ingenio-web.it

Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici

Servizio Tecnico Centrale

LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL CALCESTRUZZO IN OPERA

Settembre 2017

Documento positivamente licenziato con Parere n. 80/2016, espresso dalla Prima Sezione del Consiglio Superiore dei LL.PP. nella adunanza del 30 marzo 2017

ingenio-web.it

1 – GENERALITÀ....4
1.1 Campo di applicazione....4
1.2 Finalità....4
1.3 Glossario....5
2 – CONTROLLO DELLA RESISTENZA DEL CALCESTRUZZO IN OPERA....5
2.1 Pianificazione delle prove in opera....6
2.2 Predisposizione delle aree di prova e metodi di indagine....7
3 - VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL CALCESTRUZZO IN OPERA MEDIANTE CAROTAGGIO....8
3.1 Prelievo di campioni mediante carotaggio....8
3.2 Stima della resistenza meccanica in situ mediante carotaggi, al fine di verificare l'accettabilità del calcestruzzo messo in opera....9
3.3 Prescrizioni specifiche per la stima della resistenza in situ mediante carotaggi da utilizzare nella valutazione di costruzioni esistenti....13
4 – METODI INDIRETTI PER LA VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL CALCESTRUZZO IN OPERA....13
4.1 Generalità....13
4.2 Stima delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in opera mediante l'indice di rimbalzo....14
(o sclerometrico)....14
4.2.1 Principio di funzionamento....14
4.2.2 Verifica dello strumento....15
4.2.3 Modalità di esecuzione....15
4.2.4 Elaborazione dei risultati....16
4.3 Stima delle caratteristiche meccaniche in opera mediante la velocità di propagazione di micro-impulsi....17
(ultrasonici)....17
4.3.1 Principio di funzionamento....17
4.3.2 Taratura dello strumento....17
4.3.3 Modalità d'esecuzione....18
4.3.4 Elaborazione dei risultati....18
4.4 Stima delle caratteristiche meccaniche in opera in base alla forza di estrazione (pull-out)....19
4.4.1 Principio di funzionamento....19
4.4.2 Taratura della strumentazione....19
4.4.3 Modalità di esecuzione....19
4.4.4 Elaborazione dei risultati....20
4.5 Stima delle caratteristiche meccaniche in opera in base alla profondità di penetrazione di sonde....20
4.5.1 Principio di funzionamento....20
4.5.2 Taratura della strumentazione....21
4.5.3 Modalità d'esecuzione....21
4.5.4 Elaborazione dei risultati....22
4.6 Stima delle caratteristiche meccaniche mediante l'impiego di metodi combinati....22
4.7 Determinazione di altre proprietà del calcestruzzo in opera: individuazione della posizione delle armature e stima dello spessore del copriferro....23

ingenio-web.it

4.7.1 Principio di funzionamento 23
4.7.2 Taratura della strumentazione 23
4.8 Determinazione di altre proprietà del calcestruzzo in opera: determinazione della profondità di carbonatazione 23
4.8.1 Principio di funzionamento 23
4.8.2 Modalità di esecuzione 24
4.9 Determinazione di altre proprietà del calcestruzzo in opera: valutazione della permeabilità del calcestruzzo ai gas e all'acqua in sito 24
4.10 Ulteriori indagini strumentali sul calcestruzzo in opera 24
Bibliografia 25

ingenio-web.it

1 – GENERALITÀ

Nel contesto di un'azione normativa tesa a migliorare la sicurezza strutturale, nonché l'affidabilità dei materiali e dei relativi sistemi costruttivi, non poteva mancare una Linea Guida sulla valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in opera mediante prove distruttive e non distruttive. Il documento ha l'obiettivo di fornire indicazioni finalizzate a normalizzare le procedure, evitare errori riconducibili a procedure improprie che possano pregiudicare le attese, in termini di resistenza e di durabilità, alla base del progetto nonché di scongiurare gli errori derivanti dalla inappropriata interpretazione dei risultati delle prove distruttive e non.
Nel seguito sono illustrati i sistemi di valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in opera effettuata, sia con metodi diretti (carotaggio), che con metodi indiretti; in particolare si citano i seguenti metodi indiretti: metodo sclerometrico, metodo a ultrasuoni, metodo basato sulla forza di estrazione di inserti (pull-out) e metodo basato sulla profondità di penetrazione di sonde. Sono altresì indicati, per ogni metodo, i relativi principi di funzionamento, la taratura della strumentazione utilizzata, le modalità di esecuzione delle prove, nonché l'idonea elaborazione delle misure, per la quale sono necessarie appropriate curve di correlazione. Nello spirito di fornire agli operatori del settore uno strumento conoscitivo e operativo il più possibile organico, funzionale e corretto sotto il profilo tecnico-scientifico, sono stati evidenziati i limiti e le precauzioni nell'applicazione di ciascuno dei metodi indiretti per la valutazione della resistenza meccanica in situ che a volte, nell'uso corrente, viene affidata a generici grafici di correlazione forniti dal fabbricante a corredo delle apparecchiature di prova. Al riguardo, con riferimento alle vigenti *Norme tecniche per le costruzioni*, si richiama l'attenzione sul paragrafo relativo alle prescrizioni generali per il collaudo statico che, tra gli accertamenti discrezionali "utili per formarsi il convincimento della sicurezza di un'opera", cita il ricorso alle prove non distruttive.
Il documento proposto tocca, quindi, aspetti fondamentali per la sicurezza delle opere realizzate in calcestruzzo, materiale versatile e per questo, a volte, manipolato con eccessiva confidenza trascurando i necessari accorgimenti.

1.1 Campo di applicazione

Le presenti Linee Guida si applicano prevalentemente al calcestruzzo per uso strutturale, armato e non, ordinario e precompresso, usualmente impiegato nelle costruzioni. Talune disposizioni, laddove applicabili, restano comunque valide anche per numerosi altri tipi di calcestruzzo conosciuti ed utilizzati – che potranno essere oggetto di future specifiche Linee Guida – quali ad esempio: calcestruzzo leggero, calcestruzzo fibrorinforzato, calcestruzzo autocompattante, calcestruzzo proiettato, ecc… Per i calcestruzzi ad alta resistenza si applicano le specifiche Linee Guida già esistenti.

1.2 Finalità

E' necessario chiarire, prima di passare ai contenuti del documento, che gli ambiti di applicazione e quindi le finalità delle presenti Linee Guida fanno riferimento a due diverse fattispecie:

a) il caso in cui, con riferimento al Capitolo 11 delle vigenti Norme tecniche per le costruzioni, sia necessario verificare l'idoneità di un calcestruzzo messo in opera in relazione ai requisiti richiesti alla struttura, ovvero alla resistenza caratteristica prevista in progetto. In tale fattispecie l'obbiettivo è quindi solo quello di verificare l'accettabilità del calcestruzzo messo in opera controllando che la resistenza caratteristica strutturale in opera sia non inferiore ad una

ingenio-web.it

percentuale prestabilita della resistenza caratteristica potenziale prevista in progetto (attualmente, tale percentuale, come nel seguito precisato, è pari a 0,85 Rck). Per questo caso, si fa riferimento al successivo paragrafo 3.2.

b) il caso in cui, con riferimento al Capitolo 8 delle vigenti Norme tecniche per le costruzioni, sia necessario determinare il valore della resistenza media del cls da utilizzare ai fini della valutazione della sicurezza di una struttura esistente. In tale caso gli aspetti specifici sono riportati al successivo paragrafo 3.3.

1.3 Glossario

Si ritiene opportuno riportare, nel seguito, un *glossario* contenente la terminologia che verrà utilizzata nel presente documento, e che si auspica possa costituire un riferimento per tutti i tecnici i quali, a diverso titolo, si trovano ad operare nel campo delle prove distruttive e non.
L'utilizzo di una terminologia comune, infatti, può migliorare sensibilmente lo scambio di informazioni ed il dialogo fra diverse parti, in una materia abbastanza controversa e complessa.

R_c Valore della resistenza misurata mediante prova di compressione su un cubetto prelevato all'atto del getto, confezionato secondo le indicazioni della UNI EN 12390 e maturato in condizioni standard (**resistenza potenziale cubica**)

f_c Valore della resistenza misurata mediante prova di compressione su un cilindro standard (d=15 cm; h=30 cm) prelevato all'atto del getto e maturato in condizioni standard (**resistenza potenziale cilindrica**)

R_{ck} Valore **caratteristico** di R_c

f_{ck} Valore **caratteristico** di f_c

$R_{c,is}$ Resistenza cubica stimata all'interno della struttura (**resistenza strutturale cubica**)

$f_{c,is}$ Resistenza cilindrica stimata all'interno della struttura (**resistenza strutturale cilindrica**)

$R_{ck,is}$ Valore **caratteristico** della $R_{c,is}$

$f_{ck,is}$ Valore **caratteristico** della $f_{c,is}$

$f_{carota\ (h/d=2)}$ Valore della resistenza misurata su una carota estratta dalla struttura avente h/d=2

$f_{carota\ (h/d=1)}$ Valore della resistenza misurata su una carota estratta dalla struttura avente h/d=1

2 – CONTROLLO DELLA RESISTENZA DEL CALCESTRUZZO IN OPERA

Con riferimento a strutture nuove in cemento armato, le *Norme tecniche per le costruzioni* prevedono esplicitamente l'effettuazione di controlli di accettazione del calcestruzzo in relazione alla resistenza caratteristica a compressione prescritta. Qualora i valori di resistenza a compressione dei provini prelevati durante il getto dal Direttore dei Lavori o da una persona di sua fiducia non soddisfino i criteri di accettazione della classe di resistenza caratteristica prevista nel progetto, o qualora sorgano dubbi sulla qualità del calcestruzzo, sulla sua messa in opera, costipazione o maturazione, è facoltà del Direttore dei Lavori richiedere l'esecuzione di prove da effettuare direttamente sulle strutture già realizzate. In questi casi si dovrà tenere debito conto dei possibili effetti dovuti alla posa in opera ed alla maturazione del calcestruzzo, sui risultati dei prelievi; per tale ragione la verifica o il prelievo in opera del calcestruzzo indurito non può essere sostitutivo dei controlli d'accettazione da eseguirsi su provini prelevati durante i getti, preparati, maturati e sottoposti a prova in conformità alla UNI EN 12390-parti 1, 2, 3 e 4.
La conformità della resistenza non implica necessariamente la conformità nei riguardi della durabilità o di altre caratteristiche specifiche del calcestruzzo messo in opera, analogamente la non

ingenio-web.it

conformità della resistenza valutata in una posizione, non implica la non conformità di tutto il calcestruzzo messo in opera.
La vetustà del patrimonio edilizio nazionale e l'elevata pericolosità sismica dell'intero territorio nazionale comportano numerose situazioni in cui la stima della resistenza *in situ* della struttura si rende necessaria e preliminare ai fini della valutazione della sicurezza di edifici esistenti, per esempio quando ricorra uno dei seguenti casi:

- riduzione evidente della capacità resistente di elementi strutturali;
- valutazione della capacità sismica ai sensi del capitolo 8 delle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni
- azioni ambientali (sisma, vento, neve e temperatura) che abbiano compromesso la capacità resistente della struttura;
- degrado e decadimento delle caratteristiche meccaniche dei materiali (in relazione alla durabilità dei materiali stessi);
- verificarsi di azioni eccezionali (urti, incendi, esplosioni) significative e di situazioni di funzionamento ed uso anomalo;
- distorsioni significative imposte da deformazioni del terreno di fondazione;
- provati errori di progetto o esecuzione;
- cambio della destinazione d'uso della costruzione o di parti di essa, con variazione significativa dei carichi variabili;
- interventi non dichiaratamente strutturali (es. impiantistici, di ridistribuzione degli spazi, ecc.) qualora essi interagiscano, anche solo in parte, con elementi aventi funzione strutturale.

Le modalità d'indagine, ovviamente, si diversificano a seconda che sia necessario stimare la stabilità di una intera struttura o determinare la qualità di singoli elementi.
In ogni caso, il numero di campioni da prelevare dipende:

- dal grado di fiducia che si intende affidare alla stima della resistenza;
- dal volume di calcestruzzo sottoposto ad indagine;
- dalla variabilità dei dati o risultati che si presume di ottenere.

2.1 Pianificazione delle prove in opera

Le aree di prova, dalle quali devono essere estratti i campioni o sulle quali saranno eseguite le prove, devono essere scelte in modo da permettere la valutazione della resistenza meccanica della struttura o di una sua parte interessata dall'indagine. Le aree ed i punti di prova debbono essere preventivamente identificati e selezionati in relazione agli obiettivi. La dimensione e la localizzazione dei punti di prova dipendono dal metodo prescelto, mentre il numero di prove da effettuare dipende dall'affidabilità desiderata nei risultati.
La divisione, in regioni di prova, di una struttura, presuppone che i prelievi o i risultati di una regione appartengano statisticamente e qualitativamente ad una medesima popolazione di calcestruzzo. Nella scelta dei siti di prelievo o di prova, si deve tener conto che in ogni struttura, eseguita con getto continuo, la resistenza del calcestruzzo in opera diminuisce progressivamente dal basso verso l'alto.
Particolare attenzione deve essere posta nella pianificazione delle prove in opera per quanto riguarda i pali di fondazione e/o alcune opere speciali di fondazione, quali ad es. i diaframmi, per la loro criticità intrinseca alle condizioni del sottosuolo ove gli stessi sono realizzati. A tale scopo è raccomandabile annegare nel getto del palo o dei diaframmi (ove possibile) delle tubazioni idonee

ingenio-web.it

al successivo accoglimento di una sonda ad ultrasuoni atta a verificare con adeguate metodiche la continuità strutturale del palo (in linea di massima per pali di diametro medio-grande sono sufficienti 3 tubazioni per palo disposte lungo la circonferenza per tutta la profondità del palo).
Tale metodica consente con costi minimi in fase di getto di valutare con sufficiente sicurezza la continuità del palo per tutta la sua lunghezza e di contenere il numero ed i costi delle successive eventuali prove di portanza del palo.

2.2 Predisposizione delle aree di prova e metodi di indagine

Le aree e le superfici di prova vanno individuate in relazione al tipo di prova che s'intende eseguire, tenendo conto del fine cui le prove sono destinate, delle specifiche norme UNI di riferimento e delle indicazioni del produttore dello strumento di prova.
E' sempre opportuno che le aree di prova risultino prive sia di evidenti difetti (vespai, vuoti, occlusioni ecc.), sia di materiali estranei al calcestruzzo (intonaci, collanti, impregnanti, ecc.), sia di polvere ed altre impurità; in genere, tutti questi fattori possono contribuire ad alterare il risultato e la significatività delle prove stesse.
L'eventuale presenza di materiale estraneo e/o di anomalie sulla superficie deve essere registrata sul verbale di prelievo e/o di prova.
In relazione alla finalità dell'indagine, i punti di prelievo o di prova possono essere localizzati in modo puntuale, per valutare le proprietà di un elemento oggetto d'indagine, o casuale, per valutare una partita di calcestruzzo indipendentemente dalla posizione.
Dal numero di carote estratte e di misure non distruttive effettuate, dipende la significatività della stima della resistenza.
I metodi più semplici e che arrecano il minor danno alle superfici delle strutture, quali l'indice di rimbalzo e la velocità di propagazione, basati su fattori di correlazione, richiedono, per la stima della resistenza, calibrazioni complesse, mentre l'indagine mediante carotaggio, salvo il ricorso ad alcuni coefficienti correttivi, non richiede una vera e propria correlazione per l'interpretazione dei dati, anche se per contro determina un danno, sia pur localizzato, alla struttura ed è, evidentemente, più lenta ed onerosa. Il carotaggio è comunque il metodo di riferimento per la calibrazione (taratura) di tutti i metodi non distruttivi o semi-distruttivi.
Nella tabella seguente sono riportati, in maniera sintetica ed a scopo esemplificativo, i vantaggi e gli svantaggi dei più comuni metodi d'indagine.

Metodo di prova	Costo	Velocità di esecuzione	Danno apportato alla struttura	Rappresentatività dei dati ottenuti	Correlazione fra grandezza misurata e resistenza del cls
Carotaggio	Elevato	Lento	Moderato	Buona	Ottima
Indice di rimbalzo	Molto basso	Veloce	Nessuno	Interessa solo la superficie (1)	Debole
Velocità di propagazione di ultrasuoni	Basso	Veloce	Nessuno	Buona, se la prove è ben calibrata. Riguarda tutto lo spessore	Debole Da calibrare caso per caso (2)
Estrazione di inserti	Moderato	Veloce	Limitato	Interessa solo la superficie	Buona (3)
Resistenza alla penetrazione	Moderato	Veloce	Limitato	Interessa solo la superficie	Debole

(1) La singola determinazione è influenzata dallo stato della superficie dell'area di prova (umidità, carbonatazione ecc.),
(2) La misura si correla bene con il modulo elastico del materiale; la bontà della correlazione tra modulo elastico e resistenza meccanica, dipende molto dalle caratteristiche del conglomerato.
(3) Per i calcestruzzi di buona qualità ($\geq$30MPa). Modesta per quelli di qualità scadente.

ingenio-web.it

Nella scelta della metodologia si deve tener conto delle seguenti caratteristiche:

- l'indice di rimbalzo permette di valutare le caratteristiche del calcestruzzo anche dopo breve periodo di maturazione, ma il risultato riguarda solo la superficie corticale del calcestruzzo;
- la velocità di propagazione, operando per trasparenza, richiede generalmente l'accessibilità di due superfici opposte; fornisce indicazioni prevalentemente sulla qualità del conglomerato all'interno della struttura, in particolare sulla presenza di discontinuità della matrice cementizia dovute a vuoti o fratture;
- la misura della resistenza alla penetrazione e della forza di estrazione caratterizzano la superficie esterna più in profondità, rispetto all'indice di rimbalzo, mediamente fra 4 e 8 cm; la prima è più idonea a saggiare elementi di grosse dimensioni, la seconda è più adatta anche ad elementi di ridotte dimensioni. Il loro impiego è consigliato per calcestruzzi di buone caratteristiche meccaniche.

La numerosità dei punti di prova è un compromesso tra: accuratezza desiderata, tempo d'esecuzione, costo e danno apportato alla struttura.

3 - VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL CALCESTRUZZO IN OPERA MEDIANTE CAROTAGGIO

3.1 Prelievo di campioni mediante carotaggio

Le procedure per l'estrazione, la lavorazione dei campioni estratti per ottenere i provini e le relative modalità di prova a compressione sono descritte nelle UNI EN 12504-1 ("*Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Carote – Prelievo, esame e prova di compressione*"), UNI EN 12390-1 ("*Prova sul calcestruzzo indurito – Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme*"), UNI EN 12390-2 ("*Prova sul calcestruzzo indurito – Confezionamento e stagionatura dei provini per prove di resistenza*") e UNI EN 12390-3 ("*Prova sul calcestruzzo indurito – Resistenza alla compressione dei Provini*").

Si devono prendere in considerazione le seguenti avvertenze:

- il diametro delle carote deve essere almeno superiore a tre volte il diametro massimo degli aggregati (i diametri consigliati sono compresi tra 75 e 150 mm);
- le carote destinate alla valutazione della resistenza non dovrebbero contenere ferri d'armatura (si devono scartare i provini contenenti barre d'armatura inclinate o parallele all'asse). Qualora ciò non potesse essere evitato ci si deve aspettare che si verifichi una riduzione nella resistenza;
- le carote che presentano difetti devono essere valutate con cautela e separatamente. Le imperfezioni possono essere dovute, ad esempio, alla presenza di microfessurazioni, vuoti e disomogeneità, generate da segregazione nella posa in opera;
- il rapporto altezza/diametro (snellezza) dei provini deve essere possibilmente pari ad 1 o 2; si deve generalmente evitare, salvo casi particolari, che i provini abbiano snellezza inferiore a 1 o superiore a 2. Possono essere considerate carote con rapporto nominale 2 quelle con rapporto h/d compreso nel range 1,95÷2,05 mentre possono essere considerate carote con rapporto nominale 1 quelle con rapporto h/d compreso nel range 0,95÷1,05;
- è consigliabile effettuare i controlli su carote di snellezza pari a 1 quando si vuole operare in termini di resistenza cubica e quindi effettuare il confronto con R_c, mentre si suggerisce una snellezza pari a 2 quando si vuole operare in termini di resistenza cilindrica e quindi effettuare il confronto con f_c;

ingenio-web.it

- i campioni estratti devono essere protetti nelle fasi di lavorazione e di deposito rispetto all'essiccazione all'aria (condizioni ottimali sono la vasca o la camera di maturazione). Prima della rottura i campioni devono essere tenuti per almeno 24 ore all'aria;
- nel programmare l'estrazione dei campioni, si deve tener conto che la resistenza del calcestruzzo dipende dalla posizione o giacitura del getto.

È inoltre necessario verificare accuratamente, prima di sottoporre i campioni alla prova di compressione, il rispetto delle tolleranze previste dalla UNI EN 12390-1 come ad esempio la planarità delle superfici d'appoggio (0.0006 d [mm]) e l'ortogonalità fra le basi e le generatrici (0.5 mm).

Il rispetto delle prescrizioni previste dalla UNI EN 12504, dal prelievo fino alla preparazione dei provini prima delle prove, consente la riproducibilità e la ripetibilità dei risultati; un approccio grossolano ed inadeguato nel prelievo, nella lavorazione o nella preparazione dei provini, comporta in genere risultati non coerenti, dispersi, non significativi. Per tale ragione è sempre necessario che l'utensile di taglio sia periodicamente affilato, che la carotatrice sia rigidamente ancorata alla struttura, che l'asportazione dei detriti sia continua e che venga sempre effettuata la rettifica delle superfici terminali. È opportuno rammentare che per i calcestruzzi a bassa resistenza, tanto l'estrazione che la successiva manipolazione, taglio e rettifica in laboratorio possono compromettere l'integrità del campione; inoltre, con calcestruzzi di queste caratteristiche, è sempre opportuno evitare la rettifica sostituendola con la meno invasiva cappatura (capping).

La dispersione (variabilità) dei valori di resistenza tende ad aumentare al ridursi della dimensione dei campioni in prova ed all'aumentare del diametro massimo dell'aggregato. Si può minimizzare l'effetto della dispersione dei risultati aumentando il numero dei campioni di prova e quindi la loro rappresentatività statistica.

3.2 Stima della resistenza meccanica in situ mediante carotaggi, al fine di verificare l'accettabilità del calcestruzzo messo in opera

La resistenza determinata con i provini estratti per carotaggio R_{is} (che nel seguito si definisce *resistenza strutturale*) è generalmente inferiore a quella della resistenza determinata con i provini preparati nel corso della messa in opera del calcestruzzo, costipati e maturati in condizioni standard, R_c (che nel seguito si definisce *resistenza potenziale)* e che rappresenta il limite superiore di quella specifica fornitura). Fra i fattori che determinano tale differenza si possono citare, in termini di resistenza strutturale: le modalità di posa in opera e di compattazione, la maturazione (curing) e l'effetto del prelievo della carota. Il valore di compressione di una carota, infatti, è intuitivamente più debole del valore ottenuto dal suo equivalente provino (cilindrico o cubico, confezionato secondo UNI EN 12390-2) in quanto la superficie di carico della carota contiene frazioni di aggregato "tagliato" non interamente reagenti alla sollecitazione di carico e che contribuiscono, "per adesione", alla capacità di resistenza della carota e quindi in misura ridotta rispetto a quella di aggregati perfettamente inglobati nell'equivalente campione cilindrico.

In mancanza di un'esperienza diretta è infatti accettabile assumere che, a parità di tempo di maturazione, la resistenza strutturale (in situ) sia comunque non inferiore a 0,85 volte la resistenza del calcestruzzo messo in opera, come si vedrà nel seguito.

Il valore della resistenza ricavata dalle prove di compressione sui campioni ottenuti per carotaggio, da confrontare con il valore della resistenza caratteristica di progetto, deve essere elaborato con molta prudenza, in ragione della notevole influenza che diversi fattori hanno sulle caratteristiche delle carote, quali la messa in opera del calcestruzzo indagato, le condizioni di maturazione (di cui

ingenio-web.it

già si è detto) e le modalità di prelievo delle stesse carote. La stima, e quindi il giudizio, della qualità del calcestruzzo in opera, formulata sulla scorta della resistenza determinata su carote prelevate, deve fare ricorso a correttivi per compensare il maggiore o minore effetto di confinamento, in funzione della snellezza del campione, applicato dalle piastre alle estremità del campione nella prova di compressione, ma soprattutto dell'effetto del disturbo causato dalle operazioni di prelievo: detensionamento del campione, annullamento del confinamento degli aggregati, deterioramento del legame all'interfaccia legante-aggregato dovuto alle azioni meccaniche di prelievo.

Si può infatti affermare che la resistenza alla compressione, determinata su carota, è penalizzata dalla riduzione in quota parte del contributo proveniente dagli aggregati presenti sulla superficie laterale della carota. Tale effetto, a parità di diametro del provino, viene minimizzato per calcestruzzi di classe di resistenza elevata e si riduce al crescere della dimensione massima degli aggregati presenti. Questa riduzione di resistenza deve essere considerata nel calcolo della resistenza strutturale, tramite l'introduzione di un coefficiente moltiplicativo detto **Fattore di disturbo F_d**.

Dall'esame della letteratura esistente sull'argomento si è riscontrato che il valore di F_d decresce all'aumentare della resistenza f_{carota} rilevata sulla specifica carota.

Si suggerisce quindi di adottare i valori riportati nella Tabella seguente:

Tabella del fattore di disturbo in funzione della resistenza a compressione delle carote (h/d=1; d=100 mm)

$\mathbf{f_{carota}}$ [N/mm^2]	10	20	25	30	35	40
$\mathbf{F_d}$	*1.10*	*1.09*	*1.08*	*1.06*	*1.04*	*1.00*

Per valori intermedi si effettua l'interpolazione lineare, mentre per valori di $\mathbf{f_{carota}}$ superiori a 40 N/mm^2 il valore di $\mathbf{F}_d$ resta pari a 1.

Tali coefficienti andranno applicati al singolo risultato della carota. Il valore caratteristico derivante dall'elaborazione di tutti i risultati corretti sarà poi confrontato con il limite di 0,85 Rck di progetto ovvero potenziale come più avanti precisato.

La UNI EN 12504-1 prevede che, se la resistenza potenziale è espressa in valori cubici, l'eventuale determinazione della resistenza strutturale va effettuata su campioni ricavati da carote aventi rapporto h/d = 1 (con tolleranza ± 0,05); se invece la resistenza potenziale è espressa in valori cilindrici, l'eventuale determinazione della resistenza strutturale va effettuata su campioni ricavati da carote aventi rapporto h/d = 2 (con tolleranza ± 0,05).

Pertanto, il valore della resistenza strutturale di ciascuna carota si determina come segue:

$f_{carota} * F_d = R_{c,is}$ nel caso di provini ottenuti da carote con rapporto h/d=1

$f_{carota} * F_d = f_{c,is}$ nel caso di provini ottenuti da carote con rapporto h/d=2

Riguardo il fattore di conversione resistenza cubica/resistenza cilindrica 0,83 - che le norme tecniche vigenti utilizzano in ambito progettuale nel passaggio fra i due valori - è opportuno precisare che, da specifici studi effettuati, anche mediante una campagna di prove opportunamente realizzata sul territorio nazionale e coordinata da un Gruppo di Lavoro opportunamente nominato in ambito Osservatorio del Calcestruzzo, è stato dimostrato come tale fattore di conversione presenti un rilevante margine di variabilità in relazione ai diversi tipi di calcestruzzo. Per tale motivo, come già accennato, si raccomanda, in accordo con la UNI EN 12504-1, di utilizzare carote con rapporto

ingenio-web.it

h/d=1 (eventualmente h/d=2); è comunque fortemente sconsigliato l'impiego di carote caratterizzate da un rapporto h/d intermedio.

Se, come già accennato, si definisce "resistenza strutturale" o "in sito" ($R_{c,is}$ e $f_{c,is}$) la resistenza del calcestruzzo in opera, misurata mediante il prelievo di una serie significativa di carote, e "resistenza potenziale" (R_c e f_c) quella misurata sui campioni convenzionali (vedi Figura 1), correttamente confezionati e maturati, si può assumere – secondo la letteratura tecnica-specialistica ed in mancanza di una sperimentazione specifica – che la resistenza strutturale sia non inferiore a 0,85 volte la resistenza potenziale del calcestruzzo messo in opera.

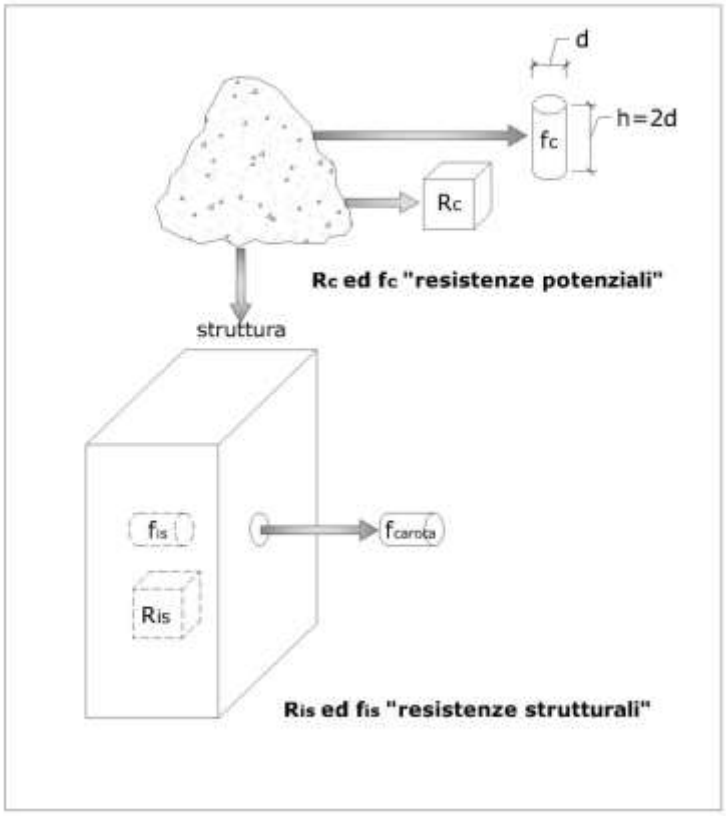

Figura 1 - Differenza concettuale tra resistenza potenziale e resistenza strutturale

In sintesi, in termini concettuali il confronto fra resistenza strutturale e resistenza potenziale risulta positivo se:

$$R_{c,is} \geq 0{,}85\ R_c \quad \text{oppure} \quad f_{c,is} \geq 0{,}85\ f_c$$

Sulla base di quanto sopra descritto, una volta determinato il valore della resistenza strutturale di ciascuna carota, si deve pervenire alla stima del valore della **resistenza caratteristica strutturale in situ** complessiva, che può essere direttamente confrontata con la resistenza caratteristica di progetto. In tal caso il criterio di conformità che deve essere applicato, come già detto, con riferimento a quanto contenuto nelle *Norme tecniche per le costruzioni* par.11.2.6 è rappresentato dalla disuguaglianza:

$$R_{ck,is} \geq 0.85\ R_{ck} \quad \text{oppure} \quad f_{ck,is} \geq 0{,}85\ f_{ck}$$

ingenio-web.it

Per stimare la resistenza caratteristica in sito $R_{ck,is}$ o $f_{ck,is}$, si può fare riferimento al procedimento contenuto nella norma EN 13791, la quale, in funzione della effettiva numerosità dei campioni prelevati, considera: un approccio statistico, se la numerosità dei campioni è superiore a 15, ed un approccio forfettario, mediante il coefficiente k, se la numerosità dei campioni è inferiore a 15.
Pertanto, in presenza di carote correttamente estratte e caratterizzate da un rapporto h/d=2 quando si intende ricavare la resistenza cilindrica e da un rapporto h/d=1 quando si intende ricavare la resistenza cubica, la resistenza caratteristica strutturale in situ si determina come indicato nel seguito:

a) numero delle carote prelevate maggiore o eguale a 15

la resistenza cilindrica (cubica) caratteristica in sito $f_{ck,is}$ ($R_{ck.is}$) è il valore inferiore tra:

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} - 1.48 * s$$
$$f_{ck,is} = f_{is,\ lowest} + 4$$

dove:
n = numero di campioni prelevati
$f_{m(n),is}$ = valore medio della resistenza a compressione degli n campioni (rammentando che per ciascun campione (*i*), la resistenza $f_{(i)}$ deve essere moltiplicata per il relativo Fattore di disturbo $F_{d(i)}$)
$f_{is,\ lowest}$ = valore minore fra le resistenze degli n campioni
s = scarto quadratico medio

b) numero delle carote compreso tra 4 e 14

la resistenza cilindrica (cubica) caratteristica in sito $f_{ck,is}$ ($R_{ck.is}$) è il valore inferiore tra:

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} - k$$
$$f_{ck,is} = f_{is,\ lowest} + 4$$

dove:
k = 5 per n (numerosità dei campioni prelevati) compreso tra 10 e 14
k = 6 per n compreso tra 7 e 9
k = 7 per n compreso tra 4 e 6 (caso da prendere in considerazione solo per opere di particolare semplicità).
In quest'ultimo caso l'uso del coefficiente k rappresenta un approccio forfettario che consente di "pesare" il valore medio della resistenza cilindrica (su carota) in funzione della numerosità dei campioni utilizzati e quindi in funzione dell'affidabilità del controllo stesso (la cui programmazione è responsabilità del Direttore dei Lavori).
Premesso che, secondo quanto stabilito dalle *Norme tecniche per le costruzioni*, la resistenza caratteristica R_{ck} di un calcestruzzo impiegato in un'opera è definita convenzionalmente come la resistenza ottenuta da campioni cubici prelevati dal getto e provati a 28 giorni di stagionatura, il metodo sopra descritto non può intendersi sostitutivo dei controlli di accettazione e deve essere utilizzato esclusivamente per esprimere un giudizio tecnico circa la conformità del calcestruzzo in opera, come peraltro precisato dalle stesse *Norme tecniche per le costruzioni* al par.11.2.6.
Anche ai fini della valutazione sulla durabilità dell'opera, in mancanza di specifiche prescrizioni, il progettista ed il Direttore dei lavori possono utilizzare il valore della resistenza caratteristica ottenuta da prove su carote, elaborate con il metodo di cui sopra, come valore da confrontare con la minima classe di resistenza necessaria per coprire la classe di esposizione richiesta, utilizzando il

ingenio-web.it

prospetto 4 riportato nella UNI 11104 *Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1*. Resta comunque nella responsabilità di Progettista, Direttore dei Lavori e Collaudatore l'esecuzione in opera di tutte le prove necessarie per la valutazione dei requisiti di durabilità ai fini dell'utilizzo previsto nella condizione ambientale specifica.

3.3 Prescrizioni specifiche per la stima della resistenza in situ mediante carotaggi da utilizzare nella valutazione di costruzioni esistenti.

Nei casi in cui sia necessario valutare la resistenza in situ del calcestruzzo di strutture esistenti, preliminarmente alla progettazione del piano di prove strutturali, risulta di fondamentale importanza:

- acquisire tutta la documentazione disponibile (progetto originario ed eventuali atti di collaudo);
- stabilire, ove possibile, l'anno di progettazione;
- ricostruire la eventuale sequenza di esecuzione (sia in elevazione che in termini di corpi di fabbrica);
- effettuare considerazioni basate sulla pratica progettuale dell'epoca di costruzione ovvero sulle caratteristiche geometriche della struttura allo scopo di individuare elementi o parti che, per criterio di progetto o per condizioni di simmetria, siano stati dimensionati (e armati nel caso di strutture in cemento armato) allo stesso modo.

Nel caso di prove che vengano effettuate ai fini della valutazione della capacità di strutture esistenti, si ricorda che, ai sensi della Circolare n. 617, "*Ai fini delle prove sui materiali è consentito sostituire alcune prove distruttive, non più del 50%, con un più ampio numero, almeno il triplo, di prove non distruttive, singole o combinate, tarate su quelle distruttive*".

Nel caso di costruzioni esistenti, non si farà riferimento ai valori f_{ck} ed R_{ck}, bensì si calcoleranno i valori medi cilindrici $f_{m\,(n)\,is}$ o cubici $R_{m\,(n)\,is}$, definiti come al punto a) del paragrafo precedente, ai quali andranno applicati i "fattori di confidenza" che ridurranno preliminarmente, in base al livello di conoscenza conseguito nelle indagini conoscitive, i valori medi di resistenza dei materiali della struttura esistente.

4 – METODI INDIRETTI PER LA VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL CALCESTRUZZO IN OPERA

4.1 Generalità

I metodi indiretti, di seguito descritti, si basano tutti sul principio della correlabilità tra parametri misurabili, riferiti alle porzioni più superficiali del calcestruzzo, e le caratteristiche meccaniche del materiale in opera, e più precisamente la resistenza a compressione. In considerazione della dispersione che spesso caratterizza l'impiego di tali metodi è appena il caso di rimarcare come la riproducibilità e ripetibilità dei risultati sia possibile solo se viene garantita l'esecuzione delle prove da personale qualificato, con attrezzature efficienti, ovvero regolarmente sottoposte a taratura e manutenzione, nel rigoroso rispetto delle specifiche tecniche di settore.

Ad oggi, a seguito della diffusione sul mercato di svariate tipologie di calcestruzzi, con caratteristiche tecniche molto diverse fra loro (calcestruzzi leggeri, calcestruzzi aerati, SCC ecc.), la correlabilità tra i parametri sopracitati non può essere definita da leggi e formulazioni univoche ma deve sempre tenere conto delle caratteristiche tecniche del materiale che si va ad investigare. È opportuno, quindi, precisare che l'uso di questi metodi deve essere limitato ai casi in cui sia nota la

ingenio-web.it

legge di correlazione tra il parametro misurato e la specifica tipologia di calcestruzzo in esame. In assenza di ciò le stime possono servire solo come confronto dei risultati con valori noti e ad evidenziare eventuali anomalie e difformità rispetto a valori tipici.
È consuetudine suddividere i metodi in: non distruttivi, che non danneggiano sensibilmente la struttura in esame, e parzialmente distruttivi, che infliggono un danno accettabile, per di più generalmente superficiale, e l'integrità delle superfici può essere facilmente ripristinata.
Qui di seguito sono presi in considerazione i metodi più consolidati nella pratica: l'indice di rimbalzo, gli ultrasuoni, l'estrazione di tasselli metallici inseriti nel calcestruzzo (pull-out) e l'infissione di sonde metalliche.
Poiché, come accennato, la stima della resistenza meccanica in opera mediante i metodi non distruttivi comporta l'utilizzo di correlazioni tra il parametro non distruttivo proprio del metodo impiegato e la resistenza a compressione del calcestruzzo in esame, la legge di correlazione può essere determinata utilizzando un adeguato numero di campioni, ottenuti mediante carotaggio, sottoposti ad indagine non distruttiva prima della loro rottura, oppure facendo uso di correlazioni standard già disponibili in letteratura per il metodo utilizzato. In questo secondo caso i valori di resistenza stimati possono essere resi più affidabili moltiplicandoli per un opportuno coefficiente correttivo desunto dal confronto con un numero ridotto di prove a compressione su provini ottenuti per carotaggio.
I metodi indiretti non eliminano la necessità del prelievo di carote, ma la numerosità di queste ultime può essere opportunamente ridotta quando si devono valutare grandi volumi di getto. Una preliminare campagna di analisi con metodi indiretti consente di programmare le posizioni di prelievo delle carote, anche sulla base del grado di omogeneità del volume di calcestruzzo in esame, ed eventualmente di suddividere l'area in esame in lotti entro i quali sia possibile definire statisticamente l'omogeneità del calcestruzzo. E' evidente come la ripetibilità e riproducibilità, dei risultati dipendano in gran parte: dalla qualità delle attrezzature (calibrazione e manutenzione periodica e documentata); dalla esperienza e dalla formazione ed addestramento del personale che esegue le prove; dal rispetto rigoroso, da parte di operatori diversi, di una stessa procedura di prova definita da norme standard ove esistenti.
A tale garanzia quindi è necessario che tutti gli operatori che eseguono le prove, intesi sia come personale di società specializzate di settore che come singoli professionisti, siano in possesso dei requisiti sopradescritti, documentati e certificati.

4.2 Stima delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in opera mediante l'indice di rimbalzo (o sclerometrico)

Le procedure per l'esecuzione della prova sono descritte dalla norma UNI EN 12504-2 ("Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Prove non distruttive – Indice sclerometrico").

4.2.1 Principio di funzionamento

Il metodo dell'indice di rimbalzo utilizza lo sclerometro per misurare l'energia elastica assorbita dal calcestruzzo a seguito di un impatto. L'energia assorbita dal calcestruzzo è correlata alla rigidezza e alla resistenza meccanica mediante relazioni empiriche. Il metodo consiste nel provocare l'impatto di una massa standardizzata contro la superficie del materiale sottoposto a prova e nel misurare l'altezza del rimbalzo, la misura è espressa in termini di percentuale dell'altezza di rimbalzo rispetto alla distanza percorsa della massa in movimento tra l'istante in cui è rilasciata e quando colpisce la superficie del calcestruzzo. Questa percentuale è detta indice di rimbalzo N.

ingenio-web.it

Dato che l'energia cinetica della massa battente è standardizzata, l'altezza di rimbalzo dipende dall'energia dissipata durante l'impatto, che a sua volta dipende dalla resistenza meccanica della superficie del calcestruzzo.
L'indice di rimbalzo è correlato alla resistenza a compressione del calcestruzzo, ma è influenzato da numerosi altri fattori, tra cui:

- le condizioni di umidità del calcestruzzo in superficie (una superficie umida conduce ad un indice di rimbalzo più basso);
- la presenza di uno strato superficiale carbonatato (aumenta l'indice di rimbalzo);
- la tessitura superficiale (una superficie ruvida fornisce generalmente un indice di rimbalzo più basso)**;**
- l'orientazione dello strumento rispetto alla verticale (sono disponibili fattori di correzione approssimati);
- l'età del calcestruzzo;
- la dimensione e il tipo degli aggregati.

Poiché solo il calcestruzzo vicino al punto dell'impatto influenza sensibilmente il valore dell'indice di rimbalzo, la metodologia di prova è sensibile alle condizioni locali, quali la presenza di grossi granuli e gli elementi grossi d'aggregati in prossimità della superficie oppure di vuoti. Per mitigare gli effetti di alcune delle cause che alterano le misure, è pertanto opportuno che nell'intorno d'ogni punto di prova siano eseguite più battute, adeguatamente distanziate fra di loro.

4.2.2 Verifica dello strumento

La verifica dello sclerometro dovrà essere effettuata prima e dopo ogni giornata di lavoro o sequenze di prove, utilizzando l'apposita incudine di riferimento fornita a corredo dal fabbricante (caratterizzato da durezza minima 52 HRC, massa 16±1 kg e diametro di circa 150 mm) cui corrisponde il valore standard dell'indice di rimbalzo N_0, eseguendo una serie di battute con lo sclerometro in posizione verticale secondo quanto indicato nella norma UNI EN 12504-2. Il corrispondente valore di taratura N_t non deve superare il valore di $N_0 \pm 3$.
Qualora N_t superi la tolleranza indicata dal produttore lo strumento non può essere utilizzato e deve essere sottoposto a revisione (pulizia e messa a punto).
Lo strumento deve essere utilizzato in un campo di temperature comprese nell'ambito del *range* previsto dalla norma UNI EN 12504-2.

4.2.3 Modalità di esecuzione

L'esecuzione delle prove si svolgerà con le seguenti modalità:
a) individuazione di una zona di misura che presenti le seguenti caratteristiche:

- assenza di ferri di armature in prossimità della superficie (da controllare mediante pacometro o altro idoneo strumento);
- superficie priva di evidenti vespai, forti porosità o rilevanti irregolarità superficiali ecc.;
- superficie non ricoperta da intonaco, o da vernice, ecc.;
- superficie possibilmente asciutta.

b) pulizia e lisciatura della superficie con pietra abrasiva, oppure utilizzando, se necessario, uno smerigliatore per asportare lo strato superficiale di calcestruzzo degradato o irregolare;
c) esecuzione di almeno 9 battute sclerometriche all'interno della zona di misura, secondo una griglia preliminarmente definita, mantenendo lo sclerometro perpendicolare alla superficie di misura. I punti su cui si effettuano le battute devono risultare non coincidenti con gli aggregati

ingenio-web.it

affioranti e sufficientemente lontani dalle barre di armatura, dagli altri punti di battuta e dagli spigoli dell'elemento;
d) calcolo della mediana dei valori degli indici di rimbalzo, tenendo conto dell'angolo α di inclinazione dello strumento rispetto all'orizzontale e verificare l'accettabilità del risultato in base al seguente criterio: se oltre il 20% di tutte le misure si discosta dalla mediana per più del 30% l'intera serie di dati deve essere scartata e le prove vanno ripetute in una nuova zona adiacente.

4.2.4 Elaborazione dei risultati

L'elaborazione dei risultati delle prove sclerometriche, così come definita dal costruttore dello strumento, consiste nelle seguenti fasi:

a) correzione degli indici di rimbalzo per tener conto della taratura dello strumento: gli indici di rimbalzo verranno moltiplicati per il coefficiente N_0/ N_t;
b) correzione degli indici di rimbalzo rilevati in funzione dell'angolo d'azione dello strumento, utilizzando le correlazioni fornite in proposito dal fabbricante dello strumento;
c) calcolo della mediana e del coefficiente di variazione dei valori utili degli indici di rimbalzo di ciascuna zona. La media sarà espressa come numero intero, il coefficiente di variazione con 2 cifre decimali.

La correlazione tra indice di rimbalzo N e resistenza a compressione Rc è del tipo rappresentato in Figura 2 e definito da una curva del tipo:

$$R_c = A * N^B$$

in cui i coefficienti A e B dovrebbero essere calibrati sullo specifico calcestruzzo indagato, mediante altri tipi di prove.

La curva tipo più comunemente utilizzata è la seguente; si precisa che i valori sugli assi variano in funzione della casa produttrice dello strumento:

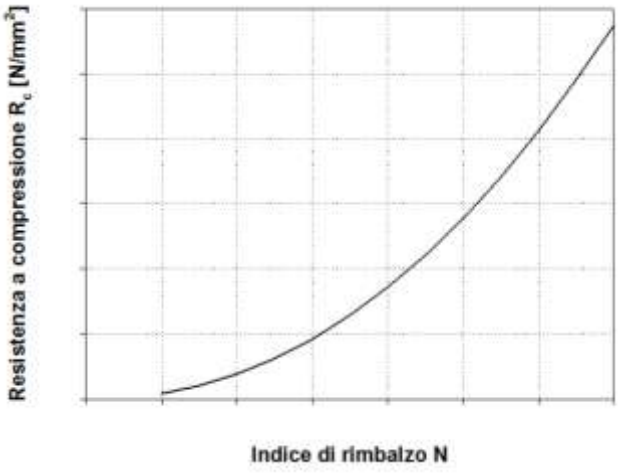

Figura 2 - Esempio di correlazione tra indice di rimbalzo e resistenza a compressione.

ingenio-web.it

4.3 Stima delle caratteristiche meccaniche in opera mediante la velocità di propagazione di micro-impulsi (ultrasonici)

Le procedure per l'esecuzione della prova sono descritte dalla norma UNI EN 12504-4 ("Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici").

4.3.1 Principio di funzionamento

Il metodo basato sulla misura della velocità di propagazione di ultrasuoni consiste nello studio della propagazione di onde elastiche longitudinali all'interno del calcestruzzo. Caratteristica del metodo è quella di tener conto delle proprietà meccaniche globali del materiale.

La resistenza a compressione è stimata in base alla velocità di trasmissione degli ultrasuoni, ipotizzando la validità di una relazione di proporzionalità tra resistenza a compressione e modulo elastico, utilizzando correlazioni sperimentali.

Si deve tener presente che le onde elastiche subiscono, all'interno dell'elemento esaminato, rifrazioni e riflessioni, dovute alla presenza degli aggregati, di fessure, di vuoti. Ciò comporta un'attenuazione del segnale per effetto dell'assorbimento d'energia. Inoltre, per effetto di vuoti o fessure, il percorso effettivamente compiuto dalle onde elastiche può risultare più lungo della distanza tra trasmettitore e ricevitore.

La prova misura la velocità di propagazione delle onde elastiche nel calcestruzzo, determinata come rapporto tra la distanza fra trasmettitore e ricevitore ed il tempo impiegato a percorrerla. La velocità così calcolata può differire dall'effettiva velocità di propagazione delle onde nel calcestruzzo in esame. Per questo motivo la velocità così calcolata è spesso denominata anche "velocità apparente".

La velocità di propagazione delle onde elastiche è influenzata da diversi fattori, tra cui l'umidità, la composizione della miscela ed il grado di maturazione. La determinazione della velocità deve avvenire in un intervallo di temperatura compreso tra 5°C e 30°C, deve tener conto della possibile presenza d'armature metalliche e di eventuali difetti macroscopici.

Per ridurre il rischio che il fascio di ultrasuoni percorra armature metalliche è opportuno, preliminarmente all'esecuzione della prova, localizzare le armature stesse mediante idonei dispositivi.

4.3.2 Taratura dello strumento

La taratura dello strumento consiste nella misura del tempo T_t (in μs) impiegato dalle onde elastiche a percorrere, secondo la sua altezza, il cilindro o il prisma metallico di taratura fornito a corredo dello strumento. Il tempo di percorrenza T_0, predeterminato dal fabbricante, costituisce il riferimento di taratura.

Se il valore di T_t differisce per più di 3 unità (μs) dal valore di T_0 lo strumento deve essere ricalibrato seguendo le istruzioni del fabbricante.

La taratura dello strumento deve essere ripetuta varie volte nel corso della giornata di misure: all'inizio e al termine della giornata, ogni qualvolta cambino le condizioni ambientali (per temperatura, insolazione, umidità, ecc.) e/o la configurazione dello strumento (cambio di cavi di connessione e/o di trasduttori, ecc.).

Detta taratura sarà effettuata con l'utilizzo di campioni di prima linea muniti di certificato di taratura valido rilasciato da Laboratorio Metrologico accreditato in ambito EA secondo la norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2005 (*Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e di taratura* ed errata corrige 1 del 19-10-2007).

ingenio-web.it

4.3.3 Modalità d'esecuzione

L'esecuzione delle prove si svolge secondo le seguenti modalità:

a) individuazione di una zona di misura idonea;
b) pulizia della superficie ed eventuale lisciatura;
c) posizionamento dei punti di misura;
d) rilievo della distanza tra i punti estremi di ciascun percorso di misura, utilizzando un idoneo strumento. Nel caso della trasmissione diretta la distanza deve essere riportata con la precisione di ±1%. Per le misure indirette si fa riferimento alla posizione del centro della faccia dei trasduttori;
e) esecuzione delle misure nella zona individuata tramite sonde puntiformi o sonde a superficie piana. In entrambi i casi la bontà delle misure è legata alla realizzazione del corretto accoppiamento tra sonda e calcestruzzo. Nel caso delle sonde puntiformi ciò si ottiene esercitando una pressione adeguatamente elevata contro il calcestruzzo. Nel caso, invece delle sonde piane è necessario interporre tra sonda e calcestruzzo un appropriato materiale d'accoppiamento (es.: grasso di vaselina);

si raccomanda, altresì, di:

f) utilizzare, per le più comuni applicazioni, frequenze comprese tra i 40 kHZ ed i 60 kHz e frequenze più basse di 40 kHz per indagare spessori elevati;
g) curare l'allineamento delle sonde (trasmittente e ricevente) nelle letture per trasparenza perché modifica la reale lunghezza del percorso dell'onda con conseguente riduzione della velocità apparente;
h) porre particolare cura nel controllare che, nelle aree di contatto, non ci siano granuli sciolti di aggregato fine interposti tra sonda e calcestruzzo.

Nel caso di misure dirette, in ogni area di misura si effettuano almeno 3 misure su percorsi diversi.
Nel caso delle misure indirette sono raccomandabili almeno 10 misure su percorsi opportunamente individuati.
Al termine delle misure su ogni zona è necessario eseguire un controllo delle misure eseguite, verificando i valori medi della velocità di propagazione delle onde elastiche e, in particolare, l'omogeneità dei valori di velocità (la differenza tra il valore massimo e minimo dovrebbe essere contenuta entro i 200 ÷ 300 m/s).

4.3.4 Elaborazione dei risultati

L'elaborazione delle misure di velocità di propagazione di micro-impulsi consiste nel calcolo delle velocità di propagazione v_p con la seguente relazione:

$$\mathbf{v_p}^2 = E_d/M_v * [(1- \nu) / (1+ \nu)*(1-2\nu)]$$

dove:
E_d è il modulo elastico dinamico in MPa
M_v è la massa volumica in kg/m^3
ν è il modulo di Poisson.

La velocità di propagazione $\mathbf{v_p}$ si esprime in m/s arrotondando il valore ai più prossimi 10 m/s.
In relazione a tale metodo di indagine, è importante precisare che la velocità degli ultrasuoni non può essere utilizzato come un mezzo di valutazione "assoluto" ma deve costituire esclusivamente un metodo di stima della resistenza a compressione, da valutare ed utilizzare sempre in associazione ai risultati ricavati dalle prove distruttive su carote estratte da getti omogenei di singole opere. Da

ingenio-web.it

studi effettuati risulta, infatti, che la correlazione tra la resistenza a compressione R_c e la velocità di propagazione $\mathbf{v_p}$ non sia univoca ma strettamente connessa alle caratteristiche dello specifico calcestruzzo indagato e pertanto variabile da cantiere a cantiere; in sostanza il medesimo valore della velocità di propagazione $\mathbf{v_p}$ può essere riscontrato su un calcestruzzo $R_c = 30$ N/mm^2 come su un calcestruzzo $R_c = 40$ N/mm^2.

Nella letteratura corrente è spesso indicata una possibile correlazione tra la resistenza a compressione R_c e la velocità di propagazione delle onde elastiche $\mathbf{v_p}$, rappresentata da una funzione esponenziale crescente:

$$R_c = A\, e^{B\,\mathbf{v}}$$

in cui A e B sono coefficienti che devono essere opportunamente calibrati mediante prove distruttive su carote.

Tale curva di correlazione, che comunque andrebbe sempre riferita esclusivamente al calcestruzzo di una specifica opera, è tuttavia di difficile determinazione, a causa della scarsa attendibilità di cui si è detto sopra.

Si consiglia, pertanto, di utilizzare la velocità di propagazione degli ultrasuoni nell'ambito dei metodi combinati, di cui al paragrafo 4.6.

4.4 Stima delle caratteristiche meccaniche in opera in base alla forza di estrazione (pull-out)

4.4.1 Principio di funzionamento

Il metodo è basato sulla misura della forza necessaria ad estrarre dal calcestruzzo un inserto metallico standardizzato. Gli inserti metallici possono essere installati nel calcestruzzo al momento del getto, predisponendoli nelle casseforme, o inseriti in fori effettuati nel calcestruzzo indurito. La forza è applicata mediante un martinetto idraulico collegato all'inserto ed un anello di reazione che contrasta con la superficie del calcestruzzo. Durante l'operazione viene estratto un cono di materiale e, pertanto, la prova è parzialmente distruttiva.

La forza di estrazione è rappresentativa di uno stato di sollecitazione complesso, ma il suo valore è correlabile con la resistenza a compressione. La correlazione tra forza d'estrazione e resistenza a compressione varia al variare della resistenza del calcestruzzo, ma è in genere migliore delle correlazioni esistenti tra resistenza a compressione e indice di rimbalzo o velocità di propagazione delle onde elastiche.

4.4.2 Taratura della strumentazione

La strumentazione per le prove di estrazione non richiede taratura *in situ*. L'apparecchio di estrazione deve essere corredato di un sistema indicatore della forza massima applicata, e calibrato in modo che l'errore del valore letto sia inferiore a ± 2%.

4.4.3 Modalità di esecuzione

Nel caso di impiego di inserti post-inseriti nel calcestruzzo, l'esecuzione delle prove si svolge secondo le seguenti modalità:

a) si individua una zona di misura idonea;

b) si stabiliscono i punti di misura, che non devono risultare coincidenti con aggregati affioranti e sufficientemente distanti dalle barre di armatura, dagli altri punti di misura e dagli spigoli dell'elemento;

c) si effettuano, in ogni area di misura, almeno 3 estrazioni. Ogni estrazione deve essere eseguita con la seguente procedura:

- esecuzione del foro ortogonalmente alla superficie del calcestruzzo;

ingenio-web.it

- evacuazione della polvere dal foro, inserimento del tassello per tutta la sua lunghezza e sua forzatura per espansione contro le pareti del foro;
- posizionamento del martinetto sul calcestruzzo ed inserimento del tirante nel foro del martinetto avvitandolo con forza nel tassello;
- centratura del martinetto rispetto al tassello ed esecuzione della prova di estrazione; in tale operazione l'incremento della pressione (o del carico) nel martinetto deve essere graduale e costante (0.5 ± 0.2 kN/s);
- rilievo della forza F di estrazione, in kN e registrazione del risultato;

d) effettuate le 3 estrazioni, verrà calcolata la media tra i 3 valori di F. Qualora uno di essi si discosti di più del 20% dal valore medio, tale valore dovrà essere sostituito dal risultato di un'ulteriore estrazione eseguita in prossimità delle altre; se anche in questo caso il criterio di accettazione non risulta verificato si dovranno ripetere le 3 estrazioni in una nuova zona adiacente.
In relazione a tale metodo di indagine, è opportuno rilevare l'importanza che assume il tipo di tassello utilizzato, che dovrà essere ad espansione geometrica controllata. In tal senso è sconsigliato l'impiego di tasselli destinati ad altri usi.

4.4.4 Elaborazione dei risultati

La correlazione tra la forza d'estrazione F, ricavata dalla pressione misurata al martinetto, e la resistenza cubica R_c è in genere del tipo rappresentato in Figura 6 e definito da una retta del tipo:

$$R_c = A + B*F$$

in cui i coefficienti A e B sono opportunamente calibrati mediante prove distruttive a compressione su carote. La Figura 3 fornisce un esempio della relazione tra forza di estrazione e resistenza a compressione:

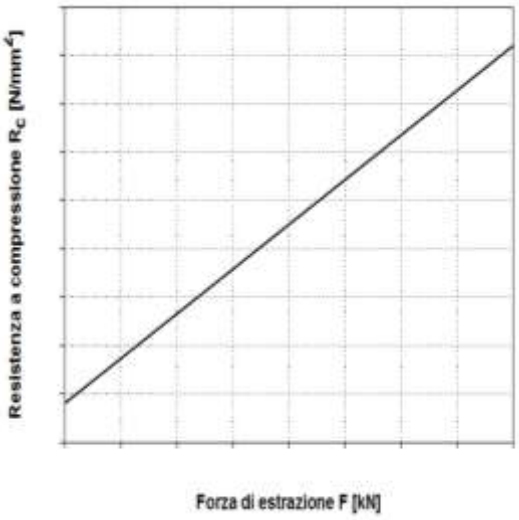

Figura 3 - Andamento della correlazione tra forza di estrazione F e resistenza a compressione Rc.

4.5 Stima delle caratteristiche meccaniche in opera in base alla profondità di penetrazione di sonde

Un utile riferimento per l'esecuzione di prove di infissione è costituito dalla norma ASTM C803.

4.5.1 Principio di funzionamento

Nella tecnica basata sulla resistenza alla penetrazione, si misura la profondità di penetrazione nel calcestruzzo di una sonda (asta) d'acciaio infissa con energia prestabilita. Il dispositivo impiegato è

ingenio-web.it

una speciale pistola (sonda Windsor) che utilizza una carica esplosiva normalizzata. La profondità di penetrazione della sonda è un indicatore della resistenza del calcestruzzo. Nel momento in cui la sonda si infigge nel calcestruzzo, una parte della sua energia cinetica si dissipa per attrito tra la sonda ed il calcestruzzo, mentre parte frattura e schiaccia il calcestruzzo. Generalmente la regione in cui il calcestruzzo è danneggiato ha approssimativamente la conformazione di un cono.
Questo metodo fornisce buone prestazioni per la valutazione dell'evoluzione della resistenza del calcestruzzo nello stadio iniziale di maturazione allo scopo di determinare il tempo più appropriato di sformatura e per determinare la resistenza relativa in parti differenti della stessa struttura.
Il risultato della prova è influenzato dalla durezza e dalla resistenza degli aggregati impiegati per confezionare il calcestruzzo, mentre è poco dipendente dalle condizioni della superficie dell'elemento, quali scabrezza e carbonatazione.

4.5.2 Taratura della strumentazione

La strumentazione per le prove di penetrazione non richiede taratura. La costanza dell'energia di infissione è infatti assicurata dalla potenza delle cariche esplosive fornite dal produttore dello strumento.

4.5.3 Modalità d'esecuzione

L'esecuzione delle prove si svolge secondo le seguenti modalità:

a) si individua un'idonea zona di misura;
b) si stabiliscono i punti di misura, che devono risultare non coincidenti con gli aggregati affioranti e sufficientemente lontani dalle barre di armatura, dagli altri punti di misura e dagli spigoli dell'elemento;
c) si eseguono le prove; ogni prova deve essere costituita da non meno di 3 infissioni; tali infissioni possono essere eseguite utilizzando l'apposita dima triangolare, contenente un foro per ogni vertice, fornita usualmente a corredo della strumentazione, che garantisce la corretta spaziatura fra i punti di misura. Ogni misura deve essere eseguita con la seguente procedura:
    - infissione della sonda perpendicolarmente alla superficie del calcestruzzo;
    - rimozione del calcestruzzo distaccato in maniera tale da ottenere una superficie piana attorno alla sonda;
    - esecuzione della misura della lunghezza W della sonda fuoriuscente dal calcestruzzo con una risoluzione di 0.5 mm; nel caso in cui la sonda sia inclinata rispetto alla perpendicolare alla superficie del calcestruzzo, il valore di W può essere ottenuto quale media dei corrispondenti valori misurati in 3 punti situati a 90° l'uno dall'altro lungo la testa della sonda; nel caso di rifiuto della sonda, si può attribuire a W il valore massimo di 60.0 mm;
d) effettuate le 3 o più infissioni, si calcola la differenza tra il valore massimo e minimo di W. Se tale differenza è minore di 8 mm la prova è da considerarsi accettabile; se invece risulta maggiore, va scartato il valore che si discosta maggiormente dalla media dei 3 valori ed esso va sostituito con quello ricavato da una quarta infissione. Verrà quindi calcolata la nuova differenza tra il valore massimo ed il valore minimo di W; se questa nuova differenza è minore di 8 mm la prova è da considerarsi accettabile; in caso contrario bisogna ripetere le infissioni in una nuova zona adiacente;
e) si rileva la durezza Mohs degli aggregati.

ingenio-web.it

4.5.4 Elaborazione dei risultati

L'elaborazione delle misure eseguite nel corso di prove d'infissione consiste nel calcolo della media dei valori di W di ciascuna zona. La media esprime in genere essa con una cifra decimale. La correlazione tra la lunghezza W e la resistenza cubica R_c è in genere del tipo rappresentato in Figura 4 e definito dalla:

$$R_c = A + B*W*F$$

in cui i coefficienti A e B sono ottenuti per calibrazione mediante prove distruttive a compressione su carote.

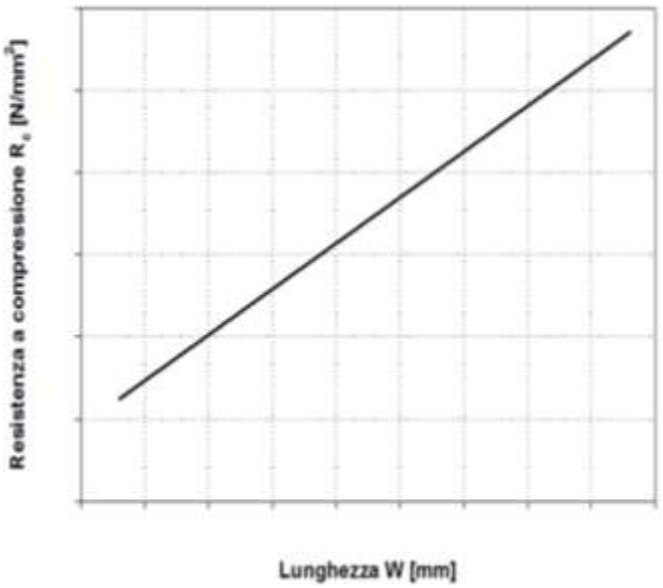

Figura 4 - Andamento della correlazione tra lunghezza [W] e resistenza a compressione [Rc].

4.6 Stima delle caratteristiche meccaniche mediante l'impiego di metodi combinati

I metodi combinati consistono nell'applicazione di due o più metodi d'indagine per la valutazione della resistenza del calcestruzzo. La disponibilità di risultati provenienti da metodi diversi consente di stimare la resistenza mediante più correlazioni che migliorano l'affidabilità della resistenza meccanica stimata.

Tra i metodi combinati più noti si ricordano:

1) misura dell'indice di rimbalzo + misura della velocità di propagazione degli ultrasuoni (metodo SONREB);

2) misura dell'indice di rimbalzo + misura della velocità di propagazione degli ultrasuoni + misura della forza di estrazione;

3) misura dell'indice di rimbalzo + misura della velocità di propagazione degli ultrasuoni + misura della profondità d'infissione.

L'esecuzione di prove combinate ed, in particolare, di quelle che prevedono l'esecuzione di prove parzialmente distruttive (estrazione di inserti o prove di penetrazione), consente di migliorare la precisione del risultato mediante l'applicazione di tecniche statistiche di correlazione multivariabili.

Nel caso, ad esempio, del metodo SONREB, uno dei sistemi di combinazione più diffusi, sono utilizzate correlazioni del tipo:

$$R_c = A * \mathbf{v_p}^B * N^C$$

dove:

ingenio-web.it

$\mathbf{v_p}$ = velocità degli ultrasuoni
N = indice di rimbalzo
A, B, C = costanti di determinazione sperimentale mediante prove distruttive su carote utilizzando, ad esempio, la procedura 1 della EN 13791.

Nel caso di un numero limitato di coppie di misure distruttive e non distruttive, si potrà ricorrere a curve già disponibili in letteratura adottando la procedura 2 della EN 13791.
In alternativa potrà ricercarsi la curva di letteratura che fornisca i necessari coefficienti correttivi.

4.7 Determinazione di altre proprietà del calcestruzzo in opera: individuazione della posizione delle armature e stima dello spessore del copriferro

4.7.1 Principio di funzionamento

La misurazione dello spessore del copriferro delle armature e l'individuazione delle barre di armatura può essere effettuata utilizzando dispositivi denominati "misuratori di ricoprimento" o "pacometri".
Questi strumenti sono dispositivi magnetici che si basano sul principio per cui la presenza dell'acciaio immerso nel calcestruzzo influenza il campo magnetico generato da un elettromagnete.
La sonda di un'attrezzatura tipica è costituita da un nucleo magnetico molto permeabile, sul quale sono montate due bobine, nella prima bobina è fatta passare una corrente alternata nota, la seconda serve per misurare la corrente indotta.
La corrente indotta dipende dal valore della riluttanza del circuito magnetico, che, a sua volta, dipende dalla vicinanza delle barre d'armatura: se il circuito magnetico comprende oltre al nucleo magnetico ed al calcestruzzo, anche una barra di armatura, la riluttanza diminuisce ed aumenta la corrente indotta nella bobina cantatrice, che viene misurata mediante un amperometro a bobina mobile.
La riluttanza è influenzata sia dal diametro dell'armatura sia dalla profondità a cui essa si trova al di sotto della superficie e pertanto è possibile correlare il valore della corrente misurata con lo spessore del copriferro ed il diametro dell'armatura.
I risultati possono essere presentati sia sotto forma di valori puntuali, sia sotto forma di immagini bidimensionali, eseguendo una scansione nell'intorno del punto di prova.
Gli strumenti commerciali generalmente forniscono risultati attendibili per elementi debolmente armati e barre d'armatura prossime alla superficie.

4.7.2 Taratura della strumentazione

La prova non è normalizzata. Occorre verificare il corretto funzionamento del pacometro prima dell'esecuzione di ciascuna campagna di prova per l' individuazione delle armature della struttura oggetto di indagine, secondo le istruzioni fornite dal produttore a corredo dello strumento.

4.8 Determinazione di altre proprietà del calcestruzzo in opera: determinazione della profondità di carbonatazione

4.8.1 Principio di funzionamento

Le procedure per l'esecuzione della prova sono descritte dalla norma UNI EN 14630 ("Determinazione della profondità di carbonatazione con il metodo della fenolftaleina") o nella UNI 9944 ("*Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo.*"). La prova si basa

ingenio-web.it

sulla proprietà di un indicatore chimico ad indicare, con variazione di colore, la basicità di una soluzione acquosa presente su una superficie. Generalmente è utilizzata una soluzione all'1% di fenolftaleina in alcool etilico. La fenolftaleina vira al rosso al contatto con soluzioni il cui pH è maggiore di 9.2 e rimane incolore per valori di pH minori, quali quelle del calcestruzzo carbonatato.

4.8.2 Modalità di esecuzione

La prova può essere eseguita sia su campioni di calcestruzzo prelevati da un elemento strutturale mediante carote, micro carote, coni di estrazione, sia su superfici di frattura con bordi a vista. È fondamentale che sia disponibile un riscontro della quota interna rispetto alla superficie esterna del calcestruzzo.

Prima della prova il campione deve essere ripulito da frammenti o detriti, e deve presentare bordi netti ed andamento possibilmente normale a quelli della superficie esterna.

L'esecuzione delle prove si svolge secondo le seguenti modalità.

Nel caso in cui la superficie in esame sia particolarmente arida e secca, può essere necessaria una preventiva umidificazione con acqua pulita (con pennello o spruzzatore) attendendo, per le successive operazioni che la superficie tenda ad essiccarsi. Si procede quindi applicando sulla superficie da esaminare una soluzione di fenolftaleina mediante pennello o nebulizzatore curando di non far colare la soluzione.

La misura della quota della linea che demarca la superficie colorata deve essere eseguita dopo un conveniente tempo di attesa (30 – 60 minuti) mediante un regolo e con la precisione del millimetro ad intervalli equispaziati onde poter rilevare il valore minimo, medio e massimo.

4.9 Determinazione di altre proprietà del calcestruzzo in opera: valutazione della permeabilità del calcestruzzo ai gas e all'acqua in sito

La permeabilità del calcestruzzo in sito può essere valutata utilizzando indagini sperimentali che possono essere raggruppate in tre categorie:

- prove basate sulla misura dell'assorbimento di acqua;
- prove basate sulla misura delle permeabilità all'acqua;
- prove basate sulla misura della permeabilità all'aria.

Tutti i metodi sopra ricordati presentano inconvenienti e limitazioni che rendono di fatto poco consigliabile il loro impiego. Si deve rimarcare che la permeabilità del calcestruzzo in situ è fortemente influenzata dall'umidità e dalla temperatura, fattori che possono condizionare significativamente i risultati di prova.

4.10 Ulteriori indagini strumentali sul calcestruzzo in opera

Ulteriori tecniche di indagine sono disponibili per la valutazione di proprietà meccaniche del calcestruzzo diverse dalla resistenza, quali l'omogeneità dei getti, l'eventuale presenza di vuoti, il contenuto di umidità, ecc.. Tra queste si ricordano:

- la termografia infrarossa, utilizzata per individuare disomogeneità all'interno della massa del calcestruzzo, in particolare nelle pavimentazioni e negli impalcati da ponte;
- il georadar, utilizzato per determinare il contenuto di umidità del calcestruzzo, la presenza di disomogeneità o di eventuali inclusioni di oggetti metallici.

ingenio-web.it

Bibliografia

Consiglio Superiore dei lavori pubblici - Linee guida sul calcestruzzo strutturale

Consiglio Superiore dei lavori pubblici - Linee Guida sui calcestruzzi strutturali ad alta resistenza

Consiglio Superiore dei lavori pubblici - Linee guida per la produzione, il controllo ed il trasporto del calcestruzzo preconfezionato

D.M. LL.PP. 14.01.2008 - Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e delle strutture metalliche.

UNI-EN 13670 Esecuzione delle opere in calcestruzzo- Parte 1- Parte generale.

EN 1992 1 Eurocode 2 : Design of concrete structures - Part 1 General rules for buildings.

UNI-EN 206-1 Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità.

UNI 11104 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità: istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1

EN 13791 Assessment of concrete compressive strength in structures or in structural elements.

UNI EN 12504-1 Calcestruzzo nelle strutture – Carote – Prelievo, esame e prova di compressione.

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

UNI EN 12504-3 Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Prove non distruttive – Determinazione della forza di estrazione.

UNI EN 12504-4 Calcestruzzo nelle strutture – parte 4 – Determinazione della velocità di impulsi ultrasonici.

UNI EN 12390-2 Prova sul calcestruzzo indurito – Preparazione e maturazione dei campioni per le prove a compressione.

ACI 228.1R (95) In place Methods to estimate Concrete strength.

ACI 228.2R (98) Non destructive Test Methods for Evaluation of concrete in structures.