

Estratto dagli atti del 17° Congresso C.T.E. Roma, 5-6-7-8 novembre 2008

## **ALCUNE CONSIDERAZIONI SUI METODI NON DISTRUTTIVI PER LA DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETA' MECCANICHE DEL CALCESTRUZZO**

*CIRO FAELLA, ENZO MARTINELLI, NICOLA SALERNO*  
*Università degli Studi di Salerno*

### **SUMMARY**

*Since wide programs for seismic assessment of public buildings are currently ongoing in Italy, non destructive testing methods for evaluating mechanical properties of concrete in existing structures are more and more popular within the technical community. Although according to the provisions of the Italian code of standard they cannot be directly considered without a preliminary calibration with respect to the results of destructive tests on a reasonably wide number of concrete samples, they can be utilized to deriving relevant information especially about the quality of concrete in terms of homogeneity. Several non destructive techniques are currently available for concrete structures and comparing the accuracy of the results derived by those techniques is nowadays an issue of concern.*

*The paper presents the results of experiments, consisting in both destructive and non-destructive tests, on concrete columns which have been already tested under cyclic actions. Comparisons in terms of mechanical properties derived by the various techniques are presented and further calibration of existing formulae for interpreting non destructive measures are also proposed. Considerations about the spatial variability of concrete mechanical properties, possibly related to both the casting process and the load history, are also reported.*

### **1. INTRODUZIONE**

La valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici esistenti ha assunto negli ultimi anni un'importanza rilevante soprattutto in relazione a crolli di edifici che hanno creato grave allarme sociale nell'opinione pubblica. L'indagine relativa all'accertamento delle proprietà meccaniche dei materiali strutturali rappresenta un passaggio-chiave nel processo che porta alla quantificazione di parametri di vulnerabilità per strutture esistenti, concorrendo direttamente alla qualificazione dei livelli di conoscenza raggiunti sulla struttura e, conseguentemente, dei fattori di confidenza da adottare nelle analisi. Procedure standard e livelli di estensione delle indagini sono definite sia dall'O.P.C.M. 3274/03 e ss.mm.ii. (O.P.C.M. 3431, 2005) che dall'Eurocodice 8 – Parte 3 (2005), in cui i valori di calcolo delle proprietà dei materiali dipendono non solo dai risultati delle indagini conoscitive, ma anche dalla loro estensione e grado di rappresentatività.

Il presente lavoro vuole dare un contributo all'approfondimento dei metodi di stima della resistenza del calcestruzzo in situ mediante prove non distruttive generalmente utilizzate per integrare con informazioni prevalentemente qualitative le risultanze quantitative derivanti da quelle distruttive (carotaggi). Nel seguito, sarà delineato inizialmente un quadro di sintesi delle più diffuse tecniche di indagine rivolte alla valutazione delle proprietà meccaniche del calcestruzzo *in situ*, riportandone i principali riferimenti normativi e le prescrizioni-chiave per l'esecuzione e l'interpretazione delle prove stesse. Verrà, quindi, presentata una campagna sperimentale che ha il carattere del caso-studio, essendo stata condotta su una serie di colonne in calcestruzzo già testate presso il Laboratorio di Strutture dell'Università di Salerno con l'obiettivo di studiarne il comportamento ciclico sotto azioni combinate orizzontali e verticali, anche in applicazione di diverse tecniche di rinforzo strutturale (Faella et Al., 2007). Da ognuna di tali colonne, tutte costituite, in linea di principio, da calcestruzzo con analoghe caratteristiche meccaniche, verranno estratte carote a diversa altezza con l'obiettivo di studiare sia la possibile variabilità spaziale della resistenza, sia l'influenza della particolare storia di carico subita dalle colonne che fa prevedere un grado di (micro) danneggiamento, differenziato lungo l'altezza in relazione al diverso livello di sollecitazione. Un confronto tra le resistenze ottenute utilizzando i risultati delle prove condotte sul calcestruzzo sarà, dunque, proposto e commentato con l'obiettivo di trarre indicazioni operative.

## 2. TECNICHE DI INDAGINE SUL CALCESTRUZZO

Le tecniche d'indagine sul calcestruzzo possono classificarsi in due grandi categorie:

- Indagini di tipo distruttivo (PD);
- Indagini di tipo non distruttivo (PND).

Se i metodi distruttivi, basati sull'estrazione di campioni di calcestruzzo da sottoporre a prove di compressione, rappresentano lo strumento più affidabile per la stima delle proprietà meccaniche del calcestruzzo, essi sono comunque caratterizzati da notevole invasività determinando disagi e, talvolta, interruzione dell'operatività della struttura. Per questa ragione, pur affidando principalmente a tali metodi la determinazione quantitativa delle proprietà meccaniche del calcestruzzo, la normativa nazionale e quella europea (O.P.C.M. 3431, 2005, EN-1998-Parte 3, 2005) permettono di ridurre il numero di prove distruttive (e dei relativi carotaggi) fino alla metà di quelle previste per il conseguimento di un determinato livello di conoscenza, sostituendo le prove non eseguite con un numero triplo di indagini a carattere non distruttivo. La valutazione della resistenza tramite prove in situ dipende da numerosi effetti di non facile determinazione quali la direzione di prelievo, il disturbo arrecato al campione ed i rapporti dimensionali tra lunghezza e diametro del campione, le tolleranze adottate nella planarità delle superfici caricate e nella loro ortogonalità rispetto alla generatrice della superficie cilindrica. Il paragrafo seguente riassume sia le principali prescrizioni normative rivolte alla standardizzazione del procedimento di prova che diverse formulazioni disponibili nella letteratura scientifica per la valutazione della resistenza (cubica o cilindrica) a partire dal valore misurato nello schiacciamento della carota estratta. Inoltre, poiché molteplici sono le metodologie di prova non distruttiva attualmente disponibili per l'indagine sul calcestruzzo, il paragrafo successivo è dedicato a quelle più diffuse ed ai modelli analitici messi a punto per l'interpretazione dei relativi risultati.

### 2.1. METODI DI INDAGINE DISTRUTTIVA (PD) SUL CALCESTRUZZO

La prova di schiacciamento di campioni cilindrici di calcestruzzo (carote) estratti dal manufatto oggetto di studio rappresenta, come è ampiamente noto, il più diffuso metodo di indagine distruttivo.

La procedura di prelievo e di prova di tali campioni è regolamentata in ambito europeo dalle norme UNI 6131:1987, UNI EN 12390-1:2002 e UNI EN 12504-1:2002 le quali prevedono la possibilità di estrarre campioni di calcestruzzo di diametro compreso tra 25 e 300 mm. Le stesse normative forniscono indicazioni in merito alle modalità di esecuzione ed, in particolare, alla velocità di penetrazione del carotiere, al fine di limitare il danneggiamento del campione (quello che viene correntemente indicato come "disturbo"). Dopo il prelievo la carota viene "rettificata" con l'obiettivo di rendere piane e parallele le facce sulle quali verrà applicato il carico al fine di evitare concentrazioni di tensione sulle eventuali parti in rilievo e stati tensionali sul provino diversi dalla compressione semplice. La Figura 1 mostra la superficie di una carota rettificata, durante la fase di misurazione del diametro, e della verifica di planarità delle superfici; affinché essa sia ritenuta idonea all'esecuzione della prova di schiacciamento devono essere controllati il diametro, la planarità delle facce estreme della carota, l'ortogonalità della generatrice del cilindro e l'altezza della carota, verificando che essi rispettano le tolleranze dimensionali dettate dalla norma UNI 6131 (1987) e brevemente riassunti nel seguito:

- tolleranza sul diametro utilizzato ( $d$ )  $\pm 0.5\%$ ;
- tolleranza sulla planarità delle superfici sottoposte a carico  $\pm 0.0006 d$ ;
- tolleranza sulla perpendicolarità della generatrice del cilindro rispetto alle basi  $\pm 0.5\text{mm}$ ;
- tolleranza sull'altezza ( $2d$ )  $\pm 0.5\%$ .



Figura 1. Verifica tolleranze carota

In mancanza del raggiungimento di tali valori mediante una rettifica meccanica, la carota dovrà essere scartata o cappata secondo quanto prescritto dalla UNI EN 12390-3:2003. La "cappatura" è un'operazione delicata che prevede l'applicazione, sulle superfici spianate della carota (dopo il taglio), di una patina di sufficiente resistenza avente spessore pari a circa 3 mm realizzata con una pasta di cemento alluminoso o gesso oppure una malta legata da zolfo fuso a 130 °C. A conclusione delle fasi di rettifica, controllo ed accettazione, i provini vengono sottoposti a successiva prova di schiacciamento mediante pressa idraulica in controllo di forza in base alle (UNI EN 12390-3:2003, UNI EN 12390-4:2002 e UNI EN 12504-1:2002).

A partire dalla resistenza della carota desunta direttamente dalla prova di schiacciamento e denotata con il simbolo  $f_{car}$ , esistono diverse formulazioni per la determinazione della corrispondente resistenza cubica  $R_c$  del calcestruzzo in situ. Una delle più ricorrenti formulazioni è quella proposta dalla British Standard 1881 (1983) secondo cui:

$$R_c = (f_{car} \cdot K_1) / 1,5 + (d/h) \quad (1)$$

In tale relazione la conversione da  $f_{car}$  a  $R_c$  è condizionata dal rapporto diametro/altezza  $d/h$  e dalla costante  $K_1$  che tiene conto della diversa rappresentatività caratteristica di campioni estratti in direzione ortogonale al getto (per i quali si assume  $K_1=2,5$ ) o parallela ad esso (nel qual caso  $K_1=2,3$  è il valore prescritto). Una formulazione sostanzialmente equivalente viene proposta dalla Concrete Society (1987)

$$R_c = (1,25 \cdot f_{car} \cdot K_2) / 1,5 + (d/h) \quad (2)$$

nella quale il fattore  $K_2$  dipende sempre dalla direzione di prelievo ed assume valore 2,0 ed 1,84 nei due casi sopra menzionati.

Più articolata è la formula proposta dal documento normativo A.C.I. 214. 4R-03 (2003), nella quale vengono considerati un numero più numeroso di fattori nella conversione da  $f_{car}$  alla resistenza cilindrica del calcestruzzo  $f_c$  e, quindi, a  $R_c=f_c/0,83$ :

$$R_c = (F_{l/d} \cdot F_{dia} \cdot F_{mc} \cdot F_d \cdot f_{car}) / 0,83 \quad (3)$$

In dettaglio, tali fattori si definiscono come segue:

-  $F_{l/d}$ , fattore che tiene conto del rapporto  $h/d$  tramite la seguente relazione che coinvolge pure la resistenza  $f_{car}$ :

$$\{1 - (0,30 - 4,3 \cdot 10^{-4} \cdot f_{car}) \cdot (2-h/d)^2\};$$

-  $F_{dia}$ , fattore legato al diametro del provino (1,06 per  $d=50$  mm, 1,00 per  $d=100$  mm e 0,98 per  $d=150$  mm);

-  $F_{mc}$ , fattore legato alle condizioni di umidità del provino (0,98 in condizione asciutta, 1,00 senza variazioni rispetto al prelievo e 1,09 se messo in acqua per 48h);

-  $F_d$  coefficiente che tiene conto del disturbo arrecato al campione durante la perforazione e pari a 1,06.

Analogamente alle (1) e (2), la Circolare ANAS 14/88 prevede la formulazione seguente, nella quale possono riconoscersi parametri cui competono il medesimo significato e valore numerico riportati per la formula (2):

$$R_c = (1,50 \cdot f_{car} \cdot K_2) / 0,83 \cdot (1,5 + d/h) \quad (4)$$

Il confronto della (4) con le (1) e (2) mette in evidenza come la prima sovrastimi l'influenza delle procedure di prelievo sulla resistenza.

Le recenti "Linee Guida" del Consiglio Superiore sui Lavori Pubblici (2008), con riferimento alla

valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo *in situ*, stabiliscono che la resistenza "ottenuta attraverso il carotaggio sia non inferiore a 0.85 volte la resistenza cilindrica del calcestruzzo messo in opera". In questo senso la resistenza misurabile *in situ* è diversa da quella *potenziale* (Rossetti & Ferraro, 2007) che avrebbe avuto lo stesso calcestruzzo se confezionato in provini con procedure standard. Inoltre, viene stabilito che la resistenza di carote con rapporto d'aspetto unitario possa essere assimilata a quelle di provini cubici, mentre quando il rapporto  $h/d=2.0$ , la resistenza cubica  $R_c$  è pari a  $1.25 f_{car}$ . Potendo interpolare linearmente per gli altri valori del rapporto d'aspetto, la seguente relazione può essere derivata dalle suddette "Linee Guida":

$$R_c = f_{car}/0,85 \cdot [1 + 0,25 \cdot (h/d - 1)] \quad (5)$$

Infine, oltre ai citati documenti normativi, esistono anche altre proposte in letteratura, alcune delle quali si riportano nel seguito:

- Cestelli Guidi (1981):

$$R_c = R_{c,situ} \cdot 1,5 = (1,25 \cdot f_{car} \cdot K_2)/1,5 + (d/h) \cdot 1,5 \quad (6)$$

- N. Augenti (2003)

$$R_c = 0,83 \cdot f_{car}^{1,10}/c \quad (7)$$

- N. Augenti e R Puccinotti (2003)

$$R_c = (b \cdot f_{car} \cdot K_2)/0,83 \cdot [1,5 + (d/h)] \quad (8)$$

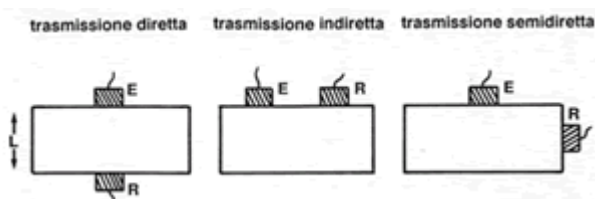
Se nella (6) i valori numerici da assumere per le costanti sono identici a quelli descritti per la (2) e la (4), nella (7) il coefficiente  $c$  tiene conto dell'influenza delle dimensioni del provino, variabile nell'intervallo  $[0.92 \div 1.00]$  per  $h/d$  compreso nell'intervallo  $[1.00 \div 2.00]$  e nella (8) il fattore  $b=1,10$  tiene conto del disturbo nella fase di prelievo. Un confronto tra le formulazioni proposte, anche molto diverse tra loro, verrà proposto nel paragrafo 4 con riferimento alla campagna sperimentale condotta.

## 2.2. METODI NON DISTRUTTIVI (PND) DI INDAGINE SUL CALCESTRUZZO

Nel presente paragrafo, con riferimento ai metodi non distruttivi di indagine del calcestruzzo si descrivono brevemente aspetti procedurali ed interpretativi di prove ultrasoniche e sclerometriche illustrandone anche il loro possibile utilizzo combinato.

### 2.2.1. Prova Ultrasonica

L'indagine ultrasonica, regolamentata in ambito europeo dalla norma UNI EN 12504-4:2005, si basa sul fenomeno di propagazione delle onde sonore, generalmente utilizzate con frequenza variabile tra (20-120) KHz, ed utilizza la correlazione tra la rigidezza del calcestruzzo, indirettamente legata alla velocità di propagazione delle onde ultrasoniche, e la sua resistenza. L'attrezzatura necessaria per l'esecuzione della prova è costituita da una centralina generatore di impulsi elettrici e da due trasduttori (trasmittente-ricevente). L'indagine consiste nel misurare il tempo impiegato dalle onde nell'attraversare il mezzo solido (calcestruzzo) compreso tra i due trasduttori poggiati sull'elemento da esaminare e nel ricavare la velocità di propagazione ( $V=L/t$ ) dividendo la distanza tra le sonde ( $L$ ) per il tempo ( $t$ ) impiegato. Tale tipo di analisi si dice condotta in *trasparenza* quando i traduttori (sonde) sono allineati, mentre si dice in *riflessione* quando le sonde sono poste sullo stesso piano ad una distanza ( $L$ ) tra loro. La Figura 2 mostra le possibili modalità di lettura della velocità



**Figura 2.** Metodi di Lettura ultrasonica

Sebbene la trasmissione diretta (o per trasparenza) sia quella dalla quale può derivarsi un valore più accurato della velocità di propagazione perché la lunghezza del percorso delle onde tra trasmettente e ricevente è chiaramente definito, è assai comune nei casi di interesse pratico la necessità di procedere a misure indirette (per riflessione) o semidirette. La correlazione che esiste tra i valori della velocità  $V$  desunti tramite questi due metodi e quello, più credibile, derivante dalla lettura per trasparenza è un aspetto operativamente interessante e sarà indagato nel paragrafo 4.

### 2.2.2. Prova Sclerometrica

Le prove sclerometriche, regolamentate dalla norma UNI EN 12504-1:2002, rappresentano le indagini più impiegate tra quelle non-distruttive per la stima speditiva della resistenza  $R_c$  del calcestruzzo. Come è noto tale misura si basa sulla misura della sua durezza superficiale definita tramite l'indice di rimbalzo ( $S$ ) di un'asta proiettata sulla superficie della struttura stessa. Lo strumento utilizzato nella prova, sclerometro, (Figura 3) è costituito da un maglio di acciaio caricato a molla che quando è rilasciato colpisce un pistone di acciaio a contatto con la superficie del calcestruzzo.

**Figura 3.** Sclerometro Schmidt

Il risultato è fortemente legato al punto di battuta; a tal proposito la norma UNI prescrive che siano eseguite almeno 9 misure, opportunamente corrette in base all'orientamento dello sclerometro, e non sovrapposte per ogni punto da esaminare e che l'indice di rimbalzo sia determinato come media delle nove letture effettuate. L'indice di rimbalzo così ottenuto è correlato alla resistenza a compressione del calcestruzzo mediante curve calibrate sperimentalmente che possono essere desunte dalla documentazione a corredo dello strumento o ricavate di volta in volta considerando i risultati di prove distruttive.

### 2.2.3. Metodo SONREB

Poiché i risultati delle prove ultrasoniche sono piuttosto influenzati dal tasso di umidità nel calcestruzzo, mentre quelli della prova sclerometrica risentono significativamente dell'indurimento superficiale indotto dal fenomeno della carbonatazione (Colleparidi, 2006) il loro utilizzo indipendente per la stima quantitativa della resistenza del calcestruzzo non è ritenuto sufficientemente affidabile. Per contro, il loro utilizzo sinergico ha portato alla messa a punto del metodo SONREB (SONic + REBound) che consente di stimare la resistenza  $R_c$  del calcestruzzo combinando la velocità ultrasonica ( $V$ ) e l'indice di rimbalzo ( $S$ ) mediante un'espressione tipo:

$$R_{c,sonreb} = a \cdot V^b \cdot S^c \quad (9)$$

Disponendo delle terne  $(R_{c,i}, V_i, S_i)$  per un certo numero (maggiore di tre) di punti sulla struttura oggetto di studio è possibile ottenere i parametri  $(a, b, c)$  che definiscono la (9) per calibrazione ai minimi quadrati. Dopo tale calibrazione, la (9) può essere utilizzata per ottenere valori di  $R_c$  in altri punti della struttura basati su sole misure non distruttive di  $V$  ed  $S$ . In letteratura sono, comunque, presenti numerose calibrazioni per la stima della resistenza del calcestruzzo tramite la (9); al fine di proporre un esame critico se ne propongono nel seguito quattro tra le più ricorrenti:

$$R_{c,s1} = 7.695 \cdot 10^{-10} \cdot V^{2.6} \cdot S^{1.4} \quad (10)$$

$$R_{c,s2} = 0.0286 \cdot V^{1.85} \cdot S^{1.246} \quad (11)$$

$$R_{C,S3} = 9.27 \cdot 10^{-11} \cdot v^{2.6} \cdot S^{1.4} \quad (12)$$

$$R_{C,S4} = 1.2 \cdot v^{2.446} \cdot S^{1.058} \quad (13)$$

I riferimenti alle quattro formulazioni riportate sopra vengono omessi per brevità e possono trovarsi in (Masi et Al., 2008)

### 3. CAMPAGNA DI INDAGINI SPERIMENTALI

Con l'obiettivo di confrontare le diverse formulazioni proposte per l'interpretazione di prove distruttive e non distruttive sul calcestruzzo in situ è stata condotta una campagna sperimentale su 13 pilastri in c.a. già sottoposti a prove cicliche in pressoflessione presso il Laboratorio di Strutture dell'Università di Salerno (Faella et Al., 2007). Tali pilastri, tutti costruiti con calcestruzzo di classe C20/25, sono assimilabili a quelli di strutture esistenti per composizione granulometrica, armatura e resistenza risultante. Si tratta, in particolare, di pilastri di forma quadrata di sezione 30x30cm<sup>2</sup> ed altezza complessiva di 220 cm sino alla base del plinto (Figura 4). Da ognuna delle colonne sono state estratte tre carote posizionate al piede, al centro della sua altezza ed in prossimità della sommità del pilastro. Nel prosieguo tali campioni, con riferimento all'i-esimo pilastro verranno denotati dai simboli P<sub>i</sub>, C<sub>i</sub>, e T<sub>i</sub>, rispettivamente. Tutte le 39 carote estratte (Figura 5) sono state misurate, pesate, rettificare tramite cappatura con malta di zolfo fuso e, quindi, testate in compressione secondo quanto illustrato nel paragrafo 2.1.



Figura 4. Carotaggi pilastri



Figura 5. Carote prelevate nella campagna sperimentale

Prima dello schiacciamento, sulle carote sono state effettuate prove ultrasoniche con trasmissione in trasparenza al fine di misurarne la velocità che, con riferimento alla carota  $C_i$ , sarà denotata  $V_{T,C_i}$ ; al fine di investigare la sensibilità della prova ultrasonica rispetto alla tipologia di trasmissione, sono state pure effettuate prove con trasmissione in riflessione sulla colonna, nell'intorno del punto di prelievo delle varie carote. In particolare, nell'intorno del punto di prelievo della carota  $C_i$  è stata misurata la velocità  $V_{R,C_i}$ . Infine, sono state effettuate battute sclerometriche sulle varie colonne nell'intorno dei punti di prelievo delle varie carote e, al solito, il valore medio dell'indice di rimbalzo nell'intorno del punto di estrazione della carota  $C_i$  sarà indicato come  $S_{C_i}$ . Tutte le prove non distruttive sono state condotte in osservanza delle prescrizioni normative richiamate nel paragrafo 2.2.

#### **4. DISCUSSIONE DEI RISULTATI**

La discussione dei risultati ottenuti dalla campagna sperimentale parte dai valori di resistenza desunti dalle prove distruttive; tali valori saranno assunti come riferimento anche per l'analisi delle prove non distruttive.

##### **4.1 PROVE DISTRUTTIVE**

I risultati desunti dalle prove di compressione sulle carote sono riepilogati nella Tabella 1 nella quale, oltre alle caratteristiche geometriche ed al peso, è possibile leggere sia la resistenza  $f_{car}$  che i corrispondenti valori della resistenza cubica  $R_c$  del calcestruzzo desunti sulla base delle diverse formulazioni (1)-(8).

Con riferimento a tali formulazioni, nella Figura 6 si osserva che nei casi considerati la (1) e la (2), proposte dalla B.S. 1881 (1983) e dalla Concrete Society (1987) sono equivalenti, mentre la (3), proposta da A.C.I. 214 (2003), risulta la meno conservativa. Appena più bassi risultano i valori delle resistenze medie stimate tramite la (4) e la (5), desunta, quest'ultima, dalle recenti Linee Guida (2008) emanate in ambito nazionale. Infine, dalla formula (7), proposta da Augenti (2003), deriva la previsione più cautelativa per la resistenza del calcestruzzo in situ. La notevole variabilità delle formulazione è in parte spiegata dal fatto che alcune (la (1), la (2), la (6) e la (7)) sono rivolte alla valutazione della resistenza attuale del calcestruzzo in situ, mentre altre puntano esplicitamente a valutarne la resistenza potenziale nel senso definito da Rossetti & Ferraro, 2007.

Altro dato significativo in merito ai risultati rappresentati nella Figura 6 riguarda la dispersione delle resistenze derivate sperimentalmente; a partire dai valori della deviazione standard rappresentati nella figura citata si desume un Coefficiente di Variazione  $CoV$  pari a circa 0,25, significativamente maggiore rispetto alla soglia di 0,10 individuata in letteratura (Linee Guida, 2008) per carotaggi effettuati su un calcestruzzo di buona qualità. Tale notevole variabilità, oltre a derivare dal fatto che le colonne sono state realizzate con calcestruzzo di identiche caratteristiche attese, ma tramite getti diversi, può essere in parte attribuito alla storia di carico che le colonne hanno subito e dal danneggiamento che ne è derivato. Se, infatti, considerando il processo costruttivo delle colonne, è lecito attendersi valori della resistenza  $R_c$  tendenzialmente maggiori al piede della colonna stessa, come mostra la Figura 4 con riferimento al pilastro  $P_1$ , il processo di carico cui le colonne sono state sottoposte prima dell'estrazione dei campioni (Faella et Al, 2007) determina significativi livelli di danneggiamento proprio nella parte inferiore. Tale condizione è tuttavia non generale per la diversità delle situazioni di riferimento: pilastri con barre lisce, ad aderenza migliorata, rinforzati con FRP e/o con angolari metallici. La diversità delle situazioni fa prevedere differenze nel danneggiamento, ma in ogni caso le carote sono state prelevate in zone prive di fessurazioni evidenti.

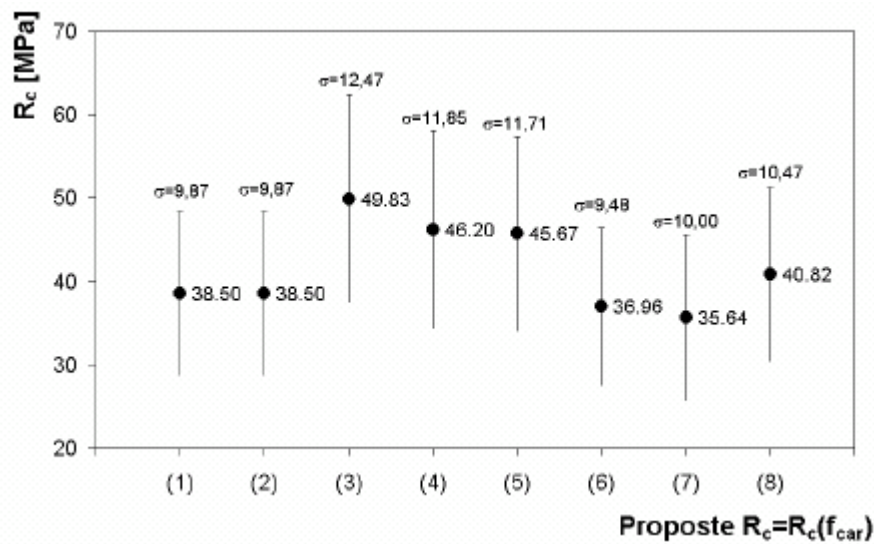


Figura 6. Media e deviazione standard della resistenza  $R_c$  secondo le formulazioni richiamate

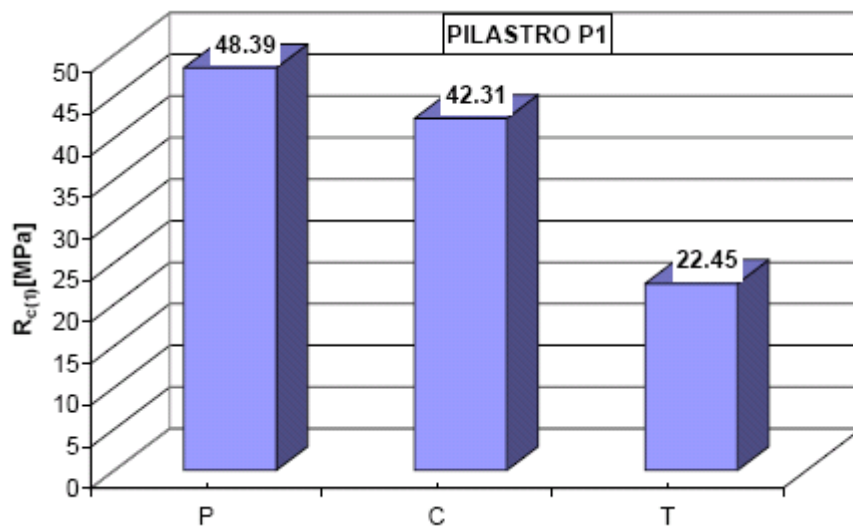
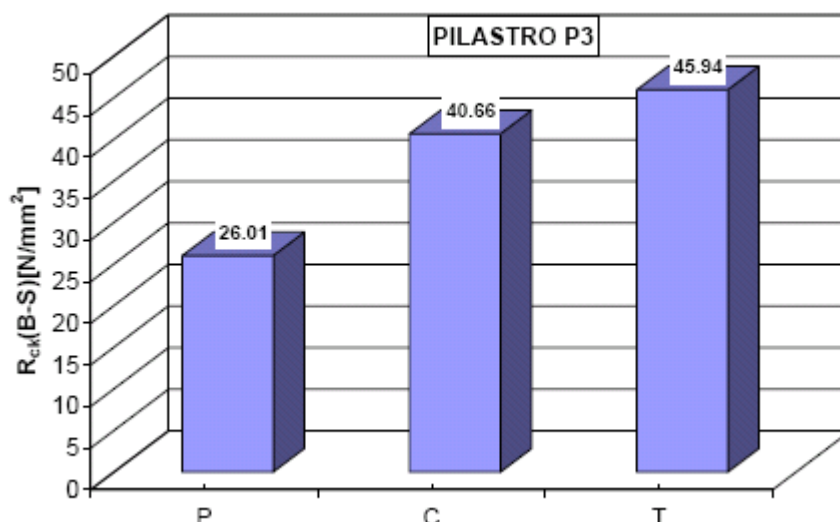


Figura 7. Valori di  $R_c$  per il pilastro P1

Di conseguenza, specie se la carota viene estratta in corrispondenza di una zona al piede del pilastro danneggiata a seguito delle prove cicliche cui è stato sottoposto, i valori della  $R_c$  al piede può risultare sensibilmente influenzato come avviene nel pilastro P3, i cui risultati sono riportati nella Figura 8.

Figura 8. Valori di R<sub>c</sub> per il pilastro P3.

Id. pilastro	Id. carota	Dimensioni		Area A <sub>c</sub> [mm <sup>2</sup> ]	P. U. V. [Kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>car</sub> [MPa]	RESISTENZA CUBICA							
		D [mm]	H [mm]				R <sub>c</sub> [MPa] (1)	R <sub>c</sub> [MPa] (2)	R <sub>c</sub> [MPa] (3)	R <sub>c</sub> [MPa] (4)	R <sub>c</sub> [MPa] (5)	R <sub>c</sub> [MPa] (6)	R <sub>c</sub> [MPa] (7)	R <sub>c</sub> [MPa] (8)
P1	P1	94	199	6936	2376	38.18	48.39	48.39	62.50	58.07	57.46	46.45	45.61	51.30
	C1	94	197	6936	2371	33.46	42.31	42.31	54.55	50.77	50.15	40.62	39.45	44.86
	T1	94	197	6936	2386	17.75	22.45	22.45	29.31	26.94	26.61	21.55	19.65	23.80
P3	P3	94	198	6936	2396	20.54	26.01	26.01	33.98	31.21	30.85	24.97	23.07	27.58
	C3	94	198	6936	2396	32.12	40.66	40.66	52.64	48.80	48.24	39.04	37.72	43.11
	T3	94	199	6936	2398	36.24	45.94	45.94	59.43	55.13	54.55	44.10	43.08	48.71
P4	P4	94	198	6936	2345	31.59	39.99	39.99	51.79	47.99	47.44	38.39	37.03	42.40
	C4	94	199	6936	2282	29.32	37.17	37.17	48.36	44.60	44.13	35.68	34.12	39.41
	T4	94	198	6936	2286	38.03	48.03	48.03	61.53	57.64	56.88	46.11	45.42	50.92
P5	P5	94	198	6936	2319	37.80	47.86	47.86	61.66	57.43	56.77	45.94	45.12	50.74
	C5	94	199	6936	2347	16.27	20.62	20.62	27.12	24.75	24.49	19.80	17.85	21.86
	T5	94	198	6936	2323	42.24	53.48	53.48	66.65	64.17	63.44	51.34	50.98	56.70
P6	P6	94	198	6936	2366	23.93	30.30	30.30	39.48	36.36	35.94	29.09	27.29	32.12
	C6	94	199	6936	2333	33.39	42.32	42.32	54.88	50.79	50.25	40.63	39.36	44.87
	T6	94	197	6936	2397	32.58	41.20	41.20	53.16	49.44	48.83	39.55	38.31	43.68
P7	P7	94	199	6936	2355	24.81	31.45	31.45	41.07	37.74	37.34	30.19	28.39	33.34
	C7	94	199	6936	2369	28.66	36.33	36.33	47.29	43.59	43.13	34.88	33.27	38.52
	T7	94	199	6936	2355	19.56	24.80	24.80	32.52	29.76	29.44	23.81	21.86	26.29
P8	P8	94	199	6936	2376	35.98	45.61	45.61	59.02	54.73	54.16	43.79	42.74	48.36
	C8	94	198	6936	2370	37.80	47.86	47.86	61.66	57.43	56.77	45.94	45.12	50.74
	T8	94	198	6936	2366	35.77	45.28	45.28	58.44	54.34	53.72	43.47	42.46	48.01
P10	P10	94	198	6936	2352	28.06	35.52	35.52	46.13	42.62	42.14	34.10	32.50	37.66
	C10	94	200	6936	2350	17.68	22.44	22.44	29.57	26.93	26.67	21.54	19.56	23.79
	T10	94	198	6936	2330	17.78	22.51	22.51	29.48	27.02	26.71	21.61	19.68	23.87
P11	P11	94	198	6936	2388	33.89	42.91	42.91	55.46	51.49	50.91	41.19	40.01	45.49
	C11	94	197	6936	2415	30.36	38.39	38.39	49.62	46.07	45.51	36.86	35.45	40.70
	T11	94	197	6936	2378	20.83	26.34	26.34	34.31	31.61	31.22	25.29	23.43	27.93
P12	P12	94	199	6936	2398	25.20	31.94	31.94	41.70	38.33	37.93	30.66	28.88	33.87
	C12	94	197	6936	2378	35.21	44.52	44.52	57.32	53.42	52.77	42.74	41.72	47.20
	T12	94	199	6936	2398	23.31	29.55	29.55	38.84	35.46	35.09	28.37	26.51	31.33
P13	P13	94	199	6936	2409	46.19	58.55	58.55	75.12	70.26	69.52	56.21	56.25	62.08
	C13	94	198	6936	2399	40.14	50.81	50.81	65.34	60.98	60.28	48.78	48.19	53.87
	T13	94	197	6936	2393	45.24	57.20	57.20	73.06	68.64	67.80	54.92	54.97	60.65
P14	P14	94	199	6936	2355	29.32	37.17	37.17	48.36	44.60	44.13	35.68	34.12	39.41
	C14	94	199	6936	2369	24.06	30.50	30.50	39.86	36.60	36.21	29.28	27.45	32.34
	T14	94	197	6936	2360	29.58	37.41	37.41	48.38	44.89	44.34	35.91	34.45	39.66
P15	P15	94	198	6936	2396	32.11	40.66	40.66	52.61	48.78	48.22	39.02	37.70	43.10
	C15	94	197	6936	2404	34.47	43.59	43.59	56.15	52.30	51.66	41.84	40.76	46.21
	T15	94	197	6936	2400	26.41	33.40	33.40	43.30	40.08	39.58	32.06	30.41	35.41

Tabella 1. Riepilogo risultati prove di schiacciamento delle carote

È opportuno precisare che nelle ultime due figure i valori di R<sub>c</sub> sono stati valutati secondo la (1) che rappresenta da un lato una delle formulazioni più utilizzate nella pratica e, dall'altro, porta a valori ragionevolmente cautelativi.

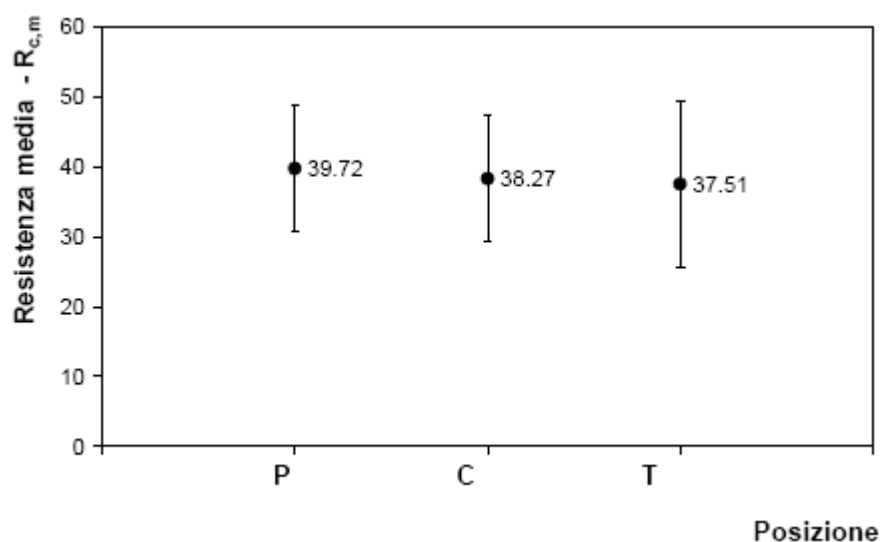


Figura 9. Valori medi di  $R_c$  in funzione della posizione della carota

Quando i due comportamenti "estremi" descritti sopra e riscontrati sulle carote estratte da alcuni dei pilastri analizzati, non riescono a prevalere l'uno sull'altro si ottengono andamenti della resistenza  $R_c$  la cui variabilità spaziale risulta più articolata e meno regolare. La Figura 9 rende conto di questa variabilità confermando che, in media, non è possibile osservare la prevalenza di uno dei due comportamenti "estremi" descritti dalla Figura 7 e dalla Figura 8.

#### 4.2 RISULTATI DELLE PROVE NON DISTRUTTIVE (ULTRASONICHE)

Sulle carote prelevate e sulle colonne nell'intorno dei punti di prelievo sono state effettuate, come detto, prove ultrasoniche in trasparenza ed in riflessione, rispettivamente. I risultati delle prime sono riportati nella Figura 10 in termini di valori medi e scarti, pure suddivisi in base alla posizione del punto di estrazione. Si evince che anche i valori medi della velocità ultrasonica  $V_T$ , letti in trasparenza, non mettono in evidenza una significativa variabilità spaziale. Inoltre, i valori delle dispersioni, misurate da un CoV di circa 3-4% sono soltanto leggermente superiori alla soglia del 2.5% fornita dalle citate "Linee Guida" (2008). Una possibile spiegazione per questa minore dispersione delle velocità  $V_T$  rispetto ad  $R_c$  ed  $f_{car}$  può derivare dalla natura discreta del danneggiamento indotto sulla struttura prima dei test sui materiali. Infatti, mentre le carote possono essere estratte da un tratto integro tra due fessure ovvero risentire di fessurazioni non evidenti (e, dunque, dar luogo a valori assai diversi della resistenza  $f_{car}$ ) la velocità ultrasonica può risentire meno di questo tipo di danneggiamento trovando il segnale una via di trasmissione sempre all'interno del calcestruzzo integro.

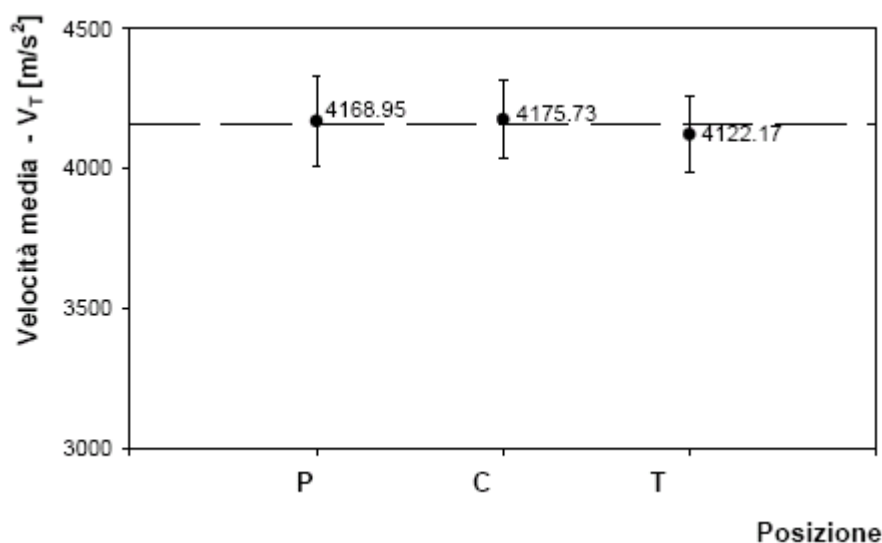


Figura 10. Valore medio di  $V_T$  in funzione della posizione della carota

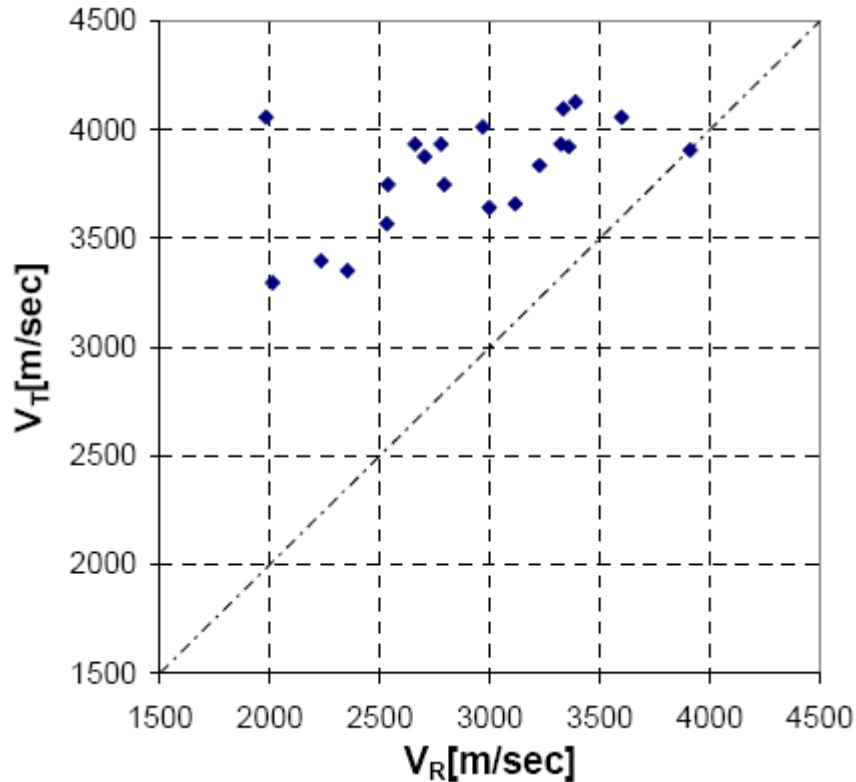


Figura 11. Velocità in trasparenza vs velocità in riflessione

Altro aspetto di interesse pratico è legato alla possibilità di eseguire prove ultrasoniche anche in riflessione ed alla conseguente necessità di stabilire una correlazione attendibile con la corrispondente misura in trasparenza, più affidabile, ma talvolta non eseguibile per la non accessibilità di due facce contrapposte. Con riferimento a tale problematica, la Figura 11 mostra che i valori della misura in trasparenza  $V_T$  risultano generalmente maggiori di quella in riflessione  $V_R$  poiché in quest'ultimo caso il percorso virtuale assunto (distanza tra le sonde) è chiaramente diverso ed inferiore a quello effettivo percorso seguito dalle onde. Una informazione di rilievo quantitativo sullo stesso aspetto deriva, invece, dalla Figura 12 dalla quale si evince che il rapporto  $V_R/V_T$  ha media (e mediana) intorno a 0.75 e che è interpretabile da una legge normale con deviazione standard pari a circa 0,11.

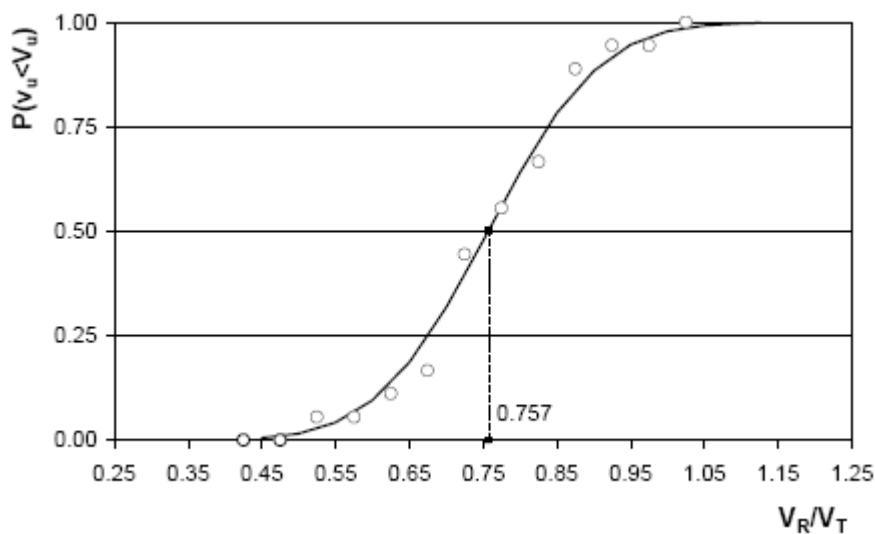


Figura 12. Distribuzione dei rapporti  $V_R/V_T$

#### 4.3 RISULTATI DELLE PROVE NON DISTRUTTIVE (SCLEROMETRICHE)

Le prove sclerometriche effettuate nell'intorno dei punti di prelievo delle carote hanno portato alla valutazione dell'indice di rimbalzo i cui valori medi sono riportati nella Figura 13 che evidenzia da un lato la sostanziale invarianza spaziale della resistenza desunta dalla prova sclerometria utilizzando la correlazione a corredo dello strumento, e dall'altro, un valore rilevante delle dispersioni che danno luogo ad un CoV poco inferiore al 10%, laddove le citate "Linee guida" (2008) indicano valori di circa il 4% per l'indice di rimbalzo in un calcestruzzo di buona qualità.

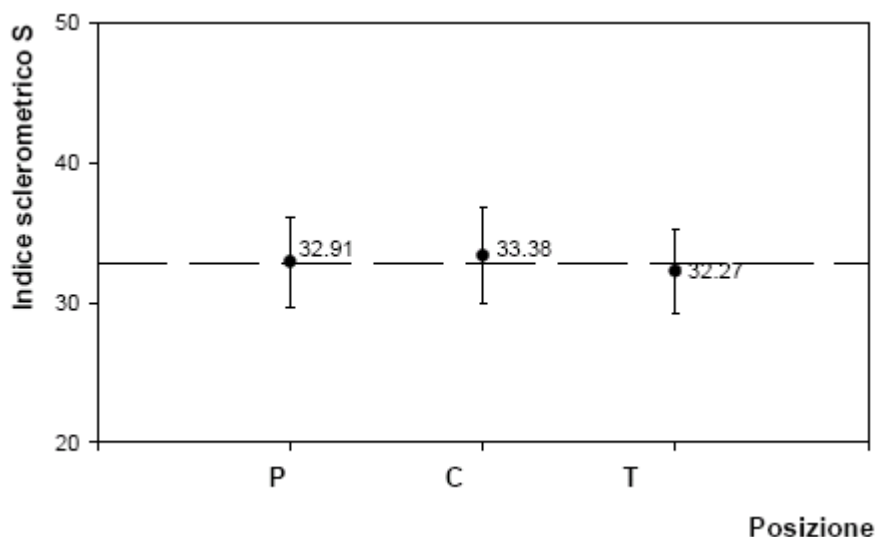


Figura 13. Valore medio di S in funzione della posizione del punto di battuta

Dal punto di vista quantitativo, poi, tale correlazione si dimostra generalmente conservativa rispetto ai risultati derivanti dalle prove distruttive tramite la (1); questo risultato può probabilmente spiegarsi a partire dal fatto che le strutture testate risultano relativamente "giovani" con entità dei fenomeni di carbonatazione più contenute di quella attesa su strutture esistenti.

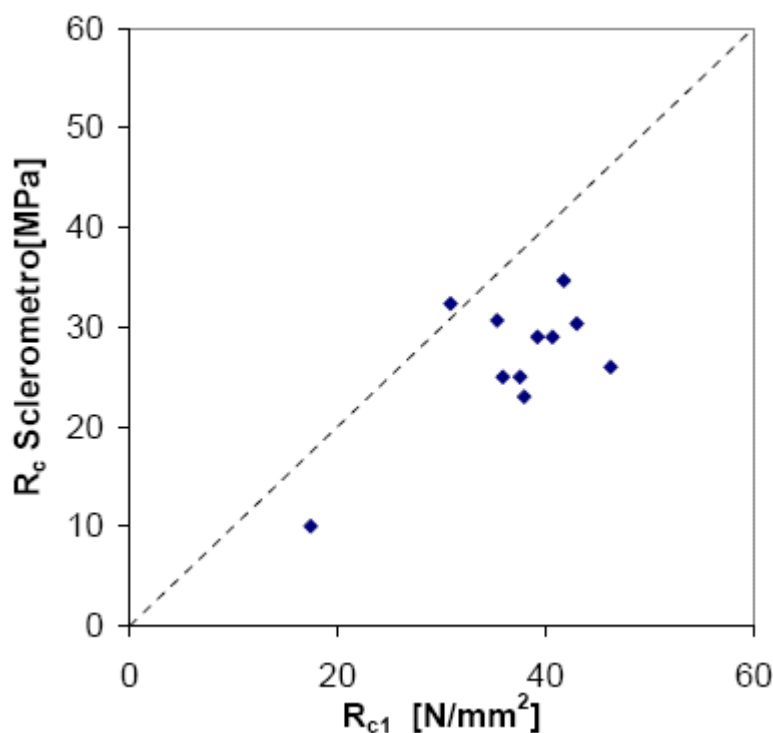


Figura 14. Andamento  $R_{ck,m}$  da indice di rimbalzo vs  $R_{ck,m}$  da schiacciamento carota.

#### 4.4 RISULTATI DELLE PROVE NON DISTRUTTIVE (METODO SONREB)

L'impiego indipendente delle due metodologie non distruttive ha portato a valutazioni sia di carattere qualitativo che quantitativo. Al fine di affinare queste ultime, è possibile procedere all'applicazione di metodi combinati come il SonReb descritto nel paragrafo 2.2.3.

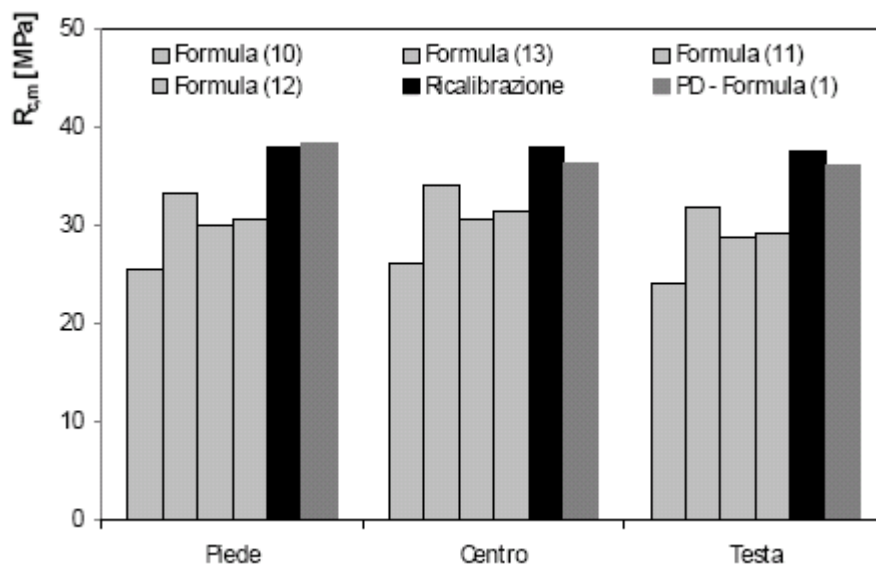


Figura 15. Applicazione del metodo SonReb ai dati ottenuti dalla campagna sperimentale

La Figura 15 mostra il confronto tra le varie formulazioni (10)-(13) di letteratura per la valutazione della resistenza  $R_c$  e mette in evidenza il fatto che esse sottostimano sensibilmente i valori di  $R_c$  derivati dallo schiacciamento delle carote e dall'applicazione della (1). Una opportuna calibrazione della (9) porta alla ridefinizione dei parametri (a, b, c) secondo la procedura dei minimi quadrati dalla cui soluzione si ottengono i valori  $a=1,1 \cdot 10^{-5}$ ;  $b=1,63017$ ;  $c=0,42773$  a partire dai quali, almeno in termini di valor medio, è possibile ottenere stime ragionevolmente accurate della resistenza  $R_c$ .

## 5. CONCLUSIONI

A partire dai risultati di una campagna di prove sperimentali distruttive e non distruttive per la determinazione della resistenza del calcestruzzo in situ, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- le formulazioni disponibili in normativa e letteratura per la stima della resistenza del calcestruzzo a partire da quella delle carote forniscono risultati piuttosto variabili e risultano non omogenee essendo orientate a finalità diverse;
- malgrado la chiara storia di carico subita dalle strutture da cui sono state estratte le carote, non è possibile stabilire una relazione per la variabilità spaziale della resistenza la quale è pure influenzata dal processo costruttivo;
- malgrado il danneggiamento, i risultati delle prove ultrasoniche risultano affetti da dispersioni minori per effetto della natura discreta delle fessure sviluppatesi nel calcestruzzo;
- i valori di velocità desunti da prove ultrasoniche condotte in riflessione risultano mediamente pari al 75% di quelle svolte nelle condizioni ideali (in trasparenza);
- le prove sclerometriche, confermando la sostanziale assenza di una chiara dipendenza spaziale dei valori di  $R_c$ , forniscono valori della dispersione dei risultati in linea con quella derivante dai metodi distruttivi.
- infine, l'applicazione del metodo combinato SonReb, sia pur necessitando di una opportuna calibrazione, si rivela assai utile per la riduzione della dispersione dei valori di resistenza desumibili da prove non distruttive.

## RINGRAZIAMENTI

Questa memoria raccoglie i risultati di una ricerca svolta nell'ambito della Linea 2-Task 1 (MND) del Progetto DPC-ReLUI S 2005-2008.

**BIBLIOGRAFIA**

- [01] **UNI 6131:1987**: "Prelevamento di campioni di calcestruzzo indurito".
- [02] **UNI EN 12390-1:2002**: "Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e casseforme".
- [03] **UNI EN 12390-3:2003**: "Resistenza alla compressione dei provini".
- [04] **UNI EN 12390-4:2002**: "Resistenza alla compressione: Specifiche per macchine di prova".
- [05] **UNI EN 12504-1:2002**: "Prove sul cls nelle strutture – Carote- Prelievo, Esame e Prova di Compressione".
- [06] **UNI EN 12504-2:2001**: "Prove non distruttive: determinazione dell'indice Sclerometrico".
- [07] **UNI EN 12504-4:2005**: "Prove sul calcestruzzo nelle strutture, parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici".
- [08] **UNI EN 13791:2007**: "Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components".
- [09] **UNI EN 1991-1-1:2005**: "Eurocodice 2, Progettazione delle strutture di cls parte 1-1: regole generali e regole per gli edifici".
- [10] **UNI EN 1998-3:2005**: "Eurocodice 8, parte 3: Assessment and retrofitting of existing buildings".
- [11] **O.P.C.M. 3274/03**: "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica, G. U. n° 105 del 08/05/2003".
- [12] **O.P.C.M. 3431/05**: "Ulteriori modifiche ed integrazioni all'OPCM n° 3274 del 20/03/03- All. 2, Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici- G. U. n° 107 del 10/05/2005".
- [13] **D.M. 14 GENNAIO 2008**: "Norme Tecniche per le costruzioni, G. U. n°29 del 04/02/2008".
- [14] **CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI, SERVIZIO TECNICO CENTRALE, FEBBRAIO 2008**: "Linee guida per la messa in opera del cls strutturale".
- [15] **A.N.A.S. Circolare 14/88**: "Durabilità delle opere d'arte stradali", a cura di M. Macori, G. Scaramuzzi, V.A. Rossetti, M. Mele, G. Fontanieri", 1988.
- [16] **AMERICAN CONCRETE INSTITUTES 214.4R-03**: "Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results", 2003.
- [18] **BRITISH STANDARD 1881**: Testing Concrete, part 120 – Methods for determination of the compressive strength of concrete cores", 1983.
- [19] **CONCRETE SOCIETY 1987**: " Concrete core Testing for Strength", Technical Report No. 11, The Concrete Society, London, pp. 44", 1987.
- [20] **V. ALUNNO ROSSETTI, A. FERRARO**, "Normativa e Controllo di Qualità del Calcestruzzo: dalla produzione alla verifica in sito", In Concreto, 76, 2007.
- [21] **M. COLLEPARDI**, "Il Nuovo Calcestruzzo", Quarta edizione, 2006.
- [22] **C. FAELLA, E. MARTINELLI, D. DE SANTO, E. NIGRO**, "Indagini conoscitive su alcuni edifici scolastici con struttura portante in c.a.per la valutazione della vulnerabilità sismica", 15° Congresso CTE, Bari, 4-6 Novembre 2004.

**[23] A. MASI , M. VONA, D. NIGRO, M. FERRINI** , “Indagini sperimentali per la stima della resistenza del calcestruzzo in-situ basata su metodi distruttivi e non distruttivi”, Convegno ReLuis “Valutazione e riduzione della vulnerabilità sismica di edifici esistenti in c.a.”, Roma, 29-30 Maggio 2008.

**[24] C. FAELLA, A. NAPOLI, R. REALFONZO, G. RIZZANO** , “Pilastrini in c.a. confinati con FRP: risultati sperimentali”, Workshop ReLUI S “Materiali ed approcci innovativi per il progetto in zona sismica e la mitigazione della vulnerabilità delle strutture”, Università di Salerno, 12-13 Febbraio 2007.

***Contatti con gli autori:***

Ciro FAELLA: [c.faella@unisa.it](mailto:c.faella@unisa.it)

Enzo MARTINELLI: [e.martinelli@unisa.it](mailto:e.martinelli@unisa.it)

Nicola SALERNO: [nsalerno@unisa.it](mailto:nsalerno@unisa.it)