

Calcolo della resistenza del calcestruzzo di strutture esistenti

Adriano Castagnone
Davide Cerroni

Sommario

RESISTENZA DEL CALCESTRUZZO IN OPERA	4
Prove dirette su carote.....	4
Metodo A.C.I. (American Concrete Institute) 214.4-R03.....	6
Metodo Masi (2005)	7
Metodo Concrete Society (1987).....	8
Metodo Cestelli Guidi (1981).....	8
NTC 08 – Metodo EN 13791 – Linee Guida C.S.LL.PP.	9
Prove indirette SonReb	10
Passaggio dalla resistenza media in opera alla resistenza caratteristica.....	11
Il modulo Et – Resistenza prove cls in opera	12
Esempio di Relazione prodotta da ET®	15
BIBLIOGRAFIA.....	17

*La presente pubblicazione è tutelata dalla legge sul diritto d'autore e non può essere divulgata senza il permesso scritto degli autori.
Gli autori non si assumono alcuna responsabilità circa il contenuto e le formule riportate.*

S.T.A. DATA srl
Corso Raffaello, 12 - 10126 Torino
tel. 011 6699345 www.stadata.com

RESISTENZA DEL CALCESTRUZZO DI STRUTTURE ESISTENTI

Le caratteristiche meccaniche dei di strutture esistente si ricavano da misurazioni dirette o indirette.

Le prime consistono nella misura diretta della grandezza interessata, mentre le seconde si ricavano indirettamente, mediante misurazioni di altre caratteristiche del materiale, per esempio la velocità di propagazione di onde e algoritmi di correlazione che consentono di risalire ai valori desiderati.

Nel caso del calcestruzzo la caratteristica meccanica da ricercare è la resistenza a compressione, la quale può essere ottenuta attraverso:

- prove distruttive dirette su carote prelevate dalla struttura in esame;
- prove SonReb (soniche e sclerometriche) non distruttive effettuate sulla struttura in analisi
- altre prove come pull-out.

Prove dirette su carote

Il prelievo di carote ed il successivo schiacciamento è il metodo più diretto più affidabile per stimare le proprietà meccaniche del calcestruzzo di strutture esistenti. Le specifiche per l'esecuzione del carotaggio sono contenute nella norma UNI EN 12504-1 (2002). Nell'esecuzione dei carotaggi vanno seguite alcune regole, tra le quali:

- il diametro delle carote deve essere almeno superiore a tre volte il diametro massimo degli aggregati cercando di prelevare, ove possibile, carote di diametro non inferiore a 100 mm¹;
- le carote non dovrebbero contenere ferri d'armatura, e vanno comunque scartati i provini contenenti barre d'armatura inclinate o parallele all'asse della carota;
- il rapporto lunghezza/diametro dei provini deve essere possibilmente uguale a 2, o comunque compreso fra 1 e 2;
- si deve impedire l'essiccazione e realizzare prove su provini con umidità originale;
- si deve tenere in conto la posizione del carotaggio rispetto all'elemento, effettuando il prelievo nei pilastri possibilmente a metà altezza.

Anche osservando queste regole, comunque, i valori ottenuti differiranno da quelli reali per diversi fattori.

¹ Alcune ditte propongono prelievi di carote con carotatrici in grado di estrarre provini di diametro pari a circa 6 cm. Per l'uso di queste carote è indispensabile la verifica che sia rispettato il rapporto diametro/dimensione massima dell'inerte = 3. Inoltre su materiale scadente il disturbo arrecato in fase di estrazione alle carote di piccolo diametro può essere maggiore rispetto a carote di maggior diametro.

Il primo fattore, e forse il più difficile da valutarsi, è legato al “disturbo del provino” cioè al danneggiamento arrecato in fase di prelievo del campione che provoca inevitabilmente un deterioramento del materiale.

Per questo un fattore importante è dato dalla velocità di rotazione della carotatrice, che deve essere limitata a non più di 600 giri/min; inoltre è importanti assicurarsi che la macchina carotatrice sia ben fissata ed agisca perpendicolarmente alla superficie dell’elemento oggetto di prelievo.

Il disturbo da estrazione produce una riduzione della resistenza reale, dovuta alla sezione utile minore di quella geometrica.

Risulta infatti che, essendo $(Area\ 1a) > (Area\ 1b)$, la tensione $\sigma = N/(Area\ 1a)$ è minore di quella che si ottiene con $N/(Area\ 1b)$, utilizzando l’area efficace.

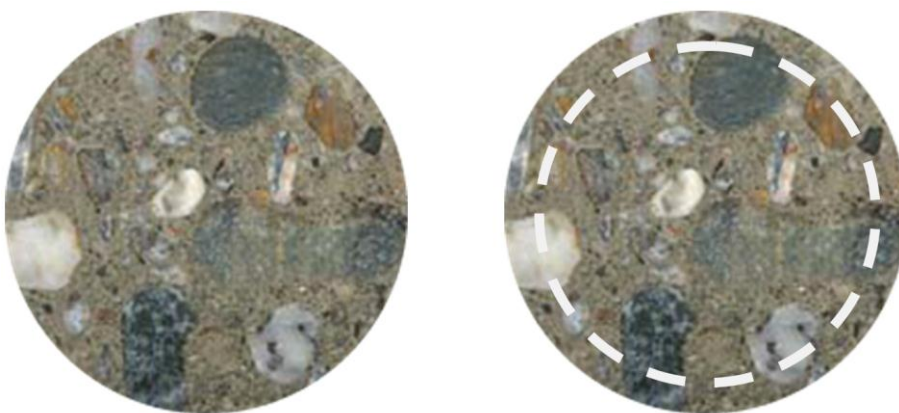


Figura 1a Carota integra

1b Carota disturbata con minor sezione utile.

Nel caso di materiale scadente i valori di rottura possono essere scarsamente significativi.

Un secondo fattore è dovuto alla forma del provino, ed in particolare al diametro in valore assoluto ed in relazione alla lunghezza (snellezza).

Un ulteriore fattore non sempre tenuto debitamente in conto è l’umidità del provino al momento del prelievo. Il provino secco manifesta una resistenza inferiore al provino conservato nelle stesse condizioni di umidità all’atto dell’estrazione; per questo è consigliabile avvolgere i provini in materiale plastico subito dopo l’estrazione.

Esistono infine formule correttive che permettono di stimare la resistenza in sito anche di carote contenenti barre di armatura (campioni che in generale sarebbero da non ritenere validi).

Nel modulo ET “Resistenza prove cls in opera” sono implementati i seguenti metodi, meglio descritti in seguito.

	Disturbo	Snellezza	Diametro	Umidità	Armature incluse
A.C.I.	x	x	x	x	
Masi	x	x	x		x
B.S. 1881		x			
Concrete Society	x	x			x
Cestelli Guidi	x	x			
EN 13791 - NTC08 – Linee Guida C.S.LL.PP.	x	x			

Metodo A.C.I. (American Concrete Institute) 214.4-R03

Calibrata su calcestruzzi di caratteristiche medie e carote di diametro pari a 100 mm, è una delle espressioni più complete disponibili in letteratura per la trasformazione della resistenza di carota in resistenza in opera:

$$f_c = f_{core} \cdot F_{l/d} \cdot F_{dia} \cdot F_{mc} \cdot F_d$$

dove:

- f_{core} : è la resistenza scaturita dalla prova di compressione del campione, espressa in MPa;
- $F_{l/d}$: correzione per forma e umidità del provino, pari a ($\alpha = 4.3 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{N}$):
 - $1 - (0.130 - \alpha \cdot f_{core}) \cdot (2 - l/d)^2$ per umidità del provino come prelevato;
 - $1 - (0.117 - \alpha \cdot f_{core}) \cdot (2 - l/d)^2$ per provino immerso per 48 h in acqua;
 - $1 - (0.144 - \alpha \cdot f_{core}) \cdot (2 - l/d)^2$ per provino conservato in aria secca;
- F_{dia} : correzione per diametro della carota, pari a:
 - 1.06 per diametro pari a 50 mm;
 - 1.00 per diametro pari a 100 mm;
 - 0.98 per diametro pari a 150 mm;

- F_{mc} : correzione per umidità, pari a:
 - 1.00 per umidità pari alla condizione di prelievo;
 - 1.09 per provino immersa 48 h in acqua;
 - 0.98 per provino conservato in aria secca;
- F_d : correzione per disturbo del provino dovuto al prelievo, pari a 1.06.

Metodo Masi (2005)

Calibrata su provini di diametro pari a 100 mm, permette di tenere in conto la presenza di barre di armatura nel provino e dell'influenza della resistenza del calcestruzzo nel valutare il disturbo dovuto al prelievo del provino:

$$f_c = f_{core} \cdot F_{l/d} \cdot F_{dia} \cdot F_a \cdot F_d$$

dove:

- f_{core} : è la resistenza scaturita dalla prova di compressione del campione;
- $F_{l/d}$: correzione per snellezza del provino, pari a $2 / (1.5 + D / l)$;
- F_{dia} : correzione per diametro della carota, pari a:
 - 1.06 per diametro pari a 50 mm;
 - 1.00 per diametro pari a 100 mm;
 - 0.98 per diametro pari a 150 mm;
- F_a : correzione per armature incluse, variabile tra:
 - 1.03 per barre di piccolo diametro (ϕ 10);
 - 1.13 per barre di diametro elevato (ϕ 20);
- F_d : correzione per disturbo del provino dovuto al prelievo, pari a:
 - 1.20 per $f_{core} < 20$ MPa;
 - 1.10 per $f_{core} > 20$ MPa

British Standard

L'espressione proposta dalle British Standard applica un unico coefficiente correttivo alla resistenza misurata sul provino:

$$f_c = f_{core} \cdot F_{l/d}$$

dove:

- f_{core} : è la resistenza scaturita dalla prova di compressione del campione;
- $F_{l/d}$: correzione per snellezza del provino, pari a $0.92 + 0.08 \cdot (l/D - 1)$.

Metodo Concrete Society (1987)

L'espressione proposta dalla Concrete Society tiene conto del disturbo, della forma della carota e della presenza di armature incluse con la seguente espressione:

$$f_c = f_{core} \cdot F_{l/d} \cdot F_a \cdot F_d$$

dove:

- f_{core} : è la resistenza scaturita dalla prova di compressione del campione;
- $F_{l/d}$: correzione per snellezza del provino, pari a $2 / (1.50 \cdot D / l)$;
- F_a : correzione per presenza di armature, pari a $1 + 1.5 \cdot (\phi / D \cdot d / l)$, dove:
 - d è la distanza della barra dalla base del provino più vicina;
 - ϕ è il diametro della barra.
- F_d : è la correzione per il disturbo, pari a 1.30.

Metodo Cestelli Guidi (1981)

Il metodo del prof. Cestelli Guidi risulta tra i primi metodi proposti.

L'espressione ha la particolarità di tenere in conto la direzione di perforazione rispetto alla direzione del getto:

$$f_c = f_{core} \cdot F_{l/d} \cdot F_{dir} \cdot F_d$$

dove:

- f_{core} : è la resistenza scaturita dalla prova di compressione del campione;

- $F_{l/d}$: correzione per snellezza del provino, pari a: $2 / (1.50 \cdot D / l)$;
- F_{dir} : correzione per direzione della perforazione rispetto al getto, pari a:
 - 1 per direzione ortogonale;
 - 0.92 per direzione parallela;
- F_d : correzione per il disturbo, pari a 1.50.

NTC 08 – Metodo EN 13791 – Linee Guida C.S.LL.PP.

Sebbene le NTC non propongano un'espressione per la correzione dei dati sperimentali, trattando il controllo della resistenza del calcestruzzo in opera sono ritenuti accettabili valori medi di resistenza fino all'85% della resistenza definita in fase di progetto, pertanto si può interpretare tale percentuale come un coefficiente di disturbo.

Per quanto riguarda la correzione per la snellezza del provino, il passaggio da resistenza cubica ($l/D = 1$) a cilindrica ($l/D = 2$) è effettuato moltiplicando per 0.83, da cui si può ricavare un'espressione linearmente variabile per snellezza compresa tra 1 e 2. Pertanto:

$$f_c = f_{core} \cdot F_{l/d} \cdot F_d$$

dove:

- f_{core} : è la resistenza scaturita dalla prova di compressione del campione;
- $F_{l/d}$: correzione per snellezza del provino, pari a: $0.83 + (1 - 0.83) (l / D - 1)$
- F_d : correzione per il disturbo, pari a $1 / 0.85$.

Le diverse normative sopra indicate poi usano metodi diversi per passare dal valore medio al valore caratteristico.

Prove indirette SonReb

L'interpretazione dei risultati delle prove SonReb richiede l'utilizzo di espressioni diverse a seconda dello strumento utilizzato e della qualità del calcestruzzo misurato. Qualora il costruttore dell'apparecchio di misura non fornisca espressioni appositamente tarate, esistono in bibliografia delle espressioni generiche, riconducibili sempre alla forma

$$f_c = a \cdot I_R^b \cdot U^c$$

dove I_R è l'indice di rimbalzo misurato, U è la velocità di attraversamento e a , b , c sono coefficienti caratteristici dell'espressione utilizzata.

Nel modulo ET "Resistenza prove cls in opera" sono implementate le seguenti espressioni:

- **Giacchetti Laquaniti (1980)** dove (con velocità di attraversamento U espressa in m/s):
 - $a = 7.546 \cdot 10^{-11}$;
 - $b = 1.4$;
 - $c = 2.6$;

- **Di Leo-Pascale (1994)** (velocità di attraversamento U espressa in m/s), dove:
 - $a = 1.2 \cdot 10^{-9}$;
 - $b = 1.058$;
 - $c = 2.446$;

- **Gasparik (1992)** (con velocità di attraversamento U espressa in km/s), dove:
 - $a = 0.0286$;
 - $b = 1.246$;
 - $c = 1.85$;

- **Rilem (1993)** (con velocità di attraversamento U espressa in m/s), dove:
 - $a = 9.27 \cdot 10^{-11}$;
 - $b = 1.40$;
 - $c = 2.60$;

Passaggio dalla resistenza media in opera alla resistenza caratteristica

Una volta valutata la resistenze in opera opportunamente corrette potrebbe essere necessario calcolare il valore caratteristico corrispondente.

Le NTC 08, le Linee Guida del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici e le norme UNI EN 13971 propongono approcci simili nella forma, ma con diversi coefficienti moltiplicativi che possono portare a risultati diversi:

- Numero di prove maggiore o uguale a 15:
 - NTC 08: $f_{ck} = f_{c,m} - 1.48 \sigma$;
 - Linee Guida C.S.LL.PP.: $f_{ck} = \min(f_{cm} - 1.48 \sigma, f_{c,min} + 4 \text{ MPa})$;
 - **UNI EN 13791** : $f_{ck} = \min(f_{cm} - 1.48 \sigma, f_{c,min} + 4 \text{ MPa})$;

- Numero di prove minore di 15:
 - NTC 08: $f_{ck} = f_{c,m} - 8 \text{ MPa}$;
 - Linee Guida C.S.LL.PP.: $f_{ck} = \min(f_{cm} - 1.48 (k / 0.85); f_{c,min} + 4 \text{ MPa})$;
 - **UNI EN 13791**: $f_{ck} = \min(f_{cm} - 1.48 (k / 0.85); f_{c,min} + 4 \text{ MPa})$;

Dove k varia a seconda del numero di prove n:

n	EN 13791 [MPa]	Linee Guida [MPa]
3	7	-
4-6	7	6
7-9	6	5
10-14	5	4

Il modulo Et – Resistenza prove cls in opera

Il modulo di Et permette il calcolo della resistenza media del calcestruzzo, a partire dai risultati di prove dirette ed indirette di una campagna di misurazioni, selezionando uno o più metodi per il calcolo del valore medio.

Resistenza prove cls in opera - v. 12.1.0

Prove distruttive		Prove SonReb						
Nr. Provino	Resist. mis. [MPa]	Diametro [mm]	Lunghezza [mm]	Umidità	Ø ferri [mm]	Dist ferri [mm]	Dir. perf.	
1	18,00	100	180	D	-	-	O	
2	12,00	100	180	D	-	-	O	
3	19,00	125	200	E	-	-	P	
4	22,00	125	200	E	-	-	P	
5	17,00	125	200	E	12	50	P	
6	18,00	100	200	W	-	-	O	
7	19,00	100	180	W	-	-	O	
8								

Legenda umidità

E: come prelevato
W: immerso 48h in acqua
D: conservato in aria secca

Legenda direzione di perforazione

O: perforazione ortogonale al getto
P: perforazione parallela al getto

Prove distruttive su carote

Metodo A.C.I.: 19,05 MPa

Metodo Masi: 20,46 MPa

Metodo B.S. 1881: 17,48 MPa

Metodo Concrete Society: 22,44 MPa

Metodo Cestelli Guidi: 24,84 MPa

Metodo EN 13791 - NTC 08 Linee Guida C.S.LL.PP.: 20,07 MPa

Compressiva 20,07 MPa

Prove SonReb

Giacchetti-Laquaniti: 15,67 MPa

Di Leo-Pascale: 19,77 MPa

Gasparik: 22,64 MPa

Rilem: 19,48 MPa

Compressiva 19,39 MPa

Dati utilizzati

Prove su carote

Prove SonReb

Analisi sismica

Resistenza media: 19,75 MPa

Fattore di confidenza FC:

Resistenza media * FC: 23,70 MPa

Resistenza media / FC: 16,46 MPa

É possibile utilizzare risultati da prove SonReb di cui si sono già calcolati i valori di resistenza del calcestruzzo (cubica o cilindrica), o direttamente con i dati misurati (indice di rimbalzo e velocità di attraversamento), selezionando una o più espressioni implementate per interpretare i risultati di cui verrà presentato il valore medio.

Prove distruttive				Prove SonReb			
Nr. Prova	Indice rimb. medio	Vel. media [m/s]	Resist. stimata [MPa]				
1	42	2.980	15,45				
2	47	3.201	21,61				
3	45	3.157	19,66				
4	44	3.105	18,37				
5	48	3.114	20,81				
6	47	3.125	20,43				
7							
8							

Risultati prove SonReb

Resistenza cilindrica

Resistenza cubica

Sclerometro - ultrasuoni

Resistenza prove cls in opera - v. 12.1.0

Demo Resistenza CLS

Prove distruttive								Prove SonReb							
Nr. Provino	Resist. mis. [MPa]	Diametro [mm]	Lunghezza [mm]	Umidità	Ø ferri [mm]	Dist ferri [mm]	Dir. perf.								
1	18,00	100	180	D	-	-	O								
2	12,00	100	180	D	-	-	O								
3	19,00	125	200	E	-	-	P								
4	22,00	125	200	E	-	-	P								
5	17,00	125	200	E	12	50	P								
6	18,00	100	200	W	-	-	O								
7	19,00	100	180	W	-	-	O								
8															

Legenda umidità

E: come prelevato
W: immerso 48h in acqua
D: conservato in aria secca

Legenda direzione di perforazione

O: perforazione ortogonale al getto
P: perforazione parallela al getto

Prove distruttive su carote

Metodo A.C.I.: 19,05 MPa

Metodo Masi: 20,46 MPa

Metodo B.S. 1881: 17,48 MPa

Metodo Concrete Society: 22,44 MPa

Metodo Cestelli Guidi: 24,84 MPa

Metodo EN 13791 - NTC 08 Linee Guida C.S.LL.PP.: 20,07 MPa

Compressiva 20,99 MPa

Prove SonReb

Giacchetti-Laquaniti: 15,67 MPa

Di Leo-Pascale: 19,77 MPa

Gasparik: 22,64 MPa

Rilem: 19,48 MPa

Compressiva 20,63 MPa

Dati utilizzati

Prove su carote

Prove SonReb

Analisi sismica

Resistenza media: 20,82 MPa

Fattore di confidenza FC: 1,20

Resistenza media * FC: 24,99 MPa

Resistenza media / FC: 17,35 MPa

Agendo sul pannello 1 - *Prove distruttive su carote*, è possibile selezionare i metodi che si intendono utilizzare per correggere i risultati sperimentali delle prove dirette. Accanto ad ogni etichetta è indicato il valore medio che risulterebbe applicando quell'unico metodo; la media complessiva è invece ottenuta applicando tutti i metodi selezionati.

Analogamente il pannello 2 - *Prove SonReb*, abilitato solo se si stanno utilizzando risultati "grezzi", restituisce il valore di resistenza media con i singoli metodi disponibili e complessiva dei metodi selezionati.

Nel pannello 3 - *Dati utilizzati*, è possibile scegliere se utilizzare i soli risultati delle prove dirette od indirette o entrambe.

Infine nel pannello 4 - *Analisi sismica*, è possibile indicare il fattore di confidenza e leggere, a calcolo effettuato, la resistenza media.

Nel caso in cui siano stati selezionati sia i dati da prove dirette che indirette, il risultato finale è dato dalla media pesata sul numero di prove del valore medio ottenuto dalle prove distruttive e dalle prove SonReb.

I valori corretti delle singole prove è visibile nella relazione prodotta dal programma stesso e di seguito riportata.

Per effettuare la valutazione di Piano ET [cliccare qui](#).

Esempio di Relazione prodotta da ET®

VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA DEL CALCESTRUZZO IN OPERA

Resistenza CLS

INTRODUZIONE

L'analisi seguente è effettuata sulle prove di laboratorio (resistenza a compressione) di carote estratte in situ. Tale procedura si divide in due fasi: nella prima si stima la resistenza in situ correggendo i risultati ottenuti dalle prove distruttive effettuate sulle carote estratte; nella seconda i valori ottenuti sono mediati e ulteriormente corretti dal fattore di confidenza.

1 - CORREZIONE E STIMA DELLE RESISTENZE

Dai valori di resistenza ottenuti da prove sperimentali si è passati alle resistenze in opera utilizzando i seguenti metodi:

- Metodo prof. Masi
- Metodo C.S. (*Concrete Society*)

Nella tabella seguente sono riassunti i valori di resistenza sperimentali.

Prova	Resistenza a compressione [MPa]	Diametro [mm]	Altezza [mm]	Umidità	D ferri [mm]	Dist. ferri [mm]	Dir. Perf.
1	18,00	100	180	D	-	-	O
2	12,00	100	180	D	-	-	O
3	19,00	125	200	E	-	-	P
4	22,00	125	200	E	-	-	P
5	17,00	125	200	E	12	50	P
6	18,00	100	200	W	-	-	O
7	19,00	100	180	W	-	-	O

Nella tabella seguente sono riassunti i valori corretti con i metodi utilizzati.

Prova	Masi [MPa]	C.S. [MPa]	EN-NTC-C.S.LL.PP. [MPa]	Media [MPa]
1	21,02	22,77	20,46	21,41
2	14,01	15,18	13,64	14,28
3	21,46	23,25	20,83	21,85
4	22,78	26,92	24,12	24,61
5	20,16	21,55	18,64	20,12
6	21,60	23,40	21,18	22,06
7	22,18	24,03	21,59	22,60

Il valore medio delle prove distruttive risulta quindi pari a **20,99** MPa.

I risultati ottenuti dalle prove SonReb sono qua riportati espressi in velocità di attraversamento ed indice di rimbalzo. La stima della resistenza è stata effettuata utilizzando le espressioni di:

- Di Leo - Pasquale
- Gasparinik
- Rilem

Prova	Indice rimb. medio	Vel. media [m/s]	Resist. stimata
-------	--------------------	------------------	-----------------

			[MPa]
1	42	2.980	16,53
2	47	3.201	22,87
3	45	3.157	21,00
4	44	3.105	19,67
5	48	3.114	22,05
6	47	3125	21,65

Nr. Prova	Di Leo-Pasquale	Gaspararinik	Rilem	Media [MPa]
1	15,76	18,85	14,99	16,53
2	21,94	24,75	21,92	22,87
3	20,26	22,86	19,90	21,00
4	18,99	21,55	18,47	19,67
5	20,97	24,15	21,01	22,05
6	20,69	23,68	20,59	21,65

Il valore medio delle prove Sonreb è pari a **20,63** MPa.

La resistenza media complessiva pesata f_{cm} risulta quindi pari a **20,82** MPa.

2 - VALUTAZIONE DELLA RESISTENZE DI CALCOLO

Per l'utilizzo dei metodi di analisi indicati dalla Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 al punto 8.7.4.2 i valori da utilizzare risultano essere i seguenti:

Descrizione	Valore [MPa]
Resistenza media f_{cm} / FC	17,35
Resistenza media $f_{cm} * FC$	24,99

Il fattore di confidenza FC è assunto pari a **1,20**.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Giacchetti, S. Bufarini, V. D’Aria – Il controllo strutturale degli edifici in cemento armato e muratura – EPC Libri
- [2] ACI 214.4R-03
- [3] A. Masi, M. Vona – La Stima della Resistenza del Calcestruzzo In-Situ: Impostazione delle Indagini ed Elaborazione dei Risultati
- [4] NTC 08
- [5] G. Manfredi, A. Masi, R. Pinho, G. Verderame, M. Vona – Valutazione degli edifici esistenti in Cemento Armato – IUSS Press
- [6] E. Cosenza, G. Manfredi, G. Monti – Valutazione e riduzione della vulnerabilità sismica di edifici esistenti in cemento armato – Polimetrica International Scientific Publisher
- [7] C. Faella, E. Martinelli, N. Salerno – 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 proprietà meccaniche del calcestruzzo