



IL CALCESTRUZZO: NORME DI PRODOTTO, PRESTAZIONI E ACCETTAZIONE

dott. ing. Nicola Longarini – dott. ing. Giuseppe Silvestro

Politecnico di Milano
Consorzio CIS-E
P.zza Leonardo da Vinci, 32 – 20133 Milano

Sommario

Nella presente memoria sono affrontati i principali temi inerenti il controllo del calcestruzzo in opera, sia per quanto riguarda il controllo di accettazione, sia il collaudo statico con riferimento anche alla certificazione di prodotto dei materiali.

I temi sono illustrati con specifico riferimento alle principali normative (nazionali e internazionali), cogenti e volontaristiche (standard), approfondendo anche le differenze che sovente esistono tra di esse.

Vengono, quindi, trattate le prove più significative da effettuarsi sul calcestruzzo in opera (prove sclerometriche, ultrasoniche, con pistola Windsor, pull-out, etc.) e le modalità con cui poter efficacemente combinare i risultati di ognuna di esse. Oltre a ciò si affrontano rilevanti approfondimenti statistici con lo scopo di verificare la costanza delle prestazioni, la qualità della messa in opera ed i conseguenti benefici e/o rischi per la durabilità della struttura.

Quanto è analizzato, è stato approfondito dagli autori affiancando il prof. ing. Antonio Migliacci in diverse attività tra le quali, in particolare, la Supervisione dei collaudi statici di grandi ed estese opere strutturali (alcune realizzate ed altre in corso di completamento, a Milano) ed in attività di consulenza sulla qualità, prestazioni e durabilità del calcestruzzo.

1 INTRODUZIONE

Il controllo del calcestruzzo in opera è di vitale importanza affinché siano garantite alla struttura le caratteristiche prestazionali assegnate in fase di progetto. Tale controllo deve essere svolto, sia dalla direzione dei lavori (ddl) durante l'esecuzione dell'opera, sia dal collaudatore la cui attività deve accompagnare quella del ddl (in corso d'opera e al termine dell'esecuzione). Per il controllo possono essere utilizzate normative nazionali e internazionali, cogenti e volontaristiche (standard), approfondendo le differenze che sovente esistono tra di esse, specie nella valutazione del potenziale valore del calcestruzzo in situ. Tale valore discende dai risultati delle prove distruttive e non distruttive, i cui risultati devono essere efficacemente combinati per ridurre i potenziali errori di ogni singola prova. Inoltre, per opere particolarmente estese è necessario svolgere approfondimenti statistici per verificare la costanza delle prestazioni, la qualità della messa in opera ed i conseguenti benefici e/o rischi per la durabilità della struttura. Quanto riportato nel prosieguo è stato approfondito dagli autori affiancando il prof. ing. Antonio Migliacci in diverse attività tra le quali: la Supervisione dei collaudi statici di grandi ed estese opere strutturali (i tre comparti Garibaldi, Varesine e Isola in "Porta Nuova" a Milano) la consulenza sulla qualità, prestazioni e durabilità del calcestruzzo anche in ambito di procedimenti legali. Si ringrazia il prof. ing. Antonio Migliacci per l'opportunità data agli autori nel collaborare con Lui in importanti attività di collaudo e di consulenza, i collaudatori dei tre comparti di "Porta Nuova" (ing. S.Sgambati, B. Finzi e G.Cozzaglio) e la società Hines Italia SGR.

2 ACCERTAMENTO DEL CALCESTRUZZO IN SITU

Con riferimento alle attività di collaudo statico in corso d'opera e finale circa le indagini da svolgere sul calcestruzzo in situ al fine d'individuare le prestazioni, è bene innanzitutto ricordare quanto esposto nel capitolo 9 delle Norme Tecniche delle Costruzioni- D.M. 2008 (NTC 2008), " *il collaudo riguarda il giudizio sul comportamento e le prestazioni delle parti dell'opera che svolgono funzione portante [...], tranne casi particolari, il collaudo va eseguito in corso d'opera, quando vengono posti in opera elementi strutturali non più ispezionabili, controllabili e collaudabili a seguito del costruire della costruzione*" e che " *le opere non possono essere messe in esercizio prima dell'effettuazione del collaudo statico*";

Inoltre, per la Legge n.°1086/71 – *Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso, ed a struttura metallica*", la Legge n.°64/74 – " *Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche*" e il D.P.R.6/6/2011 n.°380 – " *Testo Unico delle disposizioni legislative regolamentari in materia edilizia*", emerge che tra gli adempimenti del Collaudatore rientrano le seguenti attività:

- controllare quanto prescritto in materia dalla normativa in essere;
- ispezionare *l'opera* (alla presenza della DdL) *nelle varie fasi costruttive dell'opera nel complesso con particolare riguardo alle opere strutturali più importanti* [...];
- [...] *esaminare i certificati: dalle prove sui materiali e [...] dai controlli in stabilimento e nel ciclo produttivo;*
- *controllare i verbali ed i risultati delle eventuali prove di carico fatte eseguire dalla DdL;*
- [...] *esaminare il progetto dell'opera* [...];
- [...] *esaminare le indagini eseguite nelle fasi di progettazione ed esecuzione;*

le quali possono essere integrate, da “*accertamenti, studi, indagini, sperimentazioni e ricerche utili*” per “*[...] la collaudabilità delle opere*”.

Sostanzialmente, dal quadro normativo si ha quindi che attività quali “*prove di carico*” e “*prove sui materiali in opera*” sono “a discrezione” essendo tra l’altro espresso nelle NTC 2008 che queste ultime prove sono da svolgere “*ove ritenute necessarie*”; cioè, in linea teorica, sembrerebbe possibile emettere il certificato di collaudo senza averle neanche compiute. Per gli autori ciò appare inammissibile, specie se le strutture da collaudare interessano un alto edificio, un edificio strategico, o soluzioni architettoniche ardite (importanti sbalzi) da collaudare è strategica, d’importante estensione, o magari caratterizzata da particolari geometrie e soluzioni architettoniche.

In tali casi, non solo è assolutamente necessario svolgere le prove sui materiali e le prove di carico, ma anche approfondire il comportamento strutturale con analisi e controlli di tipo dinamico (ad esempio “snap back”) ad integrazione di quelli statici, ma anche continuare con controlli post collaudo, come ad esempio monitoraggi programmati di grandezze significative sul comportamento dell’opera.

Quindi, le campagne di accertamento del calcestruzzo in situ si configurano come una necessaria attività del collaudatore al fine di assicurare “*[...] la perfetta stabilità e sicurezza delle strutture e da evitare qualsiasi pericolo per la pubblica incolumità*” (dalla n.°1086/71) per quanto la normativa non lo obblighi a predisporre una limitandosi ad indicare che tale campagna venga effettuata “*[...] quando si renda necessario valutare a posteriori le proprietà di un calcestruzzo precedentemente messo in opera*” procedendo “*ad una valutazione delle caratteristiche di resistenza attraverso una serie di prove sia distruttive che non distruttive*” da non “*intendersi sostitutive dei controlli di accettazione*”, da §11.2.6 NTC.

Inoltre, nello svolgimento della suddetta valutazione “*[...] per le modalità di determinazione della resistenza strutturale si potrà fare utile riferimento alle norme: UNI EN 12504-1:2002, UNI EN 12504-2:2001, UNI EN 12504-3:2005, UNI EN 12504-4:2005 e Linee Guida pubblicate dal Servizio Tecnico Centrale Consiglio Superiore LL.PP.*”, anche se, come specificato nei successivi paragrafi, è necessario che il

collaudatore prenda anche visione di quanto esposto in letteratura e nella UNI EN 13791, in specie per quanto riguarda l'interpretazione, l'eventuale correzione e la correlazione dei risultati derivanti dalle prove (distruttive e non distruttive).

2 PROVE NON DISTRUTTIVE

2.1 - PROVA SCLEROMETRICA

Tra le prove non distruttive, la più immediata è quella sclerometrica, la quale si basa sulla misura dell'indice di rimbalzo N, che conteggia l'energia elastica assorbita dalla superficie di calcestruzzo (sottoposto a prova) a seguito dell'impatto della massa standardizzata dell'apparecchio (sclerometro). L'indice di rimbalzo, dal quale dipende il risultato della prova, è influenzato principalmente da: condizioni di umidità del calcestruzzo in superficie, presenza di uno strato superficiale carbonato, età del calcestruzzo, inclinazione dello strumento rispetto alla verticale e tipologia (dimensioni e natura) degli aggregati.

Poiché le misure sono influenzate dalle condizioni locali del punto d'impatto, prima di utilizzare lo sclerometro dovrebbe osservarsi che la zona di prova sia priva di: forti porosità, rilevanti irregolarità, eventuale strato d'intonaco e/o di vernice, ferri d'armatura in prossimità della stessa. Inoltre, qualora la zona presenti uno strato di superficie degradato o irregolare, esso deve essere asportato (ad es., con uno smerigliatore) e la superficie di test deve quindi risultare pulita e lisciata. Operativamente, cioè, dovrebbe essere seguita la seguente procedura:

- esecuzione di un opportuno numero di battute all'interno della zona di misura, definendo preliminarmente un "griglia" e "battendo" perpendicolarmente al punto di prova; qualora lo strumento fosse inclinato, va segnato l'angolo d'inclinazione ed in base a tale angolo si deve modificare il valore ottenuto;
- calcolare il valore medio degli indici di rimbalzo N ed accettare il risultato se almeno l'80% dei valori non è "distante" dal valore medio per più di 6 unità.

2.2 - PROVA SONICA

La prova si basa sulla misura della velocità di propagazione di onde elastiche nel calcestruzzo, determinata come rapporto tra la distanza trasmettitore/ricevitore ed il tempo impiegato a percorrerla. La velocità è influenzata da: contenuto d'umidità, composizione della miscela, grado di maturazione, eventuali vuoti e/o fessure interne (aumento della distanza trasmettitore/ricevitore) e dalla possibile presenza di armature (le quali devono essere preventivamente localizzate tramite pachometro).

Operativamente, cioè, dovrebbe essere seguita la seguente procedura:

- individuazione della zona di misura, pulizia della superficie e posizionamento dei punti di misura;

- rilievo della distanza tra il trasmettitore ed il ricevitore;
- esecuzione delle misure utilizzando o sonde puntiformi o di superficie piana, ed eseguito un numero opportuno di prove (ad es., n.10 per ogni zona) è necessario verificare l'omogeneità dei valori di velocità ($\Delta v_{\max} = 200 \div 300$ m/s) controllando il valore medio della velocità. Infatti, la prova sarebbe da ripetere se la velocità di trasmissione v risulta essere:

$v > 4800$ m/s oppure $v < 2500$ m/s, essendo v calcolabile secondo la seguente relazione: $v = l / [T - (T_t - T_0)]$, ove:

- l = lunghezza della base di misura;
- T = tempo di propagazione trasmettitore-ricevitore;
- T_t = tempo di percorrenza del prisma metallico di taratura;
- T_0 = tempo di percorrenza del prisma secondo il fabbricatore.

2.3 PROVA WINDSOR

La prova si basa sulla misura della profondità di penetrazione nel calcestruzzo di un'asta d'acciaio (sonda) infissa nel calcestruzzo con energia prestabilita. La prova è influenzata dalla durezza e dalla resistenza degli aggregati e solo leggermente dalla scabrezza e dalla carbonatazione della superficie dell'elemento. Operativamente, potrebbe essere seguita la seguente procedura:

- individuazione della zona e scelta dei punti d'infissione (previo controllo pachometrico);
- esecuzione di almeno n.°3 "colpi", ponendo particolare attenzione ad infiggere in direzione perpendicolare alla superficie (superficie che deve essere il più possibile piana attorno alla sonda);
- misura della lunghezza della sonda fuoriuscente dal calcestruzzo (normalmente osservando una riduzione di 0.5mm);
- calcolare la differenza $\Delta M-m$ tra il valore massimo ed il minimo, ricordando che il risultato della prova è accettabile se $\Delta M-m < 8$ mm; altrimenti, se $\Delta M-m > 8$ mm, è necessario ripetere una quarta infissione e, se con tale quarta misura d'infissione è rispettato il criterio d'accettabilità di $\Delta M-m$, si sostituisce il nuovo valore al precedente più distante dalla media (se, invece, la condizione di cui sopra non fosse nuovamente verificata, la prova andrebbe ripetuta in una zona adiacente).

3 PROVA DISTRUTTIVA

3.1 CAROTAGGIO

Le prove su carote rappresentano il metodo d'indagine più diretto ed affidabile, sebbene per ragioni pratiche, ma anche economiche, è praticamente impossibile condurre una

campagna di accertamento basandosi solo sull'estrazione di carote. Il carotaggio consiste nell'estrazione di campioni di forma cilindrica (carote) utilizzando l'apposita macchina carotatrice dotata di corona diamantata. Durante l'operazione di estrazione è bene che la carotatrice sia ben ancorata in modo che, avanzando nell'estrazione, la macchina non subisca forti vibrazioni che porterebbero a rovinare il campione (il quale deve avere un diametro costante ed asse rettilineo). Qualora ciò accadesse, si avrebbe un apparente decremento della resistenza meccanica e tale decremento è ancor più evidente nelle carote prelevate in direzione normale a quella del getto.

Le prove distruttive, su campioni da carote estratte, sono affrontate nelle UNI EN 12390-1÷3 e UNI EN 12504-1; da tali norme e dalla letteratura di riferimento si evincono limitazioni ed avvertenze relative ai campioni ed alle modalità di prova. Tra di esse, si ricordano le principali:

- il diametro delle carote deve essere superiore di almeno tre volte al diametro massimo degli inerti (e mai minore a 100 mm). Infatti, essendo la resistenza legata al rapporto (D/d_i) , con D pari al diametro della carota e d_i pari alla dimensione massima dell'inerte, vi è che al diminuire di D/d_i si ha un sensibile aumento della dispersione dei risultati (dipendente dalla distribuzione casuale degli inerti); inoltre, alcuni piccoli inerti, o frantumi di essi, potrebbero distaccarsi dalla superficie laterale indebolendo la sezione della carota tanto più essa è caratterizzata da un diametro minore;
- non devono essere contenuti ferri d'armatura nelle carote. Al riguardo si sottolinea che la presenza di spezzoni di armatura può alterare la prova, poiché:
 - carote con spezzoni disposti nella direzione di compressione non offrono risultati attendibili;
 - carote con spezzoni di armatura in direzione ortogonale subiscono una diminuzione (difficilmente quantificabile) della resistenza misurata sulla carota;
 - il rapporto altezza/diametro (H/D) dei provini dovrebbe essere $H/D = 2$ (comunque, potrebbero essere prelevati campioni aventi $H/D = 3$, in modo da giungere ad $H/D = 2$ scartando eventuali parti contenenti barre, qualora le zone di prelievo fossero piuttosto "congestionate", e rettificando le superfici su cui applicare il carico);
- le prove di compressione devono essere eseguite su provini umidi;
- le prove di compressione devono essere effettuate su campioni dei quali si è preventivamente verificata la planarità e l'ortogonalità delle superfici d'appoggio.

Per di più, al momento della prova, si dovrà tenere in conto dell'età del calcestruzzo, cioè del suo grado di maturazione. In merito, si consideri la curva riportata nella successiva Figura, ove è rappresentato l'incremento della resistenza in funzione dell'età del getto. La curva è descritta dalla seguente relazione:

$$f_c(28)/f_c(t) = \exp \{s \cdot [(28/t)^{0.5} - 1]\}, \text{ ove:}$$

- $f_c(28)$ = resistenza del calcestruzzo al 28° giorno; $f_c(t)$ = resistenza del calcestruzzo nel tempo;
- $s = 0.2$, per cementi di classe CEM42.5R, 52.5N, 52.5R; $s = 0.25$, per cementi di classe CEM 32.5R, 42.5N; $s = 0.38$, per cementi di classe CEM 32.5 N.

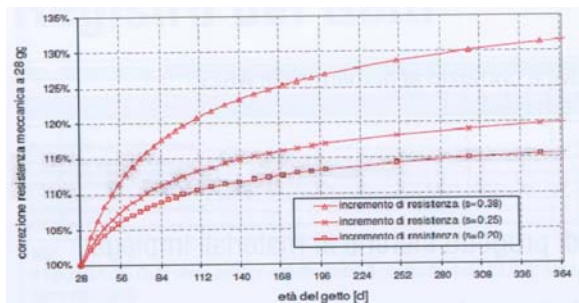


Figura 1 – incremento di resistenza in funzione dell'età del getto

4 CALIBRATURA PROVE NON DISTRUTTIVE E CAROTAGGI

Accennando solo brevemente alle seguenti procedure di taratura degli strumenti impiegati per le prove non distruttive:

- per lo sclerometro, che deve essere tarato prima e dopo ogni giornata d'impiego, si usa l'apposita incudine fornita dal fabbricante, a cui corrisponde il valore standard dell'indice di rimbalzo quando si esegue una prova con sclerometro posto in posizione verticale (vedendo quale indice di rimbalzo si ottiene battendo contro suddetta incudine e quanto esso si discosta da quello standard, è possibile correggere i risultati ottenuti nelle battute di prova);
- per la Sonica, si misura il tempo impiegato dalle onde a percorrere il cilindro metallico di taratura, fornito dal fabbricante. Annotando tale valore si verifica di quanto si discosta dal tempo standard, anch'esso predeterminato dal fabbricante, e su tale differenza si ricalibra lo strumento su indicazioni del fabbricante.
- per la Windsor, invece, non vi è bisogno di taratura;

si ritiene importante sottolineare le leggi di correlazione tra i valori della resistenza a schiacciamento (R_c) e le grandezze che caratterizzano le prove non distruttive.

In particolare, quindi, per la calibratura delle prove non distruttive sulla base di carote si hanno le seguenti relazioni (nelle quali i coefficienti a e b sono calibrati da prove su carote di riferimento ed R_c indica la resistenza a compressione):

- per la sclerometrica, $R_c = a \cdot Nb$, ove: N = indice di rimbalzo;
- per la Sonica, $R_c = a \cdot \exp bV$, ove: V = velocità di propagazione;
- per la Windsor, $R_c = a + bL$, ove: L = profondità d'infissione.

Ciò detto è chiaro quindi come la resistenza del calcestruzzo può essere desunta da ogni tipo di prova o dalla combinazione delle diverse prove (distruttive e non distruttive). In tal caso la resistenza del calcestruzzo a compressione è funzione dell'indice di rimbalzo,

della velocità ultrasonica e/o della lunghezza esposta della sonda Windsor, a seconda della combinazione di prove prescelta per una determinata area. Per esempio, effettuando le combinazioni A), B) e C) definite come segue:

A) Sclerometro + Sonica + Windsor (pedici: Sc, S e W);

B) Sclerometro + Sonica (pedici: Sc e S, anche detta in inglese SonReb);

C) Windsor (pedice: W);

i valori che si ottengono possono essere combinati secondo le seguenti relazioni:

$$\text{per A)} \quad R_C (Sc-S-W) = a_1 \cdot I_{rm}^{b_1} \cdot V_{l,s}^{c_1} \cdot L_e^{d_1};$$

$$\text{per B)} \quad R_C (Sc-S) = a_2 \cdot I_{rm}^{b_2} \cdot V_{l,s}^{c_2};$$

$$\text{per C)} \quad R_C (W) = a_3 + d_3 \cdot L_e;$$

ove:

- R_C = resistenza del calcestruzzo;
- $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1$ e d_3 sono le costanti oggetto di calibratura, stimabili col metodo della regressione lineare multivariata (minimizzazione dell'errore ai minimi quadrati);
- I_{rm} = indice di rimbalzo sclerometrico;
- $V_{l,s}$ = velocità ultrasonica longitudinale;
- L_e = lunghezza esposta della sonda Windsor.

In letteratura si possono trovare i valori delle suddette costanti. Ad esempio nel caso di prove sclerometriche e Sonreb possono aversi:

$$R_C (Sc-S) = a_2 \cdot I_{rm}^{b_2} \cdot V_{l,s}^{c_2}$$

ove, ponendo:

- $a_2 = \alpha \cdot \delta$ (con α = indice di taratura e δ = modulo di Poisson);
- I_{rm} = valore medio degli indici di rimbalzo ;
- V = velocità ultrasonica di attraversamento,

si ritrovano le seguenti formulazioni:

$$R_C (Sc-S) = \alpha \cdot 7.695 \cdot 10^{-10} \cdot I_{rm}^{1.450} \cdot V_{l,s}^{2.58} \quad (\text{Rilem, 1993});$$

$$R_C (Sc-S) = \alpha \cdot 6.693 \cdot 10^{-7} \cdot I_{rm}^{1.246} \cdot V_{l,s}^{1.85} \quad (\text{Gasparik, 1992});$$

$$R_C (Sc-S) = \alpha \cdot 9.964 \cdot 10^{-9} \cdot I_{rm}^{1.058} \cdot V_{l,s}^{2.446} \quad (\text{Di Leo e Pascale, 1994})^1.$$

Sostanzialmente, è possibile combinare i due metodi (sclerometro e Sonica) utilizzando curve dette di “iso-resistenza”, ricavate per un calcestruzzo definito standard e descritte

¹ Il limite di tali formulazioni risiederebbe nel valore dell'indice di taratura α ; tale limite è stato risolto dai rispettivi autori basandosi sui risultati sperimentali provenienti da numerose prove di carotaggio e di tipo sclerometrico-Sonreb, ricalcolando il valore α invertendo le formule da loro rispettivamente proposte [9].

dalle due sottostanti relazioni:

$$R_C (S_C-S) = 7.695 \cdot 10^{-10} \cdot I_{rm}^{1.450} \cdot V_{l,s}^{2.58} \quad (se: R_C \text{ in } [daN/cm^2] \text{ e } V \text{ in } [m/s]);$$

$$R_C (S_C-S) = 0.0286 \cdot I_{rm}^{1.246} \cdot V_{l,s}^{1.85} \quad (se: R_C \text{ in } [N/mm^2] \text{ e } V \text{ in } [km/s]);$$

oppure dalla seguente:

$$R_C (S_C-S) = 1.2 \cdot 10^{-9} \cdot I_{rm}^{1.058} \cdot V_{l,s}^{2.446} \quad (se: R_C \text{ in } [N/mm^2] \text{ e } V \text{ in } [m/s]),$$

la quale può essere corretta attraverso un coefficiente di correzione C_v che tiene conto dei valori desunti dalle prove su carote dello stesso tipo do calcestruzzo.

Ciononostante è bene chiarire che i risultati delle prove in situ possono differire tra loro ed essere influenzati proprio dalla natura stessa del getto. Cioè, a causa dei fattori che influenzano le caratteristiche del calcestruzzo oggetto delle prove (età del materiale, densità, carbonatazione superficiale del getto, dimensione degli inerti, durezza degli inerti, etc.), è necessario calibrare le suddette costanti in base alle prove di schiacciamento sulle corrispondenti carote. Ad esempio, per un'area di prova (nel successivo paragrafo definita area omogenea) siano eseguiti carotaggi ed ottenute 3 provini (C_1 , C_2 e C_3). Per ognuno di essi si eseguano:

- prove sclerometriche, ottenendo gli indici I_{rm1} , I_{rm2} ed I_{rm3} ;
- prove Sonreb, ottenendo le velocità V_1 , V_2 e V_3 ;
- prove di schiacciamento, ottenendo le resistenze (R_{C1} , R_{C2} ed R_{C3}).

Ricordando la relazione che lega le tre suddette prove (precedentemente indicata per il tipo B) con la simbologia $R_C (S_C-S)$, per le C_1 , C_2 e C_3 si ha il seguente sistema nelle tre incognite a_1 , b_1 e c_1 :

$$R_{C1} = a_1 \cdot I_{rm1}^{b_1} \cdot V_1^{c_1}$$

$$R_{C2} = a_1 \cdot I_{rm2}^{b_1} \cdot V_2^{c_1}$$

$$R_{C3} = a_1 \cdot I_{rm3}^{b_1} \cdot V_3^{c_1}$$

il quale può essere riscritto con il seguente cambiamento di variabili:

$$R_C' = a_1' + b_1 \cdot I_{rm}' + c_1 \cdot V';$$

$$ove: R_C' = \ln(R_C); I_{rm}' = \ln(I_{rm}); V' = \ln(V); a_1' = \ln(a_1);$$

e dal quale si ottiene il seguente sistema lineare:

$$\begin{vmatrix} R_{C1}' \\ R_{C2}' \\ R_{C3}' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & I_{rm1}' & V_1' \\ 1 & I_{rm2}' & V_2' \\ 1 & I_{rm3}' & V_3' \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_1' \\ b_1 \\ c_1 \end{vmatrix}$$

dal quale è possibile determinare i coefficienti $a_1 = \exp a_1'$, b_1 e c_1 .

Tale determinazione è però non unica, quindi è necessario stimarli attraverso la tecnica di minimizzazione dell'errore secondo il principio dei minimi quadrati (nel caso di

sclerometro + Sonica + Windsor si procede con lo stesso metodo sulla base di quattro parametri).

5 PROCEDURA DI ACCERTAMENTO

Le procedure di accertamento del calcestruzzo in situ sono a discrezione del collaudatore. Nel presente paragrafo si riporta quanto effettuato dai Collaudatori delle rilevanti ed estese opere strutturali di Porta Nuova-Garibaldi, Isola e Varesine in “Porta Nuova” a Milano, sotto la supervisione del prof. ing. Antonio Migliacci in accordo con la Committenza. Innanzitutto è necessario procedere individuando le cosiddette aree omogenee, cioè aree accumulate da:

- mix design;
- resistenza caratteristica attesa;
- tipologia della struttura (platee, pilastri, pareti e/o impalcati).

E' evidente che maggiore è l'estensione delle opere e le tipologie tecnologiche, maggiore sarà il numero delle aree omogenee. Successivamente, decise le tipologie di prove da compiere potrebbero essere svolte prove distruttive (carotaggi) e non distruttive (sclerometro, Sonreb e Windsor) è bene che i relativi risultati siano combinati opportunamente per compensare, anche se parzialmente, le imprecisioni dei singoli metodi e per poter ottenere un quadro completo della situazione.

Pertanto, prima di procedere con le prove, il collaudatore deve determinare un numero minimo di prove per ogni area omogenea, ma anche capire se è necessario approfondire la campagna di accertamento con controlli locali (ad esempio, stabilendo un numero opportuno di controlli locali da effettuare in un singolo punto ivi aumentando il numero di carotaggi; cioè, se tale singolo punto fosse un pilastro, si dovrà predisporre da questo l'estrazione di almeno tre provini differenti, a diverse sue quote, per ottenere il valore caratteristico più corretto). Sulla base dei risultati acquisiti dalle prove non distruttive e da quelle distruttive (per queste ultime meglio se forniti da un Laboratorio Materiali ufficiale anziché autorizzato, evitando eventuali problematiche amministrative-burocratiche legate al rilascio ed al rinnovo periodico delle autorizzazioni) si possono ottenere i valori delle resistenze dei diversi elementi appartenenti a ciascuna delle aree omogenee individuate. Per fare ciò è necessario ricordarsi (vedi bibliografia) che:

- per le prove distruttive, si possono considerare fattori di correzione che contengano: la forma del provino, la maturazione del provino, il disturbo dovuto al carotaggio stesso, l'incidenza del valore della massa e, se del caso, la direzione del carotaggio in relazione alla direzione del getto;
- per le prove non distruttive, si possono considerare fattori relativi ad imprecisioni già citate, quali ad esempio l'inclinazione dello strumento nella prova sclerometrica.

Il collaudatore, quindi, potrebbe svolgere quanto di seguito riportato:

- per ogni area omogenea individuata, scegliere un numero minimo di singole prove, distruttive e non distruttive (ad esempio, n.°4);
- per ogni gruppo di elementi (precedentemente definiti punti) appartenenti all'area omogenea, far eseguire prove combinate, meglio se:
 - tipo 1) Sonica + sclerometro *(non distruttive, combinate)*;
 - tipo 2) Windsor + Sonica + sclerometro *(non distruttive, combinate)*;
 - tipo 3) carote *(distruttive)*.

Al riguardo, si sottolinea che combinando i metodi si effettua un'indagine più completa sul materiale, in quanto, ad esempio per le prove combinate tipo 1) Sonica + sclerometro, si considerano due parametri legati a caratteristiche diverse del materiale: la velocità di propagazione della sonda Sonica è legata alla densità ed all'elasticità, l'indice sclerometrico è legato alla durezza superficiale. Inoltre, con la Sonica si ha che il grado di umidità e quello di maturazione influenzano la velocità di propagazione con un effetto opposto rispetto a quanto rilevato per le prove sclerometriche. In buona sostanza, quindi, la combinazione dei due metodi allevia in gran parte le inefficienze dei singoli metodi.

Scelte le tipologie di prove, elaborati i dati delle prove ed ottenuti i corrispondenti valori di resistenza in situ, il collaudatore procede al controllo di accettazione di tale valore.

Considerando le prove distruttive, cioè tenendo conto dei risultati provenienti dalle carote, il collaudatore può procedere come segue:

- considerate le caratteristiche della carota (maturazione, diametro, altezza, rapporto altezza/diametro) ed ottenuta la resistenza a rottura $R_{c,rott}^*$ di ogni singolo provino (ove: l'apice * corrisponde ai valori in situ, R_c corrisponde alla resistenza cilindrica ed il pedice "rott" corrisponde a rottura);
- si conteggiano i coefficienti correttivi:
 - di forma, $c_1 = 1 + 0.25 (H/D) - 1 < 1.25$, (H=altezza provino, d = diametro);
 - disturbo, $c_2 = 1/0.85$ (da Malhotra), (oppure 1/0.94 da ACI);
 - maturazione, $c_3 = \exp \{s \cdot [(28/g)^{0.5} - 1]\}$, (g = età del cls in giorni);
 - da cui il coefficiente correttivo totale, $c_t = c_1 \cdot c_2 \cdot c_3$
- si ottiene quindi il valore di resistenza corretta $R_{c,corr}^* = c_t \cdot R_{c,rott}$;

Qualora fosse necessario, bisognerebbe considerare anche il coefficiente di riduzione per massa volumica (c_4), definito come segue. Essendo:

g = gradi percentuali di riduzione di massa e p% = perdita percentuale di resistenza

si calcola il prodotto:

$c\% = g \cdot p\%$ corrispondente alla *perdita totale di resistenza (con $p=5 \div 8$)*, da cui:

$$c_4 = 1/(1-x).$$

Ad esempio, qualora si riscontri una massa volumica pari a 2320 kg/m³ (valore massimo) anzichè 2400 kg/m³ si ha:

$$g = 1 - (2320/2400) = 0.33$$

da cui 3.3%, cioè $x\% = 3.3 \cdot 6.5 = 21.45\%$, perciò $c_4 = 1/(1-0.2145) = 1.27$.

Nel caso specifico, senza considerare il coefficiente di maturazione, ogni singolo valore di resistenza allo schiacciamento relativo alle carote prelevate in situ (f_c^*) può essere corretto come segue, ottenendo un valore $f_c^*_{corr}$:

$$[1/(1-x)] \cdot c_1 \cdot (1/0.85) \cdot f_c^* = f_c^*_{corr}$$

ove i termini:

- (1/0.85) tiene conto del disturbo per carotaggio
 - $[1/(1-x)]$ tiene conto della massa volumica
 - c_1 tiene conto della forma del provino.
- Correggendo tutti i singoli valori f_c^* , si ottiene da essi il valore medio corretto ed il valore minimo corretto, in modo da poter procedere col controllo di accettazione o con il D.M. 2008 o con la UNI13791, confrontando i valori ottenuti con quelli di controllo.
- si confronta il valore di rilievo (R_{ck}^*) con quello di controllo, potendo considerare i valori sia in termini di resistenza cilindrica che cubica, rifacendosi a quanto proposto nella norme UNI (ad esempio UNI EN13791) in cui il controllo di accettazione (sui medi o sul minimo) è direttamente espresso in valori di resistenza cilindrica.

Inoltre, considerando le prove non distruttive, combinate come già sopra detto, cioè secondo le combinazioni A), B) e C) con:

A) Sclerometro + Sonica + Windsor;

B) Sclerometro + Sonica;

C) Windsor;

i valori che si ottengono vanno combinati, ad esempio:

$$\text{per A) } R_c, (S_c-S-W) = a_1 \cdot I_{rm}^{b_1} \cdot V_{1,s}^{c_1} \cdot L_e^{d_1};$$

$$\text{per B) } R_c (S_c-S) = a_2 \cdot I_{rm}^{b_2} \cdot V_{1,s}^{c_2};$$

$$\text{per C) } R_c (W) = a_3 + d_3 \cdot L_e;$$

ove la ben nota simbologia.

6 CONTROLLO DI ACCETTAZIONE

Il valore della resistenza in situ è un valore che stabilisce il collaudatore, sulla base delle prove precedentemente menzionate e sulle correzioni indicate nei precedenti paragrafi. Ad esempio, si può tenere conto della a UNI EN 13791, o delle Linee Guida del Cons. Sup. LL.PP avendo sempre presente che “[...] è accettabile un valore medio della

resistenza strutturale, misurata con tecniche opportune ... e trasformata in resistenza cilindrica o cubica, non inferiore all'85% del valore medio definito in fase di progetto" (al §11.2.6 delle NTC).

Il valore della resistenza in situ deciso dal collaudatore, sulla base delle prove distruttive e non distruttive, rappresenta un valore "presumibile", la cui incertezza risiede nelle limitazioni di ciascuna prova utilizzata e nei valori dei coefficienti di correlazione e di correzione assunti. Utilizzando, le normative prima indicate si ha quanto segue.

Per la UNI EN 13791 valgono i seguenti approcci, (nelle cui relazioni l'apice * significa in situ).

APPROCCIO A

La resistenza caratteristica in situ è il valore minore tra:

$$f_{ck}^* = f_{c,m}^* - 1.48 \cdot s \text{ (ove, } s = \text{scarto quadratico medio);}$$

$$f_{ck}^* = f_{c,min}^* + 4;$$

ove:

- f_{ck}^* = resistenza cilindrica caratteristica, desunta dalle prove in situ;
- $f_{c,m}^*$ = resistenza cilindrica media, desunta dalle prove in situ;
- $f_{c,min}^*$ = resistenza cilindrica minima, desunta dalle prove in situ;

APPROCCIO B

La resistenza caratteristica in situ è il valore minore tra:

$$f_{ck}^* = f_{cm}^* - k$$

$$f_{ck}^* = f_{c,min}^* + 4;$$

- ove, oltre alla nota simbologia, k dipende dal numero delle prove (k = 5, se $10 \leq n \leq 14$; k = 6, se $7 \leq n \leq 9$; k = 7, se $3 \leq n \leq 6$).

Il controllo di accettazione è espresso nel punto 9 –*Valutazione qualora la conformità del calcestruzzo basata su prove normalizzate sia in dubbio*,ove si riporta che tale controllo può farsi sia sui valori medi che sul minimo. Quindi, la norma riporta (con f_{ck} pari alla resistenza caratteristica a compressione su provini normalizzati) le seguenti relazioni di controllo:

$$\text{- sui medi, } f_{cm}^* \geq 0.85 (f_{ck} + 1.48 s) \quad (1)$$

$$\text{- sul minimo } f_{c,min}^* \geq 0.85 (f_{ck} - 4) \quad (2)$$

Sulla (1) e (2) di normativa è possibile fare la seguente considerazione. Qualora i risultati delle prove di resistenza sulle carote siano rappresentabili attraverso una distribuzione normale, la relazione tra il medio (f_{cm}^*) ed il caratteristico (f_{ck}^*) sarebbe: $f_{ck}^* = f_{cm}^* - 1.48 s$, (con s = deviazione standard).

Poiché per normativa deve essere verificata la seguente relazione tra il valore caratteristico in situ (f_{ck}^*) e quello caratteristico (f_{ck}): $f_{ck}^* \geq 0.85 f_{ck}$,

per quanto precedentemente detto, questa ultima relazione può scriversi:

$$(f_{cm}^* - 1.48 s) \geq 0.85 f_{ck}, \text{ da cui discende che:}$$

$$f_{cm}^* \geq 0.85 f_{ck} + 1.48 s, \quad (3)$$

che è differente dalla (1) $f_{cm}^* \geq 0.85 (f_{ck} + 1.48 s)$,

cioè nella (3) lo scarto quadratico medio è proprio quello dei valori di resistenza delle carote. Analoga considerazione vale anche per il controllo sul minimo.

Per le Linee Guida del Consiglio Superiore dei LL.PP. vale il seguente approccio (nelle cui relazioni l'apice * significa in situ). Il valore della resistenza cilindrica caratteristica in situ è il minimo tra le due seguenti relazioni (per numero di prove, $n \geq 15$):

$$f_{ck}^* = f_{cm}^* - 1.48 \cdot s \text{ (ove, } s = \text{scarto quadratico medio);}$$

$$f_{ck}^* = f_{cmin}^* + 4;$$

oppure, per numero di prove $4 \leq n \leq 14$, il minimo tra le due seguenti relazioni:

$$f_{ck}^* = f_{cm}^* - k \text{ (con: } k = 4, \text{ se } 10 \leq n \leq 14; k = 5, \text{ se } 7 \leq n \leq 9; k = 6, \text{ se } 4 \leq n \leq 6);$$

$$f_{ck}^* = f_{cmin}^* + 4.$$

Calcolato quindi il valore della f_{ck}^* , il controllo di accettazione prevede che:

$$f_{ck}^* \geq f_{ck, cont} (= 0.85 \cdot f_{ck, prog} = 0.85 \cdot 0.83 R_{ck, prog}) \quad , \quad (4)$$

ove:

- $f_{ck, cont}$ = resistenza cilindrica di controllo;
- $f_{ck, prog}$ = resistenza cilindrica caratteristica, dalle specifiche di progetto;
- $R_{ck, prog}$ = resistenza cubica caratteristica, dalle specifiche di progetto.

Infine, volendo effettuare un controllo di accettazione sui valori medi, come da §11 delle NTC, partendo dalla resistenza cubica in situ (apice *) derivante dai provini (da carote), si avrebbe che:

$R_{cm}^* \geq 0.85 R_{cm}$, che può esprimersi (per $n \geq 15$) nella seguente forma:

$$R_{cm}^* \geq 0.85 (R_{ck} + 1.48 s), \quad (5)$$

ove:

- R_{cm}^* = valore medio della resistenza cubica in situ;
- R_{cm} = valore medio della resistenza cubica di progetto;
- R_{ck} = valore caratteristico della resistenza cubica, da progetto.

Anche in questo caso si riporta la seguente considerazione. Volendo ripassare nuovamente alle resistenze cilindriche, la precedente (5) può scriversi:

$$0.83 \cdot R_{cm}^* \geq 0.85 \cdot (0.83 \cdot R_{ck} + 0.83 \cdot 1.48 s), \text{ cioè: } f_{cm}^* \geq 0.85 \cdot (f_{ck} + 1.23 s),$$

che è differente dalla relazione:

$$f_{cm}^* \geq 0.85 (f_{ck} + 1.48 s), \text{ cioè la (1) che si ottiene dalla UNI EN 13791 in termini di resistenza cilindrica.}$$

Il collaudatore, fatte le sue considerazioni e calcolati i valori in situ e quello di controllo, può riassumere i risultati ottenuti attraverso tabelle, tipo quelle successivamente riportate, sia per le prove distruttive che per quelle non distruttive combinate. Nelle Tabelle successive per semplicità si riportano valori di resistenza cubica (analogamente potrebbero utilizzarsi valori di resistenza cilindrica) e vale la

seguinte simbologia (già usata, in parte, nel precedente paragrafo 6 della presente memoria):

$R_{c,rott}^*$ = resistenza di ogni provino, da carota prelevata in situ;

$R_{c,corr}$ = resistenza allo schiacciamento corretta, da carota prelevata in situ;

R_{cmin}^* = valore più basso tra le resistenze di ogni singolo provino, da carote prelevate in situ;

R_{cm}^* = valore medio tra le resistenze di ogni singolo provino, da carote prelevate in situ;

R_{ck}^* = valore caratteristico tra le resistenze di ogni singolo provino, da carote prelevate in situ;

$R_{ck,ctr}$ = valore della resistenza di controllo, da progetto;

R_{ck} = valore della resistenza caratteristica, da progetto.

area omog.	elem. n.°	data del getto	data della prova	maturaz. [giorni]	D [mm]	H [mm]	H/D	$R_{c,rott}^*$ [MPa]
A1	01	-	-	150	103	108	1.05	49.69
	02	-	-	408	103	203	1.97	49.21
	...	-	-
	n	-	-	285	103	107	1.04	38.64

Tabella 1 – caratteristiche della carote

elem.	$R_{c,rott}^*$ [MPa]	forma c1	dist. c2	mat. c3	c_t	$R_{c,corr}^*$ [MPa]	R_{cmin}^* [MPa]	R_{cm}^* [MPa]	R_{ck}^* [MPa]	$R_{ck,ctr}$ [MPa]	R_{ck} [MPa]
01	49.69	1.01	1.18	0.88	1.05	52.17	<i>minimo tra gli n valori della $R_{c,corr}^*$</i>	<i>media tra gli n valori della $R_{c,corr}^*$</i>	51	31.5	37
02	49.21	1.24	1.18	0.84	1.23	60.52					
...					
n	38.64	1.01	1.18	0.85	1.01	39.03					

Tabella 2 – confronto tra valori per prove distruttive (carote)

area omog.	elem.	sclerom. indice N	Sonreb v [m/s]	Windsor sonda [mm]	(A) Sonreb Win [MPa]	(B) Sonreb [MPa]	(C) Win [MPa]	R_{ck}^* [MPa]	$R_{ck,ctr}$ [MPa]	R_{ck} [MPa]
A3	01	45	3825	2.10	70.47	71.60	69.81	69.68	38.25	45
	02	49	4195	2.20	79.69	80.52	75.54			
			
	n	43	3659	2.11	66.89	67.26	70.29			

Tabella 3 – confronto tra valori per prove non distruttive combinate

7 ULTERIORI CONTROLLI

7.1 COSTANZA DELLA FORNITURA

Nel caso si abbiano getti molto estesi caratterizzati da calcestruzzo di una determinata classe di resistenza, è importante verificare la “costanza” della fornitura anche indipendentemente dalla suddivisione in aree omogenee. Tale controllo potrebbe essere fatto anche dalla direzione dei lavori, specie quando ci siano più fornitori o anche un solo produttore ma il calcestruzzo provenga da centrali ubicate a diverse distanze dal cantiere (come rappresentato nella sottostante Figura).

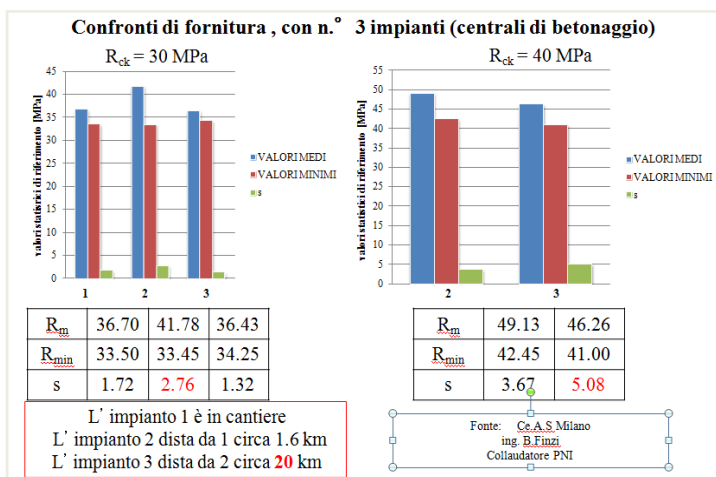


Figura 2 – confronti sulla costanza della fornitura per diversi impianti di betonaggio (fonte: collaudatore, ing. B. Finzi)

In particolare, il collaudatore lo potrebbe far eseguire sulle carote prelevate in situ, mentre il direttore dei lavori potrebbe richiederla sui cubetti prelevati in fase di getto. Il controllo sulla costanza della fornitura è importante nel caso in cui il committente acquisti il calcestruzzo a prestazione garantita (cioè, in tal caso, a resistenza) e non a composizione.

Ad esempio, per una determinata classe di calcestruzzo che si vuole indagare si disponga di un opportuno numero di campioni dai quali ricavare il valore della resistenza allo schiacciamento valutando, in termini statistici, la deviazione standard. Il valore di questa ultima grandezza, è evidente che debba essere contenuto.

Ad esempio, individuando un determinato valore della resistenza di progetto, si disponga di n.° X carote (almeno X = 15) ricavate dalle diverse aree omogenee ed aventi tutte la stessa resistenza di progetto. Le n.° X carote siano caratterizzate dallo stesso tipo di cemento e, ad esempio, da tre diversi mix design (m_d), ad esempio:

- n.° X₁ dal mix design m_{d1};
- n.° X₂ dal mix design m_{d2};
- n.° X₃ dal mix design m_{d3}.

Su tutte le carote siano state eseguite prove a compressione, disponendo quindi dei risultati delle prove.

Tali risultati (cioè i valori delle resistenze ottenuti dai provini) possono essere valutati secondo diverse “distribuzioni” (ad esempio: *Normale*, *Log-Normale*, *Weibull*, *Esponenziale*, *Rayleigh*) ed impiegando diversi stimatori (ad esempio: *massima verosomiglianza*, *corrispondenza dei momenti*, *minimi quadrati*).

Inoltre, per verificare la “bontà” della distribuzione scelta, possono essere utilizzati differenti tests di buon adattamento (ad esempio: *Kolmogrov-Smirnov*, *Anderson-Darling*, *Carmen-Von Mises*). Operativamente, applicando quanto descritto, potrebbe aversi quanto segue:

- si abbiano n.°25 carote, estratte da elementi di $R_{ck,d} = 55$ MPa e caratterizzate da cemento tipo 42.5RII ALL, di cui: n.°17 con m_{d1} , n.°4 con m_{d2} e n.°4 con m_{d3} (ove la nota simbologia);
- si esegua un raggruppamento dei dati in classi di ampiezza adeguata;
- si scelga la distribuzione più verosomigliante ai dati², utilizzando anche l’adattamento grafico (si veda, ad esempio che la migliore sia la distribuzione tipo *Weibull*);
- si stimino i parametri mediante il *metodo della massima verosomiglianza* (massima probabilità di estrarre il campione in esame);
- si esegua il test di buon adattamento, ad esempio *Andersen-Darling* (valido per verificare l’adattamento di un campione ad una distribuzione quando la forma delle code è rilevante, soglia al 5% per rigetto dell’ipotesi iniziale).

Allora, è evidente come la distribuzione normale (Figura 3) mal si adatti all’evento e che, quindi, è necessario utilizzare un altro tipo di distribuzione, ad esempio la Weibull. Utilizzando la Weibull, sottostante Figura 3, si evince che l’evento è in questo caso meglio descritto e che il test di buon adattamento (definito $OSL < 5\%$) viene superato essendo $OSL = 13.40\%$. Ciò significa che il valore di controllo, in questo caso pari a 47 MPa, deve essere confrontato col frattile risultante dalla Weibull (57 MPa), anziché col frattile risultante dalla normale (59 MPa).

² Per le distribuzioni, a titolo di esempio, si ricorda che: la log-normale è impiegata principalmente in finanza, la Weibull è impiegata in prove di rottura fragile e prove a fatica; l’esponenziale (asimmetrica) è impiegata anch’essa in finanza e nella descrizione di decadimenti nucleari; la Rayleigh è impiegata per la velocità del vento.

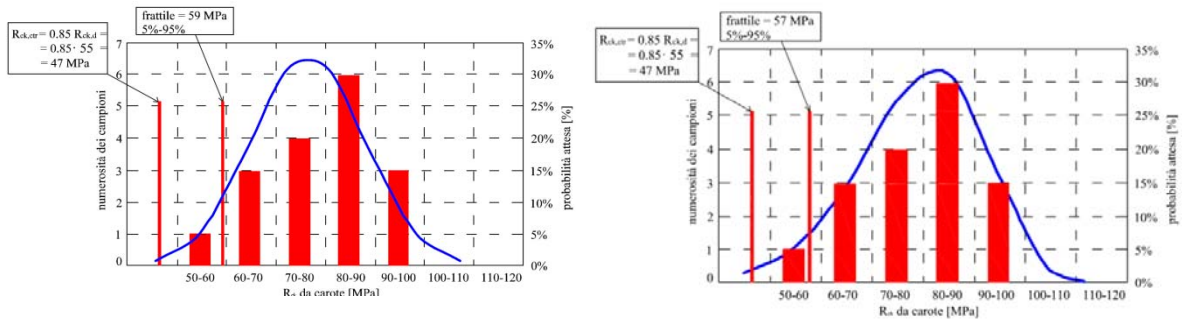


Figura 3 – distribuzioni normale e di Weibull, adattamento all’evento (fonte: attività di collaudo del dott. ing. S. Sgambati)

7.2 MODULO ELASTICO

La determinazione del modulo elastico è fondamentale per le strutture in calcestruzzo armato, in specie se si tratta di alti edifici, poiché ne influenza il comportamento sotto le azioni laterali (sisma e vento). Se dalle prove di modulo risultasse un valore minore di quello di progetto, magari calcolato con le NTC, § 11.2.10.3, dovrebbero essere condotte, a posteriori, nuove analisi numeriche utilizzando i valori delle prove. Per la determinazione del modulo elastico si possono considerare: per il modulo secante a compressione, la UNI 6556 e per il modulo elastico dinamico, la UNI EN 12504 – 4.

Nella valutazione del valore del modulo elastico, si sottolineano alcune divergenze tra la normativa nazionale ed alcune internazionali (ad esempio, le norme inglesi BSI). In particolare, si ha che le NTC forniscono un valore maggiore di quello calcolabile con le BSI 8110-2. Ciò è stato riscontrato anche in una importante attività di collaudo nella quale si è verificato che le BSI 8110-2 hanno fornito valori di modulo più vicini a quelli ottenuti con le prove.

Si veda a riguardo quanto ottenuto per le prove di modulo su provini aventi $R_{ck}= 55$ MPa nelle quali tali valori sono di gran lunga minori di quelli calcolati con le NTC con il valore medio sempre minore di quello calcolabile con le più “restrittive” BSI.

C	16	20	25	28	32	35	40	45	50	55
R_{ck}	20	25	30	35	40	45	50	55	60	67
E_{cm}	28.82	30.20	31.44	32.58	33.64	34.62	35.54	36.41	37.23	38.32

Tabella 4 – valori di modulo elastico in funzione della resistenza (NTC)

R_{ck}	20	25	30	35	40	45	50	55	60	67
E_{BS,max}	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
E_{BS,med}	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
E_{BS,min}	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39

Tabella 5 – valori di modulo elastico in funzione della resistenza (BSI)

n.°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E_m	30.8	39.99	26.91	28.10	27.27	28.77	29.29	29.10	30.52

Tabella 6 – valori medi di modulo elastico ottenuti per un esteso intervento di riqualificazione urbana (resistenza del calcestruzzo, $R_{ck} = 55$ MPa)

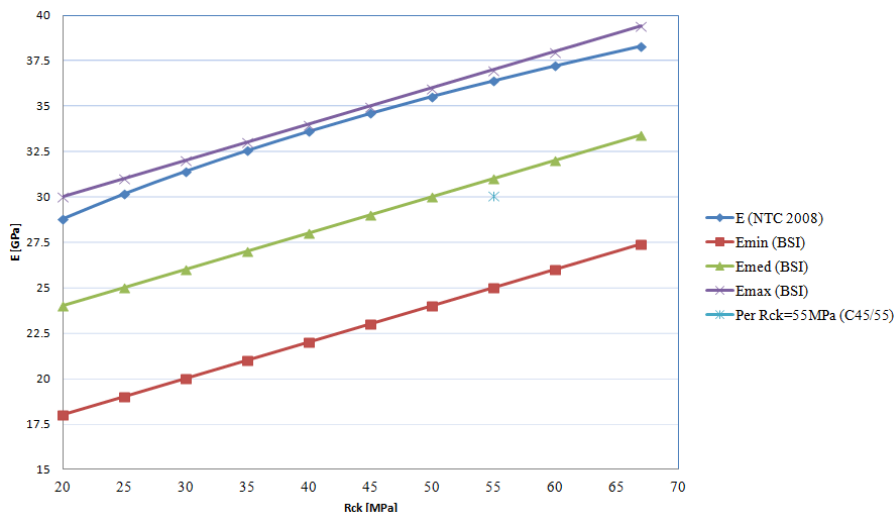


Figura 4 – valutazione del modulo elastico per NTC e BSI (fonte: attività di collaudo del dott. ing. G. Cozzaglio)

8 CONCLUSIONI

In questa memoria sono state descritte le principali tipologie di prove sul calcestruzzo che il collaudatore dovrebbe far svolgere in una campagna di accertamento del calcestruzzo in situ, sottolineando che il valore della resistenza in situ non è univoco poiché ricavato dal collaudatore a sua discrezione, essendo egli a decidere: quante e quali prove far svolgere, come combinare i risultati ottenuti da tali prove (distruttive e non distruttive) e quali coefficienti di correzione considerare.

Nella memoria sono state approfondite le tematiche legate alle modalità delle prove e le possibili correlazioni dei relativi risultati, sottolineando altresì come sia possibile confrontare il valore della resistenza “potenziale” con il valore di controllo indicato nelle diverse normative (nazionale e internazionali) e/o nelle Linee Guida. Tutto ciò è stato illustrato con riferimento ad una procedura di accertamento che rappresenta un protocollo che il collaudatore potrebbe osservare nella definizione del valore della resistenza in situ. Inoltre, sono stati affrontati temi legati al collaudo di opere in calcestruzzo particolarmente estese e/o caratterizzate da rilevanti opere strutturali quali: approfondimenti statistici relativi alla costanza della fornitura di una classe di resistenza, e valutazione del modulo elastico.

9 BIBLIOGRAFIA

- [1] D.M. 14/01/2008 – Norme Tecniche per le Costruzioni e Circolare n.°617/2009 – Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14/01/2008;
- [2] UNI EN 13791;
- [3] Linee Guida del Consiglio Superiore dei LL.PP 2008;
- [4] BSI 8110 2 – Structural use of concrete;
- [5] Malhotra V.M., Carino N.J., CRC Handbook on nondestructive testing of Concrete;
- [6] Romeu J.L. - Empirical assesment of Weibull distribution;
- [7] Romeu J.L., Greithleil C. - A practical guide to statistical analysis of material property data;
- [8] Anderson-Darling: A goodness of fit test for small samples assumptions, vol.10 n.° 5 Selected topics in assurance related technologies;
- [9] De Lucia T., Miranda M., Basile A., Formisano A. - Confronto teorico-sperimentale per il calcolo della resistenza in situ dei calcestruzzi: primi risultati.