

LA VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO IN OPERA PER IL COLLAUDO DELLE STRUTTURE E L'ACCERTAMENTO DELLE RESPONSABILITÀ DELL'IMPRESA E DEL PRODUTTORE

Alessandra BUOSO *, Luigi COPPOLA **

* *Ingegnere Civile Strutture; Dottorato di Ricerca in "Studio di calcestruzzi rinforzati con nanotubi in carbonio"; Ricercatrice presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bergamo*

** *Professore Associato di "Materiali per l'Edilizia" e di "Materiali per il Restauro delle Strutture" e già Direttore del "Laboratorio Prove Materiali e Strutture", Facoltà di Ingegneria, Università di Bergamo; Docente di "Tecnologia dei Materiali", University of Applied Sciences di Lugano (Svizzera)*

INTRODUZIONE

Una delle novità salienti introdotte dalle "Norme Tecniche per le Costruzioni" emanate ai sensi della Legge n. 1086 del 5 novembre 1971 e della Legge n. 64 del 2 Febbraio 1974 con Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008, pubblicato sul Supplemento Ordinario n.30 della G.U. del 04 Febbraio 2008 è relativa (paragrafo 11.2.6) al valore medio della resistenza strutturale ($R_{cm-opera}$), misurata con tecniche opportune (distruttive e non distruttive) e debitamente trasformata in resistenza cilindrica o cubica, non inferiore all'85% del valore medio definito in fase di progetto (R_{cm}).

Si evidenzia, in particolare, come sia sempre possibile risalire alle responsabilità di eventuali non conformità (dei valori di resistenza a compressione misurati sui cubetti prelevati a bocca di betoniera o del valore della resistenza a compressione media in opera) quando la Direzione Lavori correttamente effettua i controlli di accettazione al momento della consegna del calcestruzzo in cantiere procedendo al confezionamento, alla conservazione e alla maturazione dei provini cubici in accordo alle norme UNI EN 12390 parte 1-2-3-4 e successivamente decida di effettuare anche il controllo della resistenza in opera mediante il prelievo delle carote (con rapporto $h/d=1$ in accordo alla norma EN 12504-1). In sostanza, la resistenza a compressione valutata sui cubetti a bocca di betoniera consente di stabilire se essa è conforme al valore caratteristico utilizzato dal progettista nel dimensionamento strutturale (valenza strutturale) permettendo, nell'eventualità che il controllo dovesse risultare negativo, di accollare gli oneri derivanti da una minore resistenza a compressione del calcestruzzo fornito rispetto a quella utilizzata per il calcolo strutturale (e pattuita nel contratto commerciale tra produttore e impresa), interamente al fornitore. Generalmente questi oneri possono essere stabiliti come segue:

- A) applicazione di una penale tanto maggiore quanto più il valore caratteristico della resistenza a compressione effettiva (R_{ckeff}) si discosta (in meno ovviamente) da quello utilizzato per il calcolo strutturale ($R_{ckprogetto}$). Ad esempio, a titolo di suggerimento si potrebbe applicare una penale pari al 5 ÷ 10 % del prezzo del calcestruzzo con la R_{ck} pattuita se la resistenza caratteristica effettiva del conglomerato è maggiore del 90% di quella stabilita contrattualmente e una penale del 15 ÷ 20 % se il valore effettivo della resistenza caratteristica dovesse risultare inferiore o uguale al 90% di quella pattuita;
- B) applicazione di una riduzione del prezzo anch'essa proporzionale al deficit di resistenza a compressione riscontrato. A titolo di esempio, si potrebbe applicare una riduzione del prezzo così calcolata:

$$\text{RiduzionePrezzo} = 1,25 \cdot (\text{Prezzo}_{R_{ckprogetto}}) \cdot \frac{(R_{ckprogetto} - R_{ckeff})}{R_{ckprogetto}}$$

Se si tiene conto delle due voci precedenti nell'eventualità, ad esempio, che la $R_{ckprogetto}$ fosse stata 30 N/mm² e la R_{ckeff} del calcestruzzo fornito fosse risultata al controllo di accettazione pari a 25 N/mm² si applicherebbe una penale del 15% e una riduzione di prezzo di circa il 21% e, quindi, il prezzo effettivo del calcestruzzo fornito risulterebbe del 36% inferiore rispetto a quello del calcestruzzo con R_{ck} 30 N/mm². È evidente che quanto suggerito determina un consistente abbattimento del prezzo del calcestruzzo che, tuttavia, non deve essere visto come un provvedimento "punitivo" nei confronti del produttore, ma va inteso come "deterrente" che stimoli il fornitore ad esercitare in centrale di betonaggio stringenti controlli sulla produzione per evitare di incorrere in controlli di accettazione con esito negativo;

- C) costi derivanti dalla necessità, emersa a seguito delle verifiche strutturali, di effettuare interventi di consolidamento o di demolizione e ricostruzione degli elementi realizzati con il calcestruzzo non conforme. In quest'ultima evenienza (demolizione e ricostruzione) non si applica ovviamente né la penale né la riduzione di prezzo.

Nel caso di un controllo di accettazione negativo, ma anche allorché il Direttore Lavori di fronte ad un controllo di accettazione positivo nutre dubbi sulla qualità delle operazioni di posa in opera, compattazione e maturazione dei getti si può disporre la valutazione della resistenza a compressione in opera per stabilire se il valore è in accordo con quanto stabilito al paragrafo 11.2.6 Norme Tecniche per le Costruzioni. Nella eventualità che (Tabella 1):

- il controllo di accettazione fosse risultato positivo e la resistenza a compressione media cubica in opera $R_{cm-opera}$ risultasse maggiore dell'85% di quella media utilizzata per il dimensionamento strutturale, l'elemento (o gli elementi) sottoposto ad indagine è collaudabile e non necessita di alcun intervento di consolidamento;
- il controllo di accettazione fosse risultato positivo e la resistenza a compressione media cubica in opera risultasse inferiore all'85% di quella media utilizzata per il dimensionamento strutturale, l'opera necessita di una verifica strutturale, effettuata con il valore della resistenza caratteristica cubica in opera divisa per 0.85: ($R_{ck-opera}/0,85$). Gli oneri derivanti dalla necessità di effettuare eventuali interventi di consolidamento o la demolizione/ricostruzione degli elementi strutturali interessati dalla verifica saranno, in questo caso, accollati interamente all'impresa esecutrice;
- il controllo di accettazione fosse risultato negativo e il valore medio della resistenza a compressione cubica in opera risultasse maggiore dell'85% della resistenza media effettiva del conglomerato, ma ovviamente minore dell'85% di quella utilizzata per il dimensionamento strutturale, gli elementi indagati necessitano di una verifica strutturale. Eventuali oneri derivanti dagli interventi di consolidamento o dalla demolizione/ricostruzione in questa evenienza ricadrebbero esclusivamente sul fornitore del conglomerato;
- il controllo di accettazione fosse risultato negativo e la resistenza a compressione media cubica in opera risultasse inferiore all'85% della resistenza media effettiva del conglomerato fornito, gli elementi indagati necessitano di una verifica strutturale e gli oneri derivanti da eventuali interventi di consolidamento o dalla demolizione/ricostruzione verrebbero ripartiti tra fornitore e impresa di costruzione.

In definitiva, quindi, se correttamente e in accordo alle Norme Tecniche per le Costruzioni, il Direttore Lavori effettua i controlli di accettazione e successivamente decida di valutare la resistenza a compressione del calcestruzzo in opera sarà sempre possibile stabilire univocamente e con dati oggettivi le azioni da intraprendere e a chi accollare gli oneri derivanti dagli interventi che si rende necessario attuare.

CASO	CONTROLLO DI ACCETTAZIONE	CONTROLLO RESISTENZA IN OPERA	AZIONI DA INTRAPRENDERE	ONERI PER INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO O DEMOLIZIONE / RICOSTRUZIONE
1	POSITIVO $R_{ckeff} \geq R_{ckprogetto}$	$R_{cmopera} \geq 85\% R_{cmprogetto}$	NESSUNA Struttura collaudabile	-
2	POSITIVO $R_{ckeff} < R_{ckprogetto}$	$R_{cmopera} < 85\% R_{cmprogetto}$	VERIFICA DELLE SEZIONI con $R_{ck-opera}/0.85$	IMPRESA ESECUTRICE
3	NEGATIVO $R_{ckeff} < R_{ckprogetto}$	$R_{cmopera} < 85\% R_{cmprogetto}$ $R_{cmopera} \geq 85\% R_{cmeff}$	VERIFICA DELLE SEZIONI con $R_{ck-opera}/0.85$	PRODUTTORE DI CALCESTRUZZO
4	NEGATIVO $R_{ckeff} < R_{ckprogetto}$	$R_{cmopera} < 85\% R_{cmprogetto}$ $R_{cmopera} < 85\% R_{cmeff}$	VERIFICA DELLE SEZIONI con $R_{ck-opera}/0.85$	IMPRESA ESECUTRICE PRODUTTORE DI CALCESTRUZZO

Tabella 1– Casistiche possibili nella accertamento della resistenza a compressione del calcestruzzo a bocca di betoniera e del calcestruzzo in opera

La situazione, invece, diventa più complicata in quei contesti in cui la direzione lavori omette di effettuare i controlli di accettazione non procedendo al prelievo del calcestruzzo e al confezionamento dei cubetti prima di eseguire il getto, contravvenendo già ad un obbligo di Legge, e successivamente decida di valutare la resistenza del calcestruzzo dalle strutture in opera. Occorre tener presente, infatti, che la determinazione del valore della resistenza a compressione in opera del calcestruzzo ha, al pari del controllo di accettazione effettuato mediante il prelievo dei cubetti a “bocca di betoniera”, una duplice valenza: da una parte quella propriamente strutturale tesa a stabilire la collaudabilità dell'elemento strutturale sul quale vengono effettuati i carotaggi e la successiva determinazione della resistenza in opera. Dall'altra, la valutazione della resistenza in opera si pone anche l'obiettivo di accertare, di fronte ad un esito negativo del controllo, le responsabilità delle figure coinvolte con particolare riferimento al produttore del calcestruzzo (responsabile della qualità del conglomerato fornito) e all'impresa esecutrice delle opere (sotto la cui responsabilità ricadono le operazioni di posa, compattazione e maturazione dei getti). In sostanza, se il valore della resistenza cubica media in opera ($R_{cm-opera}$) dovesse risultare inferiore all'85% del valore della resistenza media $R_{cm-progetto}$ utilizzata per il dimensionamento strutturale tanto da richiedere per le strutture coinvolte dalla non conformità interventi di consolidamento o di demolizione/ricostruzione, si rende necessario stabilire chi tra produttore del calcestruzzo e impresa esecutrice deve accollarsi gli oneri per questi interventi supplementari. Il presente articolo è dedicato a questa tematica e si prefigge l'obiettivo di fornire una metodologia pratica per la determinazione della resistenza in opera finalizzata ad accertare sia la collaudabilità della struttura che le responsabilità di eventuali non conformità da parte dei soggetti coinvolti (fornitore di calcestruzzo e impresa esecutrice).

COME DETERMINARE LA RESISTENZA CUBICA IN OPERA AI FINI DELLA COLLAUDABILITÀ DELLA STRUTTURA: MODALITÀ DI PRELIEVO, TIPOLOGIA E DIMENSIONI DELLE CAROTE, NUMERO MINIMO DI CAROTE

Di seguito vengono riportate alcune indicazioni di carattere pratico per la valutazione della resistenza a compressione cubica del calcestruzzo in opera.

Geometria delle carote: diametro e snellezza della carota

Come è noto il dimensionamento delle sezioni in calcestruzzo armato avviene sulla base del valore della resistenza caratteristica a compressione misurata su *provini cubici di lato 150 mm*, compattati a rifiuto e maturati per 28 giorni alla temperatura di $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e U.R. > 95%. Nella valutazione della resistenza a compressione in opera essendo praticamente impossibile estrarre dalle strutture dei cubi di lato 150 mm si deve ricorrere, invece, ad effettuare la prova di schiacciamento su carote. Il valore della resistenza a compressione misurato sulle carote dipende sensibilmente dalla geometria della stessa: ad esempio, esso diminuisce all'aumentare del rapporto altezza/diametro. Pertanto, si pone immediatamente il problema di quale devono essere la geometria e le dimensioni della carota per far sì che il valore della resistenza a compressione misurato sia paragonabile a quello che si otterrebbe con lo stesso calcestruzzo (e nelle stesse condizioni di compattazione e con le medesime modalità di stagionatura) qualora la prova di schiacciamento venisse effettuata utilizzando un provino cubico.

Innanzitutto occorre precisare che il valore della resistenza a compressione è influenzato dal rapporto tra il diametro della carota (d) e la dimensione massima dell'aggregato utilizzato nel confezionamento dell'impasto (D_{\max}). Questa influenza diventa significativa quando d/D_{\max} risulta inferiore a 3. Pertanto, tenendo presente che generalmente i calcestruzzi vengono confezionati con aggregati aventi D_{\max} pari a 32 mm è opportuno che il diametro delle carote risulti almeno di 100 mm. Inoltre, la resistenza a compressione è influenzata dalla snellezza della carota e, quindi, dal rapporto tra altezza e diametro. In accordo con la norma EN 13791 la resistenza a compressione misurata su carote con diametro 100 mm e rapporto $h/d=1$ è assimilabile a quella misurata proprio sul provino cubico di lato 150 mm (nelle stesse condizioni di compattazione e con le stesse modalità di stagionatura). Pertanto, si può concludere che relativamente alla geometria della carota le prove di schiacciamento debbono essere effettuate su carote con:

- diametro 100 mm
- rapporto $h/d=1$

Quindi, a meno che non esistano particolari esigenze derivanti:

- dal dover valutare la resistenza di un calcestruzzo confezionato con aggregati aventi D_{\max} superiore a 32 mm (ad esempio 40 mm), allorché potrebbe essere opportuno ricorrere a carote di diametro 150 mm e altezza 150 mm (in modo da lasciare invariata la snellezza);
- dalla impossibilità di prelevare carote prive di ferri d'armatura paralleli all'asse longitudinale della carota, allorché potrebbe essere necessario ricorrere all'estrazione di una carota con diametro inferiore a 100 mm (ad esempio 75 mm), ma mai inferiore a 50 mm,

è opportuno attenersi, relativamente alla geometria della carota, alle disposizioni sopra riportate in quanto l'adozione di carote con diametri diversi da 100 mm impone l'applicazione di un coefficiente correttivo non sempre di facile individuazione. Si tenga conto in proposito che la resistenza a compressione sulle carote con diametro 100 mm (a parità di rapporto h/d) può risultare maggiore di quella determinata su carote di diametro 50 mm di un valore che oscilla tra il 7 e il 27% a seconda che la dimensione massima dell'aggregato sia di 20 oppure di 40 mm rispettivamente. Come si può intuire la variazione subita dalla resistenza a compressione al variare del diametro della carota rispetto a quella misurata sulla carota da 100 mm, che è direttamente assimilabile alla resistenza cubica, è abbastanza consistente. Pertanto, a meno che non esista una reale necessità, alla luce della difficoltà di individuare con esattezza il fattore correttivo da applicare si suggerisce di utilizzare carote con diametro pari a 100 mm.

h/d	0.5	0.75	1.0	1.25	1.50	1.75	2.00
$f_{c-carota}$							
15 ÷ 20	0.66	0.83	1.00	1.10	1.20	1.27	1.32
21 ÷ 35	0.70	0.84	1.00	1.06	1.16	1.18	1.22
36 ÷ 50	0.75	0.89	1.00	1.04	1.08	1.10	1.12

Tabella 2 – Coefficiente correttivo della resistenza a compressione ($F_{h/d}$) misurata su carote con rapporto h/d diverso da 1 per la trasformazione nella corrispondente resistenza a compressione cubica

Ovviamente non esiste alcuna necessità di adottare carote con rapporti $h/d > 1$. Pertanto, durante il procedimento di preparazione del campione si procederà a tagliare la carota in modo da ottenere il rapporto $h/d=1$. Se l'estrazione avviene da elementi che per il ridotto spessore o per la scadente qualità del calcestruzzo non consentono di ottenere carote con rapporto $h/d=1$ al valore della resistenza a compressione occorrerà apportare una correzione che tenga conto della minore snellezza del provino (Tabella 2).

Come si può notare il fattore di correzione è influenzato anche dal livello di resistenza a compressione del calcestruzzo. Pertanto, se ad esempio è stata determinata una resistenza a compressione di 20 N/mm^2 su una carota di diametro 100 mm e rapporto $h/d = 0.75$ la resistenza a compressione sulla carota con rapporto $h/d=1$ e $d = 100 \text{ mm}$ vale:

$$R_{c-opera} = f_{c-carota} \cdot F_{h/d} = 20 \cdot 0.83 = 16.6 \text{ N/mm}^2$$

Taglio, rettifica e spianatura della carota

Nell'esecuzione delle operazioni di carotaggio l'utensile dovrà essere fissato rigidamente alla struttura in calcestruzzo mediante degli opportuni tasselli al fine di garantire che l'asse della carota risulti perfettamente verticale. Dopo il taglio meccanico per ottenere, come suggerito al paragrafo precedente una carota di snellezza $h/d=1$, si procederà all'operazione di spianatura e rettifica delle basi del provino con macchina provvista di mole abrasive. Questa modalità di rettifica delle carote è da preferirsi a quella che utilizza malte a presa rapida applicate in spessore sottile sulle basi delle carote. Questo per riprodurre le stesse condizioni di prova esistenti nella rottura a compressione dei cubetti i quali vengono posti con le basi direttamente a contatto con la superficie dei piatti della pressa. Pertanto, nella prova di schiacciamento della carota per riprodurre la stessa situazione che si ha nella rottura del provino cubico è opportuno non interporre alcuno strato di materiale aggiuntivo tra i piatti della macchina e le basi della carota da sottoporre a prova. Nell'eventualità si volesse ricorrere alla rettifica con strato di malta (in gergo definita "cappatura") è assolutamente sconsigliabile utilizzare malte di bassa resistenza e basso modulo elastico, quali ad esempio, le malte a base di gesso. Infatti, in questa evenienza si ridurrebbe l'effetto di confinamento esercitato dai piatti della pressa sul calcestruzzo con il risultato che la resistenza a compressione misurata sul provino "cappato" risulterebbe inferiore a quella misurata sullo stesso provino rettificato meccanicamente. In conclusione, quindi, si suggerisce di effettuare la rettifica delle carote con procedimento meccanico.

È opportuno far presente che al fine di limitare l'influenza derivante da una non corretta maturazione dei getti (che fortunatamente ha scarse implicazioni sugli aspetti relativi alla collaudabilità dell'opera, ma incide pesantemente sulla durabilità delle strutture) è opportuno quando si effettua il taglio della carota che vengano rimossi i primi 2,5 ÷ 3cm più corticali che sono quelli interessati da un minor grado di idratazione.

Presenza di ferri d'armatura

Prima di effettuare il carotaggio è opportuno dotarsi di un magnetometro (pacometro o profometro) per individuare le zone della struttura dove poter effettuare un carotaggio senza interessare le barre di armatura. Innanzitutto occorre evidenziare che non è possibile utilizzare carote che presentino ferri paralleli all'asse longitudinale della stessa in quanto il valore misurato della resistenza a compressione sarebbe fortemente influenzato dalla presenza del tondino. Carote con ferri disposti perpendicolarmente all'asse longitudinale possono essere impiegate nella prova di schiacciamento, ma il valore misurato deve essere opportunamente incrementato per tener conto dell'effetto di disturbo dovuto alla presenza del ferro. In linea di massima l'incremento deve essere tanto maggiore quanto maggiore è il rapporto tra diametro del tondino e quello della carota e quanto più esso dista dalle basi della carota stessa. Il coefficiente correttivo (F_{Fe}) può essere desunto dall'espressione riportata nel Rapporto Tecnico n.11 della Concrete Society:

$$[1] \quad F_{Fe} = 1 + \left(1,5 \cdot \frac{\Phi_r}{d} \cdot \frac{l}{h} \right)$$

dove:

- Φ è il diametro del tondino in mm
- d è il diametro della carota in mm
- d' è la distanza del tondo dalla base più vicina della carota in mm
- h è l'altezza della carota in mm.

Quindi, se ad esempio la resistenza a compressione misurata su una carota con rapporto $h/d=1$ e $d=100$ mm contenente un tondino di diametro pari a 14 mm posto ad una distanza di 30 mm dalla base della carota è risultata di 25 N/mm^2 , la resistenza a compressione misurata su una carota priva di ferro sarebbe risultata pari a:

$$R_{c\text{-opera}} = f_{c\text{-carota}} \cdot F_{Fe} = 25 \cdot (1 + (1,5 \cdot (14/100) \cdot (30/100))) = 25 \cdot 1,063 = 26,6 \text{ N/mm}^2.$$

L'effetto derivante dalla presenza del tondino, nel caso in esame, conduce ad apportare un incremento al valore della resistenza misurato di circa il 6%. Ovviamente, nel caso di carota priva di ferri il coefficiente correttivo $F_{Fe} = 1$.

Effetto derivante dall'azione del carotiere: il tormento

Durante l'esecuzione del carotaggio occorre ridurre al minimo gli effetti torsionali che l'utensile provoca sulla struttura in calcestruzzo. Per questo motivo, come già in precedenza suggerito occorre fissare rigidamente il carotiere alla struttura per evitare il suo asse subisca oscillazioni durante l'operazione di estrazione della carota. Anche fissando saldamente l'utensile, tuttavia, l'operazione di carotaggio non è "indolore" per il calcestruzzo in quanto può determinare la comparsa di microlesioni interne tanto più accentuate quanto più scadente è la qualità del calcestruzzo in opera. Pertanto, di questo effetto (definito di "tormento") si deve tener conto incrementando la resistenza a compressione misurata sulla carota di un fattore F_{Tor} , inversamente proporzionale alla resistenza del conglomerato (Tabella 3).

F_{Tor}	1,15	1,12	1,10	1,07	1,05	1,02	1,00
$f_{c\text{-carota}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	10-15	16-20	21-25	26-30	31-35	36-40	> 40

Tabella 3 – Coefficiente correttivo (F_{Tor}) della resistenza a compressione della carota per tener conto dell'effetto derivante dal "tormento" dell'utensile

Pertanto, se ad esempio, la resistenza a compressione misurata su una carota con rapporto $h/d=1$ e diametro 100 mm, priva di ferri, è risultata di 25 N/mm^2 la resistenza a compressione determinata su un provino di calcestruzzo non sottoposto a carotaggio, confezionato e maturato in identiche condizioni, sarebbe del 10% più elevata e, quindi pari a 27.5 N/mm^2 ($25 \cdot 1,10$).

Effetto dovuto alla direzione del carotaggio rispetto a quella di getto

Il carotaggio effettuato in direzione perpendicolare a quella di getto intercetta microfessurazioni che durante la prova di schiacciamento si dispongono parallelamente alle isostatiche di compressione favorendo la rottura per valori dello sforzo inferiori a quelle che si registrano per la stessa carota prelevata parallelamente alla direzione di getto. La penalizzazione della resistenza per effetto di un carotaggio perpendicolare alla direzione di getto risulta tanto più marcata quanto più il prelievo viene effettuato verso le zone sommitali del getto che sono maggiormente interessate dal fenomeno di bleeding e quindi presentano un livello di microfessurazione interna più accentuato rispetto a quello che interessa le zone basali della struttura. In accordo con la EN 13791, pertanto, il valore della resistenza a compressione misurato sulle carote estratte dalla struttura deve tener conto della direzione del carotaggio. In linea di massima per le carote prelevate parallelamente alla direzione di getto, come avviene nei pavimenti o nelle platee di fondazione, non occorre apportare alcuna correzione al valore della resistenza misurata sulle carote, per le quali l'effetto delle microfessurazioni interne è poco influente nella prova di schiacciamento. Per contro, la resistenza a compressione misurata sulle carote prelevate in direzione perpendicolare al getto, come avviene quando si effettua il carotaggio su un pilastro oppure un muro di sostegno, deve essere opportunamente incrementato attraverso un coefficiente di correzione (F_{Dir}) che tenga conto anche della posizione del prelievo se alla base, cioè, in una zona intermedia, oppure in testa alla struttura (Tabella 4).

Direzione carotaggio vs getto	PARALLELA	PERPENDICOLARE		
POSIZIONE CAROTAGGIO	-	$0 \div \frac{1}{3}h$	$\frac{1}{3}h \div \frac{2}{3}h$	$\frac{2}{3}h \div h$
F_{Dir}	1,0	1,05	1,075	1,10

Tabella 4 – Coefficiente correttivo per tener conto della direzione del carotaggio rispetto a quella di posa in opera del conglomerato (h indica l'altezza dell'elemento verticale)

Quindi, se ad esempio, la resistenza a compressione misurata su una carota con rapporto $h/d=1$ e $d=100\text{mm}$ prelevata al centro di un pilastro è risultata di 30 N/mm^2 occorre incrementare il valore della resistenza a compressione per tener conto del fatto che la carota è stata prelevata perpendicolarmente alla direzione di getto. Il valore corretto della resistenza della carota risulta pertanto pari a 32.3 N/mm^2 ($30 \cdot 1,075$).

Effetto dell'età della carota e della temperatura di maturazione in cantiere

La R_{ck} utilizzata per il calcolo strutturale, come è ben noto, si intende misurata su provini maturati per 28 giorni alla temperatura di $20 \pm 2^\circ\text{C}$. È difficile, invece, che l'età della carota al momento in cui la stessa viene sottoposta alla prova di schiacciamento coincida con i 28 giorni. Basti pensare al fatto che, generalmente, si procede alla valutazione della resistenza in opera allorché è ormai noto l'esito (negativo) del controllo di accettazione dei provini confezionati a "bocca di betoniera" e, quindi, quando ormai è trascorso un tempo dall'esecuzione del getto superiore ad un mese. A volte, si decide di effettuare la valutazione della resistenza in opera quando i getti paesano evidenti difettosità con calcestruzzo pulverulento o incoerente. Generalmente in questi casi si procede al carotaggio senza attendere preliminarmente i dati delle prove di schiacciamento relative al controllo di accettazione a bocca di betoniera.

È ben noto, che la resistenza a compressione del calcestruzzo cresce nel tempo, sebbene nei primi giorni la velocità di sviluppo è maggiore e va man mano attenuandosi alle lunghe stagionature. Pertanto, se le prove di schiacciamento avvenissero su carote di età molto giovane il valore misurato sarebbe sottostimato rispetto a quello che il calcestruzzo potrebbe attingere all'età di 28 giorni. Pertanto, al valore misurato della resistenza a compressione di una carota di età generica t inferiore a 28 giorni occorrerà apportare una correzione (incremento) per tener conto del fatto che il conglomerato ha una ulteriore riserva di resistenza da sviluppare. Se le prove di schiacciamento vengono effettuate su carote di età maggiore dei 28 giorni ovviamente il valore della resistenza sviluppato sarà maggiore di quello che il conglomerato possedeva all'età di 28 giorni. Tuttavia, in questa seconda situazione è poco importante ai fini della collaudabilità che la resistenza a compressione a 28 giorni era inferiore a quella misurata sulle carote di età superiore. Pertanto, in questa evenienza al valore misurato della resistenza a compressione della carota di età maggiore di 28 giorni non occorre apportare alcuna correzione (decremento). In definitiva per tener conto dell'età del calcestruzzo al momento dell'esecuzione della prova di schiacciamento la correzione potrà essere effettuata utilizzando la formula dell'Eurocodice che esprime la resistenza a compressione ad un tempo generico t , $f_c(t)$, in funzione di quella a 28 giorni, $f_{c,28}$:

$$R_{c\text{-opera}} = f_{c\text{-carota}} \cdot F_t$$

$$[2] \quad F_t = \frac{1}{e^{\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)}}$$

dove:

- t è il tempo a cui si effettua il carotaggio ($t < 28\text{gg}$)
- s è una costante funzione del tipo di cemento impiegato (vedere tabella sotto)

TIPO DI CEMENTO	s
CEM 32.5N	0.38
CEM 32.5R	0.25
CEM 42.5N	0.25
CEM 42.5R	0.20
CEM 52.5N	0.20
CEM 52.5R	0.20

Ai fini della collaudabilità della struttura si assumerà:

- $F_t=1$ per carote sottoposte a compressione ad età maggiori di 28 giorni ($t > 28\text{gg}$);
- $F_t = 1/\exp[s(1-(28/t)^{1/2})]$ per carote sottoposte a compressione ad età inferiori a 28 giorni ($t < 28\text{gg}$).

Si supponga, a titolo di esempio, che una carota di calcestruzzo, confezionato con cemento CEM II/A-L 42.5R, venga sottoposta a schiacciamento dopo 7 giorni dal getto ed evidenzia a questa età una resistenza a compressione di 16 N/mm^2 . Ai fini della collaudabilità si potrà fare affidamento su una resistenza a compressione maggiore che il conglomerato svilupperà nei giorni successivi che potrà così essere quantificata: $16 \cdot F_t = 16 \cdot (1/\exp[-0.2]) = 16 \cdot 1.22 = 19.5 \text{ N/mm}^2$.

Se, invece, la stessa carota fosse stata sottoposta alla prova di schiacciamento dopo 60 giorni evidenziando un valore di resistenza a compressione di 35 N/mm^2 esso risulterebbe superiore alla resistenza che il conglomerato avrebbe evidenziato a 28 giorni di circa il 6% ($R_{c\text{-carota}28\text{gg}} = 35 \cdot (1/\exp[0.063]) = 35 \cdot 0,94 = 32,9 \text{ N/mm}^2$), ma ai fini della collaudabilità questa correzione non si rende necessaria adottando il valore della resistenza effettivamente ottenuta nella prova di schiacciamento e pari a 35 N/mm^2 ($F_t=1$).

Oltre all'età della carota al momento dello schiacciamento si deve tener conto anche della temperatura a cui è maturato il calcestruzzo della struttura in opera. Infatti, se la determinazione della resistenza avviene su una carota estratta da una struttura realizzata durante il periodo invernale che in cantiere è maturata a temperature inferiori a $20\pm 2^\circ\text{C}$ è evidente che il valore della resistenza a compressione è sottostimato rispetto a quella che lo stesso calcestruzzo avrebbe evidenziato a 20°C . In questo caso del più lento sviluppo della resistenza a compressione si deve tener conto incrementando il valore determinato nella prova di schiacciamento in quanto alle lunghe stagionature il conglomerato potrà recuperare il deficit di resistenza che evidenzia qualora la rottura della carota avvenga a tempi brevi dall'esecuzione del getto. Per contro, per le strutture realizzate nel periodo estivo si deve tener conto che la maturazione del calcestruzzo a temperature più elevate favorisce un più rapido sviluppo di resistenza. Soprattutto se la valutazione della resistenza a compressione viene effettuato su carote di età inferiore a 28 giorni si deve tener conto del più rapido sviluppo della resistenza (riducendo il valore effettivo misurato) altrimenti si incorre in una sovrastima della resistenza a compressione a 28 giorni. La correzione dei valori di resistenza misurati sulle carote per tener conto di temperature di maturazione in cantiere diverse da 20°C si effettua calcolando la media ponderale della temperatura ambientale dal momento dell'esecuzione dei getti e sino al giorno in cui viene effettuato il carotaggio. Questi dati possono essere ricavati consultando le pagine web dell'aeroporto più vicino al cantiere oppure quelle dell'Agenzie Regionale Per l'Ambiente (ARPA). Calcolata la temperatura media ponderale, si può applicare la correzione al valore della resistenza determinata sulla carota estratta dalla struttura dividendolo per il coefficiente correttivo F_T desunto dalla Tabella 5, con le seguenti limitazioni:

- se la temperatura media ponderale è $> 22^\circ\text{C}$ e il coefficiente correttivo desunto dalla Tabella 5 è maggiore di 1 si assume $F_T=1$. In sostanza, se ad esempio, la resistenza a compressione è stata determinata su una carota estratta da una struttura maturata per 28 giorni alla temperatura di 35°C è poco importante ai fini della collaudabilità sapere che quel conglomerato possiede una resistenza inferiore del 10% ($F_T=1.11$) a quella che lo stesso impasto avrebbe posseduto alla temperatura di 20°C . Infatti, la minore resistenza del calcestruzzo in opera derivante dall'elevata temperatura di maturazione non è più recuperabile e, quindi, non occorre incrementare il valore misurato della resistenza a compressione della carota. Se per contro, la resistenza viene misurata su una carota estratta dopo 3 giorni dalla struttura maturata alla stessa temperatura di 35°C occorre correggere il valore della resistenza misurata dalla prova di schiacciamento riducendolo per tener conto del fatto che per l'elevata temperatura la resistenza a compressione a 3 giorni è del 20% maggiore ($F_T=0.83$) di quella che lo stesso conglomerato avrebbe alla temperatura di 20°C . Se non effettuassi questa correzione si commetterebbe l'errore di sovrastimare la resistenza a compressione del conglomerato a 28 giorni da effettuarsi con il coefficiente F_t sopra menzionato;
- se la temperatura media ponderale è inferiore a 18°C e il coefficiente correttivo desunto dalla Tabella 5 è minore di 1 si assume $F_T=1$. In sostanza, se la determinazione della resistenza avvenisse su carote estratte da una struttura maturata alla temperatura media di 15°C dopo 60 giorni dal getto, ai fini della collaudabilità è poco importante sapere che il valore della resistenza a compressione è maggiore del 5% di quello che lo stesso calcestruzzo avrebbe

posseduto se maturato a 20°C. Quindi, non apporto alcuna correzione (decremento) della resistenza perché il valore attinto dal conglomerato è quello acquisito e valido per stabilire la collaudabilità della struttura. Se per contro, la determinazione della resistenza avvenisse su una carota estratta dopo 3 giorni dalla struttura maturata alla temperatura di 15°C devo operare una correzione (incremento) al valore misurato per tener conto del fatto che la bassa temperatura rallenta lo sviluppo iniziale della resistenza che risulta pari al 75% del valore che lo stesso conglomerato avrebbe attinto se maturato a 20°C. Pertanto, se non operassi questa correzione incrementando la resistenza a 3 giorni (moltiplicando il valore ottenuto dallo schiacciamento per F_T) rischierei di sottostimare il valore della resistenza a compressione a 28 giorni per la valutazione della collaudabilità della struttura.

$T > 22^\circ\text{C}$ e $F_T > 1 \rightarrow F_T = 1$; $T < 18^\circ\text{C}$ e $F_T < 1 \rightarrow F_T = 1$

TEMPO (gg)	1	3	7	21	28	60	90
TEMPERATURA (°C)							
33÷37	0.74	0.83	0.91	1.00	1.11	1.11	1.11
28÷32	0.77	0.87	0.95	1.02	1.05	1.05	1.05
23÷27	0.83	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
18÷22	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
13÷17	1.82	1.33	1.11	1.05	1.00	0.95	0.91
8÷12	2.86	1.82	1.33	1.25	1.18	1.00	0.95
3÷7	6.67	4.00	2.86	2.50	2.22	1.67	1.33

Tabella 5 – Coefficiente correttivo per tener conto di temperature di maturazione delle strutture in cantiere diverse da 20°C

Calcolo della resistenza cubica in opera ai fini della collaudabilità della struttura

In definitiva, riassumendo tutte le considerazioni contenute ai precedenti paragrafi si può scrivere la *formula più generale per il calcolo della resistenza cubica del calcestruzzo in opera valida ai fini della collaudabilità*:

$$[3] \quad R_{c\text{-opera}} = f_{c\text{-carota}} \cdot F_{h/d} \cdot F_{Fe} \cdot F_{Tor} \cdot F_{Dir} \cdot F_t \cdot F_T$$

dove:

- $R_{c\text{-opera}}$ è la resistenza cubica in opera per l'accertamento della collaudabilità della struttura (in N/mm^2);
- $f_{c\text{-carota}}$ è il valore sperimentale della resistenza a compressione (in N/mm^2) determinato sulla carota estratta dalla struttura in opera avente diametro pari a 100 mm, sottoposta a spianatura e rettifica meccanica prima dell'esecuzione della prova di schiacciamento;
- $F_{h/d}$ è il coefficiente correttivo che tiene conto della snellezza della carota. Per carote con rapporto $h/d=1$, $F_{h/d} = 1$. Per valori di h/d diversi da 1 consultare la Tabella 2;
- F_{Fe} è il coefficiente correttivo che tiene conto della presenza di ferri perpendicolari all'asse longitudinale della carota: in assenza di ferri $F_{Fe} = 1$. Per il calcolo di F_{Fe} in presenza di ferri applicare l'equazione [1];
- F_{Tor} è il coefficiente correttivo che tiene conto del "tormento" esercitato dalla macchina utensile durante l'estrazione della carota. Per la quantificazione di F_{Tor} consultare la Tabella 3;
- F_{Dir} è il coefficiente che tiene conto della direzione del carotaggio rispetto a quella di getto e della posizione della carota. Per la quantificazione di F_{Dir} consultare la Tabella 4;
- F_t è il coefficiente che tiene conto dell'età della carota al momento dell'esecuzione della prova di schiacciamento. Per il calcolo di avvalersi dell'equazione [2] tenendo conto che $F_t=1$ per carote sottoposte a compressione ad età maggiori di 28 giorni;
- F_T è il coefficiente che tiene conto della temperatura di maturazione del calcestruzzo in cantiere. Per la quantificazione di F_T avvalersi della Tabella 5 tenendo, inoltre, presente che per $T > 22^\circ\text{C}$ e $F_T > 1$ assumere $F_T=1$; per $T < 18^\circ\text{C}$ e $F_T < 1$ assumere $F_T = 1$.

Esempio di calcolo della resistenza cubica in opera per stabilire la collaudabilità della struttura

Si supponga di aver estratto da un muro di sostegno alto 5 m una carota di calcestruzzo (confezionato con un cemento di classe 32.5N) in una zona della struttura posta a 0.5 m dalla sommità del muro dove la struttura è meno impegnata dal punto di vista statico. L'estrazione della carota di diametro pari a 100 mm avviene dopo 3 giorni dal getto avvenuto durante il periodo estivo quando la temperatura media ponderale esistente in cantiere è di 30°C. Per la particolare densità dei ferri d'armatura la carota estratta presenta un tondino di diametro 12 mm perpendicolare all'asse longitudinale della carota ad una distanza dalla base più vicina pari a 20 mm. Il valore sperimentale della resistenza a

compressione ottenuto sottoponendo la carota dopo averla tagliata, rettificata e spianata meccanicamente ottenendo per la stessa un'altezza di 75 mm, è risultato pari a $18,5 \text{ N/mm}^2$. In questo contesto abbiamo:

- $f_{c\text{-carota}} = 18,5 \text{ N/mm}^2$;
- $F_{hd} = 0,83$ con $h/d=0,75$;
- $F_{Fe} = 1,048$ (vedi equazione [1]);
- $F_{Tor} = 1,12$;
- $F_{Dir} = 1,10$;
- $F_t = 1/(\exp [0,38 [1-(28/3)^{1/2}]]) = 2,18$;
- $F_T = 0,87$.

Pertanto, la resistenza cubica in opera vale (equazione [3]):

$$R_{c\text{-opera}} = f_{c\text{-carote}} \cdot F_{hd} \cdot F_{Fe} \cdot F_{Tor} \cdot F_{Dir} \cdot F_t \cdot F_T = 18,5 \cdot 0,83 \cdot 1,2 \cdot 1,12 \cdot 1,10 \cdot 2,18 \cdot 0,87 = 38,44 \text{ N/mm}^2$$

Come si può notare, il valore della resistenza cubica in opera ai fini della collaudabilità risulta decisamente maggiore di quello sperimentale derivante dalla rottura a compressione della carota. Questo risultato discende dal fatto che l'estrazione della carota è avvenuta dopo appena 3 giorni e, quindi, il conglomerato possiede una riserva di resistenza che svilupperà al 28-esimo giorno di quasi 22 N/mm^2 . Questa riserva di resistenza risulta così elevata anche perché nel confezionamento del conglomerato è stato impiegato un cemento di classe 32.5N che a 3 giorni (al momento della rottura per schiacciamento) ha un grado di idratazione basso che, successivamente, nei 25 giorni che lo separano dalla stagionatura di 28 giorni, sarà maggiore di quello di un cemento ad indurimento rapido. Conseguentemente il calcestruzzo subirà un maggior incremento della resistenza a compressione nel tempo. È inutile sottolineare come se si procedesse alla valutazione della collaudabilità della struttura sulla base del valore "grezzo" della resistenza a compressione ottenuto dallo schiacciamento della carota si commetterebbe un evidente errore sottostimando pesantemente il valore effettivo della resistenza cubica in opera del conglomerato.

Criterio per stabilire la collaudabilità della struttura: Norme Tecniche per le Costruzioni(D.M. 14/01/2008) e Norma Europea EN 13791

Chiarito ai paragrafi precedenti come effettuare il calcolo della resistenza cubica in opera ($R_{c\text{-opera}}$) è opportuno definire quale criterio adottare per stabilire la collaudabilità degli elementi sottoposti ad indagine. Le possibilità almeno sulla carta sono due, adottare il criterio:

- stabilito dalle Norme Tecniche per le Costruzioni secondo il quale la struttura è collaudabile se la resistenza cubica media in opera risulta almeno pari all'85% del valore medio della resistenza a compressione di progetto (1).

[4] NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI: $R_{cm\text{-opera}} \geq 0,85 R_{cm\text{progetto}}$

- previsto dalla norma europea EN 13791 secondo la quale la struttura è collaudabile se il valore caratteristico della resistenza cubica in opera è almeno pari all'85% del valore caratteristico di progetto:

[5] NORMA EN 13791: $R_{ck\text{-opera}} \geq 0,85 R_{ck\text{progetto}}$

Il criterio previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni risulta essere particolarmente stringente, si ritiene pertanto che la collaudabilità della struttura dovrebbe essere verificata con il criterio suggerito dalla norma europea EN 13791 (2). In accordo con questa normativa, quindi, si rende necessario determinare il valore caratteristico della resistenza a compressione in opera il quale può essere calcolato ricorrendo a due approcci distinti quello A (statistico) e quello B (forfetario). L'approccio statistico si applica quando il numero di carote sottoposte a prova è almeno pari a 15; in questo caso la resistenza caratteristica cubica in opera è il valore minore desunto dalle due seguenti equazioni:

[6] $R_{ck\text{-opera}} = R_{cm\text{-opera}} - 1,48 \cdot S_{n\text{-opera}}$

[7] $R_{ck\text{-opera}} = R_{cmin\text{-opera}} + 4$

dove:

- $R_{ck\text{-opera}}$ è la resistenza caratteristica cubica del calcestruzzo in opera (in N/mm^2);
- $R_{cm\text{-opera}}$ è il valore medio delle resistenze cubiche in opera (in N/mm^2);
- $S_{n\text{-opera}}$ è lo scarto quadratico medio dei valori delle resistenze cubiche in opera (in N/mm^2), il quale deve essere assunto almeno pari a 2 N/mm^2 ;
- $R_{cmin\text{-opera}}$ è il valore minimo delle resistenze cubiche in opera (in N/mm^2).

Adottando l'approccio di tipo B (forfetario) la resistenza caratteristica cubica in opera è il valore minore desunto dalle due seguenti equazioni:

$$[8] \quad R_{ck-opera} = R_{cm-opera} - K$$

$$[9] \quad R_{ck-opera} = R_{cmin-opera} + 4$$

n	K (N/mm ²)
3 ÷ 6	7
7 ÷ 9	6
10 ÷ 14	5

Tabella 6 – Coefficiente K per la determinazione del valore caratteristico della resistenza cubica a compressione del calcestruzzo in opera

dove i simboli nelle [8] e [9] hanno lo stesso significato dell'equazioni [6] e [7] e K è un coefficiente che dipende dal numero di carote (n) sottoposte alla prova di schiacciamento e può essere desunto dalla Tabella 6.

Come si può notare, la normativa tende ad essere più premiante allorché il lotto sottoposto a prova è costituito da un maggior numero di carote. Relativamente a quest'ultimo aspetto, il numero di carote da utilizzare, ovviamente, deve essere commisurato al volume di calcestruzzo degli elementi che si intende indagare.

In linea di massima, e a puro titolo di suggerimento, si può operare come segue:

- il numero minimo di carote da utilizzare è pari a 3 se il loro diametro è di 100 mm. Se il diametro della carota è inferiore, fermo restando le considerazioni circa la necessità di ricorrervi solo quando realmente si è impossibilitati a estrarre carote di diametro pari a 100 mm, alla luce della maggiore dispersione dei risultati di resistenza a compressione è necessario sottoporre a prova un numero di carote minimo di 9 e 6 rispettivamente per d pari a 50 e 75 mm. In sostanza, come regola di carattere generale, individuato il lotto minimo per le carote con d=100 mm esso va triplicato o raddoppiato se il diametro delle carote è rispettivamente di 50 o 75 mm;

se il volume di calcestruzzo da indagare è inferiore a 50 m³ si consiglia di utilizzare un lotto minimo costituito almeno da 7 carote con d=100 mm. Per ogni ulteriori 50 m³ dello stesso calcestruzzo (con stessa resistenza caratteristica nominale) utilizzare 2-3 carote aggiuntive. Per esempio, su un pavimento di 20 cm di spessore che ha richiesto un volume di conglomerato di 100 m³ (superficie del pavimento 500 m²) utilizzare un lotto di carote minimo costituito da 9-10 estrazioni con d=100 mm. Per un pavimento di 1000 m² per il quale sono stati impiegati 200 m³ di calcestruzzo il lotto sarà costituito da 13-16 carote e così via.

A questo punto il procedimento per l'accertamento della collaudabilità della struttura può ritenersi concluso. È opportuno sin d'ora ribadire come *il procedimento sopra illustrato può essere utilizzato esclusivamente per stabilire se la struttura è collaudabile o meno* e, quindi, per stabilire se occorre eventualmente sottoporre gli elementi strutturali ad interventi di consolidamento oppure se gli stessi debbono essere demoliti e ricostruiti ex-novo. *Per nessun motivo, di fronte ad una eventuale non conformità del valore della resistenza cubica in opera*, indipendentemente che si adotti il criterio di valutazione delle Norme Tecniche o quello previsto dalla norma EN 13791, *questa potrà essere attribuita al produttore del conglomerato*. Circa la valutazione di eventuali responsabilità del fornitore di calcestruzzo occorrerà operare in accordo a quanto riportato nei paragrafi che seguono.

ACCERTAMENTO DELLE RESPONSABILITÀ EVENTUALI DEL FORNITORE DEL CONGLOMERATO PER NON CONFORMITÀ DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE CUBICA IN OPERA

Di fronte ad una non conformità della resistenza cubica in opera - mancato rispetto di una delle equazioni [4] o [5] in funzione del criterio di collaudabilità prescelto – esiste la necessità di stabilire se vi sono responsabilità da parte del fornitore di calcestruzzo. Questa necessità, ovviamente, non sussiste in quei contesti in cui la D.L. ha effettuato, come peraltro imposto dagli obblighi di legge, il “controllo di accettazione” del conglomerato. Infatti, attraverso la valutazione dei dati di resistenza a compressione misurati sui cubetti prelevati a “bocca di betoniera” – come più volte evidenziato – si può stabilire *univocamente e in maniera oggettiva* se il produttore ha fornito o meno il calcestruzzo con la resistenza caratteristica effettiva (R_{ckeff}) conforme (cioè uguale o maggiore) a quella utilizzata nel progetto strutturale ($R_{ckprogetto}$) e pattuita contrattualmente tra fornitore e impresa. Pertanto, si ribadisce *l'estrema importanza di procedere all'effettuazione dei controlli di accettazione sui provini a “bocca di betoniera” per stabilire univocamente ed oggettivamente eventuali responsabilità del fornitore*. In assenza di questi controlli - in presenza, quindi, di una omissione da parte della D. L. di un obbligo di legge – e quando la D. L. con un “ravvedimento postumo” decida di effettuare una verifica della resistenza cubica in opera che si riveli negativa esiste la necessità di stabilire se vi sono, relativamente al mancato rispetto dei requisiti di collaudabilità, eventuali responsabilità da parte del fornitore. L'accertamento di queste responsabilità non si rivela spesso né di facile, e soprattutto, né di univoca soluzione in quanto presenta non pochi elementi di soggettività, ma anche di difficile quantificazione. Pertanto, il procedimento descritto nel seguito vuole solo rappresentare un contributo a “dipanare” una questione – l'accertamento delle responsabilità del produttore attraverso l'analisi dei dati di resistenza a compressione determinati sulle carote estratte dalle strutture in opera – tra le più complesse che investono spesso il contenzioso relativo al mondo delle costruzioni in calcestruzzo armato.

Il problema dell'accertamento delle responsabilità del fornitore del conglomerato va affrontato in questi termini: tenendo presente che la resistenza caratteristica effettiva del calcestruzzo fornito dal produttore deve essere determinata su provini cubici di calcestruzzo confezionati a "bocca di betoniera" compattati a rifiuto e maturati per 28 giorni alla temperatura di $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e U.R. > 95%, in assenza di questi dati (si ribadisce per omissione da parte della D.L. di un obbligo di legge) se si vuole accertare eventuali responsabilità da parte del produttore (sulla mancata collaudabilità della struttura) esclusivamente attraverso le misure di resistenza a compressione effettuate dalle carote estratte dal calcestruzzo in opera, ci si deve chiedere "quale sarebbe stata la resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo in opera se lo stesso fosse stato sottoposto a prove di schiacciamento utilizzando provini cubici compattati a rifiuto, maturati alla temperatura di 20°C e U.R. del 95% per 28 giorni?". Questo valore della resistenza a compressione nel prosieguo del presente articolo verrà individuata dal termine *resistenza caratteristica cubica equivalente* ($R_{ck\text{-potenziale}}$). Questa resistenza a compressione caratteristica non può essere confusa né con quella cubica caratteristica in opera per la verifica della collaudabilità della struttura ($R_{ck\text{-opera}}$) né, a maggior ragione, con il valore grezzo determinato dalla mera rottura di una ($R_{c\text{-carota}}$) o più carote estratte dalla struttura. Alle modalità di determinazione della resistenza caratteristica cubica potenziale ($R_{ck\text{-potenziale}}$) sono dedicati i paragrafi che seguono.

Geometria della carota, taglio e rettifica, presenza di ferri, tormento e direzione del carotaggio

Relativamente alle influenze della geometria della carota (diametro e snellezza), alle operazioni di taglio, rettifica e spianatura, alla presenza di ferri d'armatura, al tormento esercitato dal carotiere e all'influenza della direzione del carotaggio rispetto a quelle di getto sul valore della resistenza a compressione misurata sulla carota estratta dalle strutture in opera continuano a valere tutte le considerazioni già esplicitate nella sezione relativa al calcolo della $R_{c\text{-opera}}$ ai fini della collaudabilità. In sostanza, le influenze dei fattori sopramenzionati incidono allo stesso modo sia che si debba procedere alla valutazione della resistenza ai fini della collaudabilità che si debba determinare la resistenza caratteristica cubica equivalente per accertare eventuali responsabilità del fornitore. Pertanto, il valore della resistenza a compressione determinato sperimentalmente su una carota con diametro pari a 100 mm ($f_{c\text{-carota}(d=100\text{mm})}$) anche nel caso della quantificazione di $R_{c\text{-potenziale}}$ verrà opportunamente corretto introducendo gli stessi fattori di correzione $F_{h/d}$, F_{Fe} , F_{Tor} , F_{Dir} già esplicitati a proposito del calcolo di $R_{c\text{-opera}}$. Relativamente alle influenze della età della carota al momento della prova di schiacciamento e alla temperatura di maturazione del calcestruzzo in opera, invece, occorre introdurre alcune significative variazioni rispetto alle considerazioni riportate nei paragrafi precedenti in merito alla collaudabilità, presentate nei due paragrafi che seguono.

Età della carota al momento dell'esecuzione della prova di schiacciamento

Nel caso di accertamento della responsabilità del produttore se la prova di schiacciamento viene effettuata su carote con età inferiore a 28 giorni ci si comporterà allo stesso modo di quanto suggerito a proposito della collaudabilità delle strutture. Quindi, il valore sperimentale della resistenza a compressione verrà incrementato mediante il coefficiente F_t desunto dall'equazione [2] per ottenere la resistenza a compressione del calcestruzzo all'età di 28 giorni, stagionatura alla quale vengono sottoposti a compressione i provini confezionati a bocca di betoniera. Se le prove di schiacciamento vengono, invece, effettuate su carote con età maggiore di 28 giorni, contrariamente a quanto illustrato per la collaudabilità, il valore sperimentale della resistenza a compressione misurato sulla carota dovrà essere ridotto attraverso il coefficiente F_t ($\neq 1$) desunto dall'equazione [2] per tener conto che il conglomerato alla stagionatura di 28 giorni (quella a cui vengono schiacciati i provini confezionati a bocca di betoniera) aveva una resistenza inferiore. Pertanto, se, ad esempio, il valore sperimentale della resistenza a compressione misurato su una carota di calcestruzzo (confezionato con cemento di classe CEM 42.5R) con 60 giorni di età è risultato pari a 35 N/mm^2 , ai fini dell'accertamento delle responsabilità questo valore andrà corretto per tramutarlo in quello che il conglomerato avrebbe attinto a 28 giorni. La correzione si effettua moltiplicando il valore sperimentale della resistenza a compressione per il coefficiente F_t calcolato con l'equazione [2] ($F_t = 0.94$): $R_{c\text{-potenziale}} = 35 \cdot 0.94 = 32,9 \text{ N/mm}^2$. In definitiva, quindi, per l'accertamento delle responsabilità del produttore il coefficiente F_t , indipendentemente dall'età a cui avviene lo schiacciamento della carota verrà desunto dall'equazione [2].

Temperatura di maturazione del calcestruzzo in cantiere

I provini di calcestruzzo confezionati a bocca di betoniera ai fini del controllo di accettazione vengono sottoposti alla prova di schiacciamento dopo 28 giorni di maturazione alla temperatura di 20°C . Pertanto, per il calcolo della resistenza cubica equivalente per l'accertamento delle responsabilità del produttore il valore sperimentale ottenuto dalle prove di schiacciamento della carota estratta dalla struttura deve essere opportunamente corretto se la temperatura di maturazione del calcestruzzo in cantiere è diversa da 20°C . Rispetto a quanto stabilito per la collaudabilità della struttura, in questo caso la correzione deve essere effettuata con i coefficienti desunti dalla Tabella 5 indipendentemente dalla temperatura di maturazione e dall'età della carota al momento dell'esecuzione della prova. In sostanza, rispetto a quanto riportato a proposito della collaudabilità si opererà come segue:

- se la temperatura media ponderale è $> 22^\circ\text{C}$ si assume per F_T il valore desunto dalla Tabella 5. In sostanza, se, ad esempio, la resistenza a compressione è stata determinata su una carota estratta da una struttura maturata per 28 giorni alla temperatura di 35°C ai fini dell'accertamento delle responsabilità del fornitore è importante sapere che il conglomerato possiede una resistenza inferiore del 10% ($F_T = 1.11$) a quella che lo stesso impasto avrebbe posseduto a 20°C , temperatura alla quale avviene la maturazione dei provini per il controllo di accettazione confezionati a bocca di betoniera. Pertanto, si procede a correggere il valore sperimentale della resistenza a compressione incrementandolo;

- se la temperatura media ponderale è < 18°C si assume per F_T il valore desunto dalla Tabella 5. In sostanza, se la determinazione della resistenza avvenisse su carote estratte da una struttura maturata alla temperatura media di 15°C dopo 60 giorni dal getto, ai fini dell'accertamento delle eventualità è importante sapere che il valore della resistenza a compressione è maggiore del 5% di quello che lo stesso calcestruzzo avrebbe posseduto se maturato a 20°C. Quindi, si procede ad apportare la correzione (decremento) della resistenza a compressione per il calcolo di $R_{c-potenziale}$.

In tutte le altre situazioni si opera come già suggerito a proposito della collaudabilità. Pertanto, in definitiva per il calcolo della resistenza a compressione cubica equivalente la correzione va effettuata desumendo il coefficiente F_T dalla Tabella 5 indipendentemente dalla temperatura e dall'età a cui la carota viene sottoposta alla prova di compressione.

Fattori aggiuntivi per il calcolo della resistenza caratteristica a compressione equivalente

In sostanza, per quanto almeno sin qui detto, non ci sono differenze significative tra il calcolo della resistenza cubica in opera ($R_{c-opera}$) per la verifica della collaudabilità della struttura e quello della resistenza cubica potenziale per l'accertamento delle responsabilità del produttore ($R_{c-potenziale}$) salvo una diversa modalità di quantificazione dei coefficienti correttivi che tengono conto dell'influenza dell'età della carota al momento dell'esecuzione della prova di schiacciamento (F_i) e della temperatura di maturazione del calcestruzzo in cantiere (F_T). Tuttavia, ci sono dei fattori che influenzano pesantemente il valore della resistenza a compressione equivalente che, invece, non riguardano il calcolo della resistenza cubica in opera. Questi fattori sono relativi a:

- le aggiunte di acqua in autobetoniera;
- le modalità di posa in opera e compattazione del calcestruzzo;
- le procedure e alla durata della maturazione umida delle strutture.

All'approfondimento di queste influenze sono dedicati i paragrafi che seguono.

Le aggiunte di acqua in autobetoniera

Relativamente alle riaggiunte di acqua effettuate in autobetoniera, ai fini dell'accertamento delle responsabilità del produttore, occorre distinguere il caso in cui il calcestruzzo in cantiere:

- a) possiede la lavorabilità pattuita contrattualmente (3) tra fornitore e impresa e le riaggiunte di acqua vengono richieste dall'impresa esecutrice accertasi che la consistenza del conglomerato non è sufficiente per un'agevole esecuzione dell'opera;
- b) ha una classe di consistenza inferiore rispetto a quella pattuita contrattualmente e l'aggiunta di acqua in autobetoniera viene effettuata sotto la responsabilità dell'autista (che in questo contesto rappresenta a tutti gli effetti il produttore del conglomerato).

Prima di procedere ad esaminare i due casi sopramenzionati è opportuno sottolineare che ai fini della verifica della collaudabilità della struttura (Figura 1) è indifferente che l'aggiunta di acqua in autobetoniera avvenga nella situazione a) oppure b). Infatti, la penalizzazione della resistenza a compressione del conglomerato per effetto dell'aggiunta di acqua e, conseguentemente per l'aumento del rapporto a/c, non è più recuperabile. Quindi, ai fini della collaudabilità poco importa quale sarebbe stata la resistenza a compressione del calcestruzzo prima di procedere all'introduzione di acqua in betoniera.

Ai fini dell'accertamento delle responsabilità del produttore, invece, occorre fare un netto distinguo (Figura 1):

- se l'aggiunta di acqua avviene sotto la responsabilità del produttore (cioè viene decisa dall'autista accertosi che il conglomerato possiede un classe di consistenza inferiore a quella pattuita) non occorre apportare alcuna correzione al valore sperimentale della resistenza a compressione misurata sulla carota estratta dalla struttura: il che equivale ad assumere per il coefficiente correttivo che tiene conto di queste riaggiunte (F_{H_2O}) un valore pari ad 1. In questo caso, infatti, anche quando si effettuano correttamente i prelievi a bocca di betoniera gli stessi debbono riguardare il calcestruzzo dopo l'aggiunta di acqua. Quindi, non c'è alcuna differenza, relativamente a quest'aspetto tra calcestruzzo a bocca di betoniera e calcestruzzo in opera;
- se l'aggiunta di acqua avviene su richiesta dell'impresa esecutrice la stessa se ne assume la responsabilità e, pertanto, il prelievo dei cubetti a bocca di betoniera deve avvenire prima che si proceda alla riaggiunta di acqua (4). Quindi, anche per il calcolo della resistenza cubica equivalente è importante correggere il valore sperimentale della resistenza a compressione del calcestruzzo in opera per tener conto dell'abbattimento dovuto alla riaggiunta di acqua. In sostanza, in questa situazione è importante conoscere quale sarebbe stato il valore della resistenza a compressione prima della riaggiunta di acqua. Pertanto, il valore della resistenza a compressione sperimentale misurato sulla carota deve essere incrementato moltiplicandolo per il fattore correttivo F_{H_2O} desunto dalla seguente equazione:

$$[10] \quad F_{H_2O} = \frac{1}{1 - \left(\frac{H_2O}{10} \cdot 0,07 \right)}$$

dove H₂O è il quantitativo di acqua per m³ aggiunto in betoniera.

In accordo con l'equazione [10] la perdita di resistenza derivante dalle riaggiunte è stimabile all'incirca in un 7% per ogni 10 kg/m³ di acqua introdotti nella botte. Se, ad esempio, al momento del getto il calcestruzzo possedeva una lavorabilità S2 conforme a quella pattuita e l'impresa ha richiesto un'aggiunta di acqua di 22 kg/m³ per portare il calcestruzzo in classe di consistenza S4 e, successivamente, dalle prove di schiacciamento la resistenza a compressione della carota estratta dalla struttura ha evidenziato un valore di 27 N/mm², per il calcolo della resistenza a compressione equivalente si effettuerà la seguente correzione:

$$R_{c\text{-potenziale}} = f_{c\text{-carota}} \cdot F_{H_2O} = 27 \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{22}{10} \cdot 0,07 \right)} = 27 \cdot 1,18 = 31,9 \frac{N}{mm^2}$$

Quest'ultimo valore rappresenta la resistenza a compressione del calcestruzzo prima della riaggiunta di acqua richiesta dall'impresa.

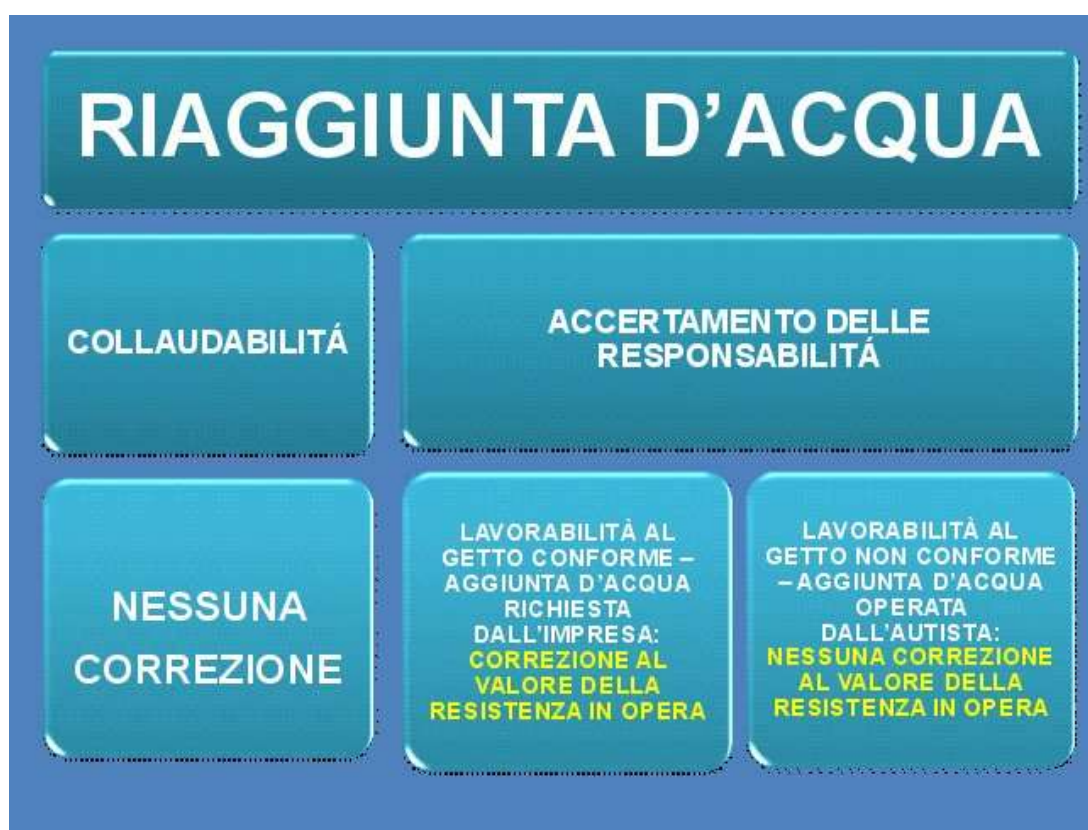


Figura 1 – Le riaggiunte di acqua in autobetoniera ai fini della collaudabilità delle strutture e dell'accertamento delle responsabilità del produttore di calcestruzzo

La compattazione del calcestruzzo delle strutture in opera

Il controllo di accettazione del calcestruzzo, come ben noto, viene effettuato su provini compattati a "rifiuto" contraddistinti dall'assenza di aria in eccesso rispetto a quella "fisiologica" e, pertanto, connotati dalla massima massa volumica. L'estrazione delle carote, invece, avviene da strutture in opera che la cui massa volumica dipende strettamente dalle modalità di effettuazione e dalla durata della vibrazione. Pertanto, se la compattazione dei getti non viene effettuata correttamente, la massa volumica del calcestruzzo in opera può risultare anche sensibilmente inferiore a quella del cubetto compattato a rifiuto per via di una maggiore percentuale di aria residua rispetto a quella fisiologica. Il maggior volume di aria residua si rende responsabile di una diminuzione della resistenza a compressione del calcestruzzo in opera rispetto a quella che lo stesso conglomerato avrebbe attinto qualora fosse stato compattato a rifiuto come il cubetto destinato ai controlli di accettazione a bocca di betoniera. Purtroppo, il deficit di resistenza meccanica a compressione non è più recuperabile e, pertanto, è poco importante dal punto di vista della collaudabilità sapere che un determinato calcestruzzo avrebbe posseduto una resistenza a compressione maggiore di quella determinata sperimentalmente sulla carota se l'opera fosse stata sottoposta ad una compattazione efficace quanto quella del cubetto. Per questo motivo, la resistenza misurata sulle carote non deve essere corretta per tener conto dell'inefficacia della compattazione. Questo equivale a dire che il coefficiente correttivo che tiene conto delle operazioni di compattazione, F_{com} , ai fini della collaudabilità deve essere posto pari ad 1 e per questo motivo, sostanzialmente, non

appare nell'equazione [3] per il calcolo della resistenza cubica in opera ($R_{c-opera}$). Ai fini della valutazione della resistenza cubica a compressione potenziale, invece, è necessario quantificare la diminuzione della resistenza per effetto di una inadeguata compattazione effettuata dall'impresa esecutrice. In sostanza, quindi, si pone il problema di valutare quale sarebbe stato il valore della resistenza a compressione se il calcestruzzo in opera fosse stato compattato a rifiuto alla stregua dei provini per il controllo di accettazione. A tale scopo si ammette che la perdita di resistenza è all'incirca il 7.5% per ogni 1% di diminuzione della massa volumica rispetto al valore massimo atteso (corrispondente a quella del cubetto compattato a rifiuto). In accordo con questo assunto, il fattore di correzione F_{Com} per il quale moltiplicare il valore sperimentale della resistenza a compressione determinato sulla carota vale:

$$[11] \quad F_{Com} = \frac{1}{1 - \left[\left(1 - \frac{m_{vcar}}{m_{vcub}} \right) \cdot 7,5 \right]}$$

dove:

- m_{vcar} è la massa volumica del calcestruzzo della carota in kg/m^3 ;
- m_{vcub} è la massa volumica del cubetto prelevato a bocca di betoniera in kg/m^3 .

Pertanto, se la resistenza a compressione misurata su una carota estratta dalla struttura in opera è risultata pari a $32 N/mm^2$ e la sua massa volumica di $2.250 kg/m^3$ contro quella misurata sul cubetto di $2.310 kg/m^3$, la resistenza cubica a compressione potenziale (cioè quella che avrebbe posseduto la carota se sottoposta ad una compattazione efficace quanto quella del cubetto) sarebbe pari a:

$$R_{c-potenziale} = f_{c-carota} \cdot F_{Com} = 32 \cdot \frac{1}{1 - \left[\left(1 - \frac{2.250}{2.310} \right) \cdot 7,5 \right]} = 32 \cdot 1,24 = 39,74 \frac{N}{mm^2}$$

Il calcolo della resistenza cubica potenziale, che in accordo all'esempio precedente sembrerebbe alquanto semplice, presenta non pochi problemi dal punto di vista pratico in quanto se fossero disponibili le masse volumiche dei cubetti prelevati a bocca di betoniera sarebbero anche disponibili i dati di resistenza meccanica a compressione e, quindi, sarebbe non necessario, per stabilire eventuali responsabilità del fornitore, effettuare alcuna valutazione dei dati di resistenza a compressione relativi alle carote in quanto quelli sui prelievi sarebbero più che sufficienti. In assenza, invece, dei dati relativi ai cubetti, in quanto di questo si sta disquisendo, non sarebbero disponibili le masse volumiche del calcestruzzo compattato a rifiuto. Si potrebbe ovviare a questo inconveniente richiedendo al produttore i dati di massa volumica del calcestruzzo indurito determinati nell'ambito delle normali procedure che egli attua durante il controllo di produzione. Relativamente a quest'aspetto occorre sottolineare che la massa volumica dei cubetti compattati a rifiuto, al pari della resistenza meccanica a compressione, è contraddistinta da una dispersione di risultati (Tabella 7) derivante dal fatto che, durante il campionamento, per via del diverso volume di aggregato grosso tra un cubetto e l'altro, la massa volumica può risultare differente. Pertanto, se si analizza il singolo dato di massa volumica non è detto che ad un minor valore corrisponda una minore resistenza.

SIGLA		$R_{cub} (N/mm^2)$	$m_{vcub} (kg/m^3)$
1		40	2.468
2		37,8	2.468
3		28,6	2.323
4		28,1	2.314
5		40,2	2.412
6		38,2	2.433
7		43	2.367
8		37,5	2.373
9		32,7	2.388
10		34,2	2.388
	MEDIA	36,03	2.384

Tabella 7 – Massa volumica e resistenza a compressione a 28 giorni di cubetti prelevati da uno stesso conglomerato prodotto in giornate distinte e compattati a rifiuto

Ad esempio, in Tabella 7, che si riferisce alle misure di massa volumica e di resistenza a compressione a 28 giorni di cubetti prelevati da uno stesso conglomerato prodotto in giornate distinte e compattati a rifiuto, si rileva come i prelievi n.7 e 8 che posseggono masse volumiche sostanzialmente coincidenti evidenziano resistenze a compressione diverse o, il che è lo stesso, come il prelievo 1, pur possedendo una massa volumica di $2.468 kg/m^3$ molto più alta di quella ($2.367 kg/m^3$) del prelievo 7, possiede resistenza a compressione di $40 N/mm^2$ minore di quella ($43 N/mm^2$) del prelievo (n.7) con la massa volumica più bassa. Questo induce a ritenere che nell'equazione [11] per la stima dell'abbattimento della resistenza derivante da incompleta compattazione per la massa volumica del calcestruzzo compattato a rifiuto si dovrà far riferimento al valore caratteristico della massa volumica desunto dai controlli di produzione ($m_{vkub-produzione}$).

La variabilità dei valori di massa volumica derivanti dal campionamento si riflette evidentemente anche sulle carote estratte dalle strutture. Pertanto, se si analizza una carota singola non è detto che ad un minor valore della massa volumica della carota corrisponda necessariamente un valore più basso della resistenza.

N°	$f_{c-carota}(h/d=1;d=100mm)$ (N/mm ²)	$m_{vcarota}$ (kg/m ³)
1	20.9	2.289
2	19.8	2.252
3	20.8	2.272
4	18.2	2.302
5	25.8	2.328
6	17.9	2.258
7	24.9	2.331
8	20.1	2.311
9	20.0	2.317
10	26.8	2.329
11	23.1	2.357
12	25.2	2.373
13	28.6	2.349
14	24.8	2.358
15	24.3	2.338
Media	22.75	2.318

Tabella 8 – Massa volumica e resistenza a compressione di carote prelevate da una struttura realizzata con calcestruzzo di stessa R_{ck} nominale

Ad esempio, in Tabella 8 si può notare come la carota 2 di massa volumica (2.252 kg/m³) inferiore a quella (2.317 kg/m³) della carota 9 presenta un valore della resistenza a compressione sostanzialmente identico a quello evidenziato da quest'ultima (19,8 e 20,0 N/mm², rispettivamente). Mentre, le carote 9 e 10 che hanno masse volumiche sostanzialmente coincidenti (2.317 e 2.329 kg/m³) presentano resistenze meccaniche significativamente diverse (20,0 e 26,8 N/mm², rispettivamente). Alla luce di queste oscillazioni dei valori di massa volumica è evidente come abbia poco senso (per non dire che può risultare erroneo) effettuare la correzione al valore sperimentale della resistenza misurata sulla singola carota - per tener conto dell'influenza della compattazione - confrontando la massa volumica di ogni carota estratta con quella del calcestruzzo compattato a rifiuto. In definitiva, quindi, per il calcolo della resistenza cubica potenziale ai fini dell'accertamento delle responsabilità del produttore, relativamente all'influenza della compattazione è opportuno far riferimento al valore caratteristico della massa volumica dell'intero lotto di carote prelevato ($m_{vkcarote-lotto}$). Questo valore verrà confrontato con quello caratteristico dei cubetti compattati a rifiuto desunto dai dati di produzione del calcestruzzo.

In accordo con quanto affermato, il coefficiente di correzione riferito all'intero lotto di carote, $F_{Com-lotto}$, verrà determinato in accordo alla seguente equazione:

$$[12] \quad F_{Com-lotto} = \frac{1}{1 - \left[\left(1 - \frac{m_{vkcar-lotto}}{m_{vkcub-produzione}} \right) \cdot 7,5 \right]}$$

Alla luce di quanto sopra riportato è evidente che quando si intende accertare la responsabilità del produttore attraverso il calcolo della resistenza cubica equivalente occorre sottoporre a prova un lotto di carote che sia rappresentativo, in termini di massa volumica del conglomerato, delle strutture che si stanno indagando. Questo significa che il numero di carote minimo da utilizzare deve essere anche per volumi di calcestruzzo inferiori a 50 m³ almeno pari a 7. Questo lotto minimo verrà incrementato di 3 carote per ogni ulteriori 50 m³ di conglomerato gettato.

Le modalità e la durata della maturazione umida delle strutture

I provini confezionati a bocca di betoniera per il controllo di accettazione del calcestruzzo vengono maturati in ambiente con U.R. del 95% al fine di favorire una corretta idratazione del cemento e, conseguentemente, lo sviluppo delle resistenze meccaniche a compressione nel tempo. Il calcestruzzo in opera, salvo che nelle strutture idrauliche o permanentemente immerse, viene maturato a umido per tempi molto più brevi, sovente anche per sole 24 ore. La minore durata della maturazione umida determina per il calcestruzzo in opera un minor grado di idratazione e, conseguentemente, un minor valore della resistenza a compressione rispetto a quello che lo stesso conglomerato avrebbe attinto qualora fosse stato mantenuto in ambiente umido per 28 giorni. È da far notare, tuttavia, come l'assenza di maturazione umida determina una diminuzione della resistenza meccanica a compressione soltanto nei primi 2,5 ÷ 3 cm di calcestruzzo più corticale. Pertanto, se si vuole eliminare l'influenza della mancata maturazione umida sul valore della resistenza a compressione della carota estratta dalla struttura basta rimuovere, mediante taglio meccanico, i primi 3 cm di calcestruzzo corticale. Questa operazione è possibile anche per le strutture di spessore inferiore a 120 mm esposte da entrambi i lati all'atmosfera asciutta dove l'asportazione di 30 mm di calcestruzzo su entrambi i fronti della parete determinerebbe per le carote un'altezza di 50÷60 mm, ancora sufficiente per poter effettuare la prova di schiacciamento per determinare la resistenza a compressione. Pertanto

relativamente alla maturazione umida dei getti si può concludere che ai fini dell'accertamento delle responsabilità del produttore rimuovendo 2,5 ÷ 3 cm del calcestruzzo corticale non si rende necessario apportare alcuna correzione al valore sperimentale della resistenza a compressione misurata sulle carote estratte dalla struttura.

CALCOLO DELLA RESISTENZA CUBICA POTENZIALE AI FINI DELL'ACCERTAMENTO DELLE RESPONSABILITÀ DEL PRODUTTORE

In definitiva, riassumendo tutte le considerazioni contenute ai precedenti paragrafi si può suggerire il metodo *per il calcolo della resistenza cubica potenziale ai fini dell'accertamento delle responsabilità del fornitore del calcestruzzo*. Esso consiste di due stadi distinti descritti nel seguito.

• PRIMO STADIO

Il primo stadio del metodo suggerito è finalizzato alla trasformazione del valore sperimentale della resistenza a compressione di ogni singola carota in quello potenziale escludendo in questa prima fase di quantificare l'effetto derivante da una incompleta compattazione:

$$[13] \quad R_{\text{c-potenziale-i}} = f_{\text{c-carote}} \cdot F_{\text{h/d}} \cdot F_{\text{Fe}} \cdot F_{\text{Tor}} \cdot F_{\text{Dir}} \cdot F_{\text{t}} \cdot F_{\text{T}} \cdot F_{\text{H2O}}$$

dove:

- $R_{\text{c-potenziale-i}}$ è la resistenza cubica potenziale riferita alla carota i -esima (in N/mm^2);
- $f_{\text{c-carota}(d=100\text{mm})}$ è il valore sperimentale della resistenza a compressione (in N/mm^2) determinato sulla carota estratta dalla struttura in opera avente diametro pari a 100 mm e rapporto h/d qualsiasi, sottoposta al taglio per la rimozione di almeno 25 mm del calcestruzzo corticale e a successiva spianatura e rettifica meccanica prima dell'esecuzione della prova di schiacciamento;
- $F_{\text{h/d}}$, F_{Fe} , F_{Tor} , F_{Dir} assumono lo stesso significato già esplicitato nell'equazione [3] a proposito della collaudabilità della struttura;
- F_{t} è il coefficiente che tiene conto dell'età della carota al momento dell'esecuzione della prova di schiacciamento. Per il calcolo di avvalersi dell'equazione [3] *indipendentemente dall'età a cui la carota viene sottoposta alla prova di schiacciamento*;
- F_{T} è il coefficiente che tiene conto della temperatura di maturazione del calcestruzzo in cantiere. Per la quantificazione di F_{T} avvalersi della Tabella 5 *indipendentemente dalla temperatura di maturazione in cantiere e dall'età a cui la carota viene sottoposta alla prova di schiacciamento*;
- F_{H2O} è il coefficiente che tiene conto delle aggiunte di acqua in betoniera. Per il calcolo di F_{H2O} avvalersi dell'equazione [10] se l'aggiunta di acqua è richiesta dall'impresa. Per aggiunte di acqua effettuate sotto la responsabilità del fornitore assumere F_{H2O} pari a 1.

• SECONDO STADIO

Calcolati i singoli valori della resistenza cubica equivalente derivanti da quelli sperimentali ottenuti sulle carote estratte dalla struttura si procederà a calcolare:

1. il valore caratteristico della massa volumica delle carote dell'intero lotto ($m_{\text{vkcarote-lotto}}$) sottoposto a prova;
2. il coefficiente $F_{\text{Com-lotto}}$ in accordo alla equazione [12];
3. la resistenza cubica media potenziale dell'intero lotto ($R_{\text{cm-potenziale-lotto}}$) corretta con il fattore $F_{\text{Com-lotto}}$. Questa resistenza si ottiene dalla media aritmetica delle singole resistenze potenziali calcolate con l'equazione [13] moltiplicata per il fattore $F_{\text{Com-lotto}}$;
4. la resistenza cubica potenziale minima dell'intero lotto ($R_{\text{cmin-potenziale-lotto}}$). Questo valore si ottiene moltiplicando il valore minimo delle resistenze potenziali desunte con l'equazione [13] per $F_{\text{Com-lotto}}$.

Noti i valori di $R_{\text{cm-potenziale-lotto}}$, di $R_{\text{cmin-potenziale-lotto}}$, del tipo di controllo di accettazione (A o B (5)) fissato dal capitolato e della resistenza caratteristica a compressione di progetto ($R_{\text{ckprogetto}}$) pattuita contrattualmente tra fornitore e impresa si potrà verificare se sono soddisfatte o meno le disequazioni previste dalle Norme Tecniche per le Costruzioni. A chiarimento del metodo proposto si riporta nel paragrafo che segue un esempio pratico.

Esempio di calcolo della resistenza cubica in equivalente ai fini dell'accertamento delle responsabilità del produttore

Si supponga di aver effettuato una campagna consistita in 15 carotaggi (diametro 100 mm) da una pavimentazione in calcestruzzo, di spessore pari a 20 cm armata con una rete elettrosaldata poggiata sulla massicciata, realizzata durante il periodo invernale da 60 giorni circa. Durante questo periodo la temperatura media ponderale esistente in cantiere è stata di 15°C. Le carote sono state sottoposte dapprima ad un taglio meccanico per la rimozione di circa 5 cm di calcestruzzo da entrambi i lati e, successivamente, a rettifica e spianatura fino ad ottenere un'altezza di 100 mm. I risultati sperimentali di resistenza meccanica a compressione e massa volumica ottenuti per le singole carote sono riportati in Tabella 9. A completamento delle informazioni disponibili dai documenti di trasporto emerge che al momento dell'esecuzione del getto l'impresa ha richiesto un'aggiunta di acqua in betoniera di 15 kg/m^3 . Durante l'esecuzione dei lavori, inoltre, sono stati omessi gli obbligatori prelievi per il confezionamento dei cubetti destinati al "controllo di accettazione" di tipo A per verificare se il calcestruzzo fornito fosse o meno conforme al valore caratteristico di progetto

($R_{ck-progetto}$) e pattuito contrattualmente tra impresa e fornitore pari a 35 N/mm^2 . Dal dossier fornito dal produttore, infine, emerge che il calcestruzzo è stato confezionato con cemento CEM II/A-LL 42.5R e che il valore caratteristico della massa volumica caratteristica del calcestruzzo compattato a rifiuto desunto dai dati di produzione ($m_{vk-cub-produzione}$) è pari a 2.303 Kg/m^3 . Stabilire in base ai valori di resistenza a compressione ottenuti sulle carote se esistono responsabilità da parte del produttore del conglomerato, cioè se il calcestruzzo fornito possedeva resistenza caratteristica inferiore a quella pattuita contrattualmente.

Verifichiamo dapprima se la struttura è collaudabile o meno utilizzando la formula precedentemente menzionata:

$$R_{c-opera} = f_{c-carote} \cdot F_{h/d} \cdot F_{Fe} \cdot F_{Tor} \cdot F_{Dir} \cdot F_t \cdot F_T$$

snellezza: $h/d=1$, $F_{h/d}$ vale 1,0 (Tabella 2);

ferri assenti: $F_{Fe} = 1,0$ (equazione [1]);

tormento: considerato sulla media dei valori $F_{Tor} = 1,10$ (Tabella 3);

direzione carotaggio parallela a quella di getto: $F_{Dir} = 1,00$ (Tabella 4);

età della carota 60 giorni e cemento di classe 42.5R: $F_t = 1,00$;

temperatura di maturazione in cantiere 15°C e 60 giorni: $F_T = 1,00$.

Quindi, si può procedere al calcolo di $R_{c-opera}$:

$$R_{c-opera} = f_{c-carote} \cdot F_{h/d} \cdot F_{Fe} \cdot F_{Tor} \cdot F_{Dir} \cdot F_t \cdot F_T = f_{c-carote} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,10 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = f_{c-carote} \cdot 1,10$$

I valori ottenuti per $R_{c-opera}$ sono riportati in Tabella 9.

Si può procedere, quindi, al calcolo dello scarto quadratico medio dei valori di $R_{c-opera}$ il quale risulta pari a $2,2 \text{ N/mm}^2$ e successivamente alla stima della resistenza caratteristica cubica in opera $R_{ck-opera}$ in accordo con la EN 13791:

$$R_{ck-opera} = 25,7 - 1,48 \cdot 2,2 = 2,4 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{ck-opera} = 22,88 + 4 = 26,9 \text{ N/mm}^2$$

Pertanto, il valore caratteristico della resistenza cubica in opera vale $22,4 \text{ N/mm}^2$.

Questo valore caratteristico non soddisfa il criterio di collaudabilità stabilito dalla EN 13791, in quanto:

$$R_{ck-opera} = 22,4 \text{ N/mm}^2 < 29,75 \text{ N/mm}^2 = 0,85 \cdot 35 = 0,85 \cdot R_{ck-progetto}$$

Ne consegue che *la struttura non è collaudabile in accordo alla EN 13791*.

In accordo alle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14.01.2008):

$$R_{cm-opera} = 25,7 \text{ N/mm}^2 < 37,9 \text{ N/mm}^2 = 0,85 \cdot 44,6 = 0,85 \cdot (35 + 9,6) = 0,85 \cdot R_{cm-progetto}$$

Quindi, *la struttura non è collaudabile in accordo al D.M. 14.01.2008*.

Si pone, pertanto, il problema di stabilire se la non collaudabilità della struttura sia da attribuire o meno al fornitore del calcestruzzo. La prima operazione da fare è quella di calcolare la resistenza cubica potenziale di ogni singola carota ($R_{cpotenziale-i}$), senza tener conto dell'influenza sui dati di resistenza a compressione dell'eventuale inaccuratezza nella compattazione dei getti, utilizzando l'equazione [13]:

$$R_{cpotenziale-i} = f_{c-carote} \cdot F_{h/d} \cdot F_{Fe} \cdot F_{Tor} \cdot F_{Dir} \cdot F_t \cdot F_T \cdot F_{H2O}$$

snellezza: $h/d=1$, $F_{h/d}$ vale 1,0 (Tabella 2);

ferri assenti: $F_{Fe} = 1,0$ (equazione [1]);

tormento: considerato sulla media dei valori $F_{Tor} = 1,10$ (Tabella 3);

direzione carotaggio parallela a quella di getto: $F_{Dir} = 1,00$ (Tabella 4);

età della carota 60 giorni e cemento di classe 42.5R: $F_t = 0,94$ (Equazione [2]);

temperatura di maturazione in cantiere 15°C e 60 giorni: $F_T = 0,95$ (Tabella 5);

aggiunta di acqua in betoniera richiesta dall'impresa 15 kg/m^3 : $F_{H2O} = 1,12$ (Equazione [10])

Si può procedere quindi al calcolo di:

$$R_{cpotenziale-i} = f_{c-carote} \cdot F_{h/d} \cdot F_{Fe} \cdot F_{Tor} \cdot F_{Dir} \cdot F_t \cdot F_T \cdot F_{H2O} = f_{c-carote} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,10 \cdot 1 \cdot 0,94 \cdot 0,95 \cdot 1,12 = f_{c-carote} \cdot 1,1$$

Come si può notare, nel caso in esame la resistenza cubica potenziale (al netto dell'effetto dovuto alla compattazione) è sostanzialmente coincidente con il valore della resistenza cubica in opera in quanto l'incremento di resistenza da apportare per tener conto delle riaggiunte di acqua richieste dall'impresa è compensato dal fatto che le prove di schiacciamento avvengono su carote maturate a temperature più basse di 20°C e con un'età (60 giorni) maggiore della stagionatura (28 giorni) alla quale sarebbe dovuti essere sottoposti a prova i cubetti. I valori ottenuti per $R_{cpotenziale-i}$ sono riportati in Tabella 9.

In base alle masse volumiche misurate per i singoli carotaggi si determina il valore caratteristico di questa grandezza relativo all'intero lotto sottoposto a prova ($m_{vk-carote-lotto}$) pari nel caso in esame a 2.263 kg/m^3 .

A questo punto si può calcolare il coefficiente correttivo che tiene conto delle modalità di compattazione riferito all'intero lotto di carote sottoposte ad indagine tenendo conto della massa volumica del calcestruzzo compattato a rifiuto (2.303 kg/m^3) desunta dai dati di produzione.

$$F_{\text{Com-lotto}} = \frac{1}{1 - \left[\left(1 - \frac{m_{\text{vkcar-lotto}}}{m_{\text{vkub-produzione}}} \right) \cdot 7,5 \right]} = 1,18$$

Si può, a questo punto, calcolare il valore medio e quello minimo della resistenza cubica equivalente dell'intero lotto e che tengono conto anche dell'influenza della compattazione:

$$R_{\text{cm-potenziale-lotto}} = 25,68 \cdot 1,18 = 30,32 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{\text{cmin-potenziale-lotto}} = 22,88 \cdot 1,18 = 27 \text{ N/mm}^2$$

Carota N°	$f_{\text{c-carota(d=100mm)}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$R_{\text{c-opera}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$R_{\text{cpotenziale-i}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$m_{\text{vcarota-i}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$
1	21,09	23,20	23,20	2.289
2	22,80	25,08	25,08	2.252
3	20,80	22,88	22,88	2.272
4	23,20	25,52	25,52	2.302
5	25,80	28,38	28,38	2.328
6	24,20	26,62	26,62	2.258
7	24,90	27,39	27,39	2.331
8	21,10	23,21	23,21	2.311
9	21,00	23,10	23,10	2.317
10	26,80	29,48	29,48	2.329
11	21,10	23,21	23,21	2.357
12	23,20	25,52	25,52	2.373
13	25,60	28,16	28,16	2.349
14	24,30	26,73	26,73	2.358
15	24,30	26,73	26,73	2.338
VALORE MEDIO		25,68	25,68 (NO COMPATTAZIONE) 30,32 (CON COMPATTAZIONE)	-
VALORE MINIMO		22,88	22,88 (NO COMPATTAZIONE) 27 (CON COMPATTAZIONE)	
VALORE CARATTERISTICO		22,4	27,1 (CON COMPATTAZIONE)	2.256

Tabella 9 – Valori sperimentali della resistenza a compressione misurata sulle carote, resistenza a compressione potenziale $R_{\text{cpotenziale-i}}$ e massa volumica dei singoli carotaggi

Per l'opera era stato previsto un controllo di accettazione di tipo A e la resistenza caratteristica a compressione di progetto (oltre che pattuita contrattualmente) era di 35 N/mm^2 . Ai fini dell'accertamento delle responsabilità del fornitore è necessario verificare le seguenti disuguaglianze:

$$R_{\text{cpotenziale-lotto}} = 30,32 \text{ N/mm}^2 < 35 + 3,5 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{\text{cminpotenziale-lotto}} = 27,0 \text{ N/mm}^2 < 35 - 3,5 \text{ N/mm}^2$$

Entrambe le disuguaglianze non sono verificate. Pertanto, si può concludere che *il calcestruzzo fornito possedeva resistenza caratteristica a compressione*, qualora la stessa fosse stata determinata sui cubetti confezionati e stagionati in accordo alle norme di legge sui controlli di accettazione, non conforme a quella prevista in progetto e contrattualmente pattuita. La resistenza caratteristica del calcestruzzo fornito, infatti, si attesta a circa 27 N/mm^2 inferiore, quindi, al valore (35 N/mm^2) di progetto.

Tenendo presente che il valore caratteristico della resistenza cubica in opera è pari a $22,4 \text{ N/mm}^2$ e risulta inferiore dell'85% del valore caratteristico della resistenza cubica potenziale ($23 = 0,85 \cdot 27$) si può anche concludere che la non collaudabilità della struttura ricade sotto la *responsabilità sia del fornitore di conglomerato che dell'impresa esecutrice*.

NOTE

- (1) Nella circolare applicativa del D.M.14.01.2008 si stabilisce che il valore medio della resistenza cubica di progetto si calcola incrementando il valore caratteristico della resistenza cubica a compressione caratteristica di 9,6 N/mm² (Ad esempio se $R_{ck-progetto} = 30 \text{ N/mm}^2 \rightarrow R_{cm-progetto} = 30 + 9,6 = 39,6 \text{ N/mm}^2$)
- (2) Resta inteso che se prima dell'inizio dell'esecuzione dei lavori non è stato esplicitamente introdotto nel capitolato speciale rivolto all'impresa che la collaudabilità deve essere effettuata con il criterio previsto dalla norma EN 13791 la stessa dovrà essere verificata con il criterio previsto al paragrafo 11.2.6 delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M.14.01.2008)
- (3) La classe di consistenza pattuita contrattualmente deve essere garantita dal fornitore per un tempo di 30 minuti circa dall'arrivo dell'autobetoniera in cantiere trascorso il quale dell'eventuale minore lavorabilità del conglomerato rispetto a quella pattuita si rende responsabile l'impresa esecutrice delle opere
- (4) Quando si procede alla riaggiunta di acqua in autobetoniera è sempre opportuno specificare sul documento di trasporto non solo il quantitativo introdotto nella botte, ma anche chi (autista o impresa) si è reso responsabile di questa operazione
- (5) Nel caso si adotti il controllo di tipo B sarà anche necessario, una volta corretti i singoli valori della resistenza equivalente desunti applicando l'equazione [13] mediante il coefficiente $F_{Com-lotto}$, calcolare lo scarto quadratico medio dei valori di resistenza equivalente dell'intero lotto ($S_{nequiv-lotto}$)

Bibliografia

- 1 L. Coppola, "Controlli della resistenza a compressione del calcestruzzo in opera in accordo alle nuove Norme Tecniche per le costruzioni", L'Edilizia, 141, 2005, pp. 30-39
- 2 L. Coppola, "Concretum", pp.660, McGraw-Hill, Milano, Italia (2007), ISBN 978-88-386-6465-6
- 3 L. Coppola, "Il manuale del calcestruzzo di qualità", pp.350, Il Sole 24 Ore, Milano, Italia (Aprile 2008), ISBN 978 88 324 7027 - 7
- 4 L. Coppola, "Concrete Tender. Capitolati speciali d'appalto, prescrizioni di capitolato e voci di elenco prezzi per il calcestruzzo destinato a edifici residenziali, commerciali, industriali e ad infrastrutture dell'edilizia civile.", pp. 364, Editore Studium Bergomense, Italia (Ottobre 2008), ISBN 978-88-89555-07-1
- 5 UNI-EN 12390-1. Prove sul calcestruzzo indurito. Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme
- 6 UNI-EN 12390-2. Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza
- 7 UNI-EN 12390-3. Prova sul calcestruzzo indurito. Resistenza alla compressione dei provini
- 8 UNI-EN 12390-4. Prova sul calcestruzzo indurito. Resistenza alla compressione. Specifiche per macchina di prova
- 9 Linee Guida sul calcestruzzo strutturale a cura del Servizio Tecnico Centrale della presidenza del Consiglio Superiore dei LL.PP
- 10 Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008)
- 11 UNI-EN 206. Calcestruzzo. Specificazione, prestazione, produzione e conformità
- 12 UNI-EN 12504-1. Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Carote – Prelievo, esame e prova di compressione
- 13 EN 13791. Assessment of in situ compressive strength in structures and precast concrete components