

Normativa e controllo di qualità del calcestruzzo: dalla produzione alla verifica in sito

di Vito Alunno Rossetti e Antonella Ferraro

1. Premessa

La certezza della qualità del conglomerato cementizio, in particolare della resistenza a compressione è un presupposto essenziale per l'affidabilità delle opere strutturali.

Ottenere e accertare la resistenza richiesta del conglomerato non è semplice: infatti intervengono oltre che fattori relativi alla composizione, alla lavorazione e maturazione (rapporto a/c, qualità del cemento, qualità e composizione granulometrica degli aggregati o di eventuali aggiunte, modalità di compattazione, tempo della stagionatura, condizioni dell'ambiente di maturazione) anche le modalità di misura (modalità di confezione, maturazione, forma e dimensione del provino, schiacciamento dei provini in laboratorio).

Nella presente nota si vogliono individuare i fattori che intervengono nel controllo della resistenza del calcestruzzo nelle diverse fasi: durante la produzione, durante il controllo, al momento dell'impiego e infine, quando necessario, in sito, all'interno delle strutture. Per alcune di queste fasi vengono riportate delle situazioni esemplificative tratte da casi pratici.

2. Controllo della produzione

A differenza degli altri componenti del calcestruzzo, questo non ha una norma armonizzata né il marchio CE. Tuttavia, secondo le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. del 14 settembre 2005, nel seguito

NT) il calcestruzzo utilizzato per scopi strutturali può essere prodotto con processo industrializzato in regime di controllo di produzione in stabilimento, una notevole novità rispetto alle precedenti norme (D.M. '96).

A tal fine è necessario disporre di apparecchiature e personale adeguati, realizzare il controllo della produzione in stabilimento, sviluppare un sistema di gestione della qualità (UNI EN 9001) certificato da un organismo terzo.

Queste modalità sono le stesse richieste per l'attribuzione del marchio CE.

Preliminarmente alla produzione di una determinata miscela di calcestruzzo, secondo la normativa è prevista una fase di studio della miscela ad opera del produttore o dell'impresa, allo scopo di produrre conglomerato avente la resistenza caratteristica e le altre proprietà di progetto.

2.1 Fattori che influiscono sulla qualità alla produzione

La qualità del calcestruzzo, in particolare la sua resistenza, dipende sia dalla quantità e qualità dei materiali (principalmente aggregati e cemento), che dalle modalità operative.

Le inevitabili oscillazioni delle proprietà dei materiali (si tratta di prodotti naturali o da essi ottenuti) si riflettono sulle resistenze ottenute, sia direttamente sia tramite la dispersione dei risultati, che a sua volta influisce sul valore caratteristico.

Oltre ad un'accurata scelta dei materiali disponibili e ad un attento proporzionamento del calcestruzzo, è necessaria anche una corretta tecnologia di preparazione dell'impasto, miscelazione e trasporto.

Il problema principale che si riscontra nelle centrali di betonaggio, per la preparazione della miscela, è il controllo del contenuto di acqua, in particolare dell'umidità dell'aggregato: l'acqua introdotta con l'aggregato può variare da impasto a impasto, producendo scarti sensibili nelle proprietà del calcestruzzo, sia fresco sia indurito.

I dispositivi in grado di eseguire in modo continuo e automatico le pesate, correggendo opportunamente la quantità di aggregato e di acqua aggiunta non hanno dato a tutt'oggi risultati completamente soddisfacenti.

Inoltre, sono importanti le modalità di miscelazione; i premiscelatori sono più efficaci delle autobetoniere, producendo un calcestruzzo più omogeneo. Anche la durata della miscelazione ha la sua importanza: l'omogeneità di un impasto migliora con l'aumentare del tempo di miscelazione.

2.2 Metodi per monitorare la qualità del calcestruzzo alla produzione

L'utilizzo del calcestruzzo avviene facendo affidamento su una caratteristica al momento sconosciuta e che può essere determinata solo dopo 28 giorni.

Il produttore, per evitare di produrre un materiale con una resistenza inaccettabilmente bassa o inutilmente alta, che possono influire sulla dispersione, necessita di metodi per la previsione della resistenza a 28 giorni utilizzando dati ottenuti a scadenze più brevi, riconoscendo se le oscillazioni dei valori a breve termine sono fisiologiche o costituiscono un trend da correggere. Uno dei metodi utilizzati per rilevare anomalie e operare eventualmente delle correzioni è ►

ad esempio il *Cusum System*¹: è usato monitorando la resistenza media, la deviazione standard e la relazione tra la resistenza iniziale, in genere quella a 7 giorni, e la resistenza a 28 giorni.

Tale metodo aiuta ad individuare i cambiamenti di queste proprietà, indicando anche quando intraprendere un'azione per aumentare la probabilità di mantenere nei limiti i valori richiesti.

Con il Cusum System decisioni appropria-

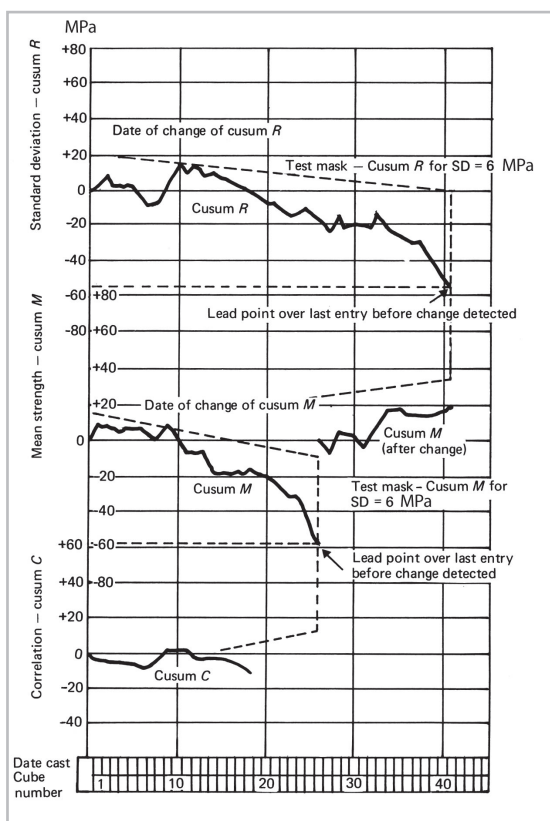


Fig. 1 - Esempi di grafici che si utilizzano con il metodo Cusum System

te possono essere prese anche sulla base di pochi risultati. In Figura 1. si riporta un esempio dei tipi di grafici che si ottengono con tale metodo.

2.3 Prelievi all'impianto e prelievi dei controlli di accettazione

Nel trasferimento dalla centrale di betonaggio al getto, nelle casseforme si possono verificare variazioni della qualità del calcestruzzo.

Nella Figura 2 e Figura 3, vengono riportati gli andamenti delle resistenze di una stessa miscela (R_{ck} 35) misurate all'impianto dal produttore per l'autocontrollo di qualità e in cantiere, da un laboratorio ufficiale, per i controlli di accettazione, durante alcuni mesi. Si può osservare come la variabilità dei valori ottenuti, incluso un periodo di comportamento anomalo (con resistenze sia insufficienti sia troppo elevate), è molto più contenuta all'impianto (la deviazione standard è 2.2 MPa all'impianto* contro 4 MPa in cantiere): le resistenze sono comprese tra 37 e 47 MPa all'impianto, mentre in cantiere variano tra 30 e 57 MPa (si vedano peraltro, più avanti, i valori ottenuti in questo cantiere da due laboratori che hanno eseguito le prove sulla stessa miscela). I fattori che possono intervenire vengono analizzati in seguito.

3. Il controllo alla consegna

Secondo le Norme Tecniche, il conglomerato va prodotto in controllo di qualità, con lo scopo di accertare che rispetti la resistenza caratteristica di progetto.

Tale controllo si articola in 3 fasi:

- la valutazione preliminare della resistenza, come già detto, serve per determinare, prima dell'inizio delle opere, la miscela per produrre conglomerato avente la resistenza caratteristica di progetto;
- controllo di accettazione: riguarda il controllo del conglomerato durante l'esecuzione delle opere, contestualmente al getto del relativo componente strutturale;

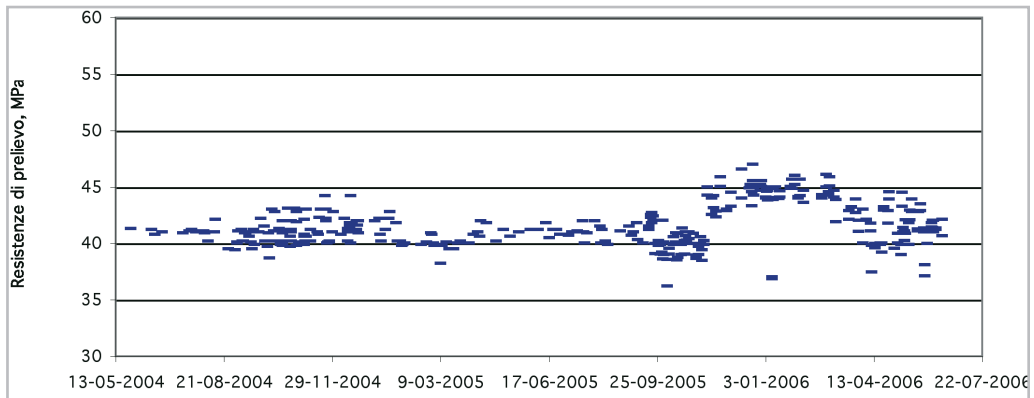


Fig. 2 - Resistenze misurate all'impianto nell'ambito del controllo di produzione (Cantiere 7)

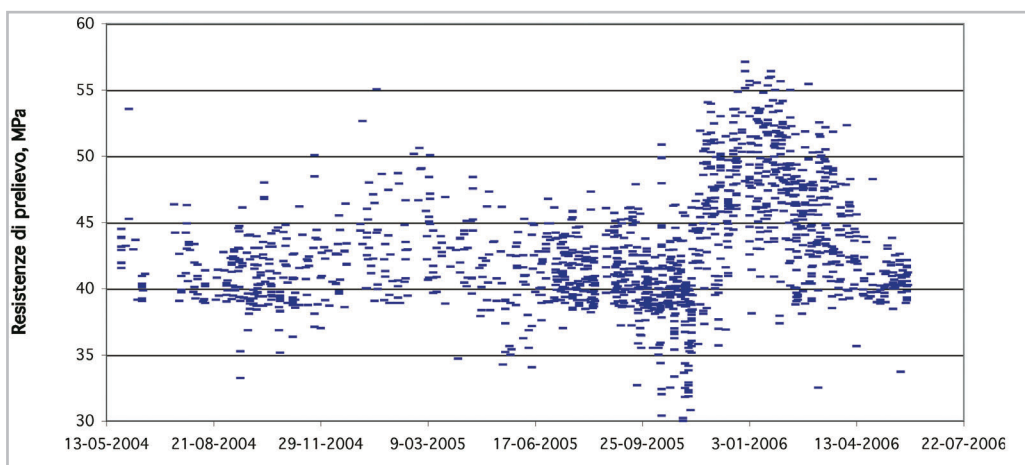


Fig. 3 - Resistenze di prelievo del Cantiere 7

- prove complementari: sono prove da eseguire, ove necessario e/o utile, a completamento delle precedenti prove.

I controlli di accettazione sono obbligatori per qualunque costruzione in cemento armato.

3.1 Il controllo di accettazione

Il controllo di accettazione, oltre che per il controllo di qualità del calcestruzzo ai fini della sicurezza strutturale, riveste un'importanza fondamentale anche dal punto di vista della qualità contrattuale della forniture di calcestruzzo, dal preconfessionatore all'impresa o da questa al committente. Se i risultati del controllo di accettazione non sono positivi, oppure mancano, nascono spesso dei contenziosi, che in certi casi si sviluppano a sfavore del fornitore; questi deve pertanto cautelarsi, accettando contrattualmente solo i risultati dei prelievi effettuati in contraddittorio in presenza del direttore dei lavori. È indispensabile che il prelievo e le prove vengano eseguiti attenendosi scrupolosamente alle indicazioni delle norme in modo che non sia possibile un cambiamento ►

* In questa nota si riportano dati sperimentali utilizzati nell'ambito dell'attività professionale degli scriventi, provenienti da diversi cantieri e/o prodotti da diversi laboratori, con una numerazione assegnata precedentemente.

sostanziale delle proprietà significative del calcestruzzo dal momento del prelievo alla fine delle lavorazioni.

3.2 Novità introdotte dalle Norme Tecniche D.M. 14 settembre 2005

Le Norme Tecniche, D.M. del 14 settembre 2005, introducono alcune novità per il controllo di accettazione:

- l'obbligo del controllo di tipo B per un quantitativo maggiore di 1500 m³; con la norma precedente si poteva scegliere uno dei due tipi;
- il fattore di probabilità portato a 1.48 da 1.4 per il controllo di tipo B;
- introduzione del coefficiente di variazione per il controllo di tipo B;
- la possibilità dell'utilizzo di distribuzioni diverse dalla normale se si eseguono controlli statistici accurati, sempre nel caso del controllo di tipo B.

3.2.1 Fattore di probabilità k

Come già detto, nelle nuove norme il fattore di probabilità k è stato modificato: per il controllo di accettazione di tipo statistico, il tipo B, si pone $k = 1.48$ (contro 1.4 della norma precedente). La Norma stabilisce che

il conglomerato venga individuato tramite la sua resistenza caratteristica, ovvero la resistenza a compressione al di sotto della quale si può attendere di trovare il 5% della popolazione di tutte le misure di resistenza. In realtà, in corrispondenza di un frattile del 5% troviamo un fattore di probabilità $k=1.64$, mentre in corrispondenza del valore $k=1.48$ troviamo un frattile di circa 7% (circa 8% per $k=1.4$). Questo significa che nel controllo di accettazione in realtà si accetta che solo il 93% delle misure siano superiori all' R_{ck} e che il 7% e non il 5% siano inferiori. Inoltre, considerando tale valore di k, la Norma consente di accettare in realtà un valore della resistenza media più basso di quello che risulta dalla definizione della resistenza caratteristica ($R_m \geq R_{ck} + k\sigma$, in cui σ è lo scarto quadratico medio).

Analizzando anche le Normative italiane precedenti al D.M. del 2005, possiamo notare come il valore assunto dal coefficiente k sia variato nel corso degli anni: le norme meno recenti riportavano valori di k più conservativi e variabili in funzione del numero di prelievi disponibili; nel tempo, sono stati attribuiti a k valori più bassi ed indipendenti dal numero di prelievi. In Figura 4 si riportano i frattili ►

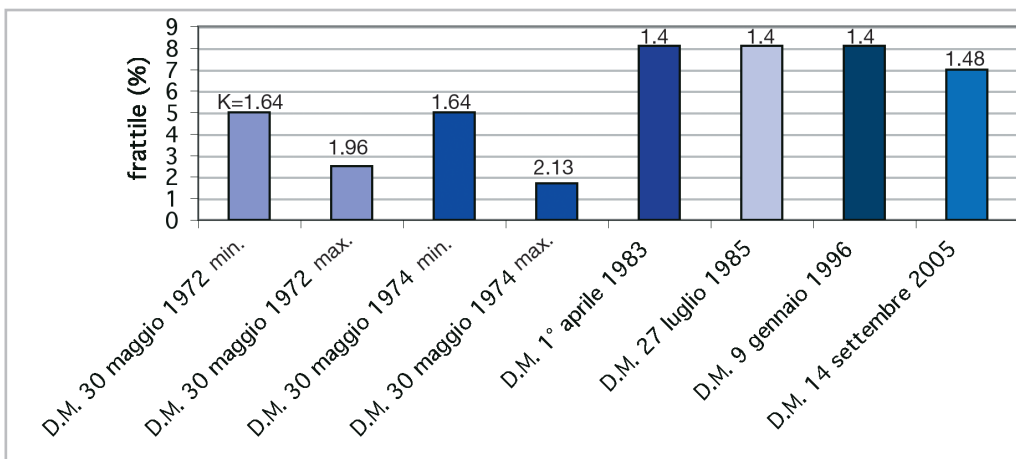


Fig. 4 - Frattili corrispondenti ai valori assunti da k nelle successive Normative. Con max e min sono indicati i valori massimi e minimi di k quando esso dipende dalla numerosità dei prelievi

corrispondenti ai fattori di probabilità k dalle varie normative.

3.2.2 Il coefficiente di variazione

Secondo la nuova norma non sono accettabili calcestruzzi con coefficiente di variazione (CV) superiore a 0.3. Inoltre, nel caso di

norma. Si può osservare come per $CV < 0.2$ le deviazioni standard per ciascuna classe di resistenza si riducono di circa la metà.

In diversi casi da noi analizzati, si è riscontrato che in pratica, anche in situazioni relative a non conformità, per i calcestruzzi più utilizzati, di classe 25, 30 e 35, la deviazione

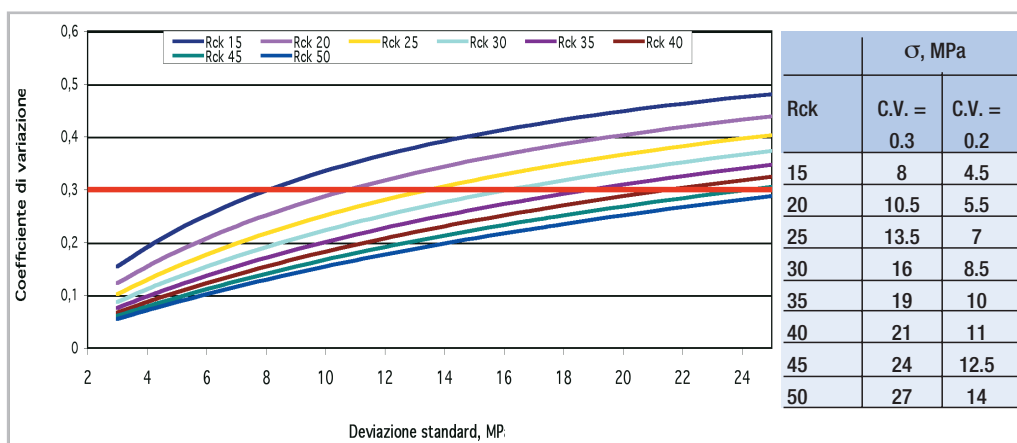


Fig. 5 - Curve del coefficiente di variazione in funzione dello scarto quadratico medio e della resistenza caratteristica

controllo di tipo B, per calcestruzzi con tale coefficiente superiore a 0.2, occorrono controlli molto accurati anche in opera.

In precedenza non si era mai fatto riferimento al coefficiente di variazione. Considerare non accettabili calcestruzzi con $CV > 0.3$, significa porre per la prima volta un limite anche allo scarto quadratico medio dei valori delle resistenza di prelievo, in relazione alla resistenza caratteristica. Con tale limite, si ammette comunque, per ciascuna classe di resistenza, una deviazione standard alquanto elevata (più della metà della resistenza caratteristica).

Nella Figura 5 seguente, vengono riportate le curve che rappresentano il coefficiente di variazione in funzione della deviazione standard e della classe del calcestruzzo.

Sono riportati anche i valori limite di σ in corrispondenza dei valori del CV indicati dalla

standard varia normalmente da circa 4.5 a circa 5.5 MPa. Pertanto i limiti imposti dalla norma per il coefficiente di variazione, sono valori alti e facilmente rispettabili, anche in casi in cui i controlli di accettazione non risultano soddisfacenti.

3.2.3 Distribuzioni statistiche

Nel caso di controllo di tipo B, come già detto, la normativa prevede che se si eseguono controlli statistici accurati, l'interpretazione dei dati sperimentali (cioè la determinazione della resistenza caratteristica) può essere svolta con i metodi completi dell'analisi statistica assumendo anche distribuzioni diverse dalla normale. Nell'analisi statistica relativa ad un controllo di accettazione, sarebbe quindi opportuno scegliere quella curva di distribuzione teorica che meglio si adatta all'istogramma sperimentale. Si è quindi ef-

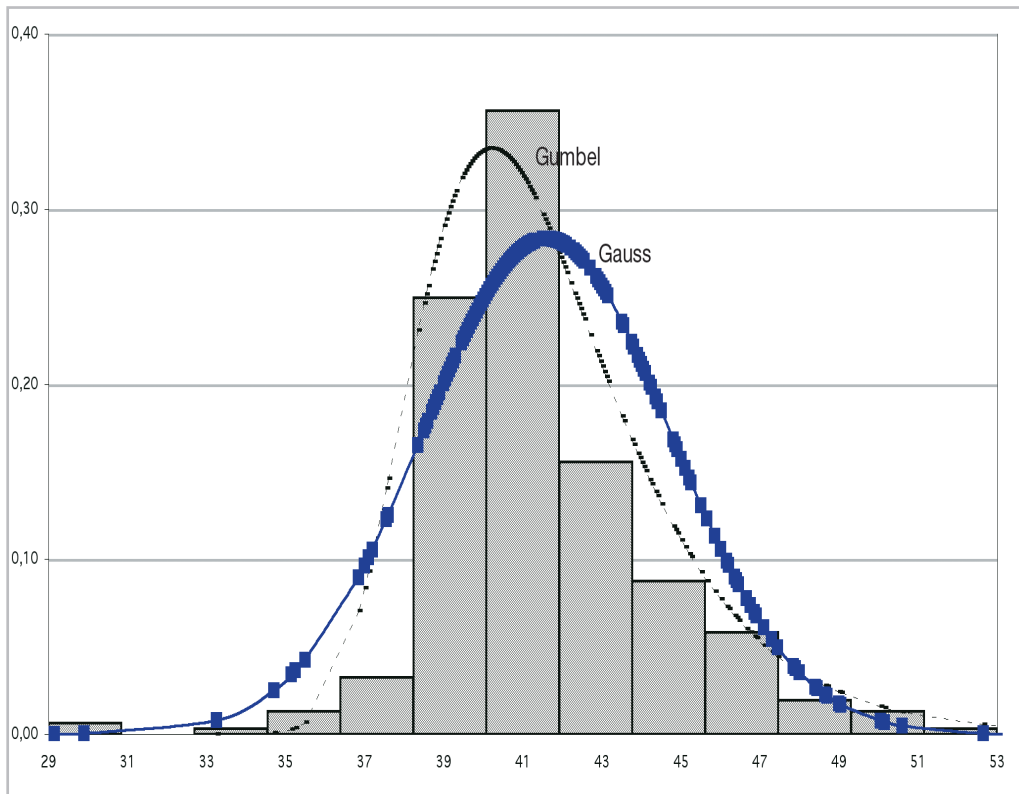


Fig. 6 - Confronto tra l'istogramma sperimentale e le due funzioni di Gauss e di Gumbel, Cantiere 7 - 309 prelievi

fettuato uno studio allo scopo di confrontare la distribuzione Normale di Gauss e la distribuzione di Gumbel con gli istogrammi dei valori di resistenza a compressione dei prelievi per i normali controlli di accettazione; le diverse serie provenivano da vari cantieri, con prelievi eseguiti, per ciascun confronto, da uno stesso laboratorio: un esempio in cui l' idoneità della distribuzione di Gumbel è evidente, è riportato in Figura 6 (la sua validità è stata confermata mediante il test di Kolmogorov-Smirnov). In qualche caso, la distribuzione più aderente ai dati sperimentali è risultata quella normale. La scelta corretta della funzione di distribuzione è importante ai fini del controllo di accettazione: un controllo di accettazione non positivo

considerando la distribuzione normale di Gauss, potrebbe risultare invece positivo se si sceglie una distribuzione più aderente ai dati². Le curve dell'esempio rappresentato nella Figura 6 indicano che il valore caratteristico della distribuzione secondo Gumbel è apprezzabilmente più alto di quello ottenuto dalla distribuzione normale.

4. Non conformità e controlli in sito

Se i risultati dei controlli di accettazione su cubi, eseguiti in modo appropriato, sono positivi, la Norma non richiede altra azione; se i risultati dei controlli di accettazione non sono soddisfacenti o non sono eseguiti conformemente alla norma o mancano, il Direttore dei Lavori deve aprire una ►

non conformità e fin tanto che questa non sia stata rimossa, l'opera o la parte di opera non può essere accettata. A tale scopo si deve procedere alla verifica delle caratteristiche del calcestruzzo in opera mediante tecniche opportune: il valore medio deve risultare non inferiore all'85% di R_{ck} , come si discuterà in seguito.

4.1 Possibili cause di non conformità

La non conformità può derivare da valori di resistenza insufficienti o da mancata esecuzione dei controlli. I fattori capaci di determinare un abbassamento della resistenza o del suo valore misurato, che spesso vengono evidenziati nell'ambito del controllo di accettazione (schematizzati in Figura 7), possono intervenire:

- *nella fase di produzione*, come già evidenziato, a causa
 - dei materiali (cemento, aggregati)
 - metodi di produzione
 - metodo di misura
- *a piè d'opera*, a causa
 - del trasporto (modalità e tempi eccessivi)
 - aggiunta d'acqua
 - temperatura ambiente

- *nell'operato del laboratorio*

- nella preparazione dei provini in cantiere
- nell'idoneità dell'ambiente di maturazione
- nell'esecuzione delle misure.

Nel caso in cui si apra una non conformità o comunque in tutti i casi in cui si ha la necessità di valutare la resistenza in sito, la qualità del calcestruzzo nella struttura è influenzata oltre che dai fattori citati anche da:

- modalità di getto (compattazione)
- ambiente di maturazione della struttura.

La stima della resistenza in sito, che in genere si effettua mediante la misura della resistenza a compressione su carote dipende da:

- modalità di prelievo dei campioni
- danneggiamento del calcestruzzo indotto dalle operazioni di estrazione
- forma e dimensione dei campioni
- modalità di preparazione dei campioni
- modalità dell'esecuzione della prova di compressione.

Infine, in fase di elaborazione dei risultati ottenuti dalle carote, non bisogna trascurare le variabili che possono condizionare il processo di interpretazione dei dati.

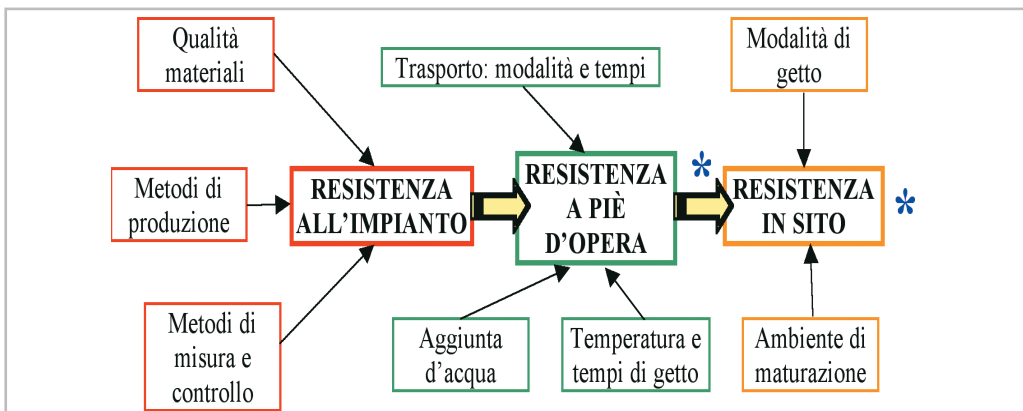


Fig. 7 - Fattori della resistenza del calcestruzzo. Il primo asterisco indica il momento del controllo di accettazione; questo influisce sulla qualità, poiché determina "l'immagine" della qualità del calcestruzzo impiegato. Tale immagine dipende dall'operato del laboratorio. Il secondo asterisco indica il momento del controllo in sito

4.2 L'operato dei laboratori

Nell'ambito di un lavoro di analisi dei controlli di accettazione per un'opera di migliaia di m³ di calcestruzzo, si è avuto modo di valutare l'operato di diversi laboratori che hanno eseguito le operazioni di confezione, maturazione e schiacciamento dei provini, operando a due a due simultaneamente negli stessi periodi.

È stato possibile riscontrare che la dispersione dei valori di resistenza di prelievo, e quindi il coefficiente di variazione, per una stessa miscela prodotta dallo stesso impianto, può essere anche molto diversa a seconda del laboratorio: si è trovato un coefficiente di variazione di circa 4.7% per il laboratorio che ha lavorato meglio (Laboratorio 13, si veda la Figura 8), e di circa 9.1% per il laboratorio che ha prodotto valori più dispersi (Laboratorio 11, si veda la Figura 8). È ovvio che se due laboratori presentano valori con pari media e diversa dispersione, quello con maggiore dispersione può produrre non conformità.

Considerazioni analoghe valgono per i carotaggi, come esemplificato nella Tabella 3.

4.3 Non conformità e valutazione della resistenza mediante carotaggio

Ai fini della rimozione della non conformità, il carotaggio, è il metodo che meglio ci permette di valutare la resistenza del conglomerato in opera; nell'utilizzazione di tale metodo, al fine di ottenere una stima della resistenza quanto più attendibile, è però importante tenere conto di diversi fattori, tra cui la numerosità dei campioni estratti, le modalità di preparazione e di conservazione degli stessi ai fini dell'esecuzione delle prove di compressione, il danneggiamento dovuto al carotaggio, la velocità di applicazione del carico, la massa volumica del calcestruzzo. Poiché non esiste uno standard nazionale

di riferimento si deve ricorrere alle normative inglesi o americane oppure a formule proposte in letteratura.

4.3.1 Resistenza potenziale e resistenza in sito

Preliminarmente alla valutazione della qualità del conglomerato in sito, bisogna introdurre una netta distinzione tra resistenza potenziale e resistenza attuale. È evidente il fatto che la resistenza a compressione determinata sui cubi, se confezionati, compattati e conservati secondo le prescrizioni della UNI EN 12390-2:2002, costituisce il valore limite superiore della resistenza che un determinato calcestruzzo è capace di sviluppare o **resistenza potenziale**.

L'applicazione della normativa UNI citata, infatti, consente di eliminare al massimo l'inglobamento d'aria che deriva dalle modalità di confezione e compattazione dei provini, e consente anche uno sviluppo ottimale dell'idratazione per le favorevoli condizioni di maturazione.

Il calcestruzzo in sito non ha la possibilità di sviluppare una resistenza pari a quella che si ottiene dai cubetti standard, tale **resistenza in sito** sarà normalmente minore, per ►

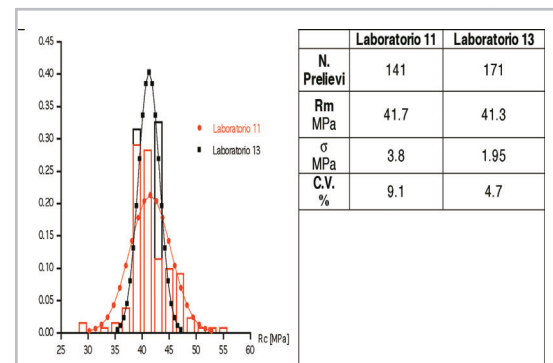


Fig. 8 - Distribuzione normale delle resistenze ottenute dallo schiacciamento a 28 giorni dei cubi prelevati per i normali controlli di accettazione di 2 laboratori e i corrispondenti valori della resistenza media e scarto quadratico medio

vari motivi già richiamati: la compattazione imperfetta, la temperatura non controllata e l'umidità relativa generalmente inferiore al 90%.

4.3.2 Stima della resistenza attuale

Il Rapporto tecnico N. 11 della British Concrete Society³, essendo conosciuto ed usato in tutto il mondo, può essere considerato lo standard per l'interpretazione dei carotaggi: si tratta di un documento che è stato utilizzato per la redazione della norma inglese sul carotaggio e attualmente, è stato considerato per la redazione della norma europea sullo stesso argomento. Nella valutazione della resistenza attuale secondo il Rapporto citato, si tiene conto della forma del provino (si passa dalla resistenza su carota a quella su cubo) e delle possibili differenze dovute all'orientazione del prelievo:

$$R_a = f_\lambda \frac{k_1}{1.5 + \frac{1}{\lambda}}$$

R_a = Resistenza cubica attuale del calcestruzzo nella struttura;

f_λ = Valore misurato della resistenza su carote aventi rapporto altezza/diametro pari a λ ;

k_1 = 2.3 per prelievo parallelo alla direzione di getto, 2.5 per prelievo ortogonale alla direzione del getto.

Per l'espressione sopra indicata, secondo il Rapporto 11 si applica un ulteriore fattore di correzione in caso di presenza di armatura nella carota e/o in caso di presenza di una eccessiva porosità.

Oltre al Rapporto 11, in letteratura sono disponibili diverse equazioni che consentono la stima della resistenza attuale. Ne vengo-

no riportate due allo scopo anche di utili raffronti.

Secondo quanto riportato nel Bollettino Ufficiale dell'Anas⁴ (redatto da una commissione di tecnici, appositamente nominati dalla stessa Anas) la resistenza cilindrica (ovvero di un provino cilindrico con rapporto H/D=2) in sito è determinabile mediante la seguente relazione:

$$R_{cil,in-sito} = \frac{k_2}{1.5 + \frac{1}{\lambda}} R_{car}$$

$R_{cil,in-sito}$ rappresenta la resistenza cilindrica valutata in sito;

R_{car} rappresenta la resistenza della carota grezza;

λ = Rapporto altezza/diametro della carota; k_2 = 1.84 o 2 a seconda che il prelievo sia parallelo alla direzione di getto, o ortogonale alla direzione del getto.

Dalla resistenza cilindrica si passa a quella cubica secondo la nota relazione, riportata anche nelle Norme Tecniche:

$$R_{cub,in-situ} = R_{cil} / 0.83$$

Un altro metodo di interpretazione dei carotaggi è quello presentato in un articolo di Cestelli Guidi⁵. Viene riportata un'unica equazione che vale sia per carotaggi effettuati in direzione orizzontale sia per carotaggi effettuati in direzione verticale; assume la seguente espressione:

$$R_{cil,in-sito} = \frac{k_3}{1.5 + \frac{1}{\lambda}} R_{car}$$

dove:

$R_{cil,in-sito}$ rappresenta la resistenza cilindrica (ovvero di un provino cilindrico con rapporto H/D=2) valutata in sito; ►

R_{car} rappresenta la resistenza della carota grezza;

λ = Rapporto altezza/diametro della carota;

$k_3 = 2$;

dal valore della resistenza cilindrica si ottiene il valore cubico secondo la relazione:

$$R_{cub, in-situ} = R_{cil, in-situ} / 0.83$$

Le equazioni considerate possono essere ricondotte ad una relazione del tipo

$$R_{cub, in-situ} = K R_{car}$$

dove il coefficiente correttivo K, per passare dalla resistenza della carota alla resistenza cubica in sito, assume i valori riportati nella Tabella 1.

4.3.3 Danneggiamento dovuto al carotaggio

Uno dei fattori che presumibilmente non è considerato nelle varie equazioni prima considerate, è il “danneggiamento” che l’operazione di carotaggio arreca al materiale, provocando sollecitazioni di torsione sulla carota e di scalzamento sull’aggregato, con un effetto negativo sulla resistenza.

Per quantificare questo effetto, è interessante riprendere i dati di una sperimentazione effettuata nel 1966 dal Prof. Barbarito⁶. La sperimentazione originaria aveva come

Tab. 1- Coefficienti correttivi K per passare dalla resistenza grezza della carota alla resistenza cubica attuale, per carote “cubiche” oppure con H/D = 2

DIREZIONE PRELIEVO	H/D = 1			H/D = 2		
	METODO CONCRETE SOCIETY	METODO ANAS	METODO CESTELLI-GUIDI	METODO CONCRETE SOCIETY	METODO ANAS	METODO CESTELLI-GUIDI
Orizzontale	1.00	0.89	0.96	1.25	1.10	1.20
Verticale	0.92	0.96	0.96	1.15	1.00	1.20

Si può riscontrare che:

- ad eccezione del valore relativo al carotaggio verticale del Rapporto 11, il valore K dei diversi metodi è minore di 1. Non è immediato comprendere per quale motivo il valore di resistenza di una carota cubica possa essere maggiore del valore in sito dello stesso calcestruzzo, tanto da dover operare una riduzione (addirittura fino all’11%) sul valore trovato;
- passando da una combinazione all’altra, i vari metodi danno risultati che non variano concordemente.

Come si vedrà al punto seguente, dati di letteratura indicano che le equazioni elencate forniscono valori apprezzabilmente più bassi del reale, nel caso di carote cubiche.

obiettivo quello di indagare gli effetti del tempo di maturazione sulla resistenza di cubi e carote.

Gli stessi dati sono stati utilizzati considerando come uniche variabili la resistenza del calcestruzzo e la modalità della prova, per indagare gli effetti connessi al disturbo indotto dal campionamento, prescindendo dall’influenza della stagionatura.

La sperimentazione si basava su un campione di 1230 cubetti, realizzati in più serie con calcestruzzi diversi, confezionati e maturati nello stesso modo.

A diverse scadenze, alcuni di questi cubi sono stati schiacciati direttamente, cubi gemelli sono stati carotati (normalmente alla

direzione di getto) misurando la resistenza delle carote tagliate con un'altezza pari al diametro.

Il grafico in Figura 9 riporta, per serie omogenee, i valori medi di resistenza ottenuti da carote in funzione dei valori medi ottenuti dai cubi.

È evidente che la retta di regressione cade al di sotto della retta dell'uguaglianza proposta dal Rapporto 11 (carotaggio orizzontale).

I dati sperimentali mettono quindi in discussione le equazioni presentate, inclusa quella fornita dal Rapporto 11, che fornisce il valore più alto della resistenza attuale nel caso di carotaggio orizzontale.

È al contrario evidente dal grafico la necessità di incrementare la resistenza delle carote per correggere l'errore prodotto dal danneggiamento da carotaggio, in modo da avere una stima realistica della resistenza cubica attuale del calcestruzzo indisturbato. La correzione dovrebbe variare da 5 MPa per calcestruzzi meno resistenti fino a 3 MPa per valori più elevati di resistenza.

Una correzione in questo senso si trova nella UNI 10834 sul calcestruzzo proiettato: la norma stabilisce un incremento del 20% al valore della resistenza cubica, per tener conto dell'effetto del disturbo indotto nel calcestruzzo a seguito delle operazioni di estrazione.

4.3.4 La resistenza potenziale

La stima della resistenza potenziale riguarda per lo più la risoluzione di problemi connessi all'aspetto contrattuale/commerciale.

La resistenza potenziale rappresenta la resistenza che il calcestruzzo provato nella struttura avrebbe raggiunto qualora compattato a fondo e maturato in condizioni ottimali, cioè quella su cubi, confezionati al momento del getto, maturati, in condizioni standard e testati a 28 giorni di maturazione.

Pertanto, per valutare la resistenza potenziale, si tiene conto dei presumibili effetti di danneggiamento dovuto al carotaggio, della stagionatura imperfetta, dell'età e del grado di compattazione del calcestruzzo oltre che della correzione della forma del provino e delle possibili differenze dovute all'orientazione del prelievo (come avviene per la resistenza attuale).

Le equazioni che si trovano in letteratura sono dello stesso tipo di quelle viste per la resistenza attuale. Sono riportati in Tabella 2 i valori dei coefficienti correttivi K proposti dai metodi sopra citati, nel caso di carote cubiche e nel caso di carote con altezza doppia del diametro.

Si può osservare che per la resistenza potenziale l'equazione del Rapporto 11 è la più penalizzante.

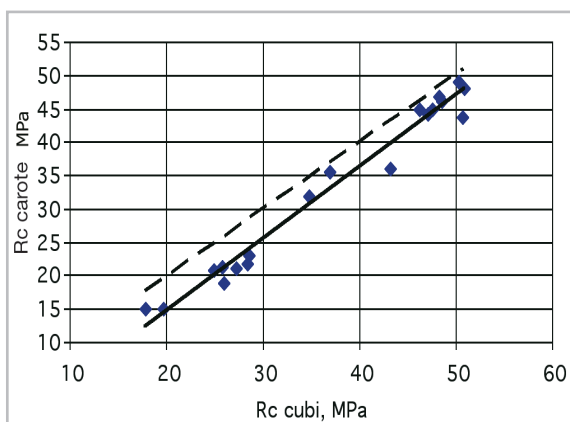


Fig. 9 - Resistenze su cubi e su carote cubiche ricavate da cubi gemelli?

Tab. 2 - Coefficienti correttivi K per passare dalla resistenza grezza della carota alla resistenza cubica potenziale

DIREZIONE PRELIEVO	H/D=1			H/D=2		
	METODO CONCRETE SOCIETY	METODO ANAS	METODO CESTELLI-GUIDI	METODO CONCRETE SOCIETY	METODO ANAS	METODO CESTELLI-GUIDI
Orizzontale	1.30	1.32	1.45	1.64	1.67	1.79
Verticale	1.20	1.45	1.45	1.50	1.79	1.79

4.4 Le Norme Tecniche e la prEN 13791

Come si è detto le Norme Tecniche prevedono un controllo della resistenza del calcestruzzo in opera per la risoluzione delle non conformità.

La norma stabilisce per la prima volta, che il calcestruzzo è accettabile se il **valore medio della resistenza in opera**, debitamente trasformato in resistenza cubica, risulta non inferiore all'85% della resistenza caratteristica. Non viene però fatto nessun cenno su come valutare la resistenza.

La prEN 13791⁸, diversamente dalla precedente, introduce un metodo per la valutazione della **resistenza caratteristica in sito**, ottenuta mediante carotaggio. Il valore così trovato non deve essere minore dell'85% della resistenza caratteristica misurata sui provini standard (cubici o cilindrici).

Nessuno dei due metodi fa riferimento alla resistenza potenziale e dal contesto è evidente che entrambi prevedono l'utilizzo dei risultati unicamente ai fini della valutazione della sicurezza della struttura, in base all'alternativa:

- accettare direttamente il calcestruzzo (resistenza > 85% R_{ck}).
- procedere alla valutazione della sicurezza (resistenza < 85% R_{ck}).

Si ritiene che, non menzionando la norma la

resistenza potenziale, un eventuale risultato negativo della resistenza in sito, che può derivare da diverse cause come si è visto, non dovrebbe essere trasferito immediatamente all'aspetto commerciale/contrattuale; in particolar modo se la non conformità deriva dalla mancata esecuzione dei controlli di accettazione.

Si dovrebbe invece effettuare una valutazione della resistenza potenziale, utilizzando il Rapporto 11 per quantificare l'inevitabile differenza tra la qualità del calcestruzzo in fornitura ed in sito; va sottolineato che in questo modo, impiegando il valore di K = 1.30 (si veda la Tabella 2) risulterebbe accettabile un calcestruzzo che presenta una resistenza caratteristica in sito pari a $R_{ck}/1.3$, che si ritiene più realistica rispetto a quella trovata con le norme qui analizzate.

4.5 Confronto tra le Norme Tecniche e la prEN 13791

È ovvio che l'applicazione della pre-norma europea può portare a risultati negativi in maggior misura rispetto a quelli che si ottengono applicando le Norme Tecniche.

Si riporta in Tabella 3 un compendio dei risultati ottenuti dall'analisi di alcune campagne di carotaggio per diversi cantieri. Sono state applicate le due norme citate e

dal confronto dei risultati (colonne 7 e 8) è possibile osservare come secondo la prEN 13791, in quasi tutti i casi il calcestruzzo potrebbe essere accettato, mentre secondo la Norma, in solo 4 casi il calcestruzzo

risulta che una carota dia una resistenza particolarmente bassa (per cause accidentali, quali microfrazture non rilevate, presenza di cavità e altre), sarà proprio questo valore di R_{ck} in sito (cioè maggiorato di circa il 18%)

Tab. 3 - Risultati ottenuti su carote applicando le NT e la prEN 13791

Cantiere	Laboratorio*	N. Carote**	R_{ck} progetto [MPa]	R_m in sito NT [MPa]	R_{ck} in sito prEN13791*** [MPa]	R_m in sito/ R_{ck} NT (%)	R_{ck} in sito/ R_{ck} prEN13791 (%)	Forma Carote H/D	σ [MPa]	$R_{c\ min}$ [MPa]	R_{pot} Secondo R11✓ [MPa]
1	1,2	27	35	33.3	20.9	95%	60%	2	7.7	16.9	43.4
	1,3	13		38.9	30.0	111%	86%	1	10.2	26	46.7
	1,2	28	30	27.6	15.9	92%	53%	2	7.9	25.2	35.9
	1,3	169		31.6	20.2	105%	67%	1	7.7	20.5	37.9
	1,2	34	25	26.7	16.0	107%	64%	2	7.2	16.5	34.9
	1,3	36		30.1	13.5	120%	54%	1	8	9.5	36.2
2	10,2	16	25	31.6	19.2	126%	77%	2	8.4	19	41.1
	10,2	58	30	47.6	22.4	159%	75%	2	11.1	18.4	61.6
	10,3	85		38.2	22.2	127%	74%	1	7.1	18.2	45.6
3	4,5	303	25	24.0	11.6	96%	46%	1	8.2	7.6	28.8
	6,4	8	35	33.0	27.0	94%	77%	1	0.24	32.7	39.6
4	4,6	22	35	38.4	31.4	110%	90%	1	4.7	30.1	46.1
	4,5	238		33.9	17.1	97%	49%	1	6.9	13.1	40.7
5	7,2	10	25	15.4	8.4	62%	34%	2	3.7	23	20
	7,8	7		14.4	7.4	58%	30%	2	4.7	10.4	18.7
	7,2	6	35	27.3	16.8	78%	48%	2	1.9	12.8	35.5
	7,8	6		25.5	19.5	73%	56%	2	5.1	19.1	33.1

*Il primo numero indica il laboratorio che ha eseguito lo schiacciamento dei cubi, il secondo lo schiacciamento delle carote.

** Le carote sono state prelevate dai diversi laboratori, per ciascun cantiere, anche in tempi diversi.

*** Nei casi di carote cilindriche la resistenza ottenuta su carote è stata trasformata in resistenza cubica applicando l'espressione del Rapporto 11 e poi si è applicato (a seconda del numero di campioni) uno dei 2 approcci indicati dalla pre-norma.

✓ Nei casi in cui non si conosceva la direzione del carotaggio si è utilizzata l'equazione del carotaggio verticale.

è conforme. D'altra parte il risultato non poteva essere diverso: fra l'altro la pre-norma europea stima la resistenza caratteristica in sito come il valore minimo tra quelli ottenuti da 2 equazioni, di cui una è data dalla resistenza minima in sito della carota, maggiorata di 4 MPa, cioè $f_{ck, is} = f_{is, lowest} + 4$. Poiché in una campagna di carotaggio è frequen-

te che risulterà determinante per l'accettabilità del calcestruzzo.

Si perviene al risultato, che gli scriventi ritengono inaccettabile, che con una resistenza media su carote pari al 159% della resistenza caratteristica (Tabella 3), l'intera produzione non risulterebbe accettabile a causa della presenza di una ►

singola carota con un valore insufficiente (18.4 MPa, riportato in tabella). Un modo per ovviare in parte all'inconveniente sarebbe quello di stabilire un criterio per decidere se il valore più basso è da scartare (individuazione degli outliers), come ad esempio quello dato per la resistenza potenziale nel Rapporto 11 (p. P/3.5.2.3).

Nell'ultima colonna della tabella vengono altresì riportati i valori della resistenza potenziale media, ottenuti secondo l'equazione proposta dal Rapporto 11, che si dovrebbero considerare nelle problematiche con aspetto contrattuale, confrontandoli direttamente con l' R_{ck} del calcestruzzo richiesto. Considerando questo aspetto, solo in 3 casi di quelli studiati indicati in tabella il calcestruzzo non era conforme.

Infine, i dati in Tabella 3 permettono di osservare come nel caso delle carote la dispersione dei risultati è molto più grande rispetto a quella tipica dei cubi; anche in questo caso sono evidenti le differenti dispersioni presentate dai vari laboratori. Anche per questo motivo, per le diverse valutazioni, è più opportuno riferirsi al valore medio.

5. Conclusioni

Assicurare e verificare la qualità voluta del calcestruzzo nelle opere finite richiede, oltre che il controllo dei materiali, anche l'applicazione delle corrette regole e procedure in tutte le fasi operative durante:

- la produzione
- la posa in opera
- la verifica della qualità del conglomerato, allo stato fresco e indurito.

Le norme dettagliano la procedura per assicurare la sicurezza della struttura, ma in caso che si verifichino non conformità, non sempre, data la numerosità delle variabili del

sistema, è immediato verificarle e riconoscere le cause che le determinano.

L'analisi delle disposizioni delle normative, in particolare delle novità delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, dando particolare rilievo alle regole per la valutazione della qualità in sito, evidenzia alcuni aspetti che richiederebbero maggiori precisazioni nelle norme stesse. ■

Bibliografia

¹ Brown, B.V. - *Monitoring concrete by the cusum method*, London: Concrete Society, *Concrete Society Digest no. 6* (1984)

² CNR - *Bollettino Ufficiale - Documento Tecnico 104/98*, 21.10.98

³ Concrete Society Technical Report N. 11, *Concrete core testing for strength; Report of concrete society working party* (1976)

⁴ M. Macori et al. "Durabilità delle opere d'arte stradali" - Documento ANAS (1998)

⁵ M. Cestelli Guidi, G. Morelli, "Valutazione della resistenza dei calcestruzzi sulle strutture finite", *L'Industria Italiana del Cemento*, N. 3, pp 185-206 (1981)

⁶ B. Barbarito "Sulla determinazione della resistenza del conglomerato cementizio in opera" *L'Industria Italiana del Cemento*, N. 4 pp 315-324 (1969)

⁷ V. Alunno Rossetti, "Il calcestruzzo - Materiali e tecnologia - Terza edizione, McGraw-Hill

⁸ prEN 13791:2005 "Assessment of in-situ compressive strength in structures and pre-cast concrete components"