

# **PRESTAZIONI, ACCETTAZIONE E NORME DI PRODOTTO IL CASO DEL CALCESTRUZZO**

**G. Silvestro<sup>1</sup>, N. Longarini<sup>2</sup>, P. Crespi<sup>3</sup>, N. Giordano<sup>2</sup>, M. Zucca<sup>2</sup>**

1 Ingegnere Civile, Libero professionista, Melfi.

2 Consorzio CIS-E, Politecnico di Milano.

3 Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano

## **SOMMARIO**

Le norme vigenti in materia di prestazioni (identificazione e qualificazione) ed accettazione dei materiali da costruzione sono un tema di particolare interesse per i professionisti che al giorno d'oggi nelle diverse vesti di Progettisti, Direttori dei lavori o Collaudatori, si trovano a dover gestire il cantiere per la costruzione di una nuova opera.

Questo tema è trattato con riferimento al materiale calcestruzzo, considerandone gli aspetti legati alle fasi di selezione del prodotto, di accettazione, di controllo delle procedure di posa in opera e della successiva verifica di esecuzione a regola d'arte. Infatti, durante la costruzione di un'opera, sono diverse le figure che partecipano con precise responsabilità alla definizione della conformità dei materiali, secondo un filo logico che emerge chiaramente attraverso un'attenta lettura dei disposti normativi.

Nel caso in questione, infatti, accanto alla figura del Progettista, cui spetta l'onere di definire le prestazioni di progetto dei materiali, del Direttore dei Lavori, che ha l'obbligo di provvedere all'accettazione del prodotto sia prima dell'inizio che durante i lavori e del Collaudatore, al quale è demandato il controllo di quanto prescritto per le opere, compare anche il Produttore del calcestruzzo che deve obbligatoriamente provvedere ad identificare e qualificare i propri prodotti prima di immetterli sul mercato, anche alla luce dell'obbligo di certificazione del processo produttivo.

La memoria chiarisce anche i principali compiti e procedure che spettano alle diverse figure in gioco mostrando alcuni esempi di applicazioni pratiche da espletare durante queste attività.

## **PERFORMANCES, ACCEPTANCE AND STANDARDS: CASE OF CONCRETE**

## **SUMMARY**

Nowadays, technical standards for concrete performance (identification and qualification) and acceptance of materials for the building construction are topics of particular interest to professionals with different roles such as Designers, Construction Managers or Testers, who have to manage tasks for construction of a new engineering work.

This subject is discussed with reference to the concrete, considering aspects related to stages of product selection, acceptance, control of procedures for casting and the subsequent checking of performance in a workmanlike manner. In fact, during the construction, there are several professionals involved with specific responsibilities into the setting of the compliance of materials, according to a logic, which emerges clearly through careful reading of standards.

In this case, next to the figure of the Designer, who has to define the performance of materials, the Construction Manager, who has to provide for checking and acceptance of product as before the start as during the work and the Static Tester, who is responsible for final checking about the requirements of works, there is also the Manufacturer who has to identify and describe their products before placing them in the market, as ruled by certification of factory production control.

Furthermore, this paper clarifies main tasks and procedures, which pertain to the various professionals, showing some simple procedures that can be used during these activities.

## 1. IL RUOLO DEL PROGETTISTA

Al progettista delle opere spetta inderogabilmente la definizione delle prestazioni fondamentali dei materiali e, in particolare per quanto riguarda il calcestruzzo, in termini almeno di durabilità, resistenza, lavorabilità e diametro massimo degli aggregati, come ribadito dalle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14/1/2008 (paragrafo 11.2.1, commi 1 e 3).

In questo ambito, la prescrizione di durabilità è volutamente posta quale prima nell'ordine, viste le correlazioni con la vita utile della struttura, e con la definizione delle azioni insistenti su di essa. Questa è correlata anche con la resistenza visti i valori di rapporto acqua/legante e di resistenza previsti dalla norma UNI EN 206-1:2006.

Inoltre, per quanto concerne il diametro massimo degli aggregati, questo viene ad essere imposto a seguito delle scelte operate dal progettista in merito agli spessori di copriferro, e quindi ancora in merito alla prescrizioni di durabilità, ma anche in relazione alle distanze d'interferro risultanti dal dimensionamento delle armature longitudinali.

## 2. IL RUOLO DEL PRODUTTORE

### 2.1 Implementazione e certificazione del sistema di controllo del ciclo produttivo

La possibilità che un generico Produttore di conglomerati cementizi possa immettere sul mercato i propri prodotti è oggi vincolata all'implementazione da parte dello stesso di un sistema di controllo del ciclo produttivo certificato da un ente terzo.

Questa metodologia di lavoro, resa cogente dalle attuali Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al più volte citato DM 14 gennaio 2008, trova il suo fondamento già a partire dalla Direttiva CE 89/106 sui "prodotti da costruzione" e nel successivo DPR n°246/1993 di attuazione nella legislazione italiana. Il recepimento di questa Direttiva ha dato il via al recepimento di una serie di norme di prodotto armonizzate a livello comunitario tra cui la UNI EN 206-1 oppure la UNI 11104:2004 (che sostituivano la UNI 9858:1991), riportanti i criteri di classificazione, produzione e di conformità del "prodotto" calcestruzzo.

A livello nazionale, però, oltre agli standard UNI armonizzati esistono anche le Linee Guida per il calcestruzzo preconfezionato, emesse dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, le quali contengono anche prescrizioni circa la classificazione, la produzione e conformità dello stesso.

|                     | 1971                   | ... | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|---------------------|------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Norme<br>Cogenti    | Legge 1086/71          |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                     | D.M. 9.1.96            |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                     | D.M. 14.1.08           |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Norme<br>Volontarie | UNI 9858:91            |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                     | UNI 206-1:2001         |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                     | UNI 206-1:2006         |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                     | UNI 11104:2004         |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                     | Linee Guida C.S.L.P.P. |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

Figura 1: Evoluzione temporale della normativa cogente e volontaria in materia.

All'interno di questo quadro normativo, è doveroso segnalare che sia le norme armonizzate UNI quanto le citate Linee Guida, sono da intendersi soltanto quali "utile riferimento", tali cioè da fornire uno strumento di lavoro utile ad implementare un sistema certificato di controllo del ciclo produttivo che sia in grado di fornire informazioni e, di riflesso, una maggiore sicurezza sulla caratteristiche dei prodotti stessi.

Sulla base di queste prescrizioni, il Produttore dovrà prima di tutto identificare, cioè classificare, i propri prodotti scegliendo tra le due principali famiglie di prodotti, i calcestruzzi a "prestazione garantita" o a "composizione richiesta", per poi procedere con la qualificazione degli stessi, cioè alla definizione delle prestazioni fornite.

Ovviamente, a valle di queste fasi sarà responsabilità del solo Produttore monitorare la produzione in modo da mantenere nel tempo le caratteristiche dichiarate per il prodotto stesso. Il monitoraggio delle prestazioni fornite nel tempo può essere eseguito e controllato mediante la predisposizione di un'apposita carta di controllo della prestazione, sul modello della "carta di controllo di Shewhart" (Figura 2).

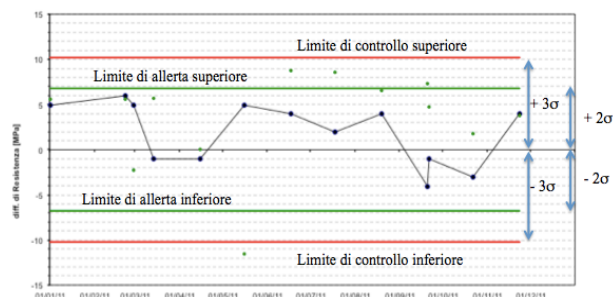


Figura 2: Carta di controllo di Shewhart.

Questo strumento permette di riportare in maniera grafica l'andamento nel tempo di un determinato parametro (ad esempio la differenza tra il valore atteso ed il valore nominale di resistenza cubica del calcestruzzo) in modo da valutarne lo scostamento rispetto al target all'interno di due ranges di valori rappresentati rispettivamente un "limite di allerta", superato il quale in maniera continuativa occorre prendere provvedimenti per continuare a controllare il ciclo di produzione, ed un "limite di controllo", superato il quale è posto immediatamente a rischio il controllo della produzione stessa. I limiti qui introdotti, sulla scorta della Teoria di Shewart, sono definiti sulla base dello scarto quadratico medio della produzione ( $\sigma$ ) e valgono rispettivamente  $\pm 2\sigma$  per il limite di allerta e  $\pm 3\sigma$  per il limite di controllo.

### 2.2 Identificazione dei prodotti (classificazione)

La classificazione dei prodotti non può prescindere dalla principale differenziazione tra calcestruzzi a "prestazione garantita" o a "composizione richiesta". Nel primo caso, infatti, il Produttore garantisce le prestazioni (ad esempio quelle individuate dal Progettista: resistenza, lavorabilità, classe di esposizione) che il prodotto avrà se messo in opera correttamente, lasciandosi agibilità operativa per variane la composizione.

Tabella 1: Prescrizioni per la stampa sul Documento di Trasporto per forniture di calcestruzzi a prestazione garantita.

| CALCESTRUZZI A PRESTAZIONE GARANTITA  |
|---|
| Classe di resistenza<br>Classe di esposizione ambientale<br>Classe di contenuto di cloruri<br>Dimensione max. dell'aggregato<br>Classe di consistenza<br><br>Se richiesto:<br>- valore minimo di composizione<br>- tipo e classe di resistenza del cemento<br>- tipo di additivo e aggiunte<br>- proprietà speciali |

Nel secondo caso, ossia per i calcestruzzi a "composizione richiesta", il Produttore garantirà la composizione del

prodotto, eventualmente richiestagli dal Cliente senza fornire alcuna ulteriore garanzia sulle prestazioni ottenibili.

Tabella 2: Prescrizioni per la stampa sul Documento di Trasporto per forniture di calcestruzzi a composizione richiesta.

| CALCESTRUZZI A COMPOSIZIONE RICHIESTA   |
|---|
| Dettagli sulla composizione<br>- contenuto di cemento<br>- tipo di additivo<br>- rapporto a/c<br>- classe di consistenza<br>- dimensione max dell'aggregato |

Sul tema della distinzione tra le due principali tipologie di calcestruzzi, la Norma UNI EN 206-1 si spinge ad identificare con certezza le prescrizioni da riportare sui documenti di consegna per due le diverse tipologie di prodotti (Tabelle 1 e 2). Da queste emerge quanto indicato in precedenza, per i calcestruzzi a “prestazione garantita” i dettagli sulla composizione non sono necessari contrariamente a quanto previsto per quelli a “composizione richiesta”.

In questo solco si inseriscono le Norme Tecniche per le Costruzioni che, al paragrafo 11.2.3, laddove prescrivono l'esecuzione di prove preliminari alla realizzazione delle opere, prevedono di verificare la capacità di ottenere le “prestazioni richieste”, lasciando quindi una palese preferenza sull'impiego di calcestruzzi a prestazione.

La classificazione secondo le prestazioni principali prevede, quindi, che il Produttore fornisca per il proprio prodotto indicazioni su: resistenza, esposizione ambientale (durabilità) contenuti di cloruri, diametro massimo dell'aggregato e lavorabilità.

Diversamente, per quanto riguarda i prodotti a composizione richiesta la principale prescrizione dovrà essere il dettaglio della composizione, come ad esempio il contenuto di cemento, il tipo di cemento, il rapporto acqua/legnate, la dimensione massima dell'aggregato e, eventualmente, il contenuto di filler.

### 2.3 Qualificazione dei prodotti

La qualificazione dei prodotti è una procedura che non è soltanto precedente all'immissione sul mercato dei prodotti stessi ma continua nel tempo monitorandone nel tempo le prestazioni e, pertanto, non è per nulla assimilabile alla “valutazione preliminare della resistenza” di cui al paragrafo 11.2.3 delle Norme Tecniche, in precedenza citato.

Per la definizione di queste procedure di qualificazione dei prodotti si trova un utile riferimento sia nella Norma UNI EN 206-1 che nelle Linee Guida per il calcestruzzo preconfezionato. Queste passano necessariamente per l'esecuzione di prove sui prodotti.

Ovviamente, Norme e Linee Guida considerano come prestazione principale la classe di resistenza ma non trascurano di citarne altre.

Attenendosi all'ambito della prestazione di resistenza, la Norma UNI EN 206-1 (paragrafo 8.2) parla propriamente di “conformità” prevedendo una fase di “produzione iniziale”, definita come tale sino al raggiungimento di 35 risultati di prova suddivisi in 3 campioni sui primi 50 metri cubi di produzione e successivamente 1 campione ogni 150 metri cubi prodotti (e comunque uno per giorno di produzione) o ogni 200 metri cubi prodotti (e comunque uno per settimana di produzione) a seconda che la produzione avvenga in mancanza o in presenza di una certificazione del processo di produzione (FPC) oppure no. Successivamente ai 35 risultati di campionamento, la Norma UNI definisce anche di una fase di “produzione continua”, quindi intendendo su produzioni già avviate e successive ai 50 metri cubi, in cui occorre

monitorare il mantenimento delle prestazioni attraverso l'esecuzione di 1 campione ogni 400 metri cubi prodotti e comunque uno per settimana di produzione.

La norma prevede, quindi, un controllo di tipo statistico sulla produzione al fine di qualificare e mantenere le prestazioni identificate dal Produttore (Tabella 3).

Tabella 3: Prescrizioni per il Produttore circa la frequenza minima di campionamento, secondo due diversi standard, utili per l'implementazione di un sistema di controllo del ciclo produttivo.

| UNI EN 206-1:2006<br>prospetto 13   |                          |   |  | Linee Guida<br>C. S. LL.PP.<br>prospetto 4        |
|---|--------------------------|---|--|---|
|   | 0 a<br>50 m <sup>3</sup> | superiore ai 50 m <sup>3</sup> <sup>(1)</sup>   |  |   |
|   |                          | con FPC   | senza FPC  |   |
| produzione iniziale <sup>(2)</sup>  | 3<br>campioni            | 1 campione<br>ogni 200 m <sup>3</sup><br>oppure<br>2 per ogni<br>settimana di<br>produzione | 1 campione<br>ogni 150 m <sup>3</sup><br>oppure<br>2 per ogni<br>giorno di<br>produzione | 2 cubetti ogni<br>1000 m <sup>3</sup><br>prodotti |
| produzione continua <sup>(3)</sup>  | /                        | 1 campione<br>ogni 400 m <sup>3</sup><br>oppure<br>1 per ogni<br>settimana di<br>produzione |  |   |
| <b>Note:</b><br><sup>(1)</sup> Campionamento nel corso della produzione e al massimo 1 ogni 25 m <sup>3</sup> .<br><sup>(2)</sup> Fino al raggiungimento di almeno 35 risultati di prelievo.<br><sup>(3)</sup> Da impiegarsi al superamento dei 35 risultati di prelievo. Qualora lo scarso tipo “o” degli ultimi 15 risultati di prelievo superi il valore 1,37σ, per i successivi 35 risultati la frequenza di campionamento deve essere aumentata a quella per la produzione iniziale. |                          |   |  |   |

Il rispetto delle prescrizioni sulla conformità dovrà avvenire verificando per il valore medio ( $f_{cm}$ ) e per ogni singolo risultato ( $f_{ci}$ ) che:

$$\begin{aligned} f_{cm} &> f_{ck} + 4 \\ f_{ci} &> f_{ck} - 4 \end{aligned} \quad (1)$$

nel caso in cui il numero di campioni sia pari ad almeno 3, mentre nel caso sia almeno pari a 15 si avrà un controllo di tipo pienamente statistico del tipo:

$$\begin{aligned} f_{cm} &> f_{ck} + 1,48 \cdot \sigma \\ f_{ci} &> f_{ck} - 4 \end{aligned} \quad (2)$$

Dal canto loro, le Linee Guida per il calcestruzzo preconfezionato, nel prospetto 4, riconoscono esplicitamente la necessità di un controllo di tipo statistico sulla produzione e definiscono come compito del Produttore la qualifica del prodotto al fine di “dare evidenza che le proprietà specificate sono ottenute con un margine adeguato dal calcestruzzo proposto” prima di impiegare un prodotto di “nuova formulazione”. Inoltre, richiedendo anch'esse il monitoraggio continuo delle prestazioni del prodotto, tra cui naturalmente anche la prestazione di resistenza, indicano l'esecuzione di almeno due cubetti ogni 1000 metri cubi prodotti.

Tutte queste procedure devono necessariamente trovare una loro sintesi in un documento predisposto dal Produttore stesso che rappresenta un vero e proprio “dossier di qualifica” contenente tutte le informazioni necessarie su materie prime, strumentazioni ed anche, volendo, sull'evoluzione temporale delle prestazioni attraverso la già citata carta di controllo di Shewart (Figura 2).

### 3. IL RUOLO DEL DIRETTORE DI LAVORI

La figura del Direttore dei lavori, prevista sin dagli albori della normativa nazionale in materia di disciplina delle opere in calcestruzzo armato (L. 1086/71), rimane di primaria importanza anche all'interno delle attuali Norme Tecniche. A questi, in concorso con il Costruttore e ciascuno per la parte di

competenza, è affidata la responsabilità della rispondenza dell'opera al progetto, dell'osservanza delle prescrizioni d'esecuzione del progetto stesso, della qualità dei materiali impiegati, nonché, per quanto riguarda gli elementi prefabbricati, della posa in opera (D.P.R. 380/2000 art. 64, comma 5).

In relazione alla qualità dei materiali impiegati, e nel caso di specie del calcestruzzo, il Direttore dei lavori dovrà procedere ai sensi delle Norme Tecniche per le costruzioni all'accettazione dei prodotti mediante l'acquisizione delle certificazioni di qualificazione svolte dal produttore nonché all'esecuzione di eventuali prove di accettazione.

Per questo, il Direttore dei Lavori dovrà procedere all'accettazione del prodotto prima dell'inizio dei lavori e, successivamente, durante l'esecuzione dei lavori stessi.

### 3.1 Accettazione prima dell'inizio dei lavori

La procedura di accettazione prima dell'inizio dei lavori è in gergo definita come *"qualificazione"*. Dall'esame della normativa vigente fin qui svolto, appare chiaro che il termine non è del tutto appropriato perché fuorviante in quanto finirebbe per attribuire al Direttore dei lavori una responsabilità che non è sua ma del Produttore del materiale.

Infatti, in questo ambito, le Norme Tecniche si limitano a riportare la necessità di eseguire una *"valutazione preliminare della resistenza"* prima dell'inizio dei getti, al fine di valutare il prodotto che sarà impiegato (paragrafo 11.2.2). La Norma esplicita che tale prodotto andrà verificato attraverso la sua prestazione fondamentale, la resistenza caratteristica (quindi in termini di  $R_{ck}$  o di  $f_{ck}$ ). La Norma in questo modo esplicita un meccanismo di predilezione nei confronti del calcestruzzo a *"prestazione garantita"*.

A questo punto, però, il Direttore dei lavori per assolvere alle prescrizioni di Norma potrebbe percorrere due strade: procedere all'esecuzione di prove preliminari oppure potrebbe decidere di accettare il prodotto sulla base del *"dossier di qualifica"* che è nella responsabilità del Produttore.

La prima strada è la più nota e praticata ma la meno ricca d'informazioni. Questo perché tali prove sono il risultato univoco di una misurazione in un dato istante, con determinate materie prime e determinate condizioni ambientali.

Diversamente, l'accettazione del *"dossier di qualifica"* presentato dal Produttore comporta l'acquisizione di una popolazione statistica di risultati decisamente più ricca di informazioni tra le quali la variazione nel tempo delle prestazioni permettendo di valutare la stabilità del ciclo produttivo del materiale che si sta accettando.

### 3.2 Accettazione in corso di fornitura

Questa fase si articola essenzialmente nei cosiddetti controlli di accettazione. Questi possono essere di tipo A e di tipo B. (NTC08 paragrafi 11.2.2 e 11.2.5).

In aggiunta a tutto quanto appena esposto, il Direttore dei lavori con l'attuale normativa ha uno strumento ulteriore che può aumentare la confidenza nei risultati dei suoi controlli: il controllo del ciclo produttivo implementato dal fornitore del calcestruzzo. Queste procedure, validate da organismi certificatori terzi, permettono, se raffrontate ai risultati del controllo di accettazione, di rafforzarne i risultati o di individuare responsabilità del Produttore o del Costruttore, rispettivamente per carenze del prodotto o di messa in opera. Questo fornisce indubbiamente validi spunti anche per la risoluzione dei contenziosi.

## 4. IL RUOLO DEL COLLAUDATORE

Nel capitolo 9 delle NTC 2008, si dichiara l'obbligo del collaudo in corso d'opera e finale dal momento che *"le opere non possono essere messe in esercizio prima dell'effettuazione del collaudo statico"* e si evidenzia che *"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"*.

Dalla Legge n.°1086/71 – Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso, ed a struttura metallica", "Legge n.°64/74 – Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche" e "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 attività di controllo e di esame (tra le quali: *"[...]controllare quanto prescritto in materia dalla normativa in essere; [...] ispezionare l'opera nelle varie fasi costruttive 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 sono potenzialmente integrabili con *"accertamenti, studi, indagini, sperimentazioni e ricerche utili"* ai fini della *"[...]collaudabilità delle opere"*.

Pertanto, stando alle norme cogenti, il Collaudatore può a sua discrezione eseguire prove di carico e prove sui materiali in opera, essendo esse a sua discrezione poiché da compiersi *"ove ritenute necessarie"* (NTC 2008). Per gli autori appare inammissibile sottoscrivere un certificato di collaudo strutturale senza aver compiuto le necessarie indagini e prove specie se le strutture da collaudare caratterizzano un edificio strategico o particolarmente rappresentativo, per forma e geometria, per soluzione strutturale adottata (ad esempio se in struttura portante in calcestruzzo fibro-rinforzato, soluzione perseguita in alcuni importanti interventi di riqualificazione) o anche per ardite soluzioni architettoniche (ad esempio importanti sbalzi, dell'ordine di 3 metri).

Tra l'altro, per i casi appena citati, si ritiene che debbano essere valutate le prestazioni dell'edificio, sia attraverso una accurata campagna di prove sulle strutture, sia eseguendo le prove di carico statico sui solai, nonché approfondendo il comportamento strutturale con analisi e controlli di tipo dinamico (ad esempio prove *"snap back"* sui solai) ad integrazione di quelli statici. Addirittura, nel caso del collaudo di un alto edificio, risulta fondamentale eseguire prove di laboratorio su carote di calcestruzzo atte a determinare il valore del modulo elastico (parametro fondamentale per la risposta della struttura sotto vento e sisma) e prove di caratterizzazione dinamica per la stima dei modi di vibrare (i cui valori debbono essere confrontati con quelli ottenuti nel modello numerico ad elementi finiti (FEM) *"as built"*).

Quindi, si ritiene che su qualsiasi edificio da collaudare, le indagini sul 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).

Le principali normative volontaristiche alle quali riferirsi la normativa cogente indica *"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.”, ma sarebbe bene confrontarsi anche con quanto riportato nella letteratura di riferimento ed alla UNI EN 13791, in specie per quanto riguarda l'interpretazione, l'eventuale correzione e la correlazione dei risultati derivanti dalle prove (non distruttive e distruttive).

## 5. PROVE SUL CALCESTRUZZO INDURITO

### 5.1 Prove non distruttive

Tra le prove non distruttive, la più immediata è quella sclerometrica, la quale si basa sulla misura dell'indice di rimbalzo dello sclerometro; l'indice è influenzato principalmente dalle condizioni locali del punto d'impatto (umidità del calcestruzzo in superficie, presenza di uno strato superficiale carbonato), dalla inclinazione dello strumento rispetto alla verticale e dalla tipologia (dimensioni e natura) degli aggregati. Pertanto, per la prova sclerometrica si dovrebbe eseguire un opportuno numero di battute all'interno della zona di misura (griglia da tracciare nell'intorno del punto considerato), facendo attenzione a mantenere lo sclerometro perpendicolarmente all'elemento strutturale (se ciò non accadesse perché non fosse possibile bisognerebbe segnare l'angolo d'inclinazione ed in base ad esso modificare il valore ottenuto). Eseguite le misure è importante calcolare il valore medio degli indici di rimbalzo  $N$  e decidere o meno se accettare il risultato il quale potrebbe essere potenzialmente valido se (perché è a discrezione del collaudatore) almeno l'80% dei valori non è “distante” dal valore medio per più di 6 unità.

Una seconda tipologia di prova è la cosiddetta sonica, la quale si basa sulla misura della velocità di propagazione di onde elastiche nel calcestruzzo. La velocità viene determinata come rapporto tra la distanza trasmettitore/ricevitore ed il tempo impiegato a percorrerla. Anche in questo caso bisogna tenere in conto che la prova è influenzata dal contenuto d'umidità, dalla composizione della miscela e dal grado di maturazione. Ma, soprattutto, è bene ricordare che la stima della velocità è influenzata in maniera importante dalla presenza di eventuali vuoti e/o fessure interne, i quali aumentano la distanza trasmettitore/ricevitore, e dalla possibile presenza di armature, le quali dovranno essere preventivamente localizzate tramite pacometro. Pertanto, per la prova sonica (individuata la zona di misura, pulita la superficie e posizionati i punti di misura) le misure dovrebbero essere eseguite in numero opportuno (ad es., n.10 per ogni zona, verificando l'omogeneità dei valori di velocità ( $\Delta v_{\max} = 200 \div 300$  m/s) e quindi il valore medio della velocità. Si ritiene che la prova sarebbe da ripetere se la velocità di trasmissione  $v$  risultasse  $v > 4800$  m/s oppure  $v < 2500$  m/s, con  $v$  calcolabile secondo la seguente relazione:

$$v = 1 / [T - (T_1 - T_0)], \quad (3)$$

ove:  $l$  rappresenta la lunghezza della base di misura,  $T$  rappresenta il tempo di propagazione trasmettitore-ricevitore;  $T_1$  è il tempo di percorrenza del prisma metallico di taratura e  $T_0$  è il tempo di percorrenza del prisma secondo il fabbricatore.

Una terza tipologia di prova è la sonda Windsor, la quale si basa sulla misura della profondità di penetrazione nel calcestruzzo di un'asta d'acciaio (sonda) da infiggere nel calcestruzzo con energia prestabilita. La prova è influenzata in particolar modo dalla durezza e dalla resistenza degli aggregati, ma anche dalla scabrezza e dalla carbonatazione della superficie dell'elemento. Pertanto, per la prova con sonda Windsor, individuata la zona e scelti i punti d'infissione (previo controllo pacometrico), dovrebbero eseguirsi almeno n.3 colpi (perpendicolarmente alla superficie “piana” di calcestruzzo attorno alla sonda) e misurata la lunghezza della sonda fuoriuscente dal calcestruzzo.

Successivamente, calcolata la differenza  $\Delta_{M-m}$  tra il valore massimo ed il minimo, ricordando che il risultato della prova potrebbe essere potenzialmente accettabile se  $\Delta_{M-m} < 8$  mm; in caso ciò non si verificasse ( $\Delta_{M-m} > 8$  mm) si dovrebbe ripetere una quarta infissione il cui risultato, se rispetta il citato criterio d'accettabilità di  $\Delta_{M-m}$ , sostituisce il valore più distante dalla media (altrimenti si dovrebbe ripetere l'intera prova in una zona adiacente).

### 5.2 Prove distruttive

Le prove distruttive su campioni (di forma cilindrica) provenienti di carote estratte dal calcestruzzo rappresentano il metodo d'indagine più diretto ed affidabile. Per l'estrazione dei campioni si utilizza l'apposita macchina carotatrice dotata di corona diamantata; tale macchina, durante l'estrazione, dovrebbe essere ben ancorata in modo che, avanzando nell'estrazione, non vi siano forti vibrazioni sulla macchina le quali porterebbero a rovinare il campione. Infatti, i campioni di calcestruzzo dovrebbero avere un diametro costante ed un asse rettilineo, infatti se ciò non si verificasse si avrebbe un apparente decremento della resistenza meccanica (ancor più marcato nel caso in cui la carota è prelevata perpendicolarmente a quella del getto).

Le norme volontaristiche che trattano le avvertenze relative ai campioni ed alle modalità di prova sono la UNI EN 12390-1+3 e la UNI EN 12504-1; da esse e dalla letteratura di riferimento si ricorda che, per operare nel miglior modo possibile e ricondursi al potenziale valore caratteristico sarebbe meglio che il diametro delle carote sia superiore di almeno tre volte al diametro massimo degli inerti (e mai minore a 100 mm). Ciò perché, essendo la resistenza legata al rapporto  $D/d_c$  (con  $D$  pari al diametro della carota e  $d$  pari alla dimensione massima dell'inerte), se esso diminuisce si avrebbe un aumento della dispersione dei risultati (dovuto alla distribuzione casuale degli inerti); tra l'altro, alcuni piccoli inerti, o frantumi di essi, potrebbero distaccarsi dalla superficie laterale indebolendo la sezione della carota in maniera più marcata tanto più il suo diametro è contenuto.

Nelle precedenti norme ed in letteratura si riporta anche che nei campioni non devono essere contenuti spezzoni d'armatura quali alterano i risultati della prova a rottura per diversi motivi. Tra essi si ricorda che le carote con spezzoni disposti nella direzione di compressione non offrono risultati attendibili e che, allo stesso tempo, carote con spezzoni di armatura in direzione ortogonale alla compressione subiscono una diminuzione (difficilmente quantificabile) nella stima della resistenza misurata; inoltre, il rapporto altezza/diametro ( $H/D$ ) dei provini dovrebbe essere pari a 2 (o comunque, potrebbero essere prelevati campioni aventi  $H/D=3$  e, scartando eventuali parti contenenti barre qualora le zone di prelievo fossero piuttosto “congestionate”, si arriverebbe ad  $H/D = 2$  rettificando, anche, le superfici su cui applicare il carico), le prove di compressione dovrebbero essere eseguite su provini umidi ed effettuate su campioni dei quali si è preventivamente verificata la planarità e l'ortogonalità delle superfici d'appoggio.

Un parametro da considerare nella stima della resistenza è l'età del calcestruzzo, cioè il suo grado di maturazione. In merito, si può fare riferimento alle curve rappresentanti l'incremento della resistenza in funzione dell'età del getto. Le curve sono descritte dalla seguente relazione:

$$f_c(28) / f_c(t) = \exp \{s \cdot [(28/t)^{0.5} - 1]\}, \quad (4)$$

dove  $f_c(28)$  = 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. Tale curva, è importante, non può essere

usata in maniera retroattiva per giustificare una non conformità a 28 giorni.

### 5.3 Calibratura tra le prove non distruttive e distruttive

I risultati delle prove non distruttive e distruttive (queste ultime da intendersi come prove per determinare la resistenza allo schiacciamento,  $R_c$ ) possono essere combinati in modo opportuno al fine d'individuare il valore potenziale della resistenza in sito. Per la calibratura delle prove non distruttive sulla base dei risultati delle prove di schiacciamento 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,  $R_c = a \cdot Nb$ , dove:  $N$  = indice di rimbalzo;
- per la Sonica,  $R_c = a \cdot \exp bV$ , dove:  $V$  = velocità di propagazione;
- per la Windsor,  $R_c = a + bL$ , dove:  $L$  = profondità d'infissione.

Sostanzialmente, la resistenza del calcestruzzo può essere desunta da ogni tipo di prova (se svolta singolarmente) o dalla combinazione delle diverse tipologie di prove. In questo ultimo caso la resistenza a compressione, in base alla combinazione fra le prove prescelte, può essere funzione dell'indice di rimbalzo, della velocità ultrasonica e/o della lunghezza esposta della sonda Windsor. Per esempio, effettuando le combinazioni I), II) e III) definite come segue:

- I) Sclerometro + Sonica + Windsor (pedici: Sc, S, W);
- II) Sclerometro + Sonica (pedici: Sc e S, anche detta in inglese SonReb);
- III) Windsor (pedice: W).

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

$$\begin{aligned} \text{per I)} \quad R_c (Sc-S-W) &= a_1 \cdot I_{rm}^{b_1} \cdot V_{1s}^{c_1} \cdot L_e^{d_1}; \\ \text{per II)} \quad R_c (Sc-S) &= a_2 \cdot I_{rm}^{b_2} \cdot V_{1s}^{c_2}; \\ \text{per III)} \quad R_c (W) &= a_3 + d_3 \cdot L_e; \end{aligned}$$

nelle quali:  $R_c$  = 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;  $V_{1s}$  = velocità ultrasonica longitudinale;  $L_e$  = lunghezza esposta della sonda Windsor. Tra l'altro si ricorda che in letteratura si possono trovare i valori delle suddette costanti, ad esempio nel caso di prove sclerometriche e Sonreb possono aversi:

$$R_c (Sc-S) = a_2 \cdot I_{rm}^{b_2} \cdot V_{1s}^{c_2} \quad (5)$$

nella quel ponendo:  $a_2 = \alpha \cdot \delta$  (con  $\alpha$  = indice di taratura e  $\delta$  = modulo di Poisson);  $I_{rm}$  valore medio degli indici di rimbalzo e  $V$  = velocità ultrasonica di attraversamento, si ritrovano le seguenti formulazioni:

$$\begin{aligned} R_c (Sc-S) &= \alpha \cdot 7.695 \cdot 10^{-10} \cdot I_{rm}^{1.450} \cdot V_{1s}^{2.58} \quad (\text{Rilem, '93}); \\ R_c (Sc-S) &= \alpha \cdot 6.693 \cdot 10^{-7} \cdot I_{rm}^{1.246} \cdot V_{1s}^{1.85} \quad (\text{Gasparik, '92}); \\ R_c (Sc-S) &= \alpha \cdot 9.964 \cdot 10^{-9} \cdot I_{rm}^{1.058} \cdot V_{1s}^{2.44} \quad (\text{Di Leo Pascale, '94}) \end{aligned}$$

Il limite di tali formulazioni risiederebbe nel valore dell'indice di taratura  $\alpha$ ; 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  $\alpha$  invertendo le formule da loro rispettivamente proposte (vedesi anche letteratura di riferimento). E' quindi possibile combinare i due metodi (sclerometro e Sonica) utilizzando curve dette di "iso-resistenza", ricavate per un calcestruzzo definito standard e descritte dalle due sottostanti relazioni:

$$\begin{aligned} - \quad R_c (Sc-S) &= 7.695 \cdot 10^{-10} \cdot I_{rm}^{1.450} \cdot V_{1s}^{2.58}, \\ &\quad (\text{con } R_c \text{ in } [daN/cm^2] \text{ e } V \text{ in } [m/s]); \\ - \quad R_c (Sc-S) &= 0.0286 \cdot I_{rm}^{1.246} \cdot V_{1s}^{1.85}, \\ &\quad (\text{con } R_c \text{ in } [N/mm^2] \text{ e } V \text{ in } [km/s]); \\ - \quad R_c (Sc-S) &= 1.2 \cdot 10^{-9} \cdot I_{rm}^{1.058} \cdot V_{1s}^{2.446}, \\ &\quad (\text{con } R_c \text{ in } [N/mm^2] \text{ e } V \text{ in } [m/s]), \end{aligned}$$

Tenendo conto delle possibili correlazioni sopra esposte il collaudatore dovrebbe tenere conto che i risultati delle prove in situ possono tra loro differire essendo influenzati proprio dalla natura stessa del getto. Cioè, a causa di alcuni fattori determinanti (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 siano eseguiti carotaggi ed ottenuti n.º3 provini ( $C_1, C_2$  e  $C_3$ ). Per ognuno di essi si eseguano: le prove sclerometriche, ottenendo gli indici  $I_{rm1}, I_{rm2}$  ed  $I_{rm3}$ , le prove Soniche, ottenendo le velocità  $V_1, V_2$  e  $V_3$  e le prove di schiacciamento, ottenendo le resistenze ( $R_{C1}, R_{C2}$  ed  $R_{C3}$ ). Ricordando la relazione che lega le tre suddette prove per  $C_1, C_2$  e  $C_3$  si ha il seguente sistema nelle tre incognite  $a_1, b_1$  e  $c_1$ :

$$\begin{aligned} R_{C1} &= a_1 \cdot I_{rm1}^{b_1} \cdot V_{1s}^{c_1} \\ R_{C2} &= a_1 \cdot I_{rm2}^{b_1} \cdot V_{1s}^{c_1} \\ R_{C3} &= a_1 \cdot I_{rm3}^{b_1} \cdot V_{1s}^{c_1} \end{aligned}$$

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

$$R_c' = a_1' + b_1 \cdot I_{rm}' + c_1 \cdot V' \quad (6)$$

nel quale  $R_c' = \ln(R_c)$ ;  $I_{rm}' = \ln(I_{rm})$ ;  $V' = \ln(V)$ ;  $a_1' = \ln(a_1)$ . Da esso si ottiene il seguente sistema lineare

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

ove 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).

### 5.4 Accettazione dei risultati di prova

I controlli di accettazione vengono fatti al termine della campagna di prove non distruttive e distruttive. In base all'estensione delle opere da collaudare è necessario una procedura nella quale il primo passo potrebbe essere accumulare gli elementi da accertare per mix design, resistenza caratteristica attesa, tipologia.

Sulla base dei risultati acquisiti dalle prove non distruttive e da quelle distruttive (da condurre preferibilmente presso un Laboratorio Materiali Ufficiale anziché autorizzato), per ciascuna delle aree omogenee individuate, si hanno valori

delle resistenza in situ, eventualmente da correggere, e/o combinare effettuando un'indagine più completa sul materiale. Per quanto concerne le correzioni sui valori delle prove distruttive (a schiacciamento), il collaudatore potrebbe conteggiare i seguenti coefficienti correttivi:

- di forma,  $c_1 = 1 + 0.25 (H/D) - 1 < 1.25$ , dove  $H$ =altezza provino,  $d$  = diametro;
- disturbo,  $c_2 = 1/0.85$  (oppure  $1/0.94$  da ACI);
- maturazione,  $c_3 = \exp \{s \cdot [(28/g)^{0.5} - 1]\}$ , dove  $g$  = età del cls in giorni;

per i quali il coefficiente correttivo  $c_t$  totale è il prodotto dei tre precedenti, cioè  $c_t = c_1 \cdot c_2 \cdot c_3$ , e quindi il valore della resistenza corretta in termini di resistenza cubica è  $R_{c,rott}^*$  data dalla  $R_{c,corr}^* = c_t \cdot R_{c,rott}$ , dove  $R_{c,rott}$  è il valore proveniente dalla prova a schiacciamento in laboratorio. Inoltre potrebbe essere conteggiato anche il coefficiente di riduzione per massa volumica ( $c_4$ ), definito come segue. Essendo  $g$  i gradi percentuali di riduzione di massa e  $p\%$  la perdita percentuale di resistenza, si calcola il prodotto  $c\% = g \cdot p\%$  cui corrisponde la perdita totale di resistenza (con  $p=5 \div 8$ ), da cui  $c_4 = 1/(1-x)$ . Ad esempio, qualora si riscontri che il valore della massa volumica è  $2320 \text{ kg/m}^3$  anziché  $2400 \text{ kg/m}^3$  si ha che:

$$g = 1 - (2320/2400) = 0.33 \text{ da cui } 3.3\%, \quad (7)$$

cioè

$$x\% = 3.3 \cdot 6.5 = 21.45 \% \quad (8)$$

e perciò:

$$c_4 = 1/(1-0.2145) = 1.27. \quad (9)$$

Quindi, definiti i coefficienti correttivi, ogni singolo valore di resistenza allo schiacciamento relativo alle carote prelevate in situ ( $f_c^*$ ) può essere corretto come segue, ottenendo un valore  $f_{c,corr}^*$ :

$$[1/(1-x)] \cdot c_1 \cdot (1/0.85) \cdot f_c^* = f_{c,corr}^* \quad (10)$$

ove:

- $(1/0.85)$  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 giunge al valore medio potenzialmente corretto ed al valore minimo potenzialmente corretto; tali valori (medio e minimo) vengono quindi utilizzati nel controllo di accettazione (in riferimento al D.M. 2008 od alla UNI 13791. Quanto descritto vale nel caso in cui si voglia fare riferimento alle sole prove distruttive.

Per quanto concerne la combinazione delle prove si osserva che, ad esempio, nelle prove combinate Sonica + sclerometro, si considerano parametri legati a caratteristiche diverse del materiale, con una mutua correzione. Con la prova Sonica la velocità di propagazione è legata alla densità ed all'elasticità, nella prova sclerometrica l'indice è legato alla durezza superficiale. Per di più, il grado di umidità e quello di maturazione del calcestruzzo influenzano la velocità di propagazione nella prova Sonica con un effetto opposto rispetto a quanto accade per la prova sclerometrica, quindi: la combinazione dei due metodi diminuisce alcune inefficienze dei singoli metodi. Infine, combinando prove distruttive e non distruttive, secondo le combinazioni già citate (I, II e III), i valori che si ottengono vanno combinati come segue:

$$\text{per I)} \quad R_{c, (Sc-S-W)} = a_1 \cdot I_{rm}^b \cdot V_{l,s}^c \cdot L_e^d;$$

$$\text{per II)} \quad R_{c, (Sc-S)} = a_2 \cdot I_{rm}^b \cdot V_{l,s}^c;$$

$$\text{per III)} \quad R_{c, (W)} = a_3 + d_3 \cdot L_e;$$

ove la ben nota simbologia.

Stabilito quindi il valore potenzialmente più valido (che è a discrezione del Collaudatore) vengono eseguiti i controlli di accettazione facendo riferimento che, secondo il punto 11.2.6 del D.M. 2008, "[...] 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".

Il collaudatore potrebbe fare riferimento alle norme cogenti o a quelle volontaristiche. Ad esempio, Per la UNI EN 13791 valgono i seguenti approcci A e B, (nelle cui relazioni l'apice \* significa in situ).

Nell'Approccio A la resistenza caratteristica in situ è il valore minore tra:

$$\begin{aligned} f_{ck}^* &= f_{c,m}^* - 1.48 \cdot s \\ f_{ck}^* &= f_{c,min}^* + 4; \end{aligned} \quad (11)$$

dove:  $f_{ck}^*$  = 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 e  $s$  = scarto quadratico medio;

Nell'Approccio B la resistenza caratteristica in situ è il valore minore tra:

$$\begin{aligned} f_{ck}^* &= f_{c,m}^* - k \\ f_{ck}^* &= f_{c,min}^* + 4; \end{aligned} \quad (12)$$

dove  $k$  dipende dal numero delle prove.

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

$$\begin{aligned} f_{ck}^* &= f_{c,m}^* - 1.48 \cdot s \\ f_{ck}^* &= f_{c,min}^* + 4; \end{aligned} \quad (13)$$

oppure, per  $n$  compreso tra 4 e 14, si considera il minimo tra le relazioni:

$$\begin{aligned} f_{ck}^* &= f_{c,m}^* - k \\ f_{ck}^* &= f_{c,min}^* + 4. \end{aligned} \quad (14)$$

con i valori di  $k$  forniti dalle stesse Linee Guida.

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

$$f_{ck}^* \geq f_{ck, cont} (= 0.85 \cdot f_{ck, prog} = 0.85 \cdot 0.83 R_{ck, prog}), \quad (15)$$

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

## 5.5 Controlli incrociati Collaudatore e Progettista

Nel caso di nuove realizzazioni o d'interventi di riabilitazione dell'esistente è importante che il progettista ed il collaudatore eseguano alcuni controlli congiuntamente. In entrambi i casi, infatti, la dispersione dei risultati deve essere il più possibile contenuta e presentare una sola moda. Ciò spesso non si verifica né nelle nuove realizzazioni, specialmente se molto estese, né in interventi di riabilitazione.

Nel primo caso la dispersione testimonia la bontà delle forniture (ad un minore dispersione, o minore scarto quadratico corrisponde una migliore fornitura) nel caso in cui, come detto, le opere siano particolarmente estese (magari per tali opere potrebbero esserci una fornitura direttamente in cantiere ed una esterna ad esso). Nel secondo caso, invece, una significativa dispersione costringe il progettista (ma anche il



collaudatore) a cautelarsi considerando il calcestruzzo in situ di una classe più scadente rispetto a quella che magari potrebbe essere (tra l'altro con l'utilizzo dei coefficienti indicati nella Circolare n.°617/2009 circa i Livelli di Confidenza).

Al fine di ritrovarsi con una dispersione tale da influire sul progetto stesso è fondamentale osservare nelle prove tutte le avvertenze discusse nei precedenti paragrafi. I controlli incrociati potrebbero essere fatti anche assieme alla Direzione dei Lavori poiché il collaudatore potrebbe far eseguire le prove su parti strutturali dalle quali la Direzione dei Lavori, per legge, ha fatto prelevare in fase di getto i cubetti (dei quali sono note, tramite prove, tutte le caratteristiche meccaniche).

Il controllo della costanza della fornitura potrebbe essere eseguito osservando, oltre alla Normale, anche altre distribuzioni. Ad esempio, osservando la distribuzione Weibull ed adottando diversi stimatori (massima verosomiglianza, corrispondenza dei momenti, minimi quadrati) verificando quindi la "bontà" della distribuzione scelta attraverso differenti tests di buon adattamento (ad esempio: Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Carmen-Von Mises). Si veda l'esempio di seguito ove per tre diversi mix design per la medesima classe di calcestruzzo,  $R_{ck,d} = 55$  MPa, si hanno 25 carote con i rispettivi risultati a schiacciamento raggruppati in classi di ampiezza adeguata. Scelta la di Weibull, si stimino i parametri mediante il metodo della massima verosomiglianza (massima probabilità di estrarre il campione in esame) e 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). Nel caso in esame, l'evento è meglio descritto dalla Weibull rispetto alla Normale, pertanto il valore di controllo, pari a 47 MPa, deve essere confrontato col frattile risultante dalla Weibull (57 MPa), anziché col frattile risultante dalla normale (59 MPa).

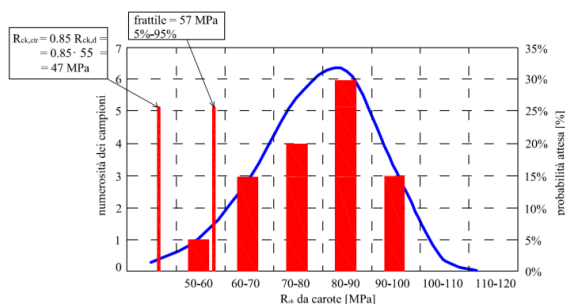


Fig. 3 - distribuzione di Weibull, adattamento all'evento (fonte: attività di collaudo del dott. ing. S. Sgambati)

Infine, oltre che prove per la determinazione della resistenza dovrebbero essere condotte prove per la determinazione del modulo elastico, grandezza necessaria per la determinazione del comportamento strutturale sotto sisma e vento (specie se si tratta di un alto edificio). Se dalle prove di modulo risultasse un valore minore di quello di progetto, da valutare secondo il punto 11.2.10.3 del D.M. 2008, dovrebbero essere condotte dal progettista nuove analisi FEM utilizzando il valore delle prove. La normativa di riferimento è: per il modulo secante a compressione, la UNI 6556; per il modulo elastico dinamico, la UNI EN 12504 - 4.

Tra l'altro, con riferimento al quadro normativo internazionale, si ricorda che il valore del modulo elastico calcolato con la normativa italiana è maggiore rispetto a quello ottenibile con la normativa anglosassone (BSI).

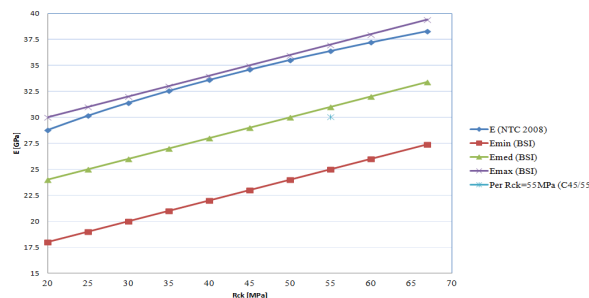


Fig. 1 - valutazione del modulo elastico per NTC e BSI (fonte: attività di collaudo del dott. ing. G. Cozzaglio)

Si veda la riguardo la Figura 4 nella quale si riproduce quanto ottenuto in uno studio condotto per un nuovo alto edificio di Milano nel 2011, per il quale le BSI 8110-2 hanno fornito, per un calcestruzzo avente resistenza cubica a compressione id 55 MPa, valori di modulo simili a quelli ottenuti con le prove di Laboratorio.

## 6. CONCLUSIONI

Le norme vigenti in materia di prestazioni ed accettazione dei materiali da costruzione rappresentano un tema di particolare interesse per i diversi professionisti che si trovano a dover sovrintendere alla costruzione di una nuova opera.

Nella memoria questo argomento è stato trattato con riferimento al materiale calcestruzzo, vista il suo fondamentale impiego sul mercato italiano, considerandone gli aspetti legati alle fasi di selezione del prodotto, di accettazione, di controllo delle procedure di posa in opera e della successiva verifica di esecuzione a regola d'arte. Infatti, durante la costruzione di un'opera, sono diverse le figure che partecipano con precise responsabilità alla definizione della conformità dei materiali, secondo un filo logico che emerge chiaramente attraverso un'attenta lettura dei disposti normativi e che la memoria cercato di chiarire.

Inoltre, sono state descritte anche le principali tipologie di prove ed alcune procedure di confronto che il Collaudatore potrebbe decidere di svolgere in una campagna di accertamento delle qualità del calcestruzzo in situ.

## 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 206-1:2006;
- [3] UNI EN 13791:2008;
- [4] Linee Guida del Consiglio Superiore dei LL.PP. sul calcestruzzo preconfezionato, 2003;
- [5] BSI 8110 2 – Structural use of concrete;
- [6] Malhotra V.M., Carino N.J., CRC Handbook on nondestructive testing of Concrete;
- [7] Romeu J.L. - Empirical assesment of Weibull distribution;
- [8] Romeu J.L., Greithleil C. - A practical guide to statistical analysis of material property data;
- [9] Anderson-Darling: A goodness of fit test for small samples assumptions, vol.10 n.° 5 Selected topics in assurance related technologies;
- [10] De Lucia T., Miranda M., Basile A., Formisano A. - Confronto teorico-sperimentale per il calcolo della resistenza in situ dei calcestruzzi: primi risultati.