

# Indagini distruttive e non distruttive su edifici in c.a. esistenti secondo l'OPCM 3274/3431: evidenze sperimentali e significatività dei risultati.

Michele D'Amato, Michelangelo Laterza

*Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia applicata all'ingegneria., Università della Basilicata, Viale dell'Ateneo Lucano, 85100 Potenza, Italia.*

Rosario Gigliotti

*C.E.R.I. Centro di Ricerca previsione, prevenzione e controllo dei Rischi geologici, Università La Sapienza, Roma, Italia.  
Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia applicata all'ingegneria, Università della Basilicata, Potenza, Italia.*

*Keywords: indagini in situ, cemento armato, edifici esistenti, resistenza del calcestruzzo, vulnerabilità, prove distruttive, prove non distruttive, prove ultrasoniche, prove sclerometriche.*

## SOMMARIO:

Di recente, in applicazione dell'OPCM 3274 del 2003, sul territorio nazionale sono state avviate numerose indagini finalizzate alla valutazione della vulnerabilità degli edifici strategici e ad alta esposizione (Programma Temporale delle Verifiche del patrimonio edilizio strategico e rilevante, ai sensi della OPCM 3362/2004). Le modalità d'indagine vengono descritte nel capitolo 11 delle norme allegate alla stessa OPCM i cui aspetti applicativi sono riportati in apposite Linee Guida Regionali che ad essa si ispirano. Nell'articolo vengono presentati i risultati di due diverse campagne di prove distruttive e non distruttive condotte su edifici in c.a. costruiti negli anni '70. L'indagine, finalizzata all'accertamento delle caratteristiche meccaniche di acciaio e calcestruzzo ed all'individuazione dei dettagli di armatura, è stata condotta riferendosi alle indicazioni contenute nell'OPCM 3274/3431 che definiscono, in relazione al numero ed al tipo di indagini, il cosiddetto "Livello di Conoscenza" ed il relativo "Fattore di Confidenza". L'analisi critica dei risultati ottenuti suggerisce alcune considerazioni in merito all'efficacia delle indagini distruttive e non evidenziando alcuni limiti della rappresentazione schematica proposta nell'Ordinanza.

**ABSTRACT:** During last year, according to the OPCM 3274/3431 (2003/2005) and according to Regional Guidelines based on the OPCM, many seismic vulnerability assessments of strategic building was been performed in Italy (Programma Temporale delle Verifiche del patrimonio edilizio strategico e rilevante, OPCM 3362/2004). The paper shows a comparison between two sets of concrete strengths evaluated during two different assessment campaigns. The two assessment campaigns was been performed on two existing buildings designed and built during the 70's. Number and type of destructive and non destructive tests, performed to assess the in situ mechanical characteristics of the concrete, was been defined according to the chapter 11 of the OPCM 3274/3431 and according to the methodology suggested by the Regional Guidelines of Basilicata. The critical analysis of the results suggests some considerations relevant to the performance of destructive and non destructive tests and shows the insufficient effectiveness of the limitations and suggestions reported in the OPCM 3274/3431 and in the Regional Guidelines.

## 1 INTRODUZIONE

Il patrimonio edilizio italiano è per buona parte costituito da edifici realizzati in epoche meno recenti, durante le quali le costruzioni erano progettate prevalentemente per i carichi gravitazionali ed in assenza di prescrizioni sui dettagli costruttivi. Tale patrimonio edilizio è a tutt'oggi per larga parte in uso, nonostante esso non risponda ai moderni criteri di progettazione antisismica e quindi non escluda la perdita di vite umane qualora si verificassero eventi sismici di notevole intensità (azioni sismiche di progetto secondo le norme attuali). Nell'ambito del 1°

Programma Temporale delle Verifiche del patrimonio edilizio strategico e rilevante, ai sensi dell'OPCM 3362/2004, sono state compiute sul territorio nazionale numerose valutazioni della vulnerabilità sismica di edifici strategici e ad alta esposizione. Tale programma offre per la prima volta l'opportunità di confrontare tra loro i risultati riferiti a buona parte del patrimonio strategico dislocato sul territorio nazionale, con riferimento ad un quadro normativo esplicito in materia: il cap. 11 dell'OPCM N. 3274/3431. In esso, infatti, sono riportate le modalità di indagine e di analisi, i requisiti di sicurezza ed i criteri di verifica degli edifici esistenti. Alcune regioni si sono dotate, a tal proposito, di specifiche Linee Guida, che si ispirano alle ordinanze 3431 e

3362. La campagna di indagini prescritte dalle suddette norme, da condurre su ogni edificio, è finalizzata ad accertare le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo e dell'acciaio, e i dettagli di armatura impiegati.

Il numero di indagini eseguite, inoltre, consente di definire il "livello di conoscenza" (LC1, LC2, LC3), cui corrisponde il tipo di analisi ed i "fattori di confidenza" dei materiali da impiegare nelle verifiche.

Sia l'OPCM sia le Linee Guida tendono a regolamentare le indagini indicando numero e tipo di prove da eseguire. In molti casi, tuttavia, sia in conseguenza delle caratteristiche della struttura rilevate nel corso delle indagini sia per le condizioni d'uso dell'edificio oggetto di verifica, è necessario ridefinire la campagna d'indagine, eventualmente discostandosi dalle indicazioni dei documenti citati. Alcune situazioni tipiche in proposito sono quelle in cui sussistono difficoltà tecniche o quelle in cui l'esecuzione delle prove può intralciare la piena operatività dell'edificio o, addirittura, risultare del tutto incompatibile con le attività che vi si svolgono. Appare pertanto opportuno definire gli obiettivi ed i criteri d'indagine, allo scopo di rendere le stesse pienamente compatibili con le differenti destinazioni d'uso e con le possibili condizioni delle strutture.

In quest'ottica, il presente lavoro pone l'attenzione su alcuni aspetti riguardanti l'interpretazione dei risultati delle prove sui calcestruzzi e la loro significatività. A tal fine vengono esaminati i risultati di due campagne di prove compiute su due complessi di edifici in c.a., realizzati a cavallo degli anni '70, ed effettuate nell'ambito del 1° Programma Temporale delle Verifiche secondo le Linee Guida Regionali della Regione Basilicata redatte dal CRiS.

## 2 INDAGINI SUL CALCESTRUZZO

Sono state effettuate prove di tipo distruttivo (prelievo di carote sottoposte a compressione uniaassiale), e prove di tipo non distruttivo (prove sclerometriche ed ultrasoniche). La valutazione della resistenza del calcestruzzo è stata effettuata attraverso il metodo combinato SONREB.

I metodi di indagine utilizzati sono sinteticamente descritti nei paragrafi seguenti.

### 2.1 Il carotaggio

Il carotaggio consiste nel prelievo in situ di provini cilindrici di calcestruzzo (UNI EN 12504-1) mediante carotatrice.

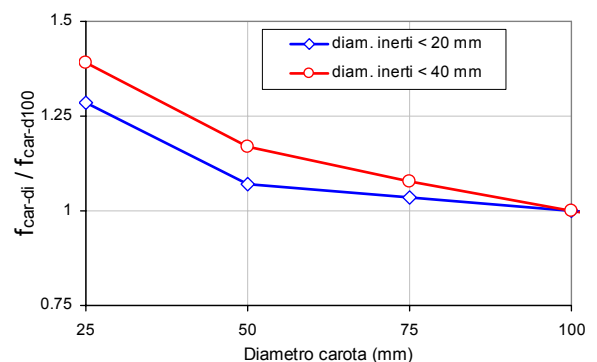
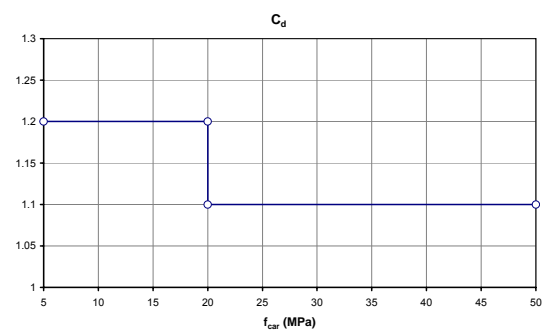
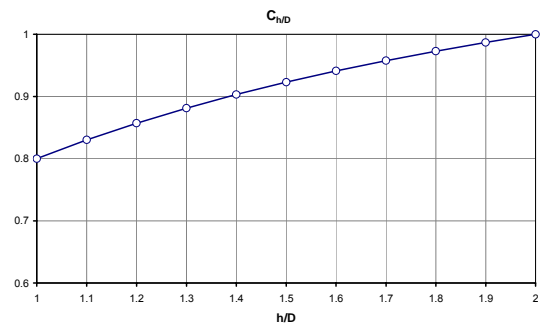
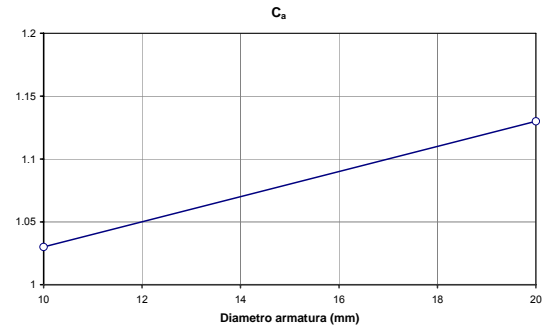
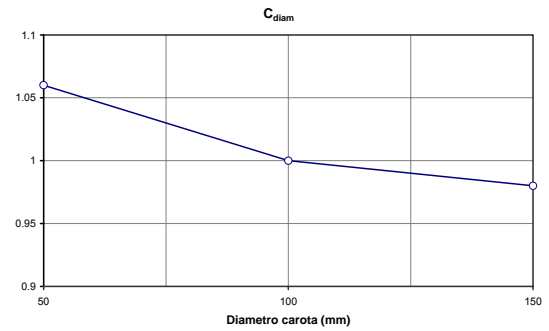


Figura 1. Coefficienti correttivi per la resistenza a compressione delle carote.

La resistenza a compressione misurata sulle carote non è influenzata significativamente dal diametro delle stesse qualora il diametro delle carote risulti pari ad almeno 3 volte la dimensione massima degli inerti del calcestruzzo. Il rapporto h/D (altez-

za/diametro) preferenziale è pari a 2 nei casi in cui la resistenza a compressione misurata deve essere paragonata alla resistenza cilindrica  $f_{c,car}$ ; pari ad 1 se il risultato deve essere paragonato alla resistenza cubica.

La resistenza a compressione cilindrica  $f_{c,car}$  si ricava dalla resistenza a compressione della carota attraverso la relazione:

$$f_{c,car} = (C_{h/D} \cdot C_{dia} \cdot C_a \cdot C_d) f_{car} \quad (1)$$

dove:

$C_{h/D}$  è il coefficiente correttivo per rapporti h/D diversi da 2, pari a  $C_{h/D} = 2/(1,5 + D/h)$ ;

$C_{dia}$  è il coefficiente correttivo relativo al diametro, da assumere pari a 1,06, 1,00 e 0,98 per D pari, rispettivamente, a 50, 100, 150 mm;

$C_a$  è il coefficiente correttivo relativo alla presenza di armature incluse, variabile tra 1,03 per barre di piccolo diametro ( $\phi 10$ ) a 1,13 per barre di diametro elevato ( $\phi 20$ );

$C_d$  è il coefficiente correttivo per tener conto del disturbo arrecato alla carota nelle operazioni di estrazione.

## 2.2 Prova sclerometrica

Lo sclerometro è un maglio di acciaio caricato a molla che, a seguito del rilascio colpisce un pistone di acciaio a contatto con la superficie del calcestruzzo. La distanza di rimbalzo del martello di acciaio dal pistone fornisce l'indice di rimbalzo S che può relazionarsi alla resistenza del calcestruzzo in esame mediante curve caratteristiche dello strumento che tengono conto anche dell'eventuale inclinazione dello strumento durante la prova.

La prova (regolamentata dalle norme UNI EN 12504-2) consiste nell'effettuare almeno nove letture su una griglia i cui punti devono essere posti ad un interasse compreso tra 25 e 50 mm e distare almeno 25 mm dal bordo. L'indice di rimbalzo S per ciascun punto di prova è pari alla media dei singoli valori misurati inclusi nell'intervallo  $0,8 I_m \div 1,2 I_m$ , essendo  $I_m$  la media di tutte le misure relative alla zona indagata.

La prova è utile a fornire un indice relativo di confronto piuttosto che esprimere una grandezza assoluta del calcestruzzo come la sua resistenza. Essa infatti esamina solo lo strato superficiale dell'elemento in cls. I risultati oltre che a fornire indicazioni sull'uniformità delle caratteristiche del calcestruzzo all'interno della struttura vengono utilizzati nelle correlazioni finalizzate alla stima in situ della resistenza. L'indice di rimbalzo o indice sclerometrico, infine, si riduce al crescere dell'umidità relativa e tende ad incrementarsi con l'età a causa del fenomeno della carbonatazione.

## 2.3 Prova ultrasonica

Il dispositivo di prova consiste di un emettitore di impulsi meccanici ed un dispositivo di ricezione disposti preferibilmente in trasparenza (ossia disposti su due facce opposte dell'elemento da saggiare). Nota la distanza di percorrenza dell'impulso viene misurato il tempo fra l'istante di emissione e l'istante di ricezione del segnale e quindi la velocità V dell'onda ultrasonica. La prova è regolamentata dall'UNI EN 12504 - 4.

L'accoppiamento delle sonde alle superfici dell'elemento da sottoporre a prove deve essere particolarmente accurato, al fine di escludere l'inclusione di aria che provocherebbe un'attenuazione del segnale. I materiali che realizzano l'accoppiamento possono essere diversi: plastilina, grasso di vasellina o altri tipi di grasso.

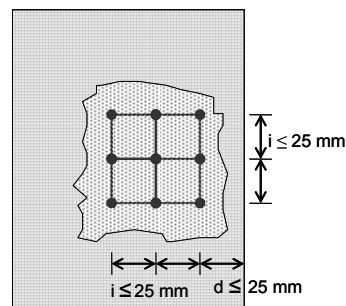


Figura 2. Griglia di punti utilizzata per la prova sclerometrica.



Figura 3. Prova ultrasonica.

L'utilizzo delle prove ultrasoniche consente di ricavare, per il calcestruzzo, il modulo elastico dinamico ed il modulo di Poisson. E' possibile, inoltre, attraverso i risultati delle prove stimare la resistenza in situ del calcestruzzo attraverso specifiche correlazioni oltre che stabilirne l'omogeneità all'interno della struttura. Al contrario di quanto accade per l'indice sclerometrico, la velocità ultrasonica aumenta con l'umidità.

## 2.4 Il metodo SONREB

I metodi combinati impiegano i risultati forniti da due o al massimo tre prove non distruttive distinte e costituiscono un utile strumento per la stima in situ

della resistenza del calcestruzzo in sostituzione delle indagini distruttive. La larga diffusione di questi metodi è dovuta principalmente al fatto che il loro uso limita l'effetto di alcuni fattori esterni sulla stima della resistenza del calcestruzzo, poiché le grandezze impiegate nelle correlazioni sono da essi influenzate in modo opposto e quindi tendono a compensarsi.

Il più diffuso dei metodi combinati è senza dubbio il metodo SONREB (Sonic Rebound) che utilizza l'indice sclerometrico  $S$  e la velocità ultrasonica  $V$ . La sua diffusione è dovuta, oltre che alle peculiarità dei metodi combinati, al fatto che le prove utilizzate richiedono tempi brevi per l'esecuzione, con conseguenti vantaggi di carattere economico. Sono inoltre poco invasive sulla struttura e quindi non compromettono la resistenza degli elementi strutturali.

È opinione diffusa che le correlazioni tra le prove non distruttive e la resistenza a compressione del calcestruzzo non possano stabilirsi in generale, ma debbano definirsi di volta in volta in base ai dati relativi al caso specifico in esame.

La resistenza stimata con il metodo SONREB è, in forma generale, fornita dalla relazione:

$$f_{c,SONREB} = a \cdot S^b \cdot V^c \quad (2)$$

in cui le costanti  $a$ ,  $b$ ,  $c$  possono ricavarsi nel caso in esame mediante il metodo dei minimi quadrati correlando la resistenza a compressione  $f_{c,car}$ , dedotta dalle prove a compressione delle carote prelevate in situ, con l'indice di rimbalzo medio  $S$  e la velocità ultrasonica media  $V$ , entrambi relativi alla zona di estrazione della carota.

I casi studio di seguito riportati evidenziano alcuni aspetti problematici dell'approccio appena descritto. In particolare, può risultare impossibile determinare i coefficienti delle SONREB quando i risultati delle prove di compressione e delle prove non distruttive risultano scarsamente correlati tra loro. Ma è anche utile mettere in guardia dal rischio di effettuare le regressioni su un campione statisticamente poco rappresentativo, tanto più se non si indicano con chiarezza i test di significatività e di correlazione da eseguire.

### 3 CASO STUDIO N.1

Il complesso in esame è stato realizzato alla fine degli anni '70.

Sono state estratte 20 carote e compiute, complessivamente, 107 prove non distruttive (sclerometriche ed ultrasoniche).

La figura 4 riporta le resistenze a compressione del cls in situ ( $f_{c,car}$ ) ricavate dalle resistenze a compressione delle carote estratte ( $f_{car}$ ), ed i risultati delle prove non distruttive compiute in corrispondenza dei punti in cui sono state estratte le carote. I risultati di queste prove, inoltre, sono riassunti in un unico grafico in cui tutti i valori di  $f_{c,car}$  e relativi  $V$  e  $S$  vengono adimensionalizzati ai rispettivi valori medi  $f_{c,car m}$ ,  $V_m$ ,  $S_m$ . ed ordinati per resistenza cilindrica crescente.

Nel caso in esame la velocità ultrasonica cresce al crescere della resistenza a compressione con una

buona correlazione ( $R^2 = 0.823$ ). L'indice sclerometrico, invece, non mostra nessuna correlazione con la resistenza a compressione assumendo valori casuali intorno al valor medio.

Dai risultati delle prove effettuate in corrispondenza dei punti di estrazione delle carote, inoltre, si nota come la resistenza a compressione delle carote ha una variabilità più marcata rispetto a quella delle prove non distruttive.

Le Linee Guida CRiS della Regione Basilicata suggeriscono di correlare l'indice sclerometrico e la velocità ultrasonica alla resistenza a compressione del calcestruzzo.

Per il caso in esame si ottiene la relazione:

$$f_{c,SONREB} = (1.453 \cdot 10^{-9}) \cdot S^{0.5282} \cdot V^{2.6237} \quad (3)$$

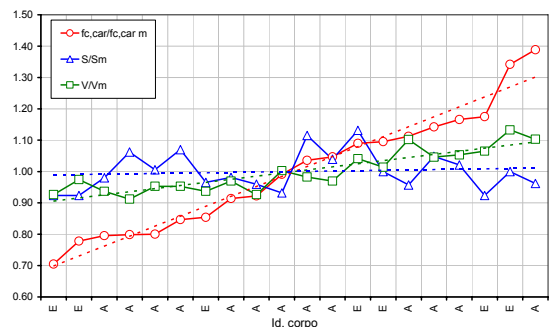
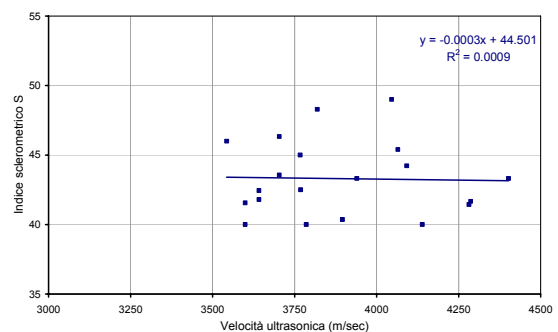
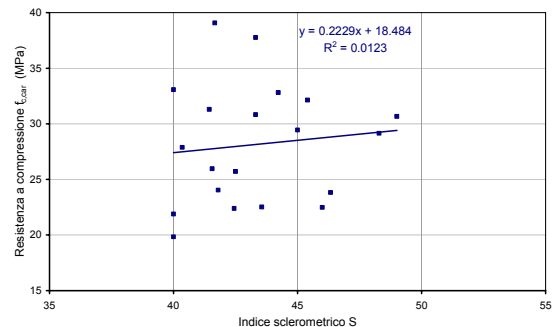
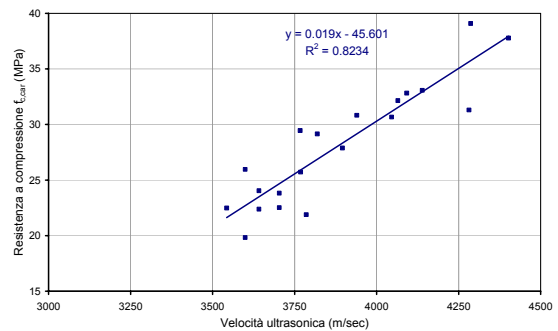


Figura 4. Caso Studio n.1: Risultati delle prove distruttive e non distruttive relative alle carote estratte.

La figura 5 riporta il confronto tra le resistenze cilindriche  $f_{c,car}$ , ricavate da prove di compressione, e le resistenze cilindriche  $f_{c,SONREB}$  ricalcolate attraverso la correlazione SONREB ricavata.

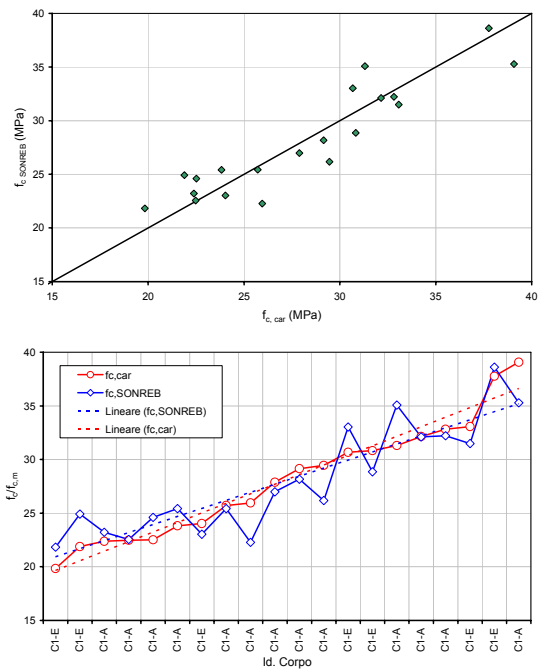


Figura 5. Caso Studio n.1: Risultati delle prove distruttive e non distruttive relative alle carote estratte.

La figura 6 mostra la correlazione esistente tra la velocità ultrasonica e la resistenza cilindrica ricavata ( $R^2 = 0.968$ ).

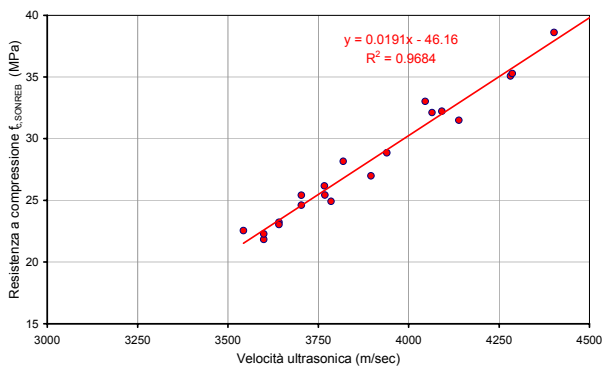


Figura 6. Correlazione tra velocità ultrasonica e resistenza cilindrica calcolata con il metodo SONREB.

E' utile confrontare la relazione SONREB ottenuta nel caso in esame con alcune delle relazioni SONREB più diffuse in letteratura:

$$f_{c,SONREB1} = 7.69 \cdot 10^{-11} \cdot S^{1.4} \cdot V^{2.6} \quad (\text{RILEM 1993, NDT4})$$

$$f_{c,SONREB2} = 6.69 \cdot 10^{-8} \cdot S^{1.246} \cdot V^{1.85} \quad (\text{J. Gasparik 1992})$$

$$f_{c,SONREB3} = 9.96 \cdot 10^{-10} \cdot S^{1.058} \cdot V^{2.446} \quad (\text{Di Leo, Pascale 1994})$$

I confronti tra le relazioni su riportate sono riferiti ai seguenti campioni di prove:

- Campione C1: prove riferite ai punti in cui sono state effettuate solo prove non distruttive (sono esclusi i punti in cui sono state estratte le carote)
- Campione C2: prove riferite ai punti in cui sono state effettuate solo prove distruttive (sono esclusi i valori riferiti ai punti in cui non sono state estratte le carote)

La figura 7 riporta le distribuzioni normali delle resistenze relative ai diversi campioni considerati ed i rispettivi coefficienti di variazione.

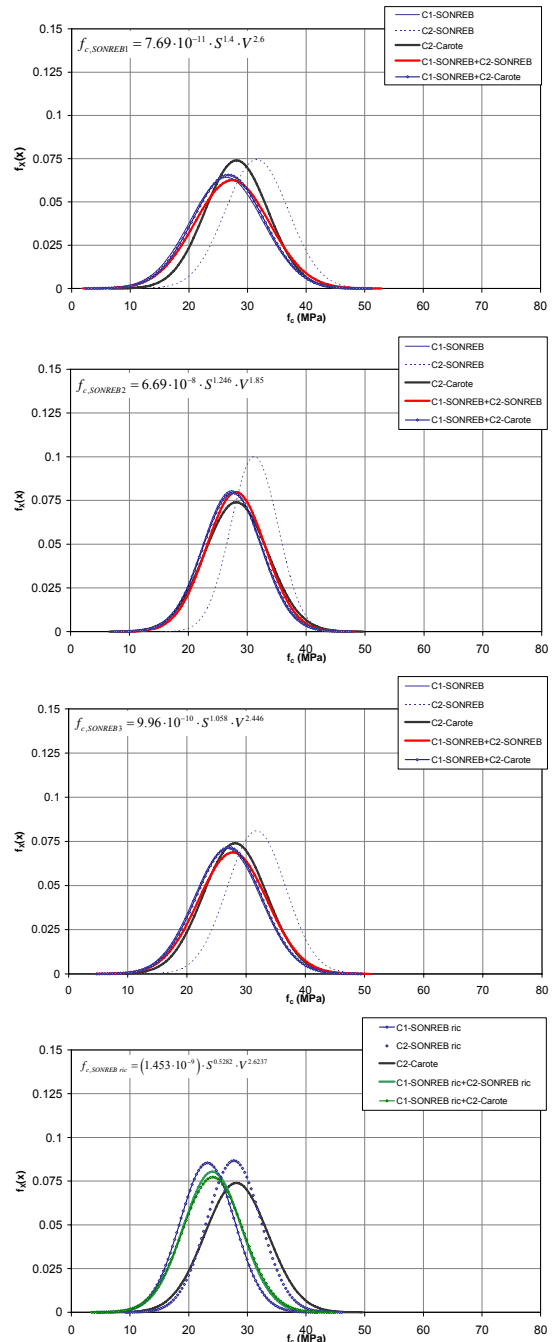


Figura 7. Distribuzioni normali delle resistenze cilindriche al variare delle correlazioni SONREB considerate.

La figura 8 mostra come tutte le relazioni SONREB utilizzate sovrastimino le resistenze in situ del



cls nei punti in cui sono state estratte le carote (Campione2) rispetto ai punti in cui sono state effettuate solo prove non distruttive (Campione1). Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che le prove ultrasoniche per il Campione2 sono state effettuate sulle carote in seguito alle operazioni di rettifica necessarie per le prove di compressione (a distanza di circa 3 giorni). È pertanto probabile che l'umidità residua nelle carote derivante dalle operazioni di rettifica abbia comportato una sovrastima della velocità ultrasonica in tali punti (vedi figura 9).

E' interessante notare (figura 8) come i coefficienti di variazione forniti dalle diverse correlazioni siano in buon accordo tra loro e con il coefficiente di variazione delle sole carote, nonostante i c.d.v. delle prove sclerometriche ed ultrasoniche corrispondenti risultino inferiori di circa 2,5 volte. A tale risultato si giunge anche considerando un numero limitato di prove. La figura 10 ad esempio riporta i c.d.v. ottenuti da 10 campioni ognuno costituito da 10 prove estratte a caso dal campione iniziale di carote (Campione2).

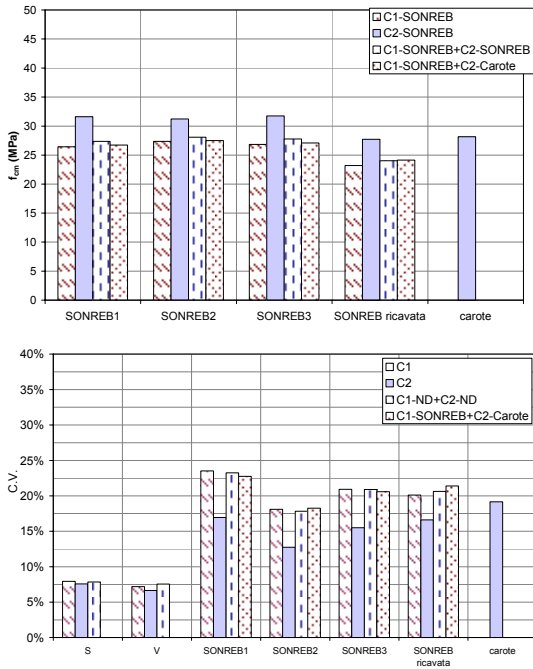


Figura 8. Resistenze medie cilindriche e coefficienti di variazione per le diverse correlazioni SONREB considerate.

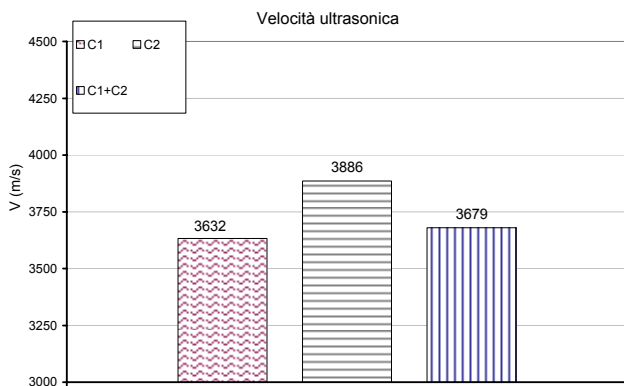


Figura 9. Velocità ultrasoniche riferite ai diversi campioni considerati.

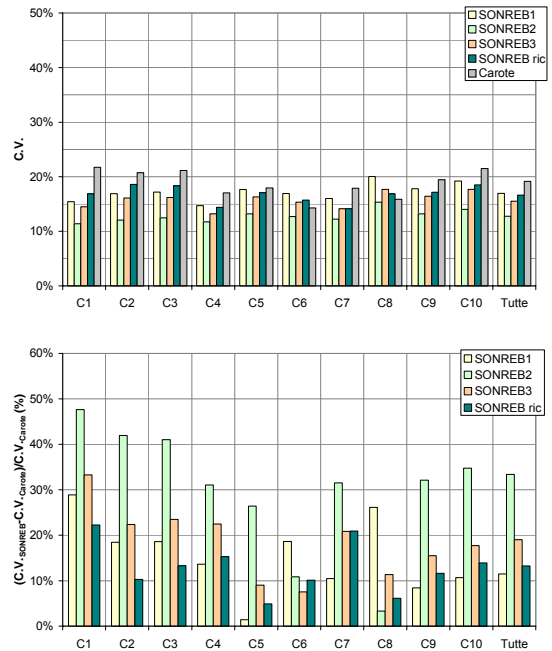


Figura 10. C.d.V. ed errori percentuali dei diversi campioni casuali considerati.

Per ogni campione estratto i c.d.v. delle relazioni SONREB non sono eccessivamente discordi dal c.d.v. delle rispettive carote. L'errore percentuale nella valutazione del c.d.v. per ogni campione estratto rispetto al c.d.v. delle carote è compreso tra 0% e 48% circa, al variare della correlazione considerata.

La resistenza a compressione media fornita dai diversi campioni estratti (figura 11), invece, è sempre prossima a quella delle corrispondenti carote, con errori percentuali più contenuti rispetto al c.d.v..

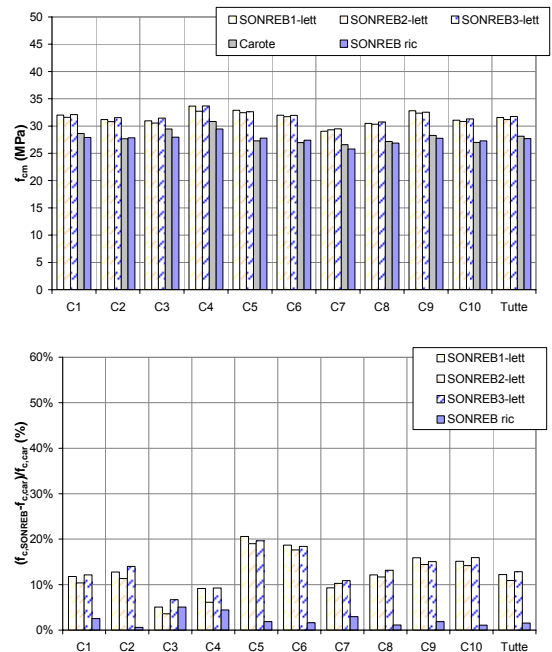


Figura 11. Resistenza media a compressione per i diversi campioni casuali considerati.

E' utile, infine, fornire l'intervallo di confidenza per la stima della resistenza media a compressione delle sole carote.

La figura seguente riporta l'ampiezza dell'intervallo (confidenza) in percentuale rispetto al valor medio  $f_{c,car-m}$  delle carote al crescere del numero di prove a compressione eseguite, ed in funzione del livello di significatività assunto.

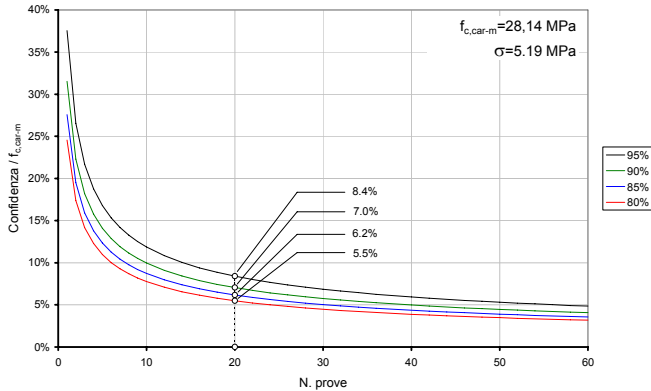


Figura 12. Errore sulla stima della resistenza media a compressione delle carote al crescere del numero di prove.

Il grafico in figura è stato ottenuto ipotizzando una distribuzione normale delle resistenze a compressione delle carote con valor medio  $f_{c,car-m}$  e deviazione standard  $\sigma$  dell'intero campione di carote.

Per un livello di significatività del 5% (livello di confidenza del 95%) l'errore sulla stima del valor medio (confidenza/ $f_{c,car-m}$ ) è pari al 8,4% in corrispondenza del numero di prove a compressione realmente eseguite, che si dimostra pertanto adeguato rispetto alla valutazione del valor medio.

#### 4 CASO STUDIO N. 2.

Il secondo caso studio riguarda un complesso edilizio realizzato all'inizio degli anni '70.

Sono state estratte 38 carote ed effettuate complessivamente 146 prove non distruttive (sclerometriche + ultrasoniche).

La figura 13 riporta le resistenze a compressione delle carote ed i risultati delle relative prove non distruttive.

In questo secondo caso si osserva una scarsa correlazione tra prove distruttive e prove non distruttive. Tanto la velocità ultrasonica quanto l'indice sclerometrico mostrano una debole correlazione con la resistenza a compressione delle carote, assumendo, al crescere della resistenza, più che altro valori casuali intorno ai rispettivi valori medi.

Per tale ragione una correlazione specifica risulterebbe poco attendibile in quanto le grandezze S e V variano in modo pressoché casuale al crescere della resistenza.

Le figure seguenti riportano, come nel primo caso studio, le distribuzioni normali dei diversi campioni di prove considerati, utilizzando le tre correlazioni di letteratura applicate precedentemente.

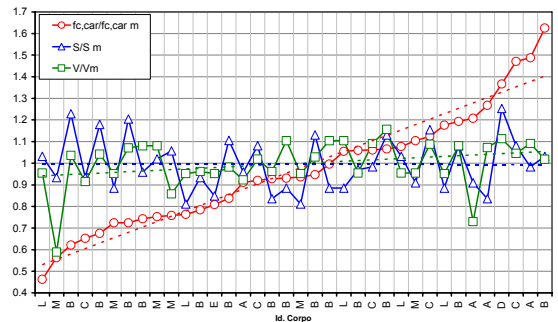
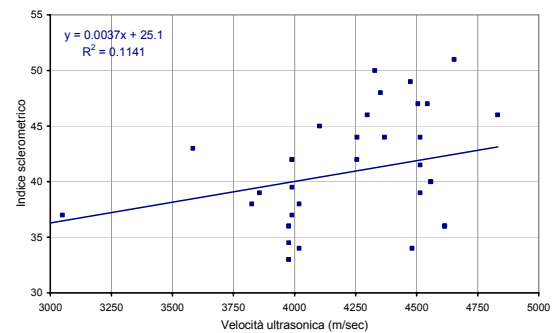
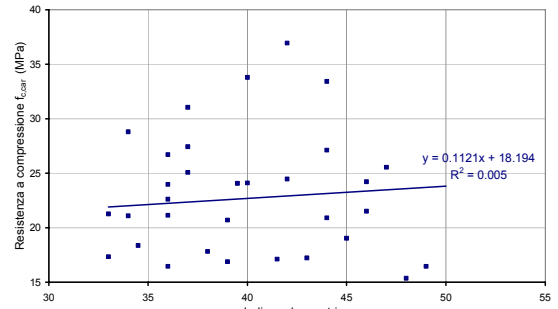
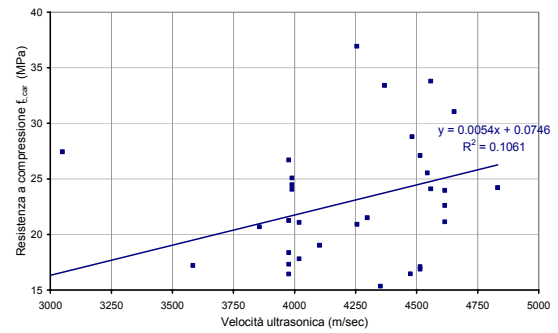


Figura 13. Caso Studio2: risultati delle prove distruttive e non distruttive relative alle carote estratte.

Per il caso in esame le tre correlazioni forniscono valori medi di resistenza maggiori della resistenza a compressione delle carote, mentre analogamente al primo caso studio i coefficienti di variazione delle resistenze stimate dei diversi campioni sono all'incirca uguali tra loro e prossimi a quello delle sole carote, nonostante i coefficienti di variazione della velocità ultrasonica e dell'indice sclerometrico siano inferiori di circa tre volte (figura 16).

Un approccio alternativo al problema può essere quello di particolareggiare le relazioni SONREB di letteratura per il caso in esame al fine di ottenere una migliore stima della resistenza in situ del cls.

Con riferimento alle prove distruttive e non distruttive relative alle sole carote (Campione2) può imporsi che il valor medio delle resistenze stimate con la generica relazione SONREB di letteratura

coincida con la resistenza media a compressione delle carote. In tal modo si ricava il valore del coefficiente  $a'$  di correlazione per il caso in esame, mentre i coefficienti  $b$  e  $c$  continuano ad essere quelli della relazione di letteratura in esame.

In figura 15 vengono riportate le distribuzioni normali ottenute con le SONREB di letteratura a cui è stato modificato il coefficiente  $a$  di correlazione.

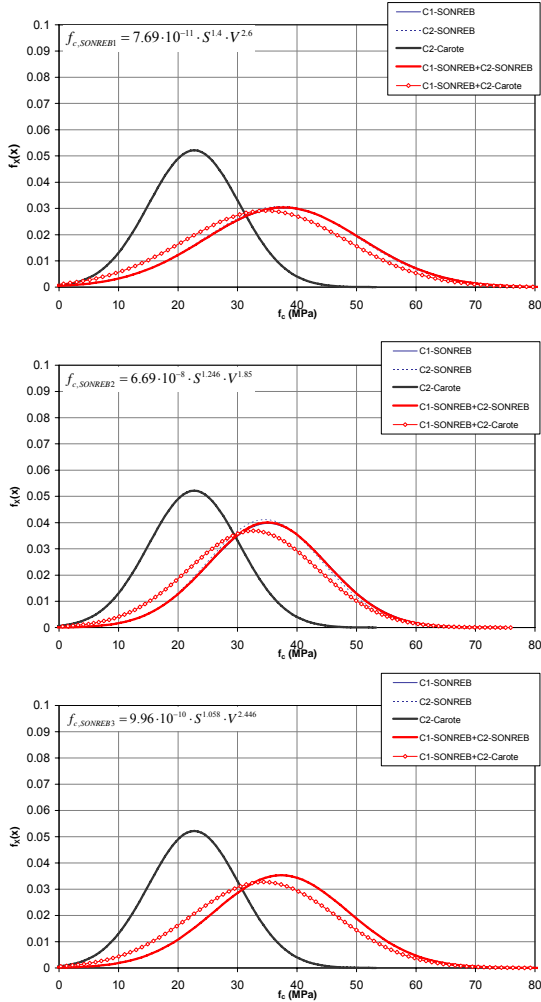


Figura 14. Distribuzioni normali delle resistenze cilindriche ottenute utilizzando le correlazioni di letteratura.

Imponendo che:

$$\frac{\sum_{i=1}^n f_{ci,car}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (a' \cdot S_i^b \cdot V_i^c)}{n} \quad (4)$$

$$f_{c,car-m} = \frac{a' \sum_{i=1}^n (S_i^b \cdot V_i^c)}{n} \quad (5)$$

si ricava

$$a' = \frac{f_{c,car-m}}{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i^b \cdot V_i^c)}{n}} \quad (6)$$

dove  $n$  è il numero di prove considerate.

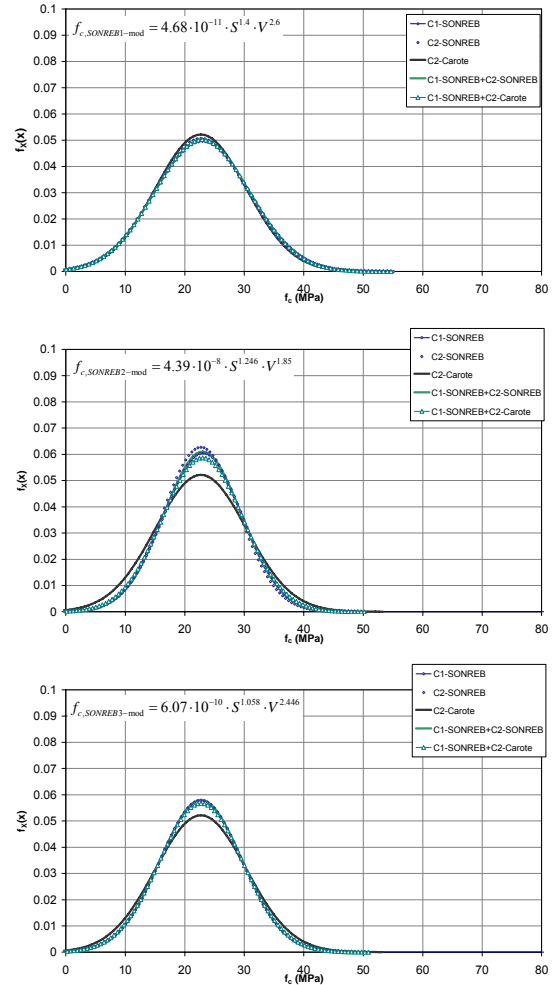


Figura 15. Distribuzioni normali delle resistenze cilindriche ottenute utilizzando le correlazioni modificate.

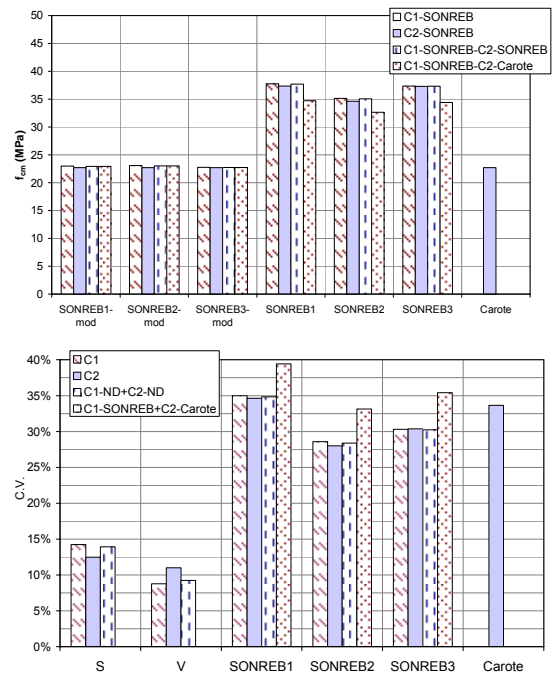


Figura 16. Resistenze cilindriche medie a compressione e c.d.v. al variare del campione considerato.

Al variare del campione considerato il valor medio stimato della resistenza a compressione con le



“SONREB modificate” è ovviamente all’incirca coincidente con la resistenza media a compressione delle carote, mentre il coefficiente di variazione coincide con quello delle SONREB di letteratura.

Anche in questo caso sono stati estratti a caso dal campione di prove relative alle carote 10 campioni costituiti ognuno da 20 prove.

Così come nel caso precedente per ogni campione estratto a caso il coefficiente di variazione non varia di molto rispetto a quello delle rispettive carote (figg. 17 e 18).

Per tutti i campioni estratti il coefficiente di variazione, inoltre, è in buon accordo con quello ottenuto considerando le resistenze a compressione di tutte le carote. Lo stesso non può dirsi per la resistenza media valutata con le relazioni di letteratura che risulta significativamente più alta, con differenze dell’ordine del 50%, della resistenza delle singole carote (figura 18) e quindi della resistenza valutata con le stesse relazioni modificate (eq. 6).

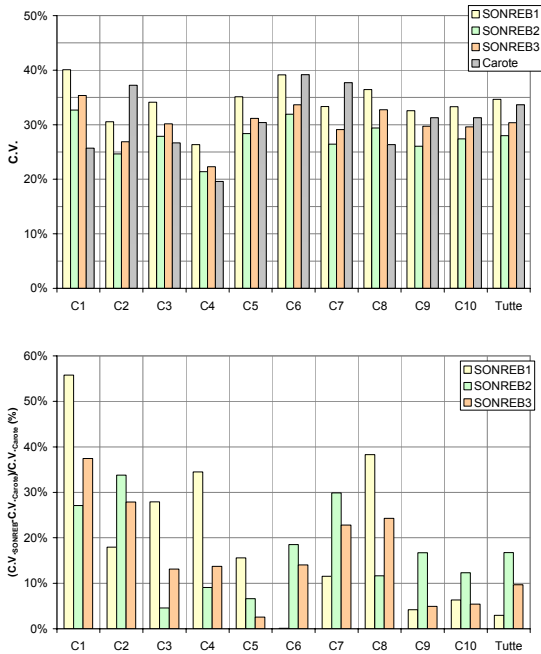


Figura 17. C.d.V. ed errori percentuali dei diversi campioni casuali considerati.

L’errore sulla stima della resistenza a compressione delle carote al crescere del numero di prove è invece riportato nella figura 19. Il grafico è stato costruito con ipotesi analoghe a quelle del Caso Studio1.

In questo caso risulta che fissato un livello di significatività pari al 5% (livello di confidenza pari al 95%) l’errore sulla stima del valor medio (confidenza/ $f_{c,car-m}$ ) è pari al 10,4 % in corrispondenza del numero di prove a compressione effettuate.

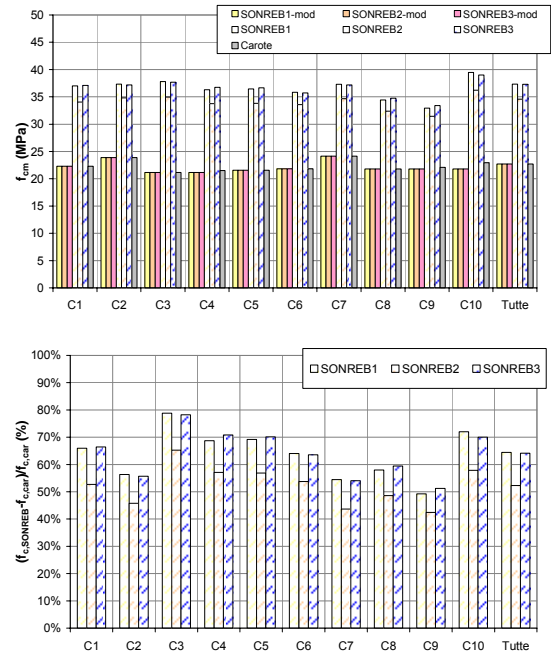


Figura 18. Resistenza media a compressione per i diversi campioni casuali considerati.

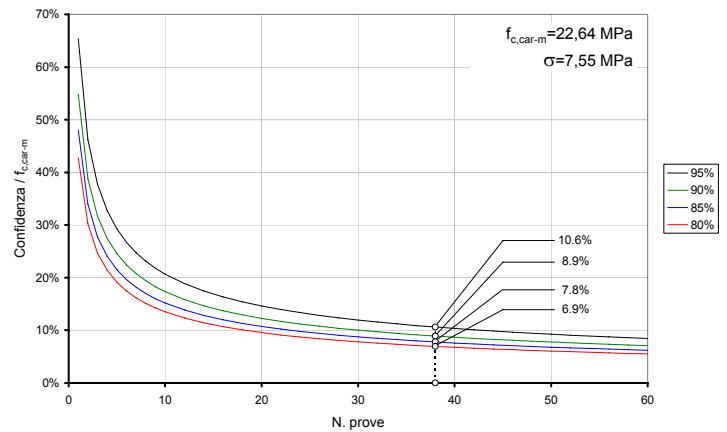


Figura 19. Errore sulla stima della resistenza media a compressione delle carote al crescere del numero di prove effettuate.

## 5 CONCLUSIONI.

Grazie all’attuazione del 1° Programma Temporale delle Verifiche del patrimonio edilizio strategico e rilevante, ai sensi dell’ OPCM 3362/2004 sono state effettuate su scala nazionale un vastissimo numero di indagini.

Le indagini sono finalizzate alla conoscenza dell’organismo strutturale ed alla stima della resistenza in situ dei materiali. Un utilizzo corretto e convenzionalmente accettabile dei valori di resistenza ottenuti per ogni singolo caso, tuttavia, richiede di stabilire criteri generali per le modalità d’indagine e l’interpretazione dei risultati.

Nei due casi qui esaminati i valori delle prove distruttive e non distruttive effettuate mostrano risultati contrastanti tra loro.

Nel primo caso esiste una chiara correlazione tra la velocità ultrasonica e la resistenza a compressione

delle carote, che consente di ricavare specifici coefficienti per la SONREB.. Nel secondo caso, invece, tanto l'indice sclerometrico quanto la velocità ultrasonica non sono correlati alla resistenza a compressione delle carote. In questo caso sono state impiegate le correlazioni di letteratura, in cui è stato ricavato un nuovo valore del coefficiente  $a$ , imponendo l'uguaglianza tra il valor medio della resistenza a compressione delle carote ed il valor medio stimato con le relazioni SONREB negli stessi punti.

L'indice sclerometrico nei due casi esaminati assume valori più che altro casuali intorno al proprio valor medio.

Nonostante le differenze evidenziate, in entrambi i casi esaminati si verifica che il c.d.v. delle relazioni SONREB impiegate nei punti in cui sono state estratte le carote non differisce di molto da quello delle resistenze delle sole carote.

Il numero totale di prove effettuate (distruttive + non distruttive) per ognuno degli edifici oggetto dell'indagine è stato stabilito a priori sulla base delle indicazioni contenute nell'OPCM 3431. A posteriori, si può affermare che nei due casi la resistenza media del cls è stata determinata dalle sole carote estratte, contribuendo significativamente le SONREB alla valutazione del solo coefficiente di variazione (peraltro utile ai fini della valutazione dei valori caratteristici della resistenza). A tal proposito si evidenzia che le sole carote estratte (da sole insufficienti in numero a soddisfare le prescrizioni dell'OPCM 3431) dimostrano di contribuire in modo sufficientemente attendibile alla stima della resistenza come si evince dalle valutazioni della significatività del campione e del relativo intervallo di confidenza riportate nelle figure 12 e 19.

Sebbene appaia senz'altro necessario esaminare un più elevato numero di casi, le differenze emerse dall'esame comparato delle due campagne di prova descritte, suggeriscono alcune considerazioni riguardanti le modalità d'indagine e l'interpretazione dei risultati. Nello stabilire criteri generali d'indagine, più che definire in maniera rigida il numero di prove da eseguire, occorrerebbe prefissare il livello di significatività statistica da raggiungere.

Sembrirebbe ad esempio più opportuno, nella valutazione della resistenza in situ del calcestruzzo, stabilire il numero di carote avendo definito l'errore accettabile per la stima del valor medio. Occorrerebbe inoltre tener conto della dispersione statistica e scegliere adeguatamente il tipo di distribuzione maggiormente rappresentativa delle prove in esame (in genere per le resistenze dei calcestruzzi si assumono distribuzioni normali o lognormali). Infine, è senz'altro utile effettuare prove non distruttive per ampliare l'estensione delle indagini limitando il numero di carotaggi e ricavare una stima più attendibile della variabilità della resistenza all'interno dell'organismo strutturale.

## BIBLIOGRAFIA

- OPCM N.3274/3431. *Norme Tecniche per il Progetto, la Valutazione e l'Adeguamento Sismico degli Edifici*.
- Centro di Competenza Regionale sul Rischio Sismico (CRiS), 2005. *Linee Guida per la Valutazione della Vulnerabilità Sismica degli Edifici Strategici e Rilevanti*.
- UNI EN 12504-1, 2002. *Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Carote - Prelievo, esame e prove di compressione*.
- UNI EN 12504-2, 2001. *Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Prove non distruttive - Determinazione dell'indice sclerometrico*.
- UNI EN 12504-4, 2005. *Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Prove non distruttive - Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici*.
- RILEM, 1993. *NDT 4 Recommendations for in situ concrete strength determination by combined non-destructive methods*, Compendium of RILEM Technical Recommendations, E&FN Spon, London.
- Di Leo, G. Pascale, 1994. *Prove non distruttive sulle costruzioni in c.a.*, Il giornale delle prove non distruttive, n. 4.
- J. Gasparik, 1992. *Prove non distruttive nell'edilizia*. Quaderno didattico AIPnD, Brescia.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1997. *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Report FEMA 273 (Guidelines) and Report 274 (Commentary), Washington, D.C..
- American Concrete Institute, 2002. ACI 214R-02, *Evaluation of Strength Test Results of Concrete*.