



# Le indagini in situ su calcestruzzi ed acciai per la valutazione della vulnerabilità sismica delle opere d'arte: tipologia, approcci metodologici, pianificazione e strumentazione

## Parte 1: Calcestruzzi

**Marco Breccolotti**

*Università di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale*

# Sommario

---

## 1. Riferimenti Normativi

## 2. Prove su calcestruzzi

2.1 Carotaggi, Pullout, Break off, Sonda Windsor, Prove sclerometriche, Prove ultrasoniche

2.2 Prove combinate Sonreb,

2.3 Interpretazione statistica dei risultati;

## 3. Prove su acciai da c.a.

3.1 Prelievo di barre

3.2 Prove di durezza (Brinell, Vickers, Rockwell)

3.3 Correlazione tra prove distruttive e prove NDT

3.4 Interpretazione statistica dei risultati

3.5 Prove pacometriche

## 4. Prove su acciai da carpenteria

4.1 Prelievi in situ

4.2 Prove di durezza (Brinell, Vickers, Rockwell)


4.3 Correlazione tra prove distruttive e prove NDT


4.4 Interpretazione statistica dei risultati




## Riferimenti normativi


---

 NTC 2008 “Norme tecniche per le costruzioni” e Circ. 617/2009, Istruzioni per l’applicazione delle “Norme tecniche per le costruzioni”.

 ASCE 11-90 “Guideline for Structural Condition Assessment of Existing Structures”, 1990.

 Bollettino C.E.B. n. 243 “Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures”, 1998.

 ISO/FDIS 13822 “Assessment of Existing Structures”, 2000.


 Bollettino *f.i.b.* n. 22 “Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures”, 2003.





## Riferimenti normativi


---

 ACI 214.4R-10 “Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results” (Reapproved 2016).

 UNI EN 13791:2008 “Valutazione della resistenza a compressione in sito nelle strutture e nei componenti prefabbricati di calcestruzzo”.

 UNI EN 1998-3:2005 “Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 3: Valutazione e adeguamento degli edifici”.


 FEMA 547 “Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings”, 2006.


 ASCE/SEI 41-13 “Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings”, 2014.





## Riferimenti normativi


---

 UNI EN 12504-1:2009 “Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 1: Carote - Prelievo, esame e prova di compressione”.

 UNI EN 12504-2:2012 “Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 2: Prove non distruttive - Determinazione dell'indice sclerometrico”.

 UNI EN 12504-3:2005 “Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 3: Determinazione della forza di estrazione”.

 UNI EN 12504-4:2005 “Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici”.

 UNI EN ISO 377:2013 “Acciaio e prodotti di acciaio - Prelievo e preparazione dei campioni e dei provini per prove meccaniche”.



## Prove su calcestruzzi: Carotaggi

Le carote sono prelevate mediante carotatrice a corona diamantata, utilizzando un sistema di supporto della macchina che assicuri la costanza della direzione di perforazione.

### Metodo principale previsto dalla normativa

1. Estrazione di carote dalla struttura
2. Prove di schiacciamento
3. Interpretazione statistica dei dati

Alcune delle principali norme:

- ACI 214.4R
- EN 13791
- DM 14.01.2008 (NTC) / EN 1998



## Prove su calcestruzzi: Carotaggi

---

### Dimensioni geometriche delle carote - Diametro

Il valore di riferimento del diametro delle carote è 150 mm, come quello dei provini cilindrici che si utilizzano per la misura della resistenza a compressione del calcestruzzo.

Il diametro delle carote deve essere correlato alla dimensione massima degli inerti: dovrebbe essere non minore di tre volte la dimensione degli inerti, con un limite inferiore di 50 mm.

In linea di principio le carote più grandi sono preferibili rispetto a quelle più piccole, ma la maggior parte degli sperimentatori ha riscontrato differenze trascurabili tra carote di 150 mm di diametro e carote di 100 mm.

Per questo motivo si prelevano generalmente carote di 100 mm.





# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

---

## Dimensioni geometriche delle carote - Diametro



**Marco Breccolotti**

Perugia, 24 aprile 2017

*Le indagini in situ su calcestruzzi ed acciai per la  
valutazione della vulnerabilità sismica delle opere d'arte*

8/92



# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

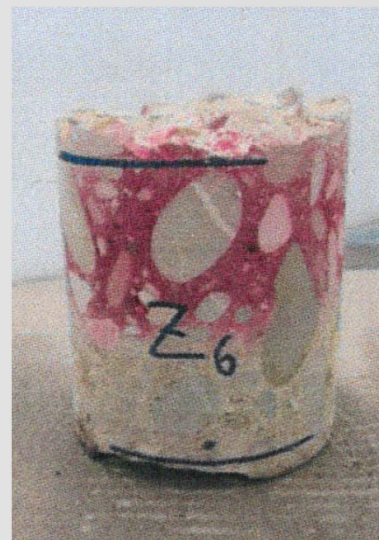
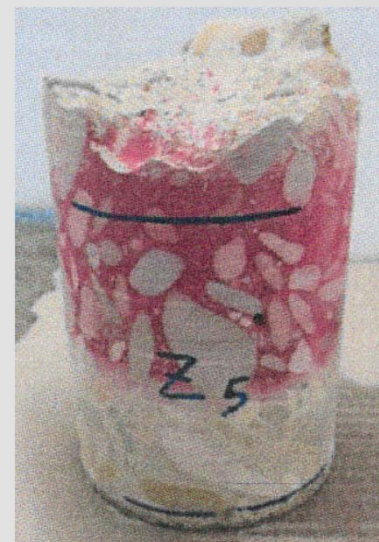
## Dimensioni geometriche delle carote - Diametro

### RESISTENZA A COMPRESSIONE (UNI EN 12390-3:2009)

DATI PRELIMINARI ALLA PROVA					RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE		
ID Provino	Data prova	Massa (kg)	Diametro $\Phi$ (mm)	Altezza h (mm)	F (kN)	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	P (NE-EM)
023213/01/01 Z1	28/06/13	2,940	93,94	189,63	81,71	11,8	EM
023213/01/02 Z2	28/06/13	2,919	93,97	188,24	22,02	3,2	EM
023213/01/03 Z3	28/06/13	1,478	94,03	95,94	84,54	12,2	EM
023213/01/04 Z5	28/06/13	1,542	94,01	95,89	66,74	9,6	EM
023213/01/05 Z6	28/06/13	1,406	93,99	92,14	111,46	16,1	EM
023213/01/06 Z10	28/06/13	1,458	93,97	96,19	31,64	4,6	EM

P = Preparazione del provino: NE = Non eseguita, EM = Eseguita molatura.  
N.D. = Non dichiarato

$$f_{cm} = 12.6 \text{ N/mm}^2$$



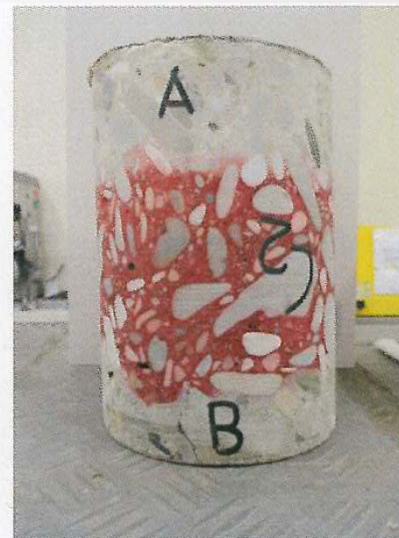
# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

## Dimensioni geometriche delle carote - Diametro

### RESISTENZA A COMPRESIONE (UNI EN 12390-3:2009)

DATI PRELIMINARI ALLA PROVA					RESISTENZA ALLA COMPRESIONE		
ID Provino	Data prova	Massa (kg)	Diametro $\Phi$ (mm)	Altezza h (mm)	F (kN)	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	P (NE-EM)
045513/01/01 C1	12/11/13	5,287	144,45	141,02	210,27	12,8	EM
045513/01/02 C2	12/11/13	5,382	144,42	144,08	272,96	16,7	EM
045513/01/03 C3	12/11/13	5,317	144,49	143,26	298,61	18,2	EM

P = Preparazione del provino: NE = Non eseguita, EM =Eseguita molatura.



$$f_{cm} = 15.9 \text{ N/mm}^2$$

(+26.2%)



## Prove su calcestruzzi: Carotaggi

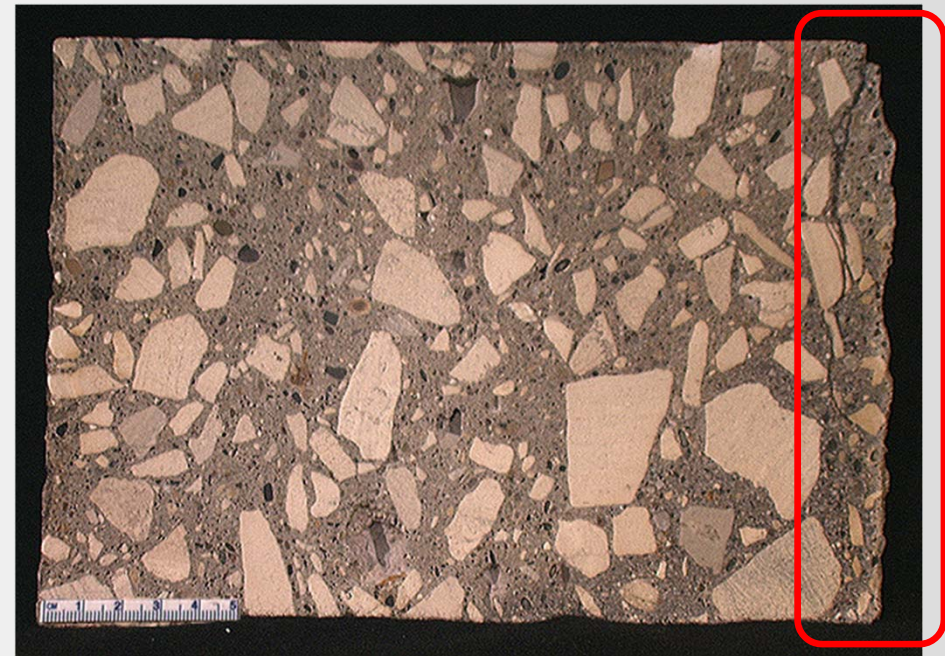
### Dimensioni geometriche delle carote - Lunghezza

Valore di riferimento della lunghezza pari a due volte il diametro

È possibile utilizzare, dopo correzione, i risultati ottenuti da carote più corte

È opportuno che il rapporto  $L / d$  non scenda al di sotto di  $0,9 \div 1,2$

La lunghezza della carota prelevata deve essere più grande della lunghezza da utilizzare nella prova, allo scopo di eliminare le zone di calcestruzzo danneggiato in corrispondenza della/delle basi.



# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

---

## Stima della resistenza meccanica

Con le carote è possibile stimare la resistenza meccanica del calcestruzzo in situ (cubica o cilindrica).

Ciò richiede di tener conto del rapporto  $\lambda = L / d$  e della eventuale presenza nelle carote di barre di armatura, mediante opportuni coefficienti correttivi.

La resistenza in situ è minore (UNI EN 13791 85%) di quella misurata su campioni standard confezionati al momento del getto.

La stima della resistenza dei provini standard confezionati al momento del getto richiede di tener conto:

- delle condizioni di stagionatura;
- della presenza di vuoti nel calcestruzzo;
- dell'età,

mediante opportuni, ulteriori, coefficienti correttivi.



## Prove su calcestruzzi: Carotaggi

---

### Correzione per il rapporto lunghezza / diametro

Poniamo:  $\lambda = L / d$

La Norma Italiana UNI EN 12504-1 indica che le carote con  $\lambda = 1$  possono essere considerate rappresentative di provini cubici, quelle con  $\lambda = 2$  di provini cilindrici.

Non forniscono alcuna indicazione per valori diversi di  $\lambda$ .

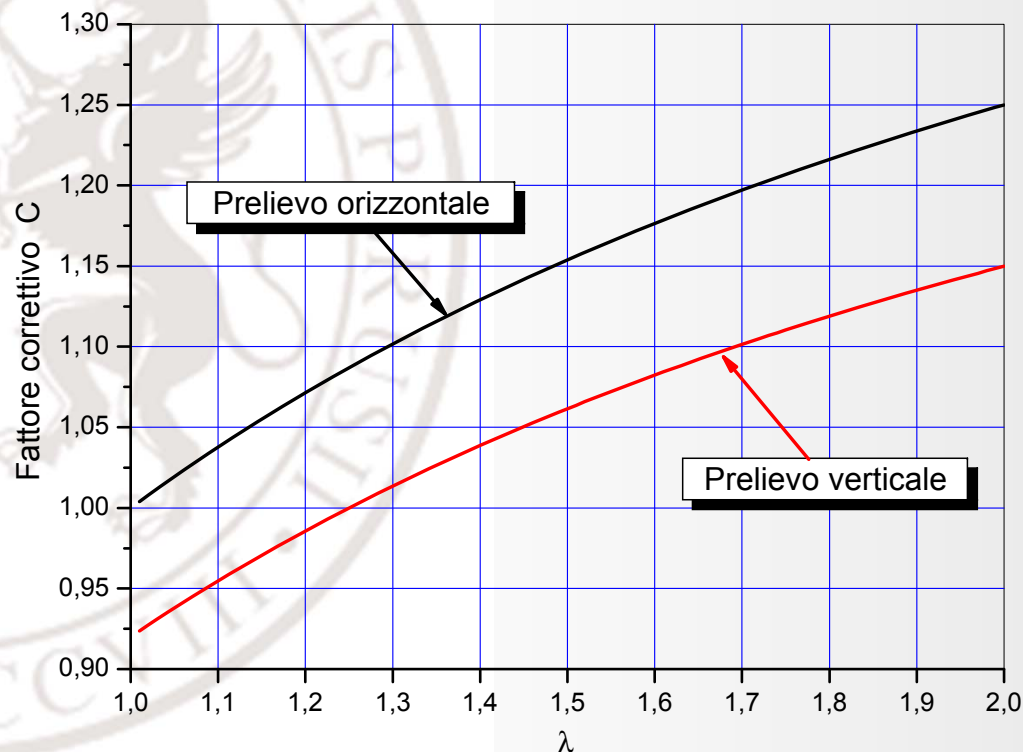
Peraltro è ben noto che la resistenza meccanica determinata su carote deve essere corretta per tener conto del rapporto  $\lambda = \text{lunghezza}/\text{diametro}$ . Per valori diversi del rapporto occorre fare riferimento a indicazioni di altre normative.



## Prove su calcestruzzi: Carotaggi

### Correzione per il rapporto lunghezza / diametro

Il Concrete Society Digest No. 9 (UK) suggerisce di considerare il fattore moltiplicativo seguente per ricavare la resistenza cubica:



carote perforate in orizzontale

$$C = [2,5 / (1,5 + 1/\lambda)]$$

carote perforate in verticale

$$C = [2,3 / (1,5 + 1/\lambda)]$$





## Prove su calcestruzzi: Carotaggi

### Correzione per il rapporto lunghezza / diametro

Le ASTM C/42C 42M – 99 e le AASHTO T 24 02 suggeriscono gli stessi valori del coefficiente C (non trasformano a resistenza cubica e perciò sono numericamente più piccoli):

$\lambda$	c
1,75	0,98
1,50	0,96
1,25	0,93
1,00	0,87



## Prove su calcestruzzi: Carotaggi

### Correzione per la presenza di armatura

Il Concrete Society Digest No. 9 (UK) suggerisce di tener conto della presenza di eventuali barre di armatura considerando il fattore moltiplicativo:

$$C_2 = 1,0 + 1,5 \phi_r d / (\phi_c L)$$

carote che contengono una sola barra

$$C_2 = 1,0 + 1,5 \sum [\phi_r d / (\phi_c L)]$$

carote che contengono due barre

in cui:

$\phi_r$  = diametro delle barre

$\phi_c$  = diametro della carota

d = distanza dell'asse della barra dalla base più vicina della carota

L = lunghezza della carota (non incapsulata)



# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

## Correzione per stagionatura

Il Concrete Society Digest No. 9 (UK) suggerisce di tener conto delle condizioni di stagionatura mediante un fattore moltiplicativo (la resistenza in situ è minore di quella di progetto).

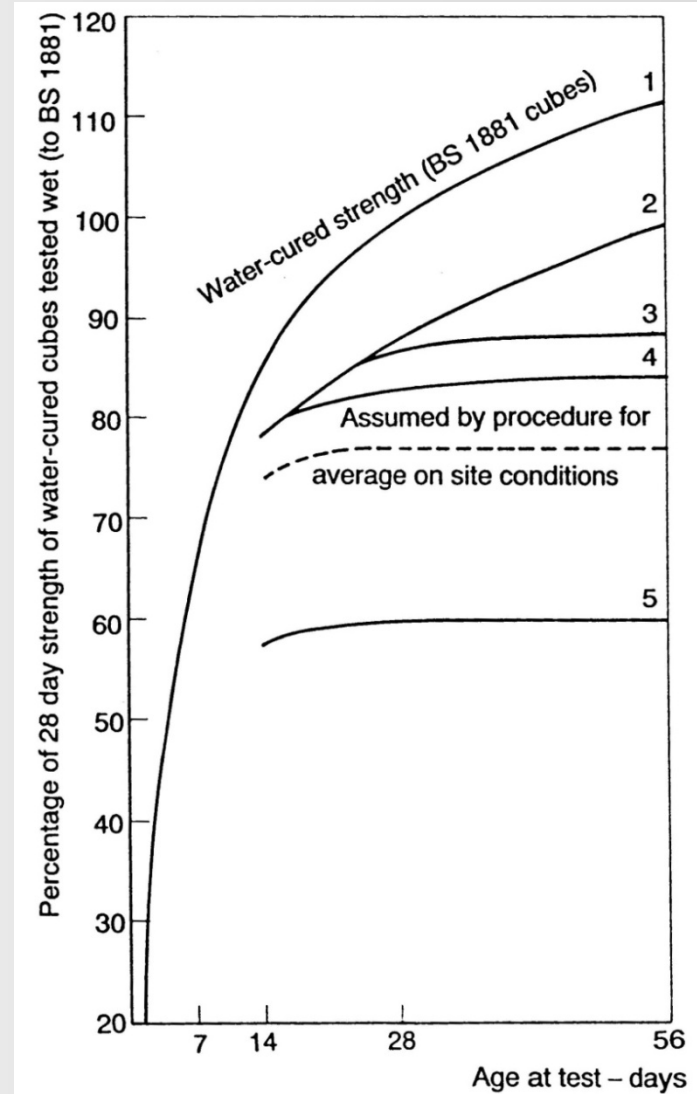
1 = stagionatura in acqua

2 = cls protetto dalla perdita di acqua

3 = cls protetto dalla perdita di acqua per 12 giorni, poi lasciato asciugare in aria

4 = cls protetto dalla perdita di acqua per 5 giorni, poi lasciato asciugare in aria

5 = cls lasciato asciugare in aria



**Marco Breccolotti**

Perugia, 24 aprile 2017

Le indagini in situ su calcestruzzi ed acciai per la  
valutazione della vulnerabilità sismica delle opere d'arte

17/92

## Prove su calcestruzzi: Carotaggi

### Correzione per la presenza di vuoti

Il Concrete Society Digest No. 9 (UK) suggerisce di tener conto della presenza eccessiva di vuoti mediante un fattore moltiplicativo.

L'eccesso di vuoti è definito rispetto ad un calcestruzzo di densità normale da determinare mediante pesatura delle carote.

Table 3: Correction factors for excess voids.<sup>(4)</sup>

Excess voids %	Strength multiplying factor
0	1.00
0.5	1.04
1.0	1.08
1.5	1.13
2.0	1.18
2.5	1.23
3.0	1.28
3.5	1.33
4.0	1.39
4.5	1.45
5.0	1.51



# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

## Correzione per l'età

E' la questione più controversa.

Si può ad esempio utilizzare la figura del Concrete Society Digest No. 9 (UK) che lega condizioni di stagionatura, età e resistenza.

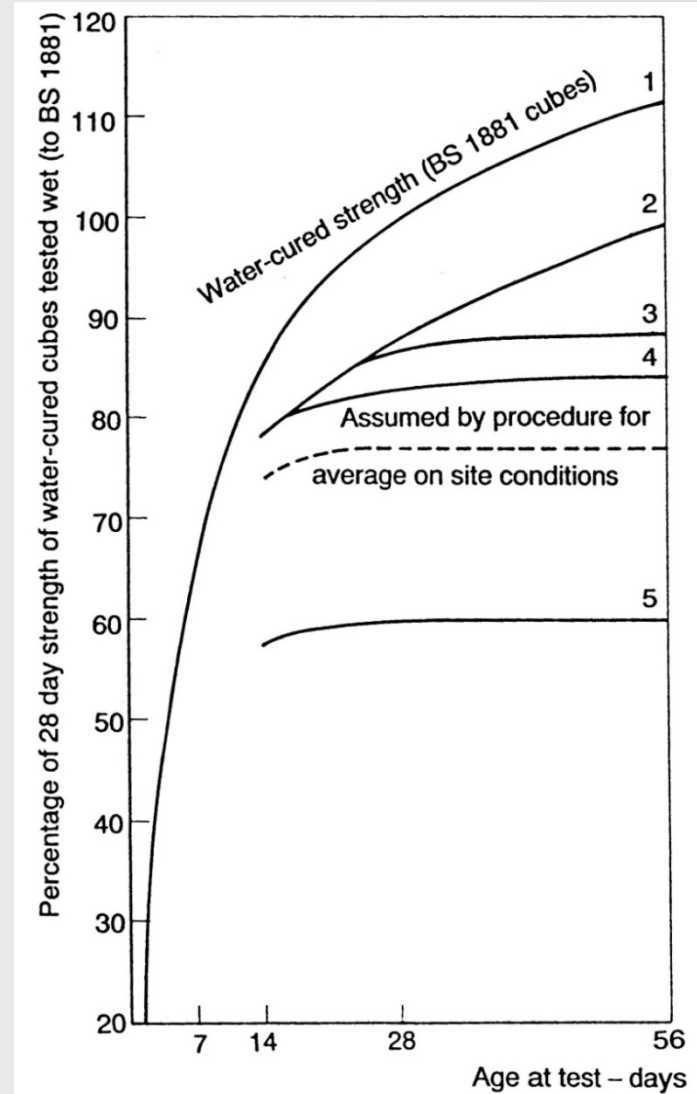
1 = stagionatura in acqua

2 = cls protetto dalla perdita di acqua

3 = cls protetto dalla perdita di acqua per 12 giorni, poi lasciato asciugare in aria

4 = cls protetto dalla perdita di acqua per 5 giorni, poi lasciato asciugare in aria

5 = cls lasciato asciugare in aria



## Prove su calcestruzzi: Carotaggi

### Elaborazione dei risultati: NTC 2008

Se la numerosità dei campioni estratti da un'area di prova è pari a tre (3), numero minimo accettabile, si può stimare solo la resistenza media.

Nel caso sia disponibile una numerosità superiore a tre, oltre al calcolo del valore medio e dello scarto quadratico medio, si può proporre la stima della resistenza caratteristica relativa all'area di prova.

Per stimare la resistenza caratteristica  $f_{cil,ca}$ , si possono prendere in considerazione le indicazioni della EN 13791.

Se la numerosità di campioni estratti è maggiore o eguale a 15, la resistenza caratteristica  $f_{cil,ca}$  è pari a:

$$f_{cil,ca} = \min (f_{medio,ca} - 1.48 * s; f_{min,ca} + 4)$$

dove:

$f_{medio,ca}$  = valore medio

$f_{min,ca}$  = valore minimo

$s$  = scarto quadratico medio





# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

## Elaborazione dei risultati: NTC 2008

I fattori di confidenza indicati nella Tabella C8A.1 servono a un duplice scopo:

- a) per definire **le resistenze dei materiali** da utilizzare nelle formule di capacità degli **elementi duttili e fragili**; le resistenze medie, ottenute dalle prove in situ e dalle informazioni aggiuntive, sono divise per i fattori di confidenza;
- b) per definire **le sollecitazioni trasmesse dagli elementi duttili a quelli fragili**; a tale scopo, le resistenze medie degli elementi duttili, ottenute dalle prove in situ e dalle informazioni aggiuntive, sono moltiplicate per i fattori di confidenza.



# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

## Elaborazione dei risultati: NTC 2008

Tabella C8A.2 – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza per **edifici in calcestruzzo armato o in acciaio**

Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1		Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>limitate</i> verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>limitate</i> prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	1.35
LC2	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Disegni costruttivi incompleti con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure estese verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali con <i>limitate</i> prove in-situ oppure estese prove in-situ	Tutti	1.20
LC3		Disegni costruttivi completi con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure esaustive verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con estese prove in situ oppure esaustive prove in-situ	Tutti	1.00



# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

## Elaborazione dei risultati: NTC 2008

Tabella C8A.3b – Definizione orientativa dei livelli di rilievo e prove per **edifici in acciaio**

	Rilievo (dei collegamenti)(a)	Prove (sui materiali) (b)
	Per ogni tipo di elemento “primario” (trave, pilastro...)	
Verifiche limitate	Le caratteristiche dei collegamenti sono verificate per almeno il 15% degli elementi	1 provino di acciaio per piano dell'edificio, 1 campione di bullone o chiodo per piano dell'edificio
Verifiche estese	Le caratteristiche dei collegamenti sono verificate per almeno il 35% degli elementi	2 provini di acciaio per piano dell'edificio, 2 campioni di bullone o chiodo per piano dell'edificio
Verifiche esaustive	Le caratteristiche dei collegamenti sono verificate per almeno il 50% degli elementi	3 provini di acciaio per piano dell'edificio, 3 campioni di bullone o chiodo per piano dell'edificio



# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

## Elaborazione dei risultati: NTC 2008

### NOTE ESPLICATIVE ALLA TABELLA C8A.3 (a, b)

Le percentuali di elementi da verificare ed il numero di provini da estrarre e sottoporre a prove di resistenza riportati nella Tabella C8A.3 hanno valore indicativo e vanno adattati ai singoli casi, tenendo conto dei seguenti aspetti:

(a) Nel controllo del raggiungimento delle percentuali di elementi indagati ai fini del rilievo dei dettagli costruttivi si tiene conto delle eventuali situazioni ripetitive, che consentano di estendere ad una più ampia percentuale i controlli effettuati su alcuni elementi strutturali facenti parte di una serie con evidenti caratteristiche di ripetibilità, per uguale geometria e ruolo nello schema strutturale.

(b) Le prove sugli acciai sono finalizzate all'identificazione della classe dell'acciaio utilizzata con riferimento alla normativa vigente all'epoca di costruzione. Ai fini del raggiungimento del numero di prove sull'acciaio necessario per il livello di conoscenza è opportuno tener conto dei diametri (nelle strutture in c.a.) o dei profili (nelle strutture in acciaio) di più diffuso impiego negli elementi principali con esclusione delle staffe.

(c) Ai fini delle prove sui materiali è consentito sostituire alcune prove distruttive, non più del 50%, con un più ampio numero, almeno il triplo, di prove non distruttive, singole o combinate, tarate su quelle distruttive.

(d) Il numero di provini riportato nelle tabelle 8A.3a e 8A.3b può esser variato, in aumento o in diminuzione, in relazione alle caratteristiche di omogeneità del materiale. Nel caso del calcestruzzo in opera tali caratteristiche sono spesso legate alle modalità costruttive tipiche dell'epoca di costruzione e del tipo di manufatto, di cui occorrerà tener conto nel pianificare l'indagine. Sarà opportuno, in tal senso, prevedere l'effettuazione di una seconda campagna di prove integrative, nel caso in cui i risultati della prima risultino fortemente disomogenei.



## Prove su calcestruzzi: Carotaggi

### Elaborazione dei risultati: EN 13791

Stima della resistenza caratteristica  $f_{cil,ca}$ .

Numerosità dei campioni estratti da un'area di prova pari a 3 (numero minimo accettabile): si può stimare solo la resistenza media.

Numerosità superiore a 3: si può stimare anche la resistenza caratteristica:

Per  $n \geq 15$ :

$$f_{cil,ca} = \min ( f_{medio,ca} - 1.48 * s ; f_{min,ca} + 4 )$$

dove:  $f_{medio,ca}$  = valore medio  
 $f_{min,ca}$  = valore minimo  
 $s$  = scarto quadratico medio



# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

## Elaborazione dei risultati

Per  $4 \leq n \leq 14$ :

$$f_{cil,ca} = \min ( f_{medio,ca} - k ; f_{min,ca} + 4 )$$

dove:

- $f_{medio,ca}$  = valore medio
- $f_{min,ca}$  = valore minimo
- $k = 4$  per  $n$  compreso tra 10 e 14
- $k = 5$  per  $n$  compreso tra 7 e 9
- $k = 6$  per  $n$  compreso tra 4 e 6.

N.B.: Valori in N/mm<sup>2</sup>.





## Prove su calcestruzzi: Carotaggi

---

### Osservazioni circa la stima della resistenza meccanica in situ ottenuta su provini estratti per carotaggio

La resistenza dei provini prelevati in situ generalmente è inferiore a quella dei provini standard preparati nel corso della messa in opera del calcestruzzo e stagionati in condizioni standard, tale differenza è dovuta a fattori quali:

- la procedura di compattazione,
- la stagionatura,
- l'effetto del prelievo.

In mancanza di esperienze dirette si può assumere che la resistenza caratteristica in situ corrisponde a circa 0,85 volte la resistenza caratteristica del calcestruzzo messo in opera.



## Prove su calcestruzzi: Carotaggi

---

### Osservazioni circa la stima della resistenza meccanica in situ ottenuta su provini estratti per carotaggio

Il confronto tra la resistenza caratteristica ottenuto sui campioni ricavati per carotaggio e la resistenza caratteristica del calcestruzzo messo in opera, deve essere fatto con molta prudenza, in modo particolare nel caso in cui il prelievo del calcestruzzo dalla struttura sia stato effettuato dopo una stagionatura (tempo e temperatura) non ben definita.

Il giudizio delle caratteristiche del calcestruzzo in opera in base alla resistenza determinata su carote prelevate deve tener conto inoltre che la resistenza alla compressione valutata sulla carota è una resistenza “cilindrica” (se la carota ha  $\lambda = 2$ ).



## Prove su calcestruzzi: Carotaggi

---

### Osservazioni circa la stima della resistenza meccanica in situ ottenuta su provini estratti per carotaggio

Si può assumere che la resistenza di un campione avente diametro compreso tra 100 e 150 mm, ottenuto per carotaggio, avente altezza eguale al diametro, abbia la medesima resistenza di un equivalente provino cubico da 150 millimetri, parallelamente si può assumere che la resistenza di un campione ottenuto per carotaggio ed avente rapporto altezza – diametro eguale a 2 abbia resistenza eguale a quella di un equivalente provino cilindrico.

Per rapporti dimensionali intermedi, in prima approssimazione, si possono applicare le correlazioni discusse in precedenza.



# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

---

## Microcarotaggio e sua applicabilità

Il microcarotaggio permette di stimare la resistenza meccanica provando un numero elevato di provini ( $n \geq 12$  per ogni area di prova) di ridotte dimensioni ( $\Phi \approx h \approx 28$  mm). Pur con una elevata dispersione dei valori singoli, il valore medio che si ottiene è una stima abbastanza affidabile della resistenza a compressione del calcestruzzo dell'area di prova.

Questa tecnica è utile nei casi in cui non sia possibile prelevare carote aventi dimensioni normali ( $\Phi \geq 50$  mm), quali ad esempio:

- elementi di piccolo spessore,
- sezioni molto armate,
- superfici che non sopportano il danno estetico prodotto da un prelievo classico.



# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

---

## Microcarotaggio e sua applicabilità

Il microcarotaggio non risulta idoneo ad indagare calcestruzzi aventi resistenza  $< 20$  MPa, dato che l'estrazione e la lavorazione delle superfici danneggerebbero i provini ed i risultati non risulterebbero attendibili.

Le operazioni d'estrazione, di lavorazione dei campioni, di esecuzione delle prove a compressione richiedono controlli accurati e devono essere effettuati da personale esperto e qualificato.

Il procedimento di prova è descritto in UNI 10766.



# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

---

## Cenni all'interpretazione dei risultati

### - ACI 214.4R:

Propone 2 approcci: > uno statisticamente fondato, più cautelativo  
> l'altro basato su stime empiriche, meno cautelativo

### - EN 13791:

Debole giustificazione teorica.

Utilizza formulazioni studiate per non danneggiare indebitamente i produttori di CLS in un contesto in cui questa figura non esiste.

### - NTC 2008 + Circolare 617 del 2009/ Eurocodice 8:

Semplice media dei valori sperimentali eventualmente (LC1, LC2)  
*abbattuta con fattori di confidenza di **origine qualitativa**.*





# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

## Limiti degli approcci attuali

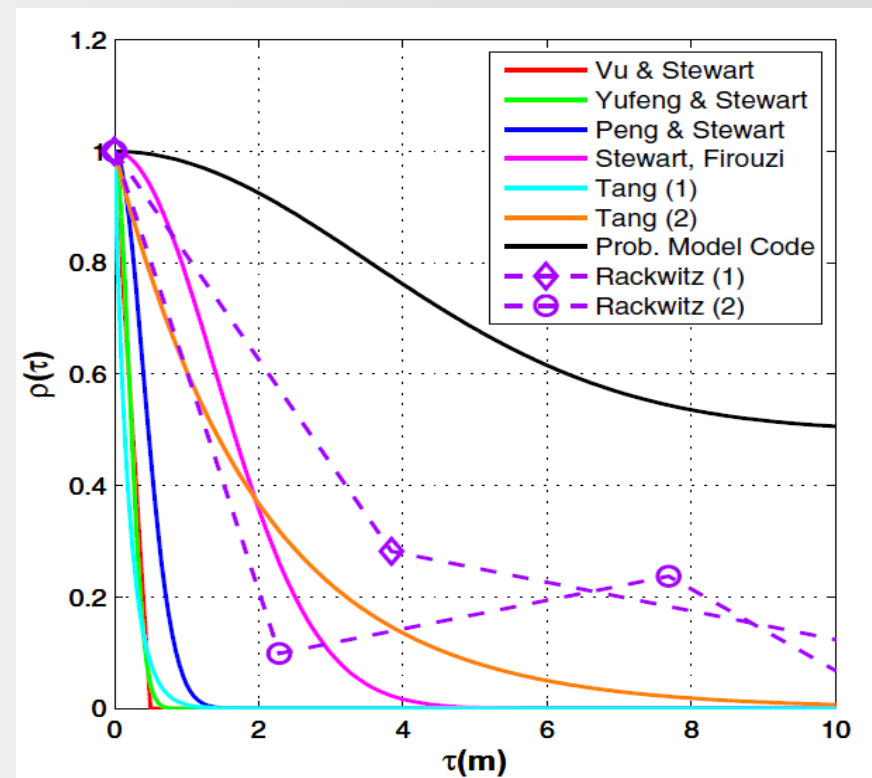
Approcci normativi, punti in comune:

- Ipotesi distribuzione normale delle resistenze:

*accettabile anche se una distribuzione lognormale sarebbe più appropriata.*

- Ipotesi campioni indipendenti:

*al riguardo non vi sono dati certi.*



M. Federico Bonfigli, Tesi di dottorato, Perugia 2017.



Marco Breccolotti

Perugia, 24 aprile 2017

Le indagini in situ su calcestruzzi ed acciai per la  
valutazione della vulnerabilità sismica delle opere d'arte

33/92

# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

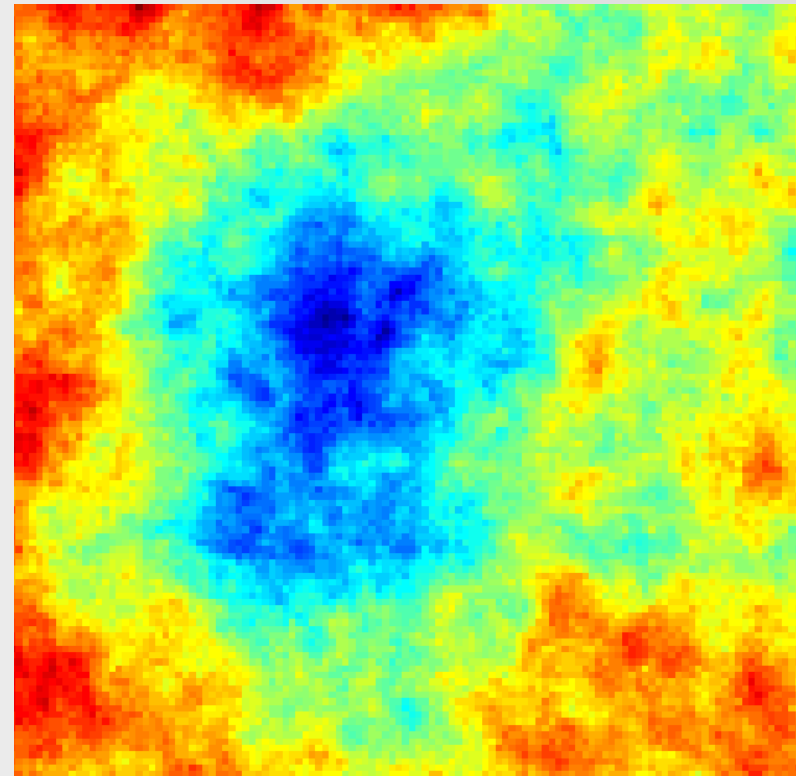
## Limiti degli approcci attuali

Approcci normativi, punti in comune:

- Ipotesi distribuzione normale delle resistenze
- Ipotesi campioni indipendenti ← è realistico? **NON È DETTO!**

La distribuzione delle resistenze in-situ è una  
«realizzazione di un campo stocastico»

→ Misurazioni ravvicinate produrranno valori positivamente correlati («simili»)



*M. Federico Bonfigli, Tesi di dottorato, Perugia 2017.*

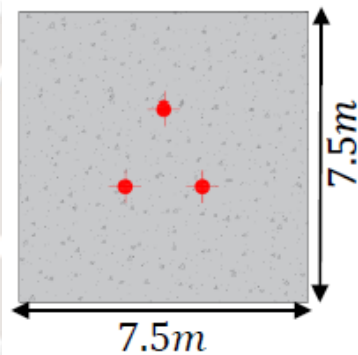


# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

## Limiti degli approcci attuali

Cosa implica una «cattiva» scelta dei punti di prova?

Se trascurata: una riduzione di confidenza nelle stime.



$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0.29 & 0.37 \\ 0.29 & 1 & 0.29 \\ 0.37 & 0.29 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\rho(x) = e^{-\frac{x^2}{4}}$$

$$\bar{\rho} = 0.313 \rightarrow k = 6.59$$

$$f_{p,\alpha} = \bar{x} - ks$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1 & 0.94 \\ 0.00 & 0.94 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\bar{\rho} = 0.313 \rightarrow k = 9.63$$

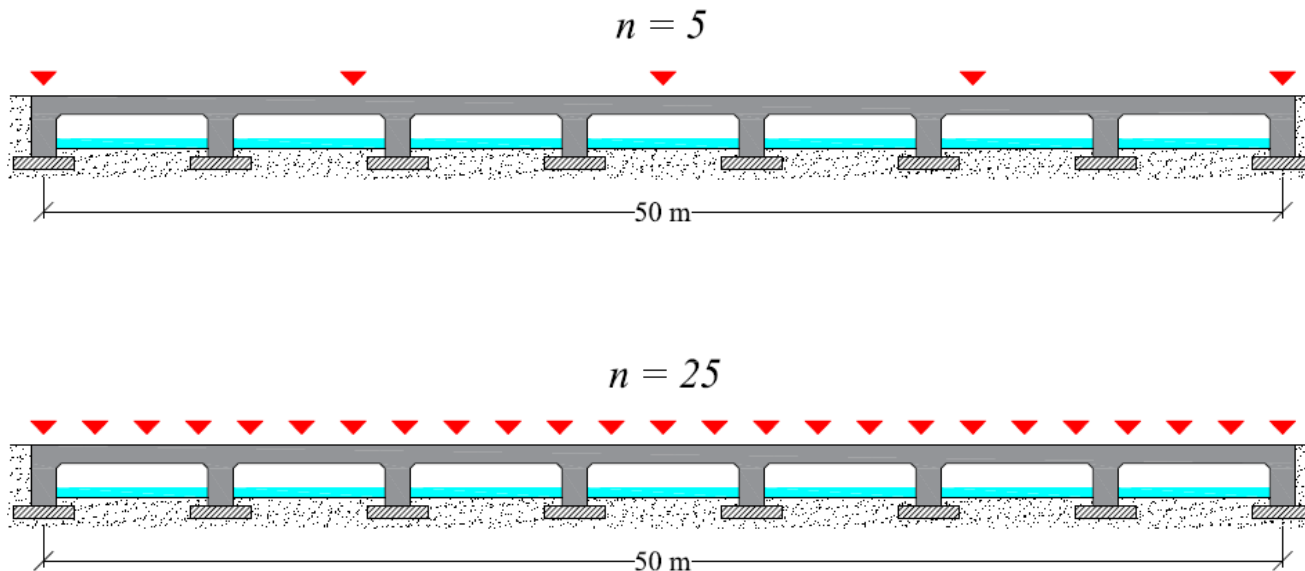
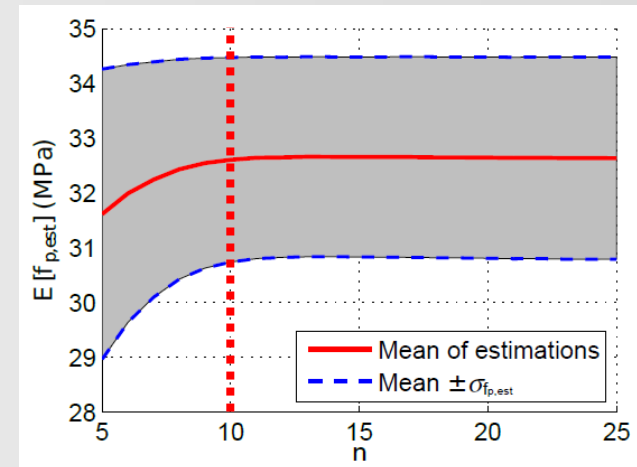


# Prove su calcestruzzi: Carotaggi

## Limiti degli approcci attuali

Cosa implica una «correlazione» tra le misure?

Un limite superiore al numero di campioni «ottimale».



Marco Breccolotti

Perugia, 24 aprile 2017

Le indagini in situ su calcestruzzi ed acciai per la  
valutazione della vulnerabilità sismica delle opere d'arte

36/92

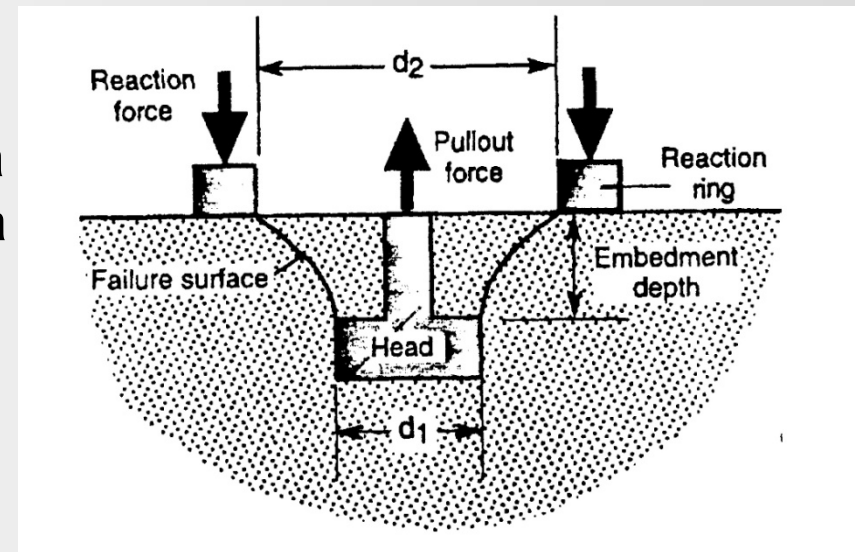
## Prove su calcestruzzi: Pull-out

Stima della resistenza a compressione, associata per definizione alla distruzione del materiale, mediante una o più altre grandezze che in genere sono ad essa correlate (misura indiretta).

Una prova di pull-out consiste nell'estrarre dall'elemento di calcestruzzo un inserto metallico di forma speciale, che vi è stato inserito.

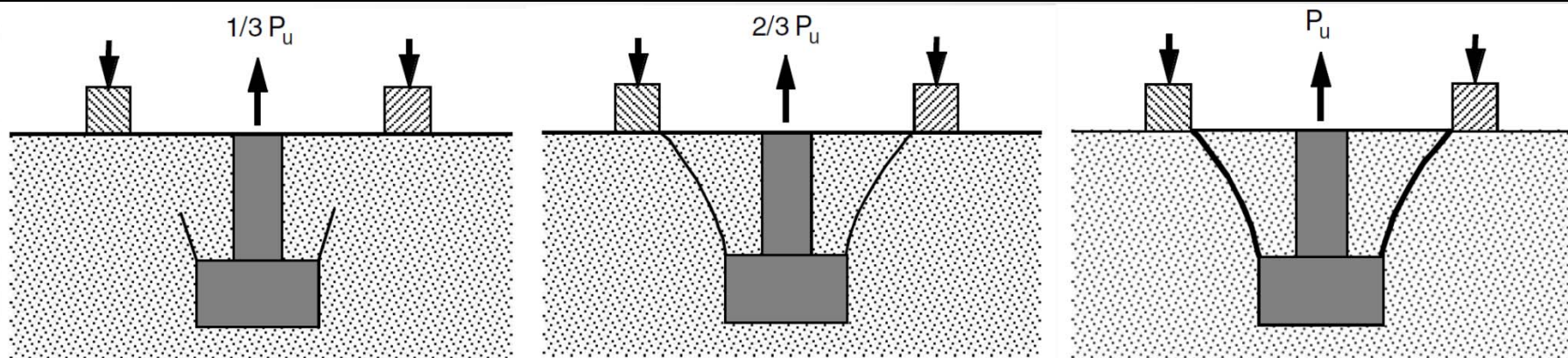
La forza necessaria ad estrarre l'inserto viene misurata tramite un dinamometro e viene utilizzata per stimare la resistenza a compressione del materiale.

Durante l'estrazione viene strappato via un cono di materiale e pertanto la prova è parzialmente distruttiva.





## Prove su calcestruzzi: Pull-out

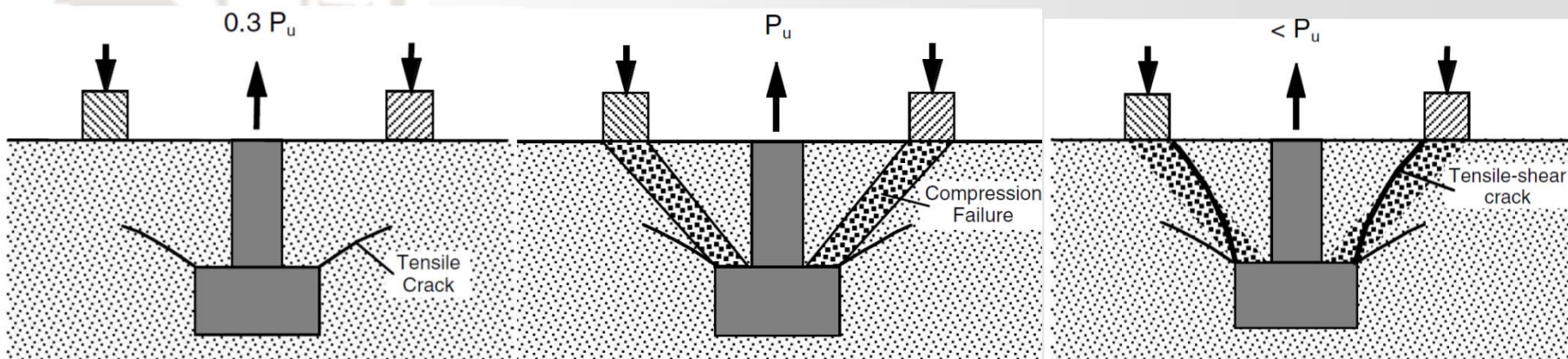


I - Circumferential cracking starts

II - Circumferential cracking complete, load carried by aggregate interlock

III - Aggregate pullout at ultimate load

Failure sequence based on NBS large-scale pullout tests (Stone and Carino 1983).



A Stage 1

B Stage 2

C Stage 3

Failure mechanism of pullout tests according to Krenchel and Bickley (1987).



**Marco Breccolotti**

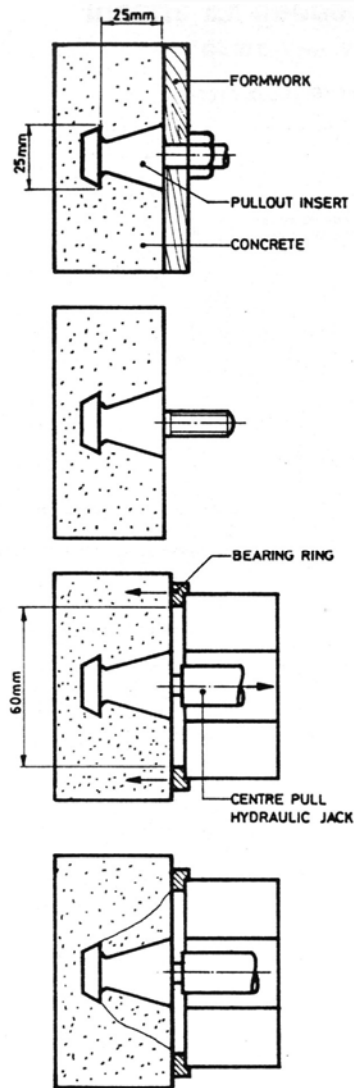
Perugia, 24 aprile 2017

Le indagini in situ su calcestruzzi ed acciai per la  
valutazione della vulnerabilità sismica delle opere d'arte

38/92

# Prove su calcestruzzi: Pull-out

## Inserto pre-inserito

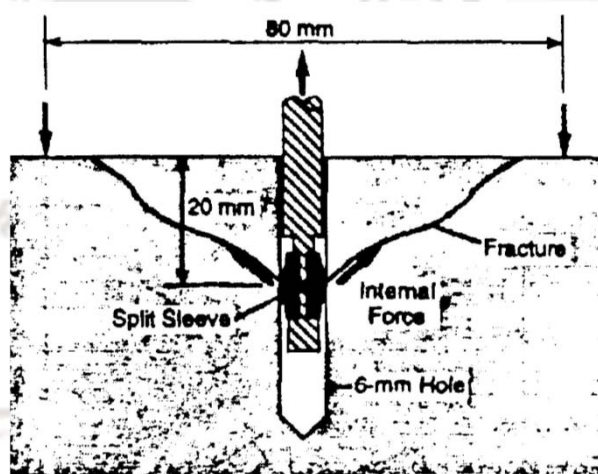


- 1) L'inserto metallico è montato all'interno della cassaforma prima del getto del calcestruzzo.
- 2) La cassaforma viene rimossa.
- 3) Un martinetto idraulico viene montato sulla superficie del calcestruzzo
- 4) Viene applicato al perno dell'inserto una forza di trazione crescente e viene estratto un cono di calcestruzzo.

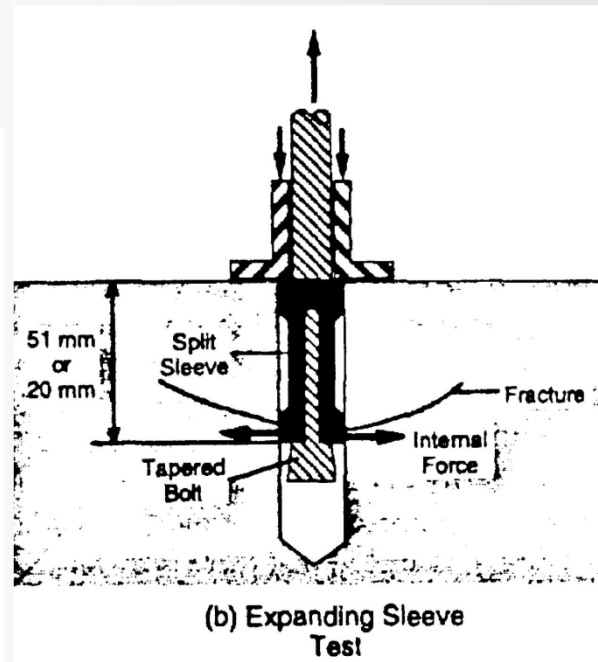
# Prove su calcestruzzi: Pull-out

## Inserto post-inserito

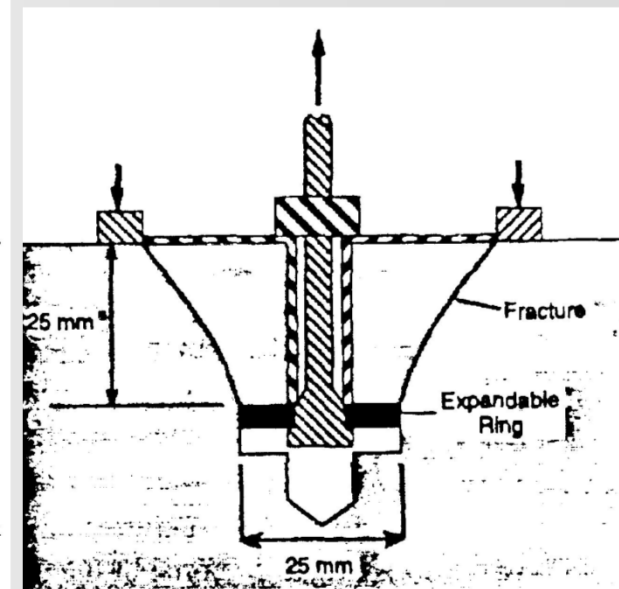
- Superfici di rottura inclinate di  $\sim 45^\circ$  (isostatiche di compressione)
- Resistenza di pull-out (essenzialmente resistenza a trazione) pari a circa il 20% della resistenza a compressione
- La correlazione tra forza di pull-out e resistenza cubica approx. lineare.



(a) BRE Internal Fracture Test



(b) Expanding Sleeve Test



(c) CAPO Test

## Prove su calcestruzzi: Pull-out

Correlazione tra pressione dell'olio misurata  $p$  (bar) e forza di estrazione  $F$  (kN).

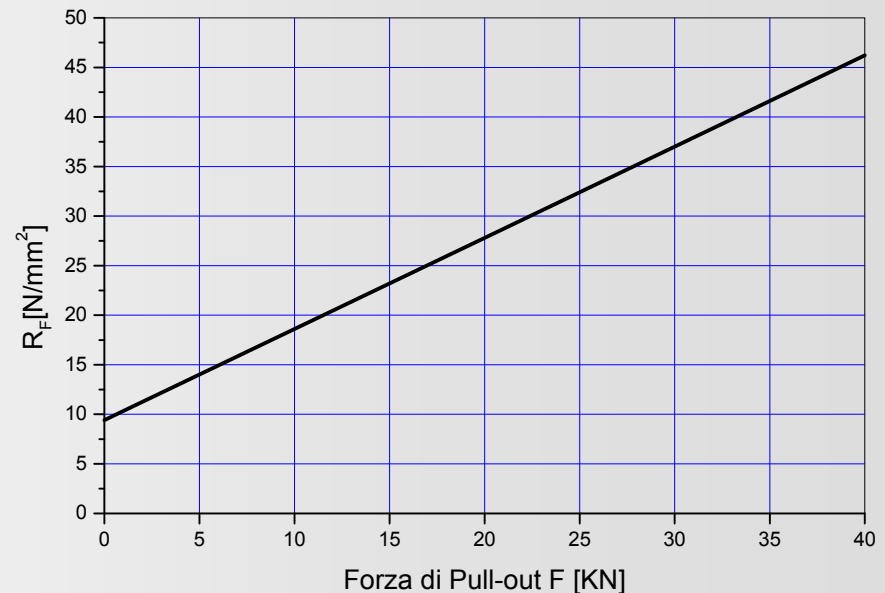
$$F[\text{kN}] = 0,161 \cdot p + 2,566$$

(correlazione esatta fornita dalla casa costruttrice del dispositivo di prova)

Una possibile correlazione tra forza di estrazione  $F$  [kN] e resistenza  $R_F$  [N/mm<sup>2</sup>]:

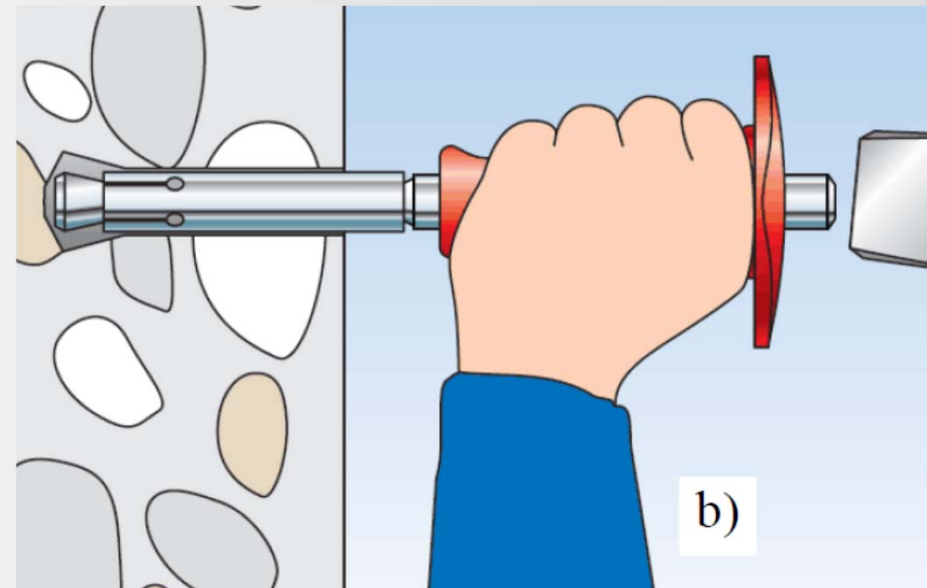
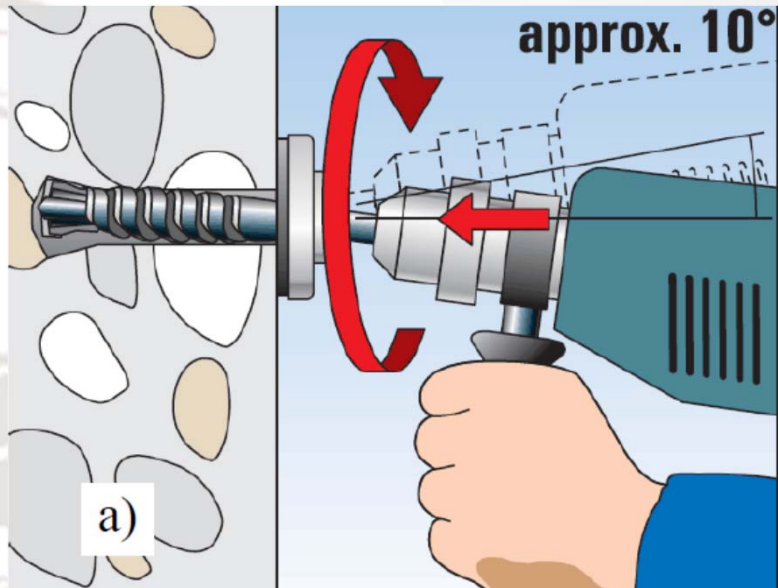
$$R_F \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] = 9,41 + 0,92 \cdot F_m [\text{kN}]$$

Per ogni punto di misura si eseguono 3 prove. Si assume come significativa la media delle  $F$ .





## Prove su calcestruzzi: Pull-out



### Fasi esecutive

- 1) perforazione cilindrica con punta di 14mm di diametro fino alla profondità di 45mm
- 2) Esecuzione di un foro tronco-conico con una speciale punta basculante con diametro alla base di circa 17-18mm
- 3) Inserimento del tassello e suo allargamento mediante percussione.





## Prove su calcestruzzi: Pull-out

Nuova metodologia di prova che riduce la dipendenza dei risultati dalle modalità esecutive dell'operatore.

### Fasi esecutive

- 1) Esecuzione di foro con punta al widia diam. 18 mm;
- 2) Realizzazione di cava cilindrica in profondità con smerigliatrice e fresa diamantata diam. 18 mm e gambo 11 mm.
- 3) Posa in opera di inserto in materiale plastico ad elevata resistenza ed espansione dello stesso nella cava cilindrica;
- 4) Estrazione dell'inserto con asportazione del cono di calcestruzzo.



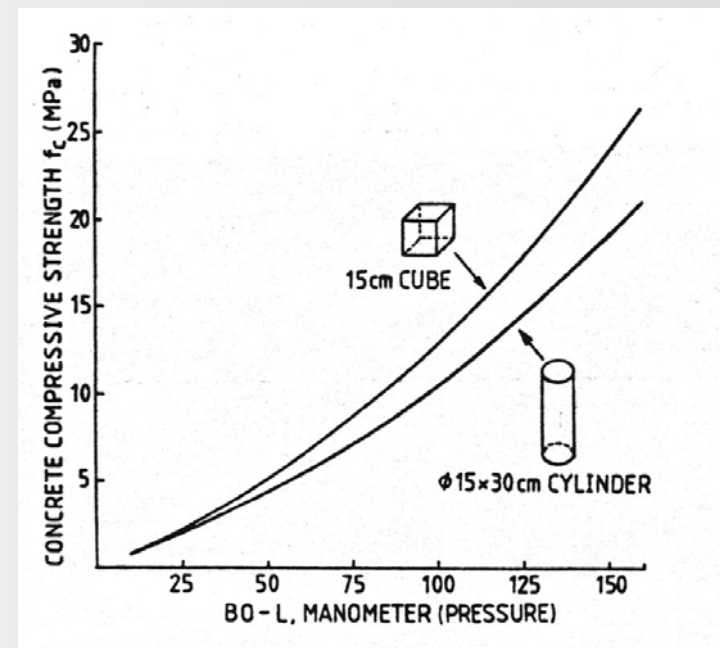
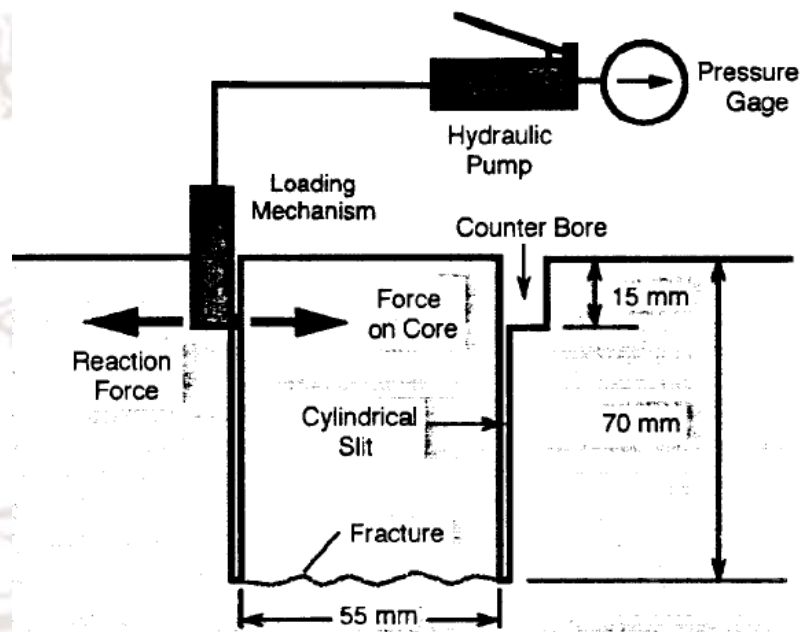
Conforme alle specifiche tecniche richieste dalla vigente norma UNI EN 12504-3:2005 “ Prove sul calcestruzzo nelle strutture Parte 3: Determinazione della forza di estrazione”.



## Prove su calcestruzzi: Break-off

Determinazione della resistenza a trazione per flessione del calcestruzzo secondo un piano parallelo alla superficie del calcestruzzo, ma all'interno di esso.

Il metodo è rapido e di semplice esecuzione ed i risultati non sono influenzati sensibilmente dalle condizioni della superficie del getto.

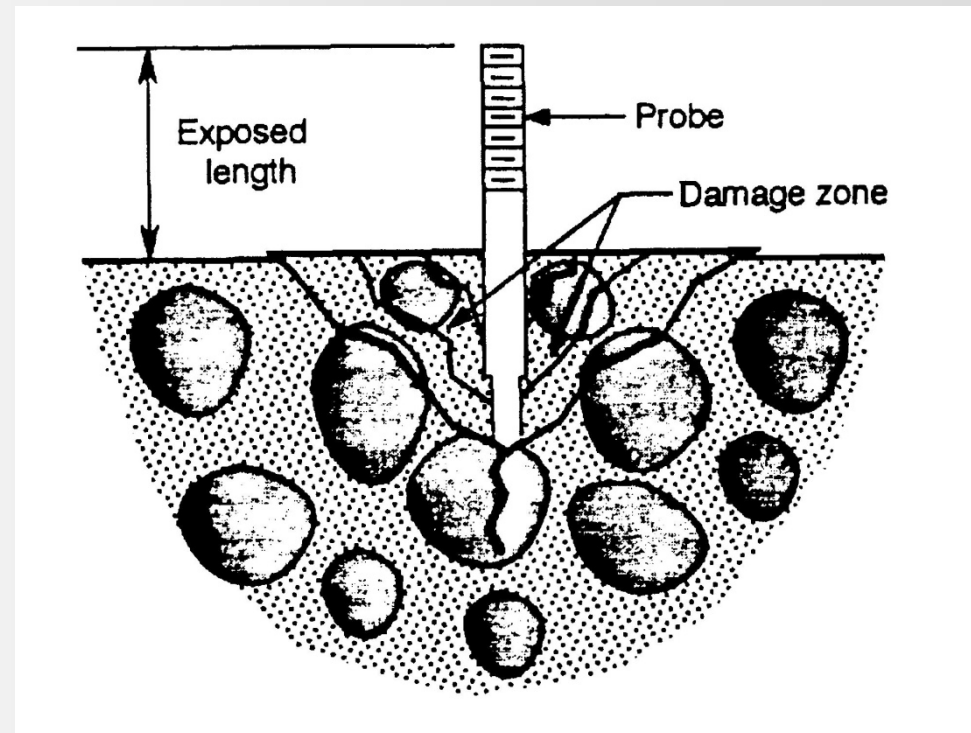


## Prove su calcestruzzi: sonda Windsor

Determinazione della resistenza alla penetrazione del calcestruzzo.

Una carica di polvere da sparo viene usata per conficcare una sonda di acciaio ad alta resistenza nel materiale sottoposto a prova.

La lunghezza della sonda che resta fuori del calcestruzzo è una misura della resistenza alla penetrazione, da cui si possono dedurre informazioni sulla resistenza a compressione.



## Prove su calcestruzzi: Sclerometro

---

Adattamento al calcestruzzo delle prove di durezza sui metalli (misura della profondità dell'impronta a seguito dell'impatto di una massa standardizzata sulla superficie del materiale sottoposto a prova).

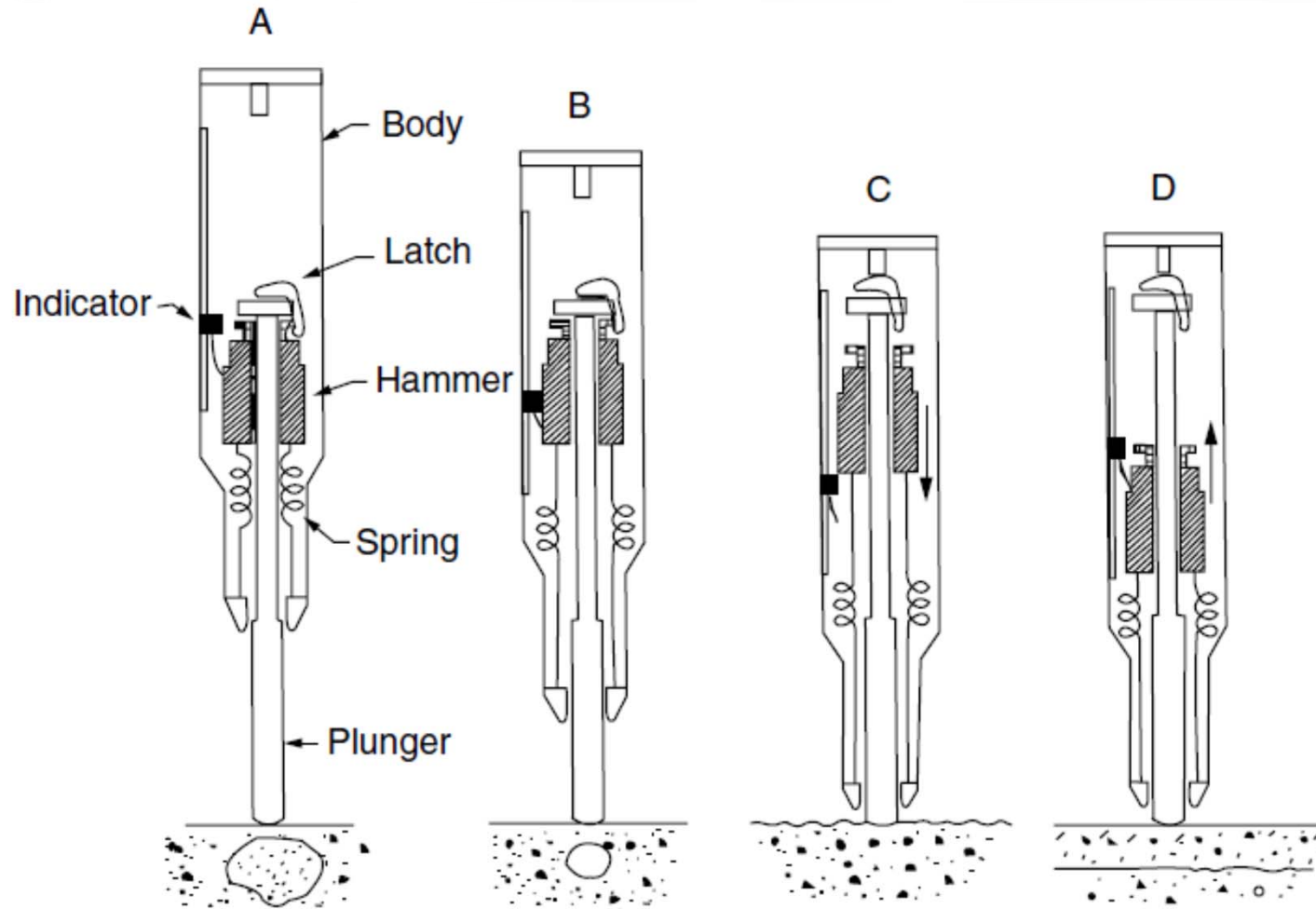
*Ernst Schmidt*, un ingegnere svizzero, sviluppò nel 1948 un dispositivo per eseguire prove sui calcestruzzi, basato sul principio del rimbalzo. La novità dell'opera di Schmidt consiste nell'averne standardizzato l'esecuzione.

UNI EN 12504-2, Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Determinazione dell'indice sclerometrico, 2001.



# Prove su calcestruzzi: Sclerometro

## Funzionamento dello sclerometro





## Prove su calcestruzzi: Sclerometro

---

In posizione di riposo la molla A è indeformata e mantiene l'asta B fuori dell'involucro C che racchiude il meccanismo. Il martello D è agganciato al disco E a mezzo di un gancio a leva F. Anche la molla G che pressa sul martello e sulla cassa esterna è indeformata.

Per eseguire la prova si dispone l'apparecchio perpendicolarmente alla superficie del getto, con l'estremità dell'asta B in contatto con la superficie.

Esercitando una pressione sullo strumento, l'asta rientra sull'involucro e sposta la massa scorrevole verso il fondo, caricando nel contempo le molle.





Quando l'asta B tocca il perno H questo fa scattare il gancio F che libera la massa mobile e la proietta contro l'incudine. Dopo l'urto il martello rimbalza e trascina un indice mobile lungo una scala graduata. La lettura è espressa da un numero intero (**indice di rimbalzo**) compreso tra 1 e 100 che esprime la lunghezza di rimbalzo in percentuale rispetto alla corsa.

---



# Prove su calcestruzzi: Sclerometro

Differenti modelli in funzione di resistenza e spessore del calcestruzzo

		Concrete Compressive Strength Range					
		1 - 5 MPa 145 - 725 psi	5 - 10 MPa 725 - 1,450 psi	10 - 30 MPa 1,450 - 4,351 psi	30 - 70 MPa 4,351 - 10,153 psi	70 - 100 MPa 10,153 - 14,504 psi	> 100 MPa > 14,504 psi
		Fresh Concrete Very Low Strength Concrete		Normal Concrete		High Strength Concrete	Ultra High Perform- ance Concrete
<b>SilverSchmidt</b> 	<b>SilverSchmidt ST/PC Type N</b>						<b>Only with user defined custom curves</b>
	<b>SilverSchmidt ST/PC Type L</b>						
<b>SilverSchmidt PC Type L with Mushroom Plunger</b> 							
<b>Original Schmidt Digi-Schmidt</b> 	<b>Original Schmidt Type N/ND/NR</b>						
	<b>Original Schmidt Type L/LD/LR</b>						
<b>Schmidt OS-120</b> 							
	<b>Schmidt OS-120PT</b>						
<b>Type N</b>	2.207 Nm (1.63 ft lbf)	Standard Impact energy. Test object should have a minimum thickness of 100 mm (3.9") and be firmly fixed in the structure.					
<b>Type L</b>	0.735 Nm (0.54 ft lbf)	Low Impact energy. Suitable for brittle objects or structures less than 100 mm (3.9") thick.					



**Marco Breccolotti**

Perugia, 24 aprile 2017

Le indagini in situ su calcestruzzi ed acciai per la  
valutazione della vulnerabilità sismica delle opere d'arte

49/92

## Prove su calcestruzzi: Sclerometro

---

Benché lo sclerometro fornisca un modo rapido e poco costoso per controllare l'uniformità del materiale, ha molte serie limitazioni e di esse bisogna essere consapevoli.

Per esempio i risultati con esso ottenuti dipendono dal grado di levigatezza della superficie, dalla eventuale carbonatazione e dal contenuto di umidità, dalla dimensione e dal tipo degli inerti (calcestruzzo) o dei mattoni ed infine dall'età dell'elemento strutturale.

Il funzionamento di uno strumento di questo tipo è basato sulla misura dell'energia dissipata nell'urto di una massa metallica mobile (martello) contro un'incudine che è tenuta a contatto della superficie da provare.

Il martello dello sclerometro è spinto da una molla di caratteristiche proporzionate alla durezza del materiale da provare ed al suo spessore: esistono pertanto sclerometri da muratura, da calcestruzzo, ecc.



## Prove su calcestruzzi: Sclerometro

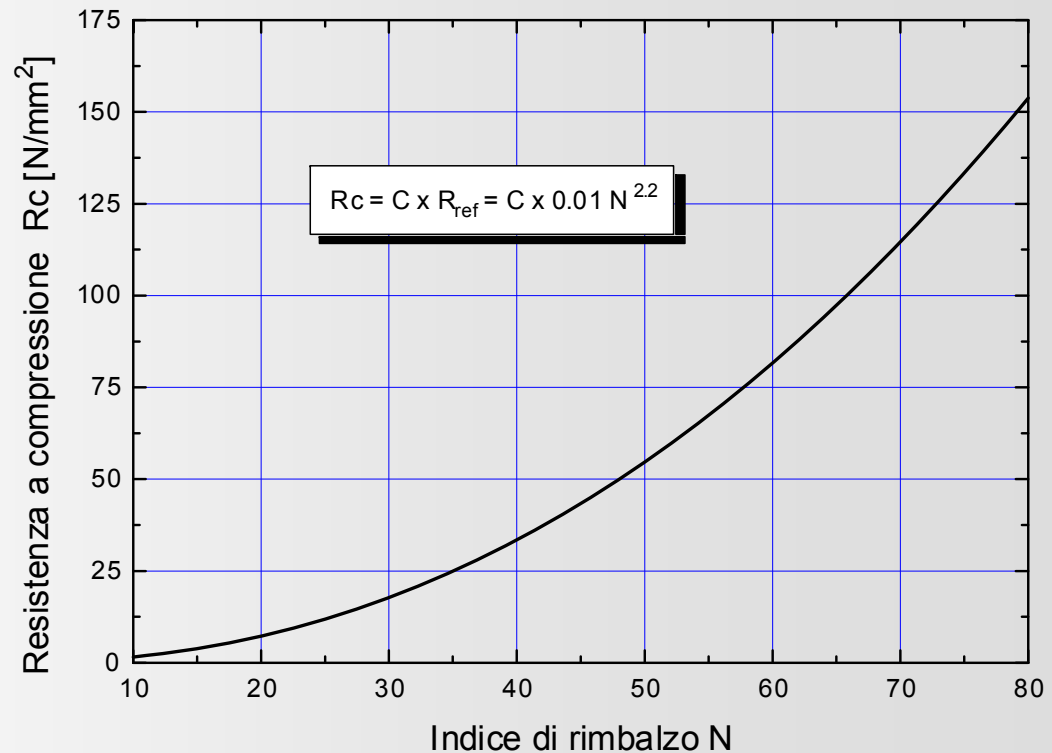
A questo punto, al fine di stimare la resistenza del materiale, occorre utilizzare una curva di calibrazione.

Nel caso del calcestruzzo si può utilizzare una relazione del tipo:

$$R_{\text{ref}} = 0.01 N^{2.2} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad N = \text{indice di rimbalzo}$$

Se il calcestruzzo in prova è diverso per composizione da quello di riferimento usato per la taratura della curva, occorre moltiplicare  $R_{\text{ref}}$  per un coefficiente correttivo  $C$ :

$$R_c = C \times R_{\text{ref}}$$



## Prove su calcestruzzi: Sclerometro

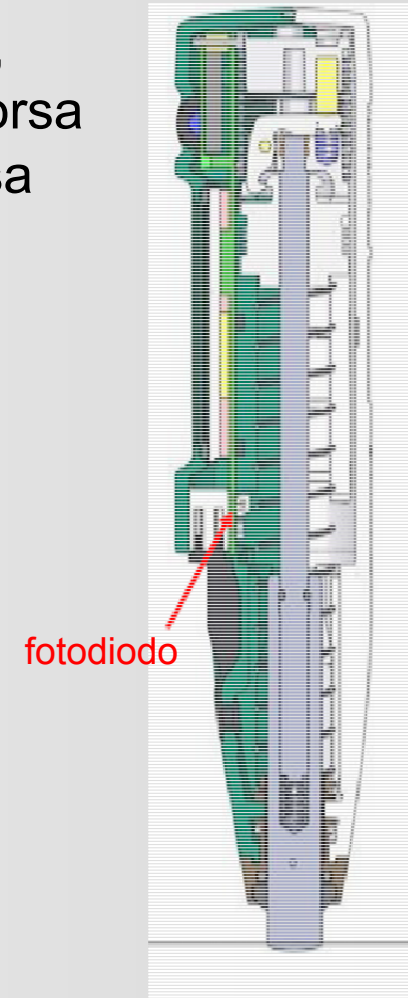
Gli sclerometri tradizionali misurano l'**indice di rimbalzo R**, definito come il rapporto percentuale tra la distanza  $x_r$  percorsa nello strumento dalla massa dopo l'impatto e quella percorsa prima dell'urto  $x_i$ :

$$R = \frac{x_r}{x_i} \cdot 100$$

Questa misura è tuttavia soggetta all'**influenza** degli **attriti interni** allo strumento e all'effetto della **forza di gravità**.

Per questi motivi i **più recenti sclerometri** fanno invece riferimento all'**indice Q**, che è pari al **rapporto** percentuale tra il valore della **velocità** della massa subito **prima e dopo l'impatto**, che si dimostra essere immune a tali fenomeni di disturbo.

$$Q = \sqrt{\frac{E_{k,r}}{E_{k,i}}} \cdot 100 = \frac{V_r}{V_i} \cdot 100$$



Sezione longitudinale  
sclerometro SilverSchmidt di Proceq





## Prove su calcestruzzi: Sclerometro

---

### Vantaggi

- semplicità e basso costo (dispositivo più usato per prove NDT).

### Svantaggi

- non esiste una relazione univoca tra indice di rimbalzo e resistenza;
- indaga solo il calcestruzzo superficiale;
- risente delle condizioni di umidità (una superficie asciutta conduce ad un indice di rimbalzo più elevato);
- è fortemente influenzato dalla carbonatazione (la presenza di uno strato superficiale carbonatato aumenta l'indice di rimbalzo);
- è influenzato dalla tessitura superficiale (una superficie liscia fornisce un indice di rimbalzo più elevato);
- risente dell'orientazione dello strumento rispetto alla verticale (sono disponibili fattori di correzione approssimati);
- risente della presenza di aggregati nella zona di prova.



## Prove su calcestruzzi: Sclerometro

---

Numerosità: per ogni punto di prova non meno di 9-10 battute.  
valori molto difforni dalla media verranno scartati

Se i risultati da scartare sono almeno due su dieci è opportuno scartare l'intero insieme delle misure relative al punto considerato.

Lo sclerometro è comunque utile per valutare la omogeneità e la uniformità della qualità del calcestruzzo.

Non è invece raccomandato il suo uso quando occorranò valutazioni accurate della resistenza.

Il grado di precisione che può essere ottenuto con lo sclerometro (su calcestruzzo) è:

- a) 12 - 18 % se sono disponibili campioni di calcestruzzo, prelevati in situ, per la taratura ed è nota la composizione;
- b) 15 - 20 % se sono disponibili solo campioni;
- c) 18 - 28 % se è nota solo la composizione;
- d) molto oltre il 30 % quando non sono disponibili dati per la taratura.



## Prove su calcestruzzi: Ultrasuoni

Parker (1953): primi tentativi alla Ontario Hydro di sviluppare correlazioni tra la velocità di propagazione delle onde elastiche e la resistenza meccanica.

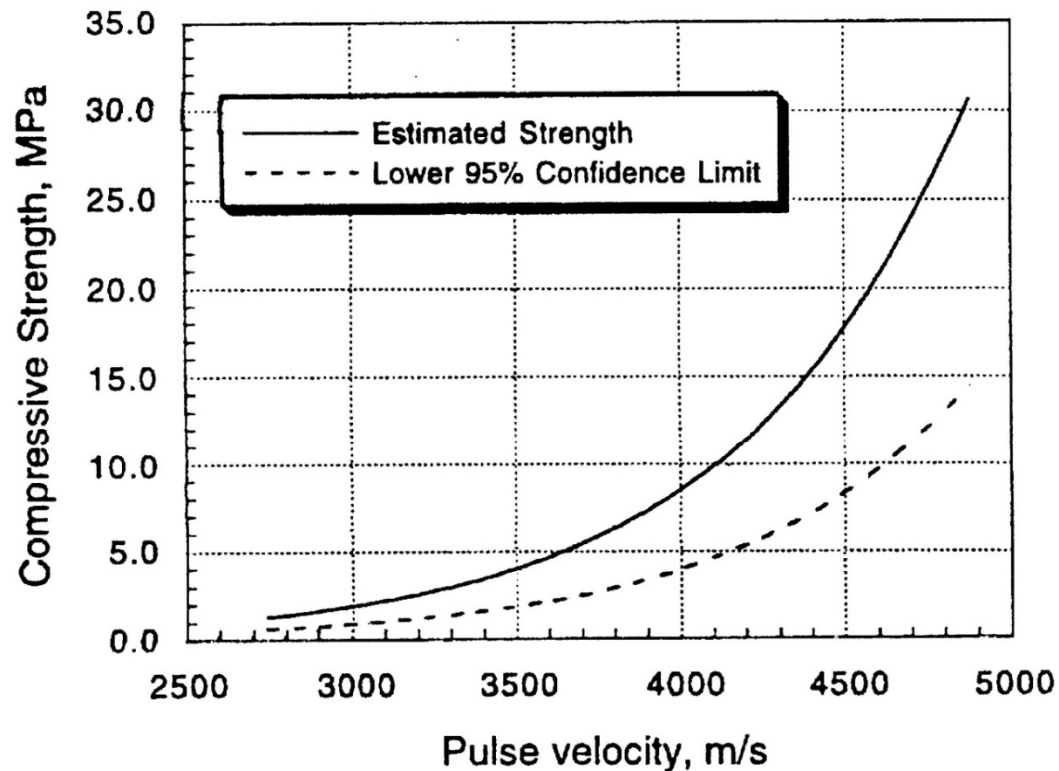


FIGURE 19.3 Compressive strength versus pulse velocity relationship based upon 46 mixtures made with the same aggregate [based on Parker, 1953].



## Prove su calcestruzzi: Ultrasuoni

Negli Stati Uniti una sonda sonica fu sviluppata nel 1947 dalla Portland Cement Association in collaborazione con Ontario Hydro e numerose applicazioni sono riferite da Whitehurst (1951).

In particolare l'Autore pubblicò una proposta di classificazione della qualità dei calcestruzzi basata sulla velocità degli ultrasuoni:

Velocità [m/s]	Qualità
Oltre 4570	Eccellente
3660-4570	Generalmente buona
3050-3550	Dubbia
2130-3050	Scadente
Sotto 2130	Molto scadente



## Prove su calcestruzzi: Ultrasuoni

---

Onde sonore: onde elastiche che si propagano attraverso fluidi e solidi.

Frequenze udibili dall'uomo: tra 20 Hz e 20 kHz (è tecnicamente possibile produrre onde elastiche della stessa natura di quelle udibili fino alla frequenza di circa 500 MHz).

Le onde elastiche di frequenza compresa tra 20 kHz e 500 MHz vengono dette ultrasuoni.

Le onde utilizzate nelle prove non - distruttive sui materiali sono di solito comprese tra le frequenze di 0.5 MHz e 20 MHz.

Fluidi: onde longitudinale (spostamento delle particelle intorno alla posizione di equilibrio in direzione di propagazione dell'onda).

Solidi: onde longitudinali, onde trasversali, onde superficiali (onde di Love, onde di Rayleigh, ecc.).





## Prove su calcestruzzi: Ultrasuoni

La velocità delle onde longitudinali in un fluido è data da:

$$V_c = \sqrt{\frac{K_a}{\rho}}$$

in cui  $K_a$  è il modulo di elasticità adiabatica e  $\rho$  è la densità.

Nei solidi la velocità delle onde longitudinali è data dall'espressione:

$$V_c = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}$$

in cui  $E$  è il modulo di elasticità e  $\nu$  è il coefficiente di Poisson.

Esempio: propagazione di onde longitudinali nell'acciaio:

$$E = 2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$$
$$\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3 \quad \nu = 0.30$$

$$V_c = \sqrt{\frac{(1-0.30)2.06 \times 10^{11}}{(1+0.30)(1-0.60)7850}} \cong 5940 \text{ m / s}$$



## Prove su calcestruzzi: Ultrasuoni

La velocità delle onde trasversali  $V_s$  nei solidi è all'incirca la metà di quelle longitudinali ed è data dall'espressione:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

in cui  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  è il modulo di elasticità tangenziale del materiale

Ritornando all'esempio dell'acciaio si ha:

$$V_s = \sqrt{\frac{2.06 \times 10^{11}}{2(1+0.3)7850}} \approx 3170 \text{ m/s}$$

Rapporto tra velocità delle onde trasversali e quella delle onde longitudinali:

$$\frac{V_s}{V_c} = \frac{3170}{5940} = 0.53$$



# Prove su calcestruzzi: Ultrasuoni

---

## Generazione degli ultrasuoni

Alcuni materiali cristallini esibiscono il cosiddetto effetto piezoelettrico, cioè il cristallo si dilata o si contrae se una differenza di potenziale è applicata alle facce del cristallo.

Allo stesso modo un campo elettrico si genera sulle facce del cristallo se esso è sottoposto a sforzi meccanici.

I materiali piezoelettrici sono alla base della maggior parte dei trasduttori elettromeccanici.

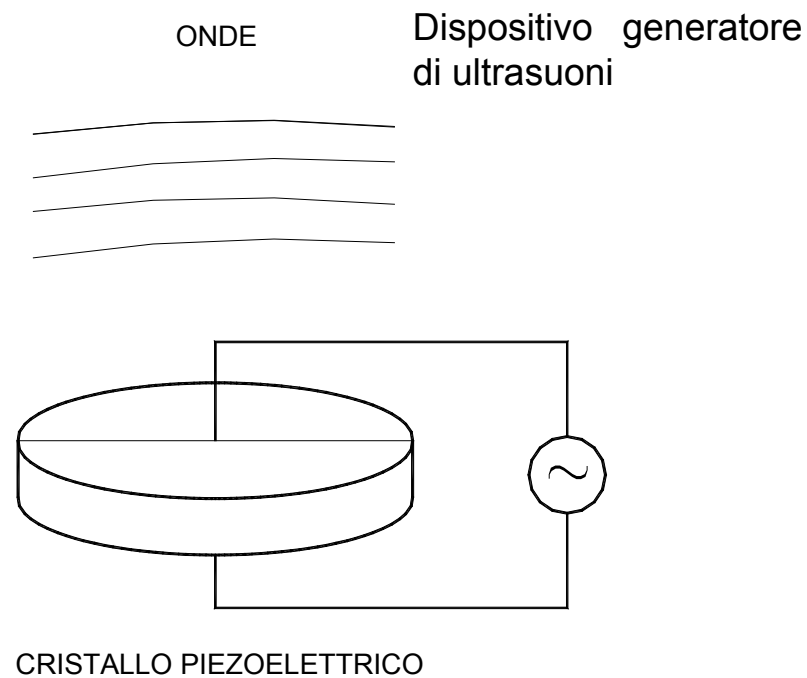
Il primo materiale piezoelettrico ad essere utilizzato è stato il quarzo naturale, che continua ad essere usato ancor oggi insieme ad altri materiali sintetici (ceramici), quali il titanato di bario, derivati del niobio e dello zirconio, ecc.



# Prove su calcestruzzi: Ultrasuoni

## Generazione degli ultrasuoni

Quando una differenza di potenziale alternata è applicata attraverso lo spessore di un disco di materiale piezoelettrico, questi si contrae e si espande, generando così un'onda di compressione normale al disco nel mezzo circostante.



## Prove su calcestruzzi: Ultrasuoni

---

Quando si utilizza il quarzo naturale, il disco deve essere tagliato secondo una particolare giacitura legata ai piani cristallini. Questo problema non esiste con i materiali ceramici.

La generazione delle onde elastiche è più efficiente quando il cristallo vibra secondo la (una) sua frequenza naturale, che dipende dalle dimensioni e dalle costanti elastiche del materiale impiegato.

Per questo motivo un cristallo da 10 MHz è più sottile di uno da 5 MHz.

Val la pena sottolineare che un cristallo per la generazione del suono è anche in grado di rivelare il suono (trasduttore).

Un'onda ultrasonica che incide su un cristallo, lo mette in vibrazione generando una tensione alternata sulle facce opposte.





## Prove su calcestruzzi: Ultrasuoni

---

In alcune tecniche di indagine, come vedremo più avanti, si utilizzano due trasduttori (uno che produce il raggio ed uno che lo riceve), ma nella maggior parte dei casi è sufficiente un solo trasduttore.

Questo agisce tanto da trasmittente che da ricevitore.

Gli ultrasuoni vengono trasmessi come treno di impulsi di brevissima durata e, durante gli intervalli di tempo tra gli impulsi, il cristallo può rilevare i segnali riflessi.

UNI EN 12504-4, Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici, 2005.

---



# Prove su calcestruzzi: Ultrasuoni

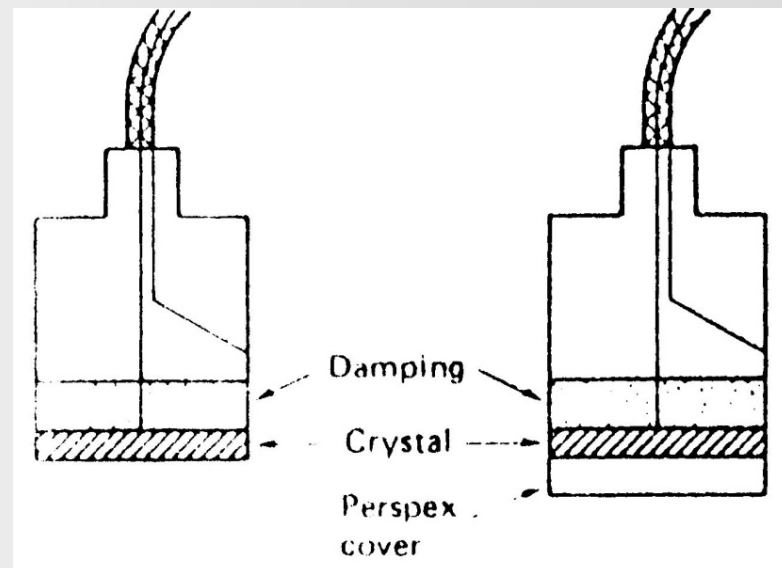
## Tipi di sonde

Configurazione tipica: cristallo posto in contatto direttamente o per il tramite di una custodia protettiva con il materiale sottoposto a prova.

Un impulso di tensione di brevissima durata viene applicato al cristallo e lo mette in vibrazione alla sua frequenza naturale.

Dopo che l'impulso di tensione è terminato l'oscillazione del cristallo dovrebbe attenuarsi il più velocemente possibile. A tale scopo il cristallo è appoggiato ad uno strato di materiale smorzante.

Sonde normali progettate per trasmettere un'onda di compressione secondo la direzione ortogonale alla sua superficie.

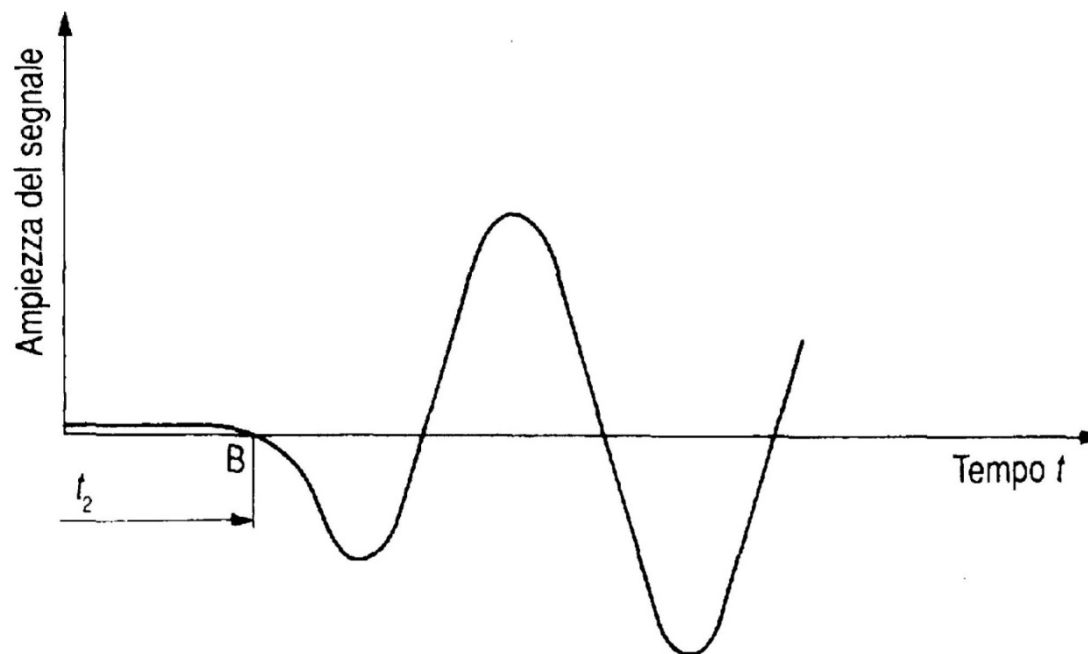


# Prove su calcestruzzi: Ultrasuoni

## Rappresentazione dei risultati

Sull'oscilloscopio viene rappresentata la storia temporale del segnale ricevuto dalla sonda ricevente.

Il tempo  $t$  impiegato dal segnale per percorrere la distanza  $L$  (misurata) si ricava in corrispondenza del punto di deviazione della prima semionda.

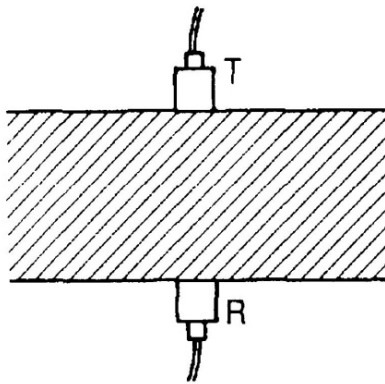


# Prove su calcestruzzi: Ultrasuoni

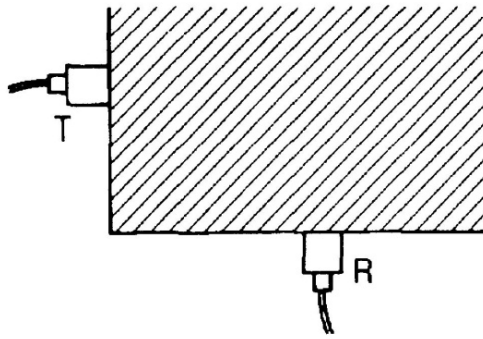
## Modalità di esecuzione delle prove

Prova per trasparenza: si usano trasmettitore e ricevitore separati

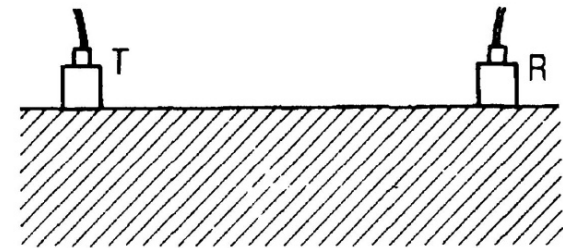
La prova può avvenire tra i lati opposti di un solido (trasmissione diretta), tra lati contigui in corrispondenza di uno spigolo (trasmissione semidiretta), sullo stesso lato (trasmissione indiretta).



a) trasmissione diretta



b) trasmissione semidiretta



c) trasmissione indiretta

T = sonda trasmittente

R = sonda ricevente

# Prove su calcestruzzi: Ultrasuoni



(a)

(a) SOUND CONCRETE

SOUND WAVES TRAVEL SHORTEST DISTANCE BETWEEN  $T_x$  AND  $R_x$

$$V_0 \approx \frac{L}{t_0}$$



(b)

(b) REINFORCING STEEL

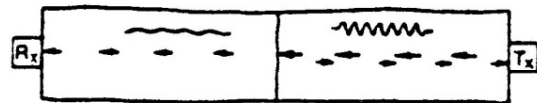
SOUND WAVES TRAVELLING THROUGH STEEL ARRIVE BEFORE THOSE THROUGH CONCRETE



(c)

(c) SHALLOW CRACK

SOUND WAVES TRAVEL AROUND CRACK  
 $t_1 > t_0$  ;  $V_1 < V_0$



(d)

(d) NARROW CRACK

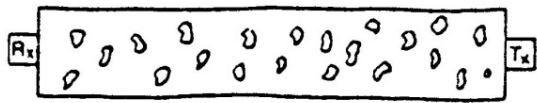
SOUND WAVES PARTIALLY REFLECTED AND PARTIALLY TRANSMITTED WITH LARGE LOSS OF AMPLITUDE BUT ONLY SLIGHT INCREASE IN  $t_0$



(e)

(e) WIDE CRACK

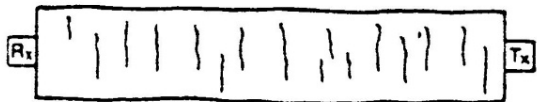
SOUND WAVES WHOLLY REFLECTED. NO SIGNAL RECEIVED



(f)

(f & g) VOIDS AND MICRO CRACKS

SOUND WAVES MAY TRAVEL AROUND OR ACROSS THEM (IF WATER FILLED) WITH INCREASE OF TRANSIT TIME



(g)

CONDITIONS THAT INFLUENCE TRANSMISSION OF SOUND WAVES IN CONCRETE





## Prove su calcestruzzi: Ultrasuoni

---

La misura della velocità di propagazione delle onde elastiche longitudinali viene effettuata misurando il tempo  $t$  necessario a percorrere una distanza nota  $l$ . Normalmente viene utilizzata la prova per trasparenza.

La velocità è allora semplicemente:  $v = \frac{l}{t}$

A questo punto occorre impiegare una correlazione tra velocità e resistenza meccanica. Nel caso del calcestruzzo viene talvolta utilizzata una legge del tipo:

$$R_c = a \cdot e^{1.1v} \quad [\text{N/mm}^2] \quad a = 0.24 \text{ N/mm}^2$$

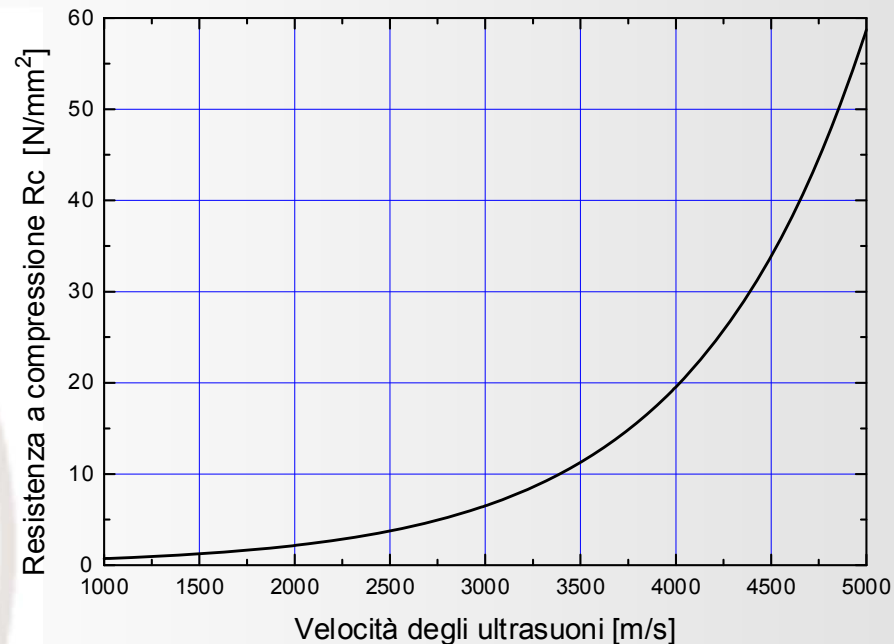
in cui la  $v$  è espressa in Km/s ed  $a$  è una opportuna costante che deve essere calibrata su un campione di riferimento portato a rottura.

A titolo di controllo se  $v = 3600 \text{ m/s} = 3.6 \text{ Km/s}$  si ha:

$$R_c = 0.24 e^{1.1 \times 3.6} = 12.6 \text{ N/mm}^2$$



## Prove su calcestruzzi: Ultrasuoni



Il margine di errore della procedura di stima è il seguente:

- a) 12 - 16% quando sono disponibili campioni del calcestruzzo ed è nota la composizione
- b) 14 - 18% quando sono disponibili solo campioni
- c) 18 - 25% quando è nota solo la composizione del calcestruzzo
- d) oltre il 30% quando non sono disponibili dati di alcun tipo per la taratura.



## Prove su calcestruzzi: SonReb

---

Questo metodo di indagine, totalmente non distruttivo, è basato sulle misurazioni simultanee della velocità di propagazione di ultrasuoni (Son) e sull'indice di rimbalzo allo sclerometro (Reb, da rebound = rimbalzo).

I vantaggi di questo metodo, che è stato applicato principalmente alle costruzioni di calcestruzzo, sono i seguenti:

- la precisione dei risultati è poco influenzata dal contenuto di umidità del calcestruzzo, dal grado di maturazione, dal contenuto in cemento, dalla dimensione degli inerti (al contrario del metodo degli ultrasuoni) e dal grado di carbonatazione (al contrario del metodo che usa il solo sclerometro);
- i risultati forniscono informazioni su tutto lo spessore del calcestruzzo;
- non c'è bisogno di speciale preparazione prima del getto del calcestruzzo e non c'è danneggiamento dopo la prova.



## Prove su calcestruzzi: SonReb

Metodo basato sulla definizione di un calcestruzzo di riferimento, per il quale vengono calibrate curve di ugual resistenza, disegnate in un sistema di riferimento velocità di propagazione e indice di rimbalzo.

Per calcestruzzi diversi da quello di riferimento, il risultato ottenuto dal grafico deve essere corretto, applicando un fattore correttivo  $C_t$ :  $R_{\text{eff}} = R_{\text{ref}} \times C_t$

Le strade per determinare  $C_t$  possono essere tre.

1) Quando sono disponibili campioni carotati del calcestruzzo in prova,  $C_t$  può essere calcolato sottoponendo a prova non distruttiva e poi distruttiva i campioni:

$$C_t^{\text{sperim}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{R_{\text{eff},i}}{R_{\text{ref},i}}$$

in cui

$R_{\text{eff},i}$  è la resistenza ottenuta dalla prove distruttive e

$R_{\text{ref},i}$  è la resistenza ottenuta dalle prove non-distruttive



## Prove su calcestruzzi: SonReb

2) Quando è nota la composizione del calcestruzzo:

$$C_t^{teor} = C_c C_d C_a C_g C_\varphi$$

in cui i coefficienti a secondo membro tengono conto:

- $C_c$  del tipo di cemento;
- $C_d$  del contenuto di cemento;
- $C_a$  del tipo di inerti;
- $C_g$  della quantità di inerte fine;
- $C_\varphi$  della dimensione massima degli inerti

Questi coefficienti sono disponibili sotto forma di tabelle.





## Prove su calcestruzzi: SonReb

---

3) Se sono disponibili tanto prove sperimentali che la composizione, i due coefficienti, quello sperimentale e quello teorico sono calcolati e paragonati fra loro.

Se la differenza tra di loro è minore del 20% si calcola una media pesata con l'espressione seguente:

$$C_t = \frac{2C_t^{sperim} + C_t^{teor}}{3}$$

Si attribuisce maggiore importanza (peso) al coefficiente sperimentale.

In caso contrario occorre approfondire le indagini per individuare, tra i due, il valore meno affidabile (di solito è  $C_t^{teor}$ ).



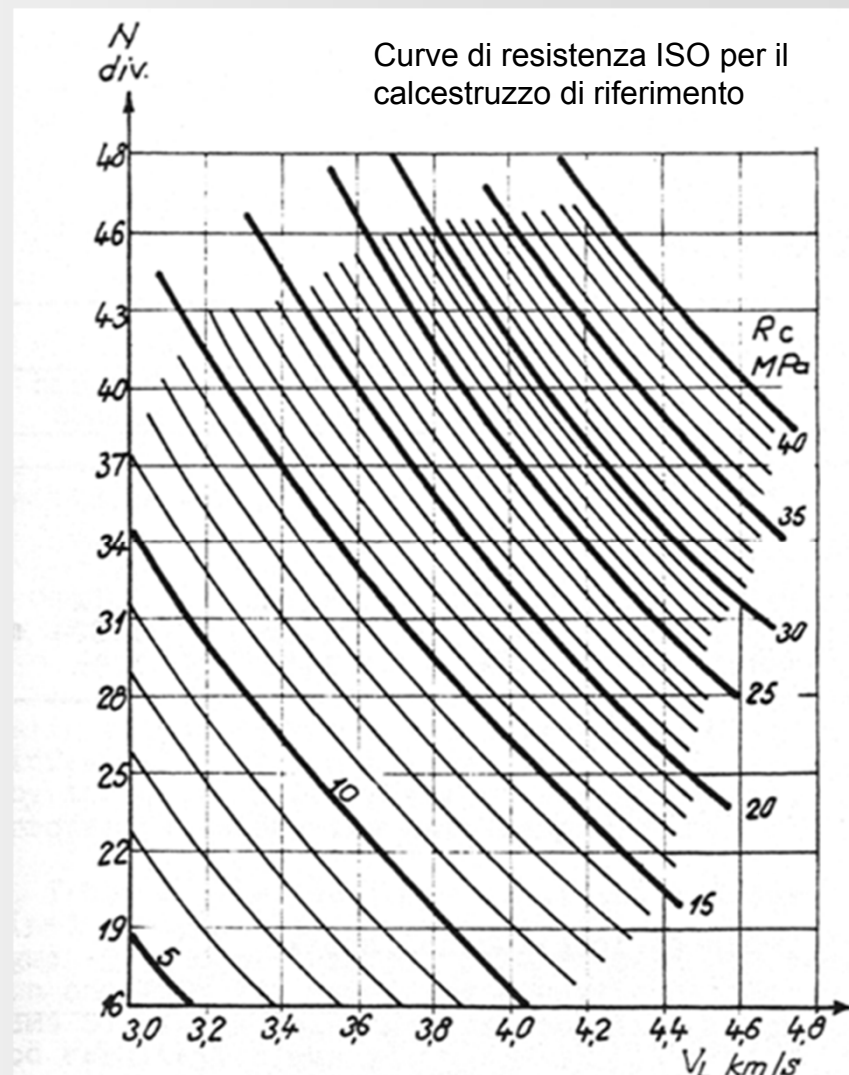
## Prove su calcestruzzi: SonReb

Correlazione tra Indice sclerometrico  $N$ , Velocità di propagazione degli ultrasuoni  $V$  (m/s) e Resistenza meccanica  $R_{V-N}$  ( $N/mm^2$ ).

$$R_{V-N} = 7,695 \cdot 10^{-11} \cdot V^{2,6} \cdot N^{1,4}$$

Livelli di precisione ottenibili:

- a) 10-14% (campioni + composizione)
- b) 12-16% (solo campioni)
- c) 15-20% (solo composizione)
- d) oltre il 20% (né campioni, né composizione)



## Prove su calcestruzzi: Carbonatazione

La prova si basa sulla proprietà di un reagente chimico ad indicare, con variazione di colore, la basicità di una soluzione acquosa presente su una superficie.

Generalmente è utilizzata una soluzione all'1% di fenolftaleina in alcool etilico. La fenolftaleina vira al rosso al contatto con soluzioni il cui pH è maggiore di 9.2 e rimane incolore per valori di pH minori, quali quelle del calcestruzzo carbonatato (UNI EN 14630:2007).

### C8A.2.3 COSTRUZIONI IN CALCESTRUZZO ARMATO O IN ACCIAIO: LIVELLI DI CONOSCENZA

*Metodi di prova non distruttivi:* Sono ammessi metodi di indagine non distruttiva di documentata affidabilità, che non possono essere impiegati in completa sostituzione di quelli sopra descritti, ma sono consigliati a loro integrazione, purché i risultati siano tarati su quelli ottenuti con prove distruttive. Nel caso del calcestruzzo, è importante adottare metodi di prova che limitino l'influenza della carbonatazione degli strati superficiali sui valori di resistenza.

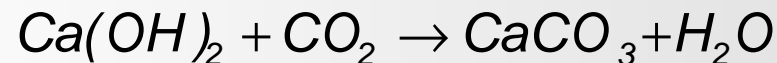


# Prove su calcestruzzi: Carbonatazione

## Reazione di carbonatazione

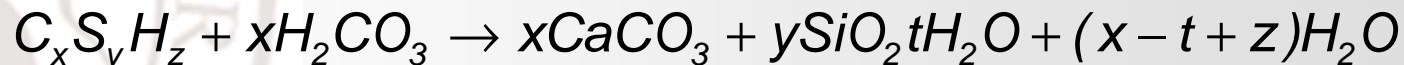
Le reazioni che portano alla formazione di carbonato di calcio nella matrice sono due:

### 1. Dissoluzione dell'idrossido di calcio



### 2. Carbonatazione dei silicati idrati di calcio (C-S-H)

La generica reazione si scrive come:



La **velocità** di penetrazione del **fronte carbonatato** dipende da vari fattori, e principalmente da:

**Umidità relativa:** Umidità relativa bassa rende difficoltosa la dissoluzione di  $\text{CO}_2$ . Umidità relativa alta rende invece difficoltosa la diffusione di  $\text{CO}_2$ .

**Porosità del calcestruzzo:** Una maggiore porosità agevola la diffusione di  $\text{CO}_2$  e quindi la velocità di penetrazione della carbonatazione aumenta.

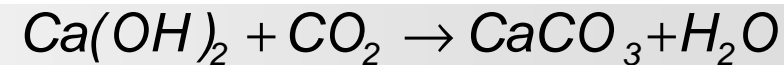
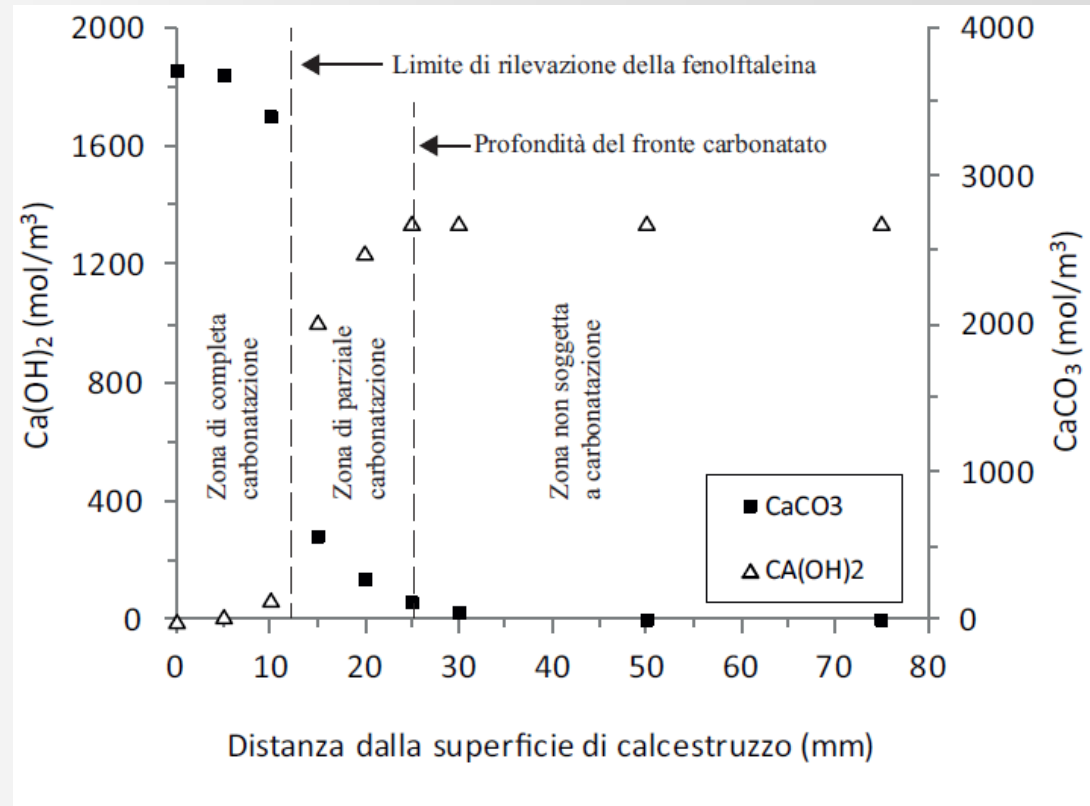




## Prove su calcestruzzi: Carbonatazione

La carbonatazione in realtà si estende oltre l'altezza rilevata dalla fenolftaleina.

Lo spessore non rilevato è stato definito dai ricercatori come di **parziale carbonatazione** e l'evidenza sperimentale ha mostrato che ha uno **spessore molto simile a quello rilevato dalla fenolftaleina**



CHANG C. , CHEN J., *Strength and Elastic Modulus of Carbonated Concrete*, ACI Materials Journal, 102 pagg.315-321, ottobre 2005.





# Prove su calcestruzzi: Carbonatazione

## Influenza della carbonatazione sulle misure sclerometriche

Due diversi approcci al problema:

1. Determinazione di un coefficiente riduttivo  $\alpha$  della resistenza in funzione dell'età  $t$  del calcestruzzo. Approccio che ha avuto più seguito nella letteratura scientifica.

$$f_c(R,t) = f(R) \cdot \alpha(t)$$

Età (giorni)	$\alpha$
< 28	1,0
28 – 182	0,9-1,0 (var. lineare)
> 182	0,9

TANIGAWA Y. et al., ACI Spec. Publ. SP82, 1988

$$\alpha(R,t) = 1 - \frac{n_1}{(R/R_0)^{n_2}} \left( \frac{t-28}{t+n_3} \right)$$

KIM J. et al., Cement & Concrete Composites, 31, 2009

Età (giorni)	$\alpha$
28	1,0
50	0,87
70	0,84
100	0,78
200	0,72
500	0,67
1000	0,65
3000	0,63

AIJ, *Manual of nondestructive test methods for the evaluation of concrete strength*, 1983

**Limite:** Si trascura totalmente il fatto che lo sviluppo del fronte di carbonatazione non è solo funzione del tempo ma anche delle condizioni ambientali in cui il calcestruzzo è posto.



# Prove su calcestruzzi: Carbonatazione

## Influenza della carbonatazione sulle misure sclerometriche

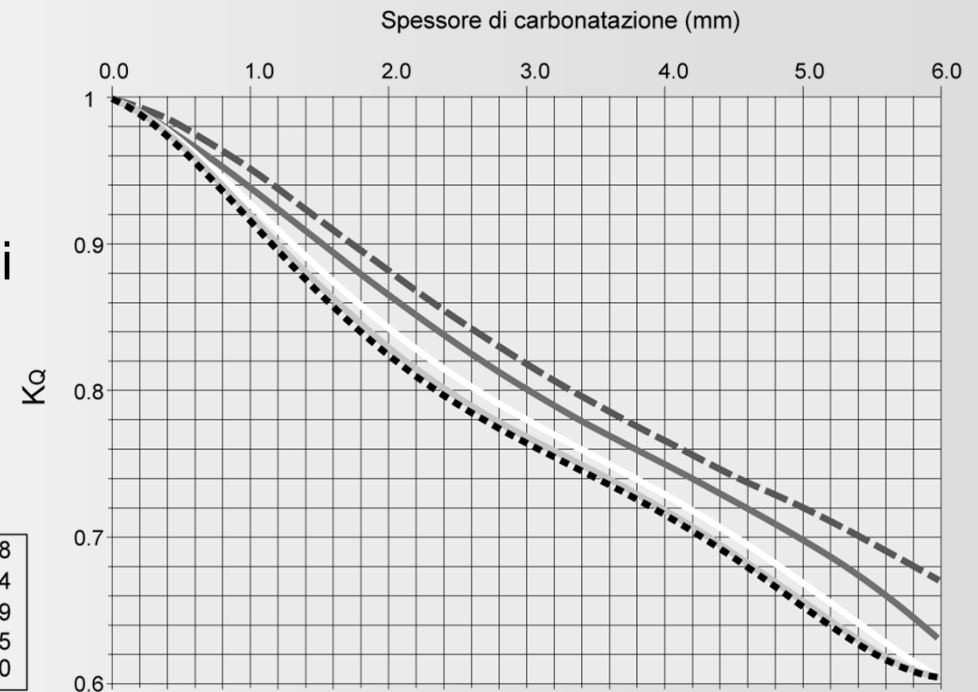
Due diversi approcci al problema:

2. Correzione dell'indice di rimbalzo mediante coefficienti correttivi in funzione dello spessore di carbonatazione.

Proceq, sulla base della norma cinese JGJ/T 23-2001, ha determinato delle curve di correzione della misura dell'indice di rimbalzo in funzione dello spessore di carbonatazione.

Curve Proceq

---	23 - 28
—	28 - 34
—	34 - 39
—	39 - 45
...	45 - 50



# Prove su calcestruzzi: Carbonatazione

## Influenza della carbonatazione sulle misure sclerometriche

### Norma cinese JGJ/T 23-2001

Technical Specification for Inspection of Concrete Compressive Strength by Rebound Method

附录 A 测区混凝土强度换算表

平均回弹值 $R_m$	测区混凝土强度换算值 $f_{cu,i}$ (MPa)												
	平均碳化深度值 $d_m$ (mm)												
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	$\geq 6.0$
20.0	10.3	10.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20.2	10.5	10.3	10.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20.4	10.7	10.5	10.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20.6	11.0	10.8	10.4	10.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20.8	11.2	11.0	10.6	10.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
21.0	11.4	11.2	10.8	10.5	10.0	—	—	—	—	—	—	—	—
21.2	11.6	11.4	11.0	10.7	10.2	—	—	—	—	—	—	—	—
21.4	11.8	11.6	11.2	10.9	10.4	10.0	—	—	—	—	—	—	—
21.6	12.0	11.8	11.4	11.0	10.6	10.2	—	—	—	—	—	—	—
21.8	12.3	12.1	11.7	11.3	10.8	10.5	10.1	—	—	—	—	—	—
22.0	12.5	12.2	11.9	11.5	11.0	10.6	10.2	—	—	—	—	—	—
22.2	12.7	12.4	12.1	11.7	11.2	10.8	10.4	10.0	—	—	—	—	—
22.4	13.0	12.7	12.4	12.0	11.4	11.0	10.7	10.3	10.0	—	—	—	—
22.6	13.2	12.9	12.5	12.1	11.6	11.2	10.8	10.4	10.2	—	—	—	—
22.8	13.4	13.1	12.7	12.3	11.8	11.4	11.0	10.6	10.3	—	—	—	—
23.0	13.7	13.4	13.0	12.6	12.1	11.6	11.2	10.8	10.5	10.1	—	—	—
23.2	13.9	13.6	13.2	12.8	12.2	11.8	11.4	11.0	10.7	10.3	10.0	—	—
23.4	14.1	13.8	13.4	13.0	12.4	12.0	11.6	11.2	10.9	10.4	10.2	—	—
23.6	14.4	14.1	13.7	13.2	12.7	12.2	11.8	11.4	11.1	10.7	10.4	10.1	—
23.8	14.6	14.3	13.9	13.4	12.8	12.4	12.0	11.5	11.2	10.8	10.5	10.2	—
24.0	14.9	14.6	14.2	13.7	13.1	12.7	12.2	11.8	11.5	11.0	10.7	10.4	10.1

Indice di rimbalzo medio  $R_m$

Spessore medio dello strato carbonatato (mm)

Resistenza a compressione attesa (MPa)

La tabella si estende per valori di  $R_m$  compresi tra 20 e 60



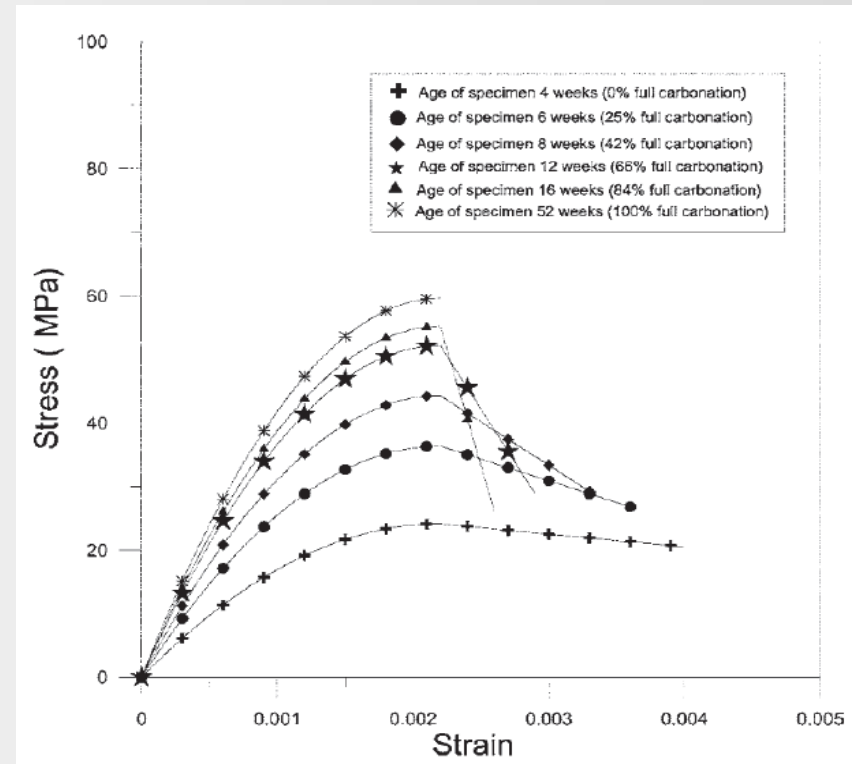
# Prove su calcestruzzi: Carbonatazione

## Proprietà meccaniche dei calcestruzzi carbonatati

Nella letteratura scientifica è stata individuata la seguente formulazione dei **diagrammi tensione-deformazione** per **calcestruzzi carbonatati**.

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_0 \left[ 2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], & \text{se } \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ \sigma_0 \left[ 1 - 0.15 (1 + 3\alpha) \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} \right) \right], & \text{se } \varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases}$$

Dove  $\alpha$  è la frazione di volume di calcestruzzo soggetto a completa carbonatazione.



CHANG C. , CHEN J., *Strength and Elastic Modulus of Carbonated Concrete*, ACI Materials Journal, 102 pagg.315-321, ottobre 2005.

	Percentuale $\alpha$ di cls totalmente carbonatato					
	0%	25%	42%	66%	84%	100%
$\varepsilon_0$	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022
$\sigma_0$ (MPa)	24.2	36.4	44.3	52.2	55.2	59.6
$\varepsilon_u$	0.004	0.0036	0.0033	0.0026	0.0026	0.0022
$\sigma_u$ (MPa)	20.5	26.8	29.3	28.9	26.1	59.6



# Prove su calcestruzzi: SonReb

- ✓ Non Destructive Technique to assess in-situ strength of concrete.
- ✓ It's a **combination of 2 NDTs**:

**1. Rebound Hammer Index  $R$**   
*superficial hardness of concrete*



**2. Ultrasonic Pulse Velocity  $V$**   
*speed of a ultrasonic pulse through*



- ✓ **R, V affected by:** moisture conditions, age of concrete, **concrete carbonation**, etc.
- ✓ **Opposite effects** : e.g. moisture reduces R but increases V  
→ IDEA: use both NDTs together to improve accuracy → **SonReb method**

**SonReb correlation equation:**  $f_c = a_1 \cdot R^{a_2} \cdot V^{a_3}$





# Prove su calcestruzzi: SonReb

**Definizione di un coefficiente correttivo per UPV:**

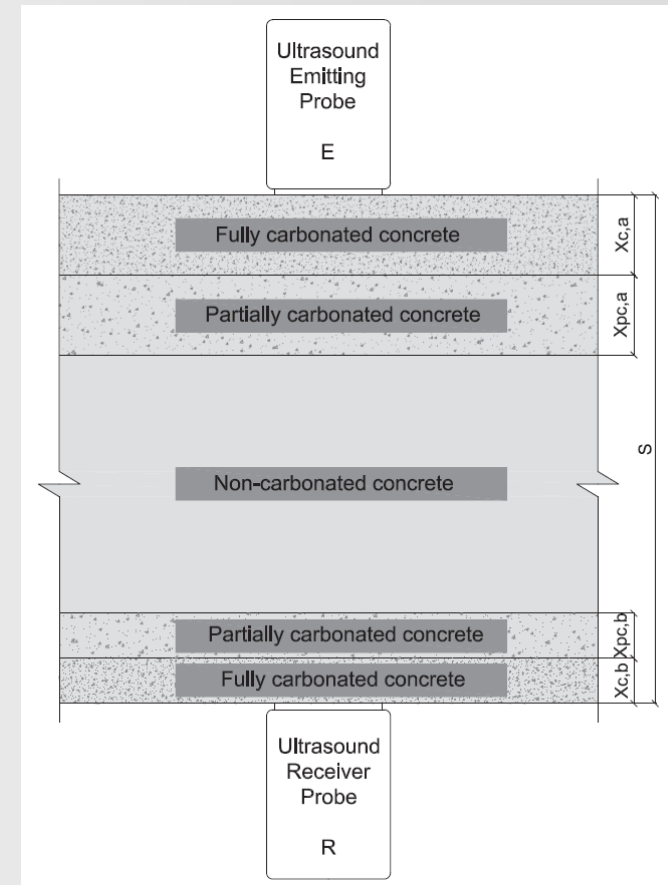
$$k_v = \frac{V(0)}{V(S, x_c)}$$

**Assumendo alcune ipotesi (.....):**

$$k_v(S, x_c) = \begin{cases} \frac{V_0 x_{c,tot}}{S} \left( \frac{1}{V_{fc}} + \frac{1}{V_{fc}} - \frac{2}{V_0} \right) + 1 & \text{if } x_{c,tot} \leq \frac{S}{2} \\ \frac{V_0 x_{c,tot}}{S} \left( \frac{1}{V_{fc}} - \frac{1}{V_{fc}} \right) + \frac{V_0}{V_{pc}} & \text{if } \frac{S}{2} \leq x_{c,tot} \leq S \end{cases}$$

**Esempio: calcestruzzo 24 MPa**

Concrete Type	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Static El. Modulus (MPa)
Non-carb. concr	2300	17967
Part. carb. concr	2325	20617
Fully carb. concr.	2400	26946



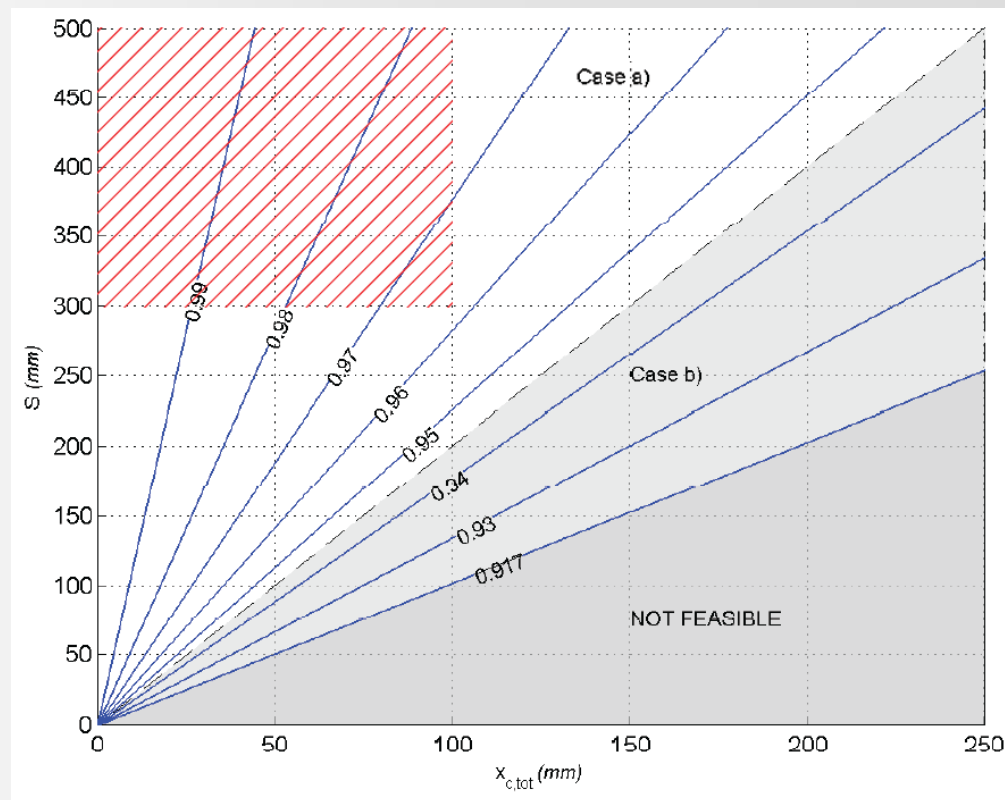
## Prove su calcestruzzi: SonReb

### Risultati:

- Valore minimo  $k_v \approx 0.92$
- Valore tipico per le dimensioni ricorrenti  $k_v \approx 0.98$

→ La carbonatazione **aumenta** le misure di UPV

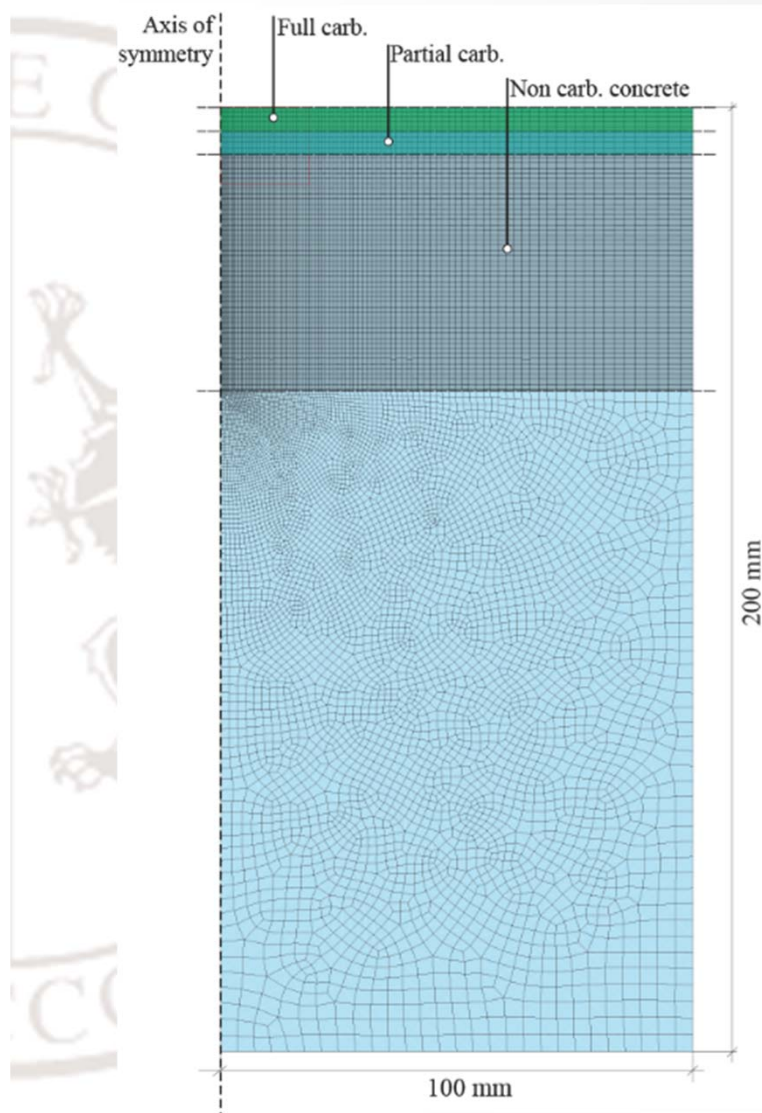
→ **ma** la sua influenza è **molto bassa** (l'aumento di rigidità è quasi completamente controbilanciato dall'aumento di massa)



**L'effetto della carbonatazione sulla UPV può essere trascurato.**



# Prove su calcestruzzi: SonReb



## FE Model of the rebound hammer impact

Axisymmetric (cylindrical) model

Lysmer and Kuhlemeyer boundary conditions

Impacting mass: rigid body

- Impact kinetic energy 2.207 J (*N-type hammer*)

Concrete:

- 3 different layers: carbonated, partially carbonated and non carbonated concrete.
- **Concrete Damaged Plasticity** model
  - Most of the parameters from literature, sensitivity analysis for the remaining ones.
  - Ignored stiffness degradation on unloading.



**Marco Breccolotti**

Perugia, 24 aprile 2017

Le indagini in situ su calcestruzzi ed acciai per la  
valutazione della vulnerabilità sismica delle opere d'arte

85/92

# Prove su calcestruzzi: SonReb

## Proprietà meccaniche dei calcestruzzi carbonatati

Il problema è stato descritto in termini di **simmetria assiale**. Questo consente di ridurre significativamente i tempi di calcolo senza alterare i risultati prodotti.

### **Condizioni di Vincolo:**

Condizione di vincolo deformabile infinito alla “Lysmer e Kuhlemeyer”.

### **Velocità di impatto:**

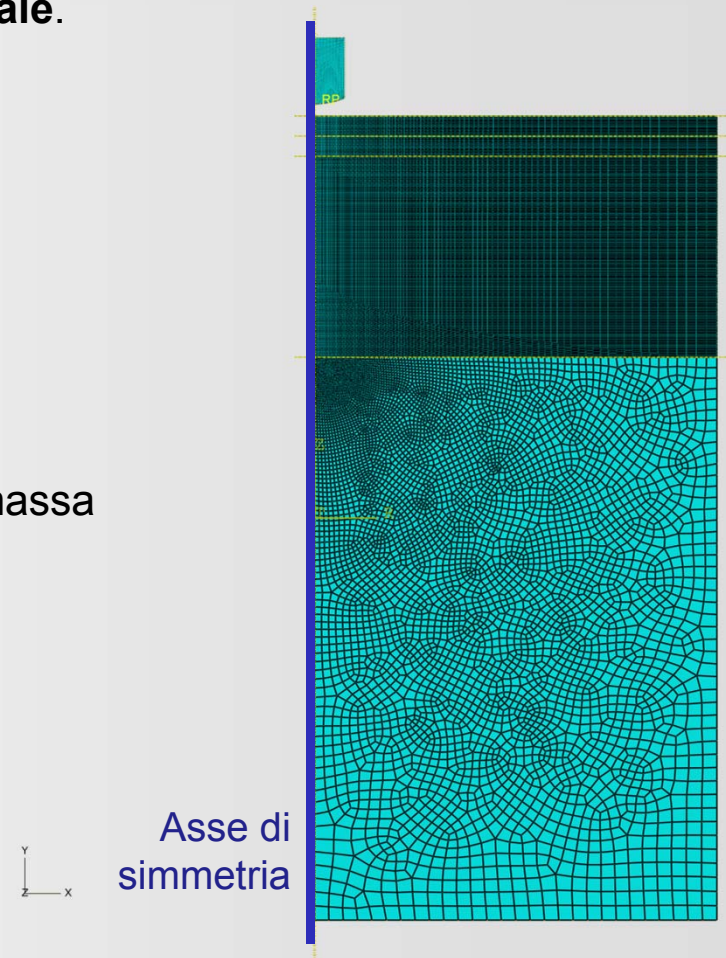
Ricavata dai dati di energia cinetica di impatto e massa dichiarati dal produttore.

$$v_i = 5,718 \text{ m/s}$$

**Calcestruzzi indagati ( $f_{cm}$ )** : 20, **24**, 30 e 35 Mpa

**Spessori di carbonatazione  $x_c$  valutati:**

1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,15,20 e 25 mm



# Prove su calcestruzzi: SonReb

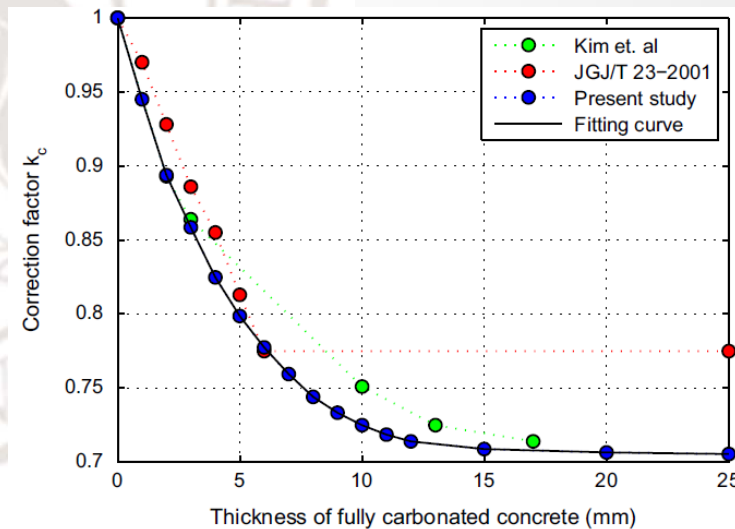




# Prove su calcestruzzi: SonReb

- ✓ **Dynamic (explicit) analysis** looking for mass speed after rebound  $V_f$
- ✓ **Many analysis** run with different values of  $x_c$
- ✓ **Rebound index Q is function of  $x_c$ :**  $Q(x_c) = \frac{V_f}{V_0} \cdot 100$
- ✓ **Correction coefficient is defined as:**  $k_c(x_c) = \frac{Q(0)}{Q(x_c)}$

## RESULTS



→ **Good agreement with literature**

→ **General form of the coefficient of correction:**

$$k_c(x_c) = 1 - e^{b_1} + e^{b_1 \cdot e^{x_c/b_2}}$$



## Prove su calcestruzzi: SonReb

**AIM:** Increase the accuracy of in-situ concrete strength predictions in presence of carbonation.

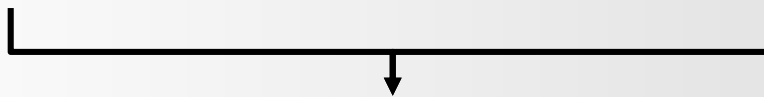
**IDEA:** Develop a new correlation curve that uses the concrete carbonation thickness as an additional parameter.

$$f_c = a_1 \cdot R^{a_2} \cdot V^{a_3}$$

**SonReb correlation equation**

$$k_c(x_c) = 1 - e^{b_1} + e^{b_1 \cdot e^{x_c/b_2}}$$

**Rebound index correction coefficient**


$$f_c = a_1 \cdot \left[ R \cdot (1 - e^{b_1} + e^{b_1 \cdot e^{x_c/b_2}}) \right]^{a_2} \cdot V^{a_3}$$

**Improved SonReb method correlation surface**



# Prove su calcestruzzi: SonReb

---

## Improved SonReb method

Steps for the application of the I-SonReb method

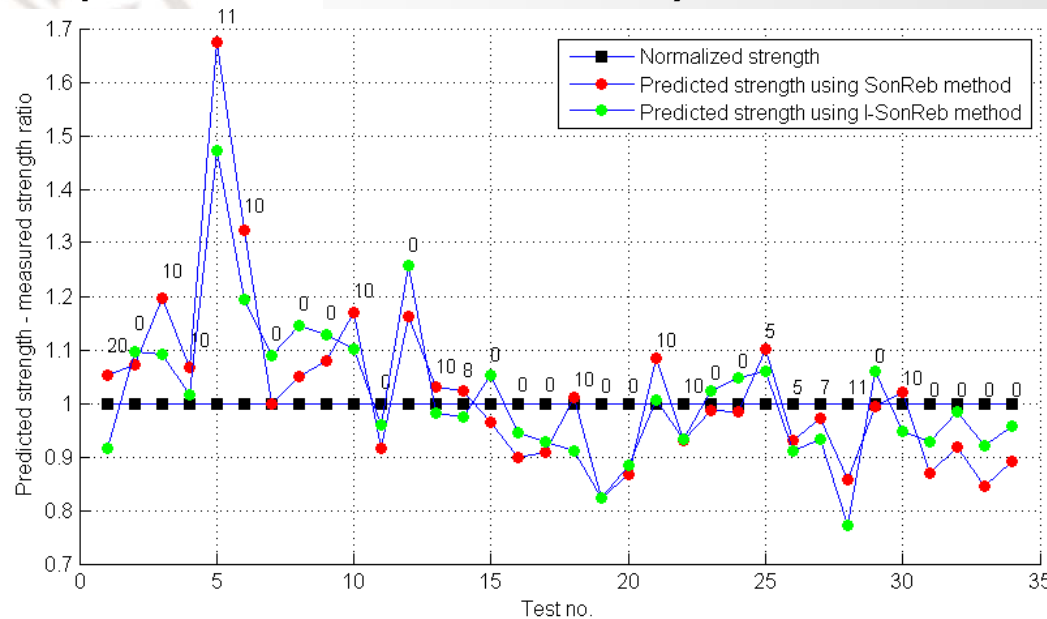
1. **Choose a suitable number of sampling locations** where to extract cores to calibrate the fitting equation.
2. **Measure** the rebound index **R** and the ultrasonic pulse velocity **V**.
3. **Extract cores** and evaluate the carbonation thickness  $x_c$  by means of a phenolphthalein solution.
4. **Test cores** to evaluate the actual concrete compressive strength  $f_c$ .
5. **Perform a non-linear fitting of the I-SonReb equation** using these data.
6. **Perform an extended non-destructive testing campaign** on the structures measuring **R, V** and  $x_c$ .
7. **Evaluate the concrete strength** using the calibrated I-SonReb correlation eq.



# Prove su calcestruzzi: SonReb

**Object:** R.C. frame of a 10 floors building located in Rome, Italy.

**Comparison between the accuracy of traditional NDTs with I-SonReb**



Correlation formula	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_1$	$b_2$	$R^2$
$f_c = a_1 \cdot R^{a_2}$	0.162	1.469				0.356
$f_c = a_1 \cdot V^{a_3}$	$1.123 \cdot 10^{-5}$		1.831			0.457
$f_c = a_1 \cdot R^{a_2} \cdot V^{a_3}$	$9.043 \cdot 10^{-6}$	1.036	1.381			0.598
$f_c = a_1 \cdot (R \cdot (1 - e^{b_1} + e^{(b_1 \cdot e^{(x_c/b_2)})}))^{a_2} \cdot V^{a_3}$	$3.367 \cdot 10^{-5}$	1.360	1.082	-1.794	20.818	0.713



**Marco Breccolotti**

Perugia, 24 aprile 2017

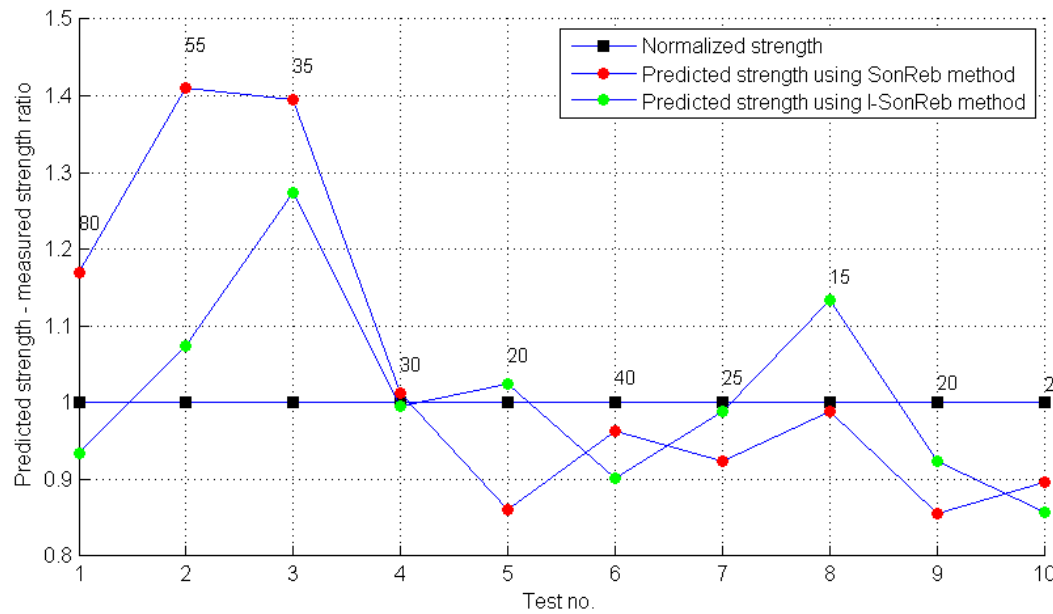
Le indagini in situ su calcestruzzi ed acciai per la  
valutazione della vulnerabilità sismica delle opere d'arte

91/92

# Prove su calcestruzzi: SonReb

**Object:** Piers and cap beams of a viaduct located in central Italy.

**Comparison between the accuracy of traditional NDTs with I-SonReb**



Correlation formula	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_1$	$b_2$	$R^2$
$f_c = a_1 \cdot R^{a_2}$	0.047	1.793				0.304
$f_c = a_1 \cdot V^{a_3}$	$5.754 \cdot 10^{-4}$		1.342			0.178
$f_c = a_1 \cdot R^{a_2} \cdot V^{a_3}$	$7.873 \cdot 10^{-8}$	2.037	1.486			0.635
$f_c = a_1 \cdot (R \cdot (1 - e^{b_1} + e^{(b_1 \cdot e^{(x_c/b_2)})}))^{a_2} \cdot V^{a_3}$	$5.063 \cdot 10^{-6}$	1.294	1.363	-0.835	47.174	0.813



**Marco Breccolotti**

Perugia, 24 aprile 2017

Le indagini in situ su calcestruzzi ed acciai per la  
valutazione della vulnerabilità sismica delle opere d'arte

92/92