurato sulla carota estratta. Si osserva che le prove che hanno fornito le migliori approssimazioni sono le stime della resistenza a partire dalle prove ultrasoniche e le prove di *pull out*. Le prove sclerometriche hanno sottostimato sistematicamente la resistenza "reale" del calcestruzzo mentre la sonda *Windsor* è risultata sostanzialmente insensibile alle variazioni della resistenza del calcestruzzo. La ragione per cui diverse tecniche hanno fornito risultati insoddisfacenti può essere ricercata nella resistenza elevata del calcestruzzo. E' necessario i valori misurati sulle carote sono ricompresi nel raggio d'azione di tutte le tecniche sperimentali impiegate. In particolare, le prestazioni insoddisfacenti dei metodi combinati *Sonreb* possono essere attribuiti all'elevato valore della velocità ultrasonica. Quando tale velocità si colloca attorno ai 3000 m/s i metodi *Sonreb* forniscono prestazioni migliori.

La tabella 13 evidenzia come solo un'indagine condotta con più tecniche sperimentali possa fornire una valutazione sull'affidabilità dei risultati. Nel caso specifico, l'uso di diverse tecniche, anche consolidate, avrebbe condotto a gravi errori.

Riferimenti generali e normativi

DISPONIBILI IN FORMATO PDF SUL WEB

Bungey J.H., Millard S.G., Grantham M.G., *Testing concrete in structures*, Taylor and Sons, London, 2006
Malhotra, V.M., Carino, N.J., *Handbook on NonDestructive Testing of Concrete*, 2nd ed, CRC Press, Boca Raton, 2004.

RIFERIMENTI NORMATIVI

UNI 9189 "*Calcestruzzo indurito. Determinazione dell'indice sclerometrico*"

EN 12504-2-2001. *Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Prove non distruttive – Determinazione dell'indice sclerometrico*

EN 583-2004. *Prove non distruttive. Esame ad ultrasuoni*

EN 12504-4-2005: *Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 4: determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.*

10157/1992, *Calcestruzzo indurito,. Determinazione della forza di estrazione mediante inserti post-inseriti ad espansione geometrica forzata*

EN 12504-3-2005. *Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 3: determinazione della forza di estrazione.*

Linee Guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive - Servizio Tecnico Centrale del Cons. Sup. Lavv. Pubbl., febbraio 2008

EN 1992-1-1:2004 *Design of concrete structures. General rules and rules for buildings*

ASTM C803/C803M - 03 *Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete*