

QUADERNI PER LA PROGETTAZIONE

CONTROLLI E VERIFICHE DELLE STRUTTURE DI CALCESTRUZZO ARMATO IN FASE DI ESECUZIONE

Compiti e responsabilità del Direttore dei Lavori secondo
le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni
(D.M. 14/01/2008) e la Circolare esplicativa n. 617/2009

di

ALESSANDRO ZIZZI - SANTO MINEO
STEFANO BUFARINI - VINCENZO D'ARIA

INDICE GENERALE



Presentazione..... 11

Introduzione..... 13

CAPITOLO 1

IL CONTROLLO DI PRODUZIONE..... 19

CAPITOLO 2

IL CALCESTRUZZO 21

2.1 Specifiche per il calcestruzzo 23

2.1.1 *Classe di resistenza e prescrizioni per la durabilità* 23

2.1.2 *Il calcestruzzo ad alta resistenza* 26

2.1.3 *Il copriferro ed il diametro dell'aggregato* 28

2.1.4 *Le classi di esposizione ambientale* 31

2.1.4.1 *Nessun rischio di corrosione delle armature
o di attacco al calcestruzzo* 32

2.1.4.2 *Strutture esposte all'aria o in condizioni di potenziale
degrado dovuto a fenomeni di corrosione dei ferri
di armatura indotta da carbonatazione* 32

2.1.4.3 *Strutture esposte all'azione dei cloruri che portano
al degrado delle strutture per corrosione dei ferri
di armatura* 33

2.1.4.4 *Strutture esposte all'azione di degrado dovuta
a ripetuti cicli di gelo e disgelo* 34

2.1.4.5	<i>Strutture esposte all'azione aggressiva di determinati agenti chimici che devono essere quantificati mediante analisi chimica</i>	35
2.1.5	<i>Le condizioni climatiche</i>	38
2.1.5.1	<i>Getti in clima freddo</i>	38
2.1.5.2	<i>Getti in clima caldo</i>	39
2.2	<i>I controlli di accettazione del materiale</i>	41
2.2.1	<i>I compiti del Direttore dei lavori</i>	41
2.2.2	<i>La preparazione dei provini</i>	53
2.2.3	<i>La stagionatura dei provini</i>	58
2.2.4	<i>I certificati di prova emessi dai laboratori ufficiali</i>	59
2.2.5	<i>La massa volumica</i>	60
2.2.6	<i>La classe di consistenza</i>	62
2.3	<i>Il controllo del materiale in opera</i>	65
2.3.1	<i>La "messa in opera"</i>	65
2.3.2	<i>La "maturazione"</i>	71
2.3.3	<i>Il calcestruzzo in opera</i>	73
2.3.4	<i>L'indagine SonReb</i>	75
2.3.5	<i>L'indagine sclerometrica</i>	75
2.3.6	<i>L'indagine ultrasonora</i>	78
2.3.7	<i>Il metodo SonReb</i>	82
2.3.8	<i>Il carotaggio</i>	83
2.3.9	<i>Elaborazione dei risultati</i>	84
2.4	<i>Caso di studio</i>	86
	<i>Report fotografico</i>	93

CAPITOLO 3

LE BARRE DI ARMATURA	99
----------------------	----

3.1	<i>Specifiche per l'acciaio</i>	100
-----	---------------------------------	-----

3.2	Il controllo di accettazione del materiale	101
3.2.1	<i>Il produttore</i>	103
3.2.2	<i>Il rivenditore</i>	105
3.2.3	<i>Il Centro di trasformazione</i>	105
3.2.4	<i>Il controllo di accettazione in cantiere</i>	107
3.2.5	<i>Il certificato di prova</i>	108
3.3	Il controllo del materiale in opera	112
3.3.1	<i>Le giunzioni delle barre di armatura</i>	114
3.3.2	<i>Le riprese di getto</i>	119

CAPITOLO 4

LE STRUTTURE PREFABBRICATE..... 123

4.1	Generalità	123
4.2	I controlli di accettazione delle strutture prefabbricate di produzione occasionale	126
4.3	I controlli di accettazione delle strutture prefabbricate soggette a marcatura CE	126
4.4	I controlli di accettazione delle strutture prefabbricate in serie	128
4.5	I controlli in cantiere	129

CAPITOLO 5

IL CONTROLLO DELLE FONDAZIONI PROFONDE..... 133

5.1	Le fondazioni profonde	133
5.2	Il palo trivellato	133
5.2.1	<i>I difetti costruttivi dei pali trivellati</i>	137



5.3	I pali infissi	137
5.3.1	<i>I difetti costruttivi dei pali prefabbricati ed infissi</i>	138
5.4	I controlli d'integrità	138
5.4.1	<i>Metodologie e tecniche di controllo</i>	139
5.4.2	<i>Carotaggio del palo</i>	139
5.4.3	<i>Carotaggio mediante ultrasuoni – cross-hole, CLS</i>	140
5.4.4	<i>Le prove dinamiche a bassa deformazione nel dominio del tempo - Prova ecometrica</i>	146
5.4.5	<i>Le prove dinamiche a bassa deformazione nel dominio della frequenza – prova vibrazionale o di ammettenza meccanica</i>	150

CAPITOLO 6

LA RELAZIONE A STRUTTURA ULTIMATA	155
---	-----

CAPITOLO 7

La marcature CE	165
7.1 Inquadramento generale	165
7.2 Il percorso della marcatura CE	166
7.3 Le opere strutturali	168
7.4 Il Benestare Tecnico Europeo	171

CAPITOLO 8

L'organizzazione complessiva dei controlli	173
8.1 Requisiti organizzativi e principi di qualità	173
8.2 Criteri di campionamento e criteri di accettabilità	175

CAPITOLO 9

RAPPORTI DI PROVA E CERTIFICAZIONI 177

9.1 Esempio di stima delle resistenze strutturali del calcestruzzo
in opera mediante l'applicazione del metodo SonReb 177

9.2 Esempio di prova di carico statica su un solaio 205

9.3 Esempio di certificato delle prove di trazione, piegamento
e raddrizzamento di barre di acciaio per cemento armato
ad aderenza migliorata 215

9.4 Esempio di certificato delle prove di trazione e prova di resistenza
al distacco del nodo di saldatura su reti e tralicci elettrosaldati 218

9.5 Esempio di certificato delle prove di trazione su trefoli
di acciaio per cemento armato precompresso 221

9.6 Esempio di certificato delle prove di trazione
e di piegamento eseguite su acciaio per strutture
metalliche e strutture composte..... 224

Allegato A

(Estratto da nuove norme tecniche per le costruzioni
di cui al D.M. 14/01/2008 integrato
con la Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009)..... 227

Bibliografia 285



PRESENTAZIONE

Nell'attività lavorativa di ciascuno di noi, e nella vita in generale, ci sono incontri che segnano la nostra crescita professionale o comunque la modificano in maniera importante. Riusciamo a capirlo solo a distanza di tempo, in una visione retrospettiva.

Alcuni anni fa, nel tentativo di approfondire le tematiche dei controlli sulle strutture, incontrai Stefano Bufarini e Vincenzo D'Aria, due relatori del corso di elevata formazione professionale "Non Destructive Testing Manager – Civil Engineering"; incontro che ora posso certamente definire importante perché ha segnato una svolta nella mia attività professionale. Infatti dopo il primo approccio un po' demoralizzante, quando scoprii di non conoscere così bene come credevo il calcestruzzo, materiale con cui per anni avevo dimensionato strutture di ogni tipo e genere, trovai uno stimolo per approfondire tematiche con un approccio scientifico rigoroso ma al contempo assolutamente pratico.

Socrate sosteneva che la vera saggezza è in colui che sa di non sapere, e nella conseguente ricerca di colmare queste lacune. Ho avuto la grande fortuna di condividere il percorso con tecnici provenienti da tutte le parti d'Italia, dalla Sicilia alla Valle d'Aosta. Condividendo con loro la passione per il mio lavoro, trovando momenti di confronto culturale con professionisti che lavorano in contesti diversi, con differenti specializzazioni e sviluppando con alcuni di loro rapporti di sincera amicizia, e tra questi vi è Santo Mineo, Stefano Bufarini e Vincenzo D'Aria.

Insieme abbiamo dato vita ad una Associazione culturale, la MASTER "Materials and Structures, Testing and Research" (www.masteritalia.org), e avendo tutti riscontrato una eccessiva carenza ed una scarsa attenzione al controllo del processo costruttivo, quasi egualmente diffusa su tutto il territorio nazionale, abbiamo organizzato i primi convegni, con la motivazione di diffondere la cultura dei controlli sulle strutture.

L'approfondimento di questi temi mi ha spinto a scrivere questo testo. Libro che ho scritto sostanzialmente per me stesso, per cercare di dare un po' d'ordine al mio lavoro, mettendo per iscritto alcuni appunti. Lavoro che alla fine mi ha portato a proporre una condivisione delle mie analisi con la pubblicazione di questo testo, nella speranza che possa essere un strumento di lavoro utile per altri professionisti.



Per tutti i temi trattati ho cercato di adottare sempre l'approccio al problema del Direttore dei lavori, anche quando ho affrontato dettagli specifici sul materiale non ho voluto approfondire tematiche proprie del Tecnologo del calcestruzzo. Questo perché credo che il Direttore dei lavori non può e non debba essere un "tuttologo", ma debba comprendere il linguaggio di tutte le figure che incontra nell'esercizio della sua professione.

Un importante contributo a questo libro è stato apportato dall'Ing. Fabio Vallati di Protos Spa, con cui ho il piacere di lavorare nei controlli tecnici in esecuzione ai fini del rilascio per le polizze decennali postume, a cui va il merito dei capitoli 7 ed 8. Infine un particolare ringraziamento va ad Anna Prada per la pazienza con cui ha corretto le bozze, e a tutti i colleghi che hanno fatto osservazioni e dato suggerimenti importanti.

Alessandro Zizzi

alessandrozizzi@masteritalia.org

INTRODUZIONE



La figura del Direttore dei lavori (D.L.) è una delle più affascinanti e complesse del settore edile. È il consulente tecnico del Committente, deve attuare ciò che il progettista ha previsto e pertanto deve avere ben chiari le ipotesi di calcolo e l'iter progettuale, ma al contempo deve "vivere" il cantiere, affrontando tutte le problematiche che si incontrano nel mettere in pratica quello che il progetto ha definito sulla carta.

Non per nulla le nuove disposizioni normative richiedono al D.L. una maggiore consapevolezza nella scelta, nell'impiego e nel controllo dei materiali e delle tecnologie connesse all'utilizzo del calcestruzzo armato.

Durante l'iter costruttivo il Direttore dei lavori si confronta quasi quotidianamente con l'impresa costruttrice che, essendo chiamata alla responsabilità di una corretta esecuzione dell'opera, vede nel D.L. un controllore che ha un compito di stretta vigilanza sul suo operato.

Il Direttore dei lavori deve quindi essere esperto anche della parte "esecutiva" dell'iter costruttivo, conoscere la tecnologia delle costruzioni, le problematiche di cantiere, ma soprattutto avere grandi capacità di comunicazione, perché solo attraverso la costruzione di una sinergia con l'Impresa, con il Tecnologo del calcestruzzo, ed in particolare con il Direttore di cantiere, può svolgere al meglio il suo compito.

Nel suo ruolo istituzionale riveste una posizione molto delicata perché, in caso di errori o mancanze da parte delle imprese, può essere chiamato in causa per "mancata sorveglianza", anche se nessuno ha ancora definito con precisione fino a che punto si debba spingere questa sorveglianza affinché il Direttore dei lavori possa evitare di essere chiamato a rispondere in solido, insieme con l'impresa esecutrice, per responsabilità che a quest'ultima sono univocamente conferite dal nostro Codice Civile (vedi art.1669)¹.

La legge fondamentale relativa alle strutture in calcestruzzo armato, la

1. Nota: art. 1669 del Codice Civile: "Rovina di cose immobili – Quando si tratta di edifici o di altre cose immobili destinate per loro natura a lunga durata, se, nel corso di dieci anni dal compimento, l'opera, per vizio del suolo o per difetto di costruzione, rovina in tutto o in parte, ovvero presenta evidente pericolo di rovina o gravi difetti, l'appaltatore è responsabile nei confronti del committente e dei suoi aventi causa, ... *omissis*".

L. 1086/71, sancisce che “Il Direttore dei lavori e il costruttore, ciascuno per la parte di sua competenza, hanno la responsabilità della rispondenza dell’opera al progetto, dell’osservanza delle prescrizioni di esecuzione del progetto, della qualità dei materiali impiegati ...”; e le nuove norme tecniche si limitano a specificare qualche dettaglio su come svolgere un corretto **controllo di produzione**.

Una piccola rivoluzione culturale per i professionisti del settore è stata la necessità di documentare ogni azione che possa influenzare il processo costruttivo. Siamo passati da relazioni di progetto minimali, dove non vi era traccia dei calcoli svolti, oppure da relazioni composte unicamente da stampati provenienti come output dalla procedura di calcolo automatico (assolutamente indecifrabili), alle nuove norme tecniche che indicano espressamente come presentare i risultati dei calcoli effettuati dal progettista e richiedono di riportare nelle relazioni di calcolo “... informazioni generali riguardanti l’esame ed i controlli svolti sui risultati ed una valutazione complessiva dell’elaborazione dal punto di vista del corretto comportamento del modello”. Azione che certamente ogni serio progettista svolgeva anche prima, ma in un contesto normativo meno stringente.

Analogamente a quanto richiesto al progettista, risulta evidente la necessità che anche il Direttore dei lavori debba **documentare** i controlli che svolge durante la realizzazione dell’opera, cercando di non cadere nella facile trappola di aumentare la quantità di carta da produrre nella nostra attività professionale quotidiana (qualche volta assolutamente inutile). Il D.L. dovrà operare con il preciso fine di testimoniare in maniera inequivocabile il lavoro che abbiamo svolto, così da poterlo facilmente ricostruire anche dopo anni dal termine dei lavori, sia come base per futuri interventi sull’edificio, sia per la propria attività nel caso di possibili contestazioni.

Il Direttore dei lavori deve mettere in atto tutte le procedure di controllo richieste dal nostro corpo normativo, ma se vuole ottenere veramente l’obiettivo di una “costruzione di qualità” deve coinvolgere nel suo lavoro tutti gli operatori presenti in cantiere, perché, come in un qualsiasi altro settore merceologico, un prodotto di qualità si ottiene coinvolgendo tutti i soggetti della filiera produttiva.

Occorre infatti sempre considerare che la “Qualità” a cui tende il progettista è, sostanzialmente, una “Qualità teorica”. Il Direttore dei lavori nell’esecuzione dell’opera ha come risultato una “Qualità reale” certamente inferiore, che degrada naturalmente nel tempo fino ad un livello di accettabilità minimo (“Qualità critica”), il cui raggiungimento decreta la fine della vita utile dell’opera.

Volendo schematizzare questi concetti in un ipotetico diagramma cartesiano Tempo-Qualità, si ottiene quanto di seguito.

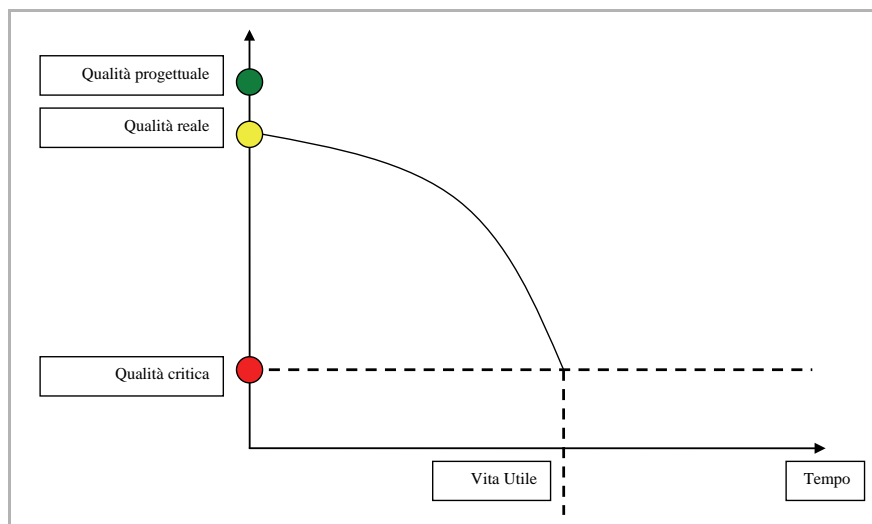


Figura 1

L'obiettivo a cui deve tendere il Direttore dei Lavori è, pertanto, quello di ottenere una Qualità reale dell'opera quanto più prossima a quella teorica oltre che materiali ed elementi strutturali durevoli e caratterizzati da una curva di degrado naturale meno accentuata possibile, al fine di aumentare la vita utile dell'opera.

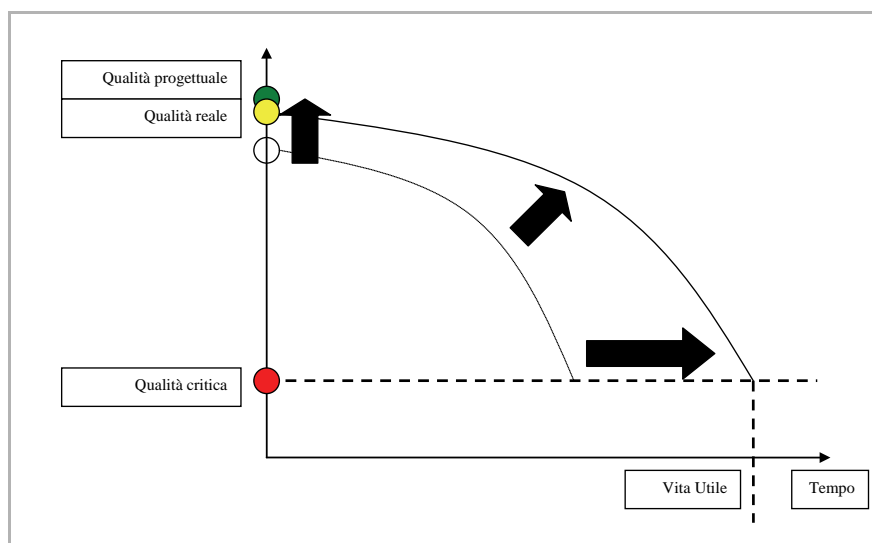


Figura 2

La qualità di un'opera è in realtà influenzata dalla qualità dei singoli materiali e di ogni elemento strutturale; il livello di qualità critica dell'opera può essere raggiunto quando va in crisi l'elemento più debole. Obiettivo del Direttore dei lavori deve pertanto essere anche quello di ottenere un livello di qualità dei singoli elementi strutturali quanto più omogeneo possibile.

Non bisogna poi dimenticare che una verifica sui requisiti del materiale "in situ", effettuata durante l'iter costruttivo di un'opera edilizia, permette di individuare tempestivamente eventuali "non conformità", consentendo di realizzare interventi di ripristino con costi certamente non paragonabili a quelli da sostenere a opera finita, quando magari il contenzioso viene aperto a seguito del manifestarsi di dissesti statici più o meno rilevanti.

Purtroppo risulta abbastanza evidente che i controlli nel nostro settore non siano ancora così diffusi, con la conseguenza che, nel migliore dei casi la "durabilità" delle nostre strutture è ancora un dato difficilmente raggiungibile (molto diffuse sono strutture recenti dove fenomeni di "spalling" si presentano in maniera decisamente evidente). Nel peggiore dei casi, le strutture non riescono a dare risposte adeguate in termini di resistenza rispetto alle sollecitazioni a cui sono chiamate a rispondere.

Le nostre norme tecniche pur essendo un validissimo riferimento potrebbero essere migliorate; appare, infatti, chiara la mancanza di un controllo obbligatorio per il calcestruzzo in opera. La discrezionalità dei controlli dopo la messa in opera di questo materiale è, a parere di chi scrive, certamente una lacuna legislativa, e questo a fronte di una ridondanza di controlli sulle barre di armatura. Quando il ferro arriva in cantiere da un Centro di trasformazione, deve solo essere messo in opera, e durante questa fase è assai difficile che le barre di armatura possano subire trasformazioni fisiche tali da modificarne la resistenza o la duttilità.

I controlli dovrebbero essere sempre richiesti da tutti gli attori coinvolti nella realizzazione di un'opera edilizia: dai fornitori di calcestruzzo; dalle imprese edili; dai Direttori dei lavori. Un corretto approccio alle tematiche dei controlli ha come risultato indiretto quello di **valorizzare l'operato di chi fa bene il suo lavoro.**

E' utile inoltre ricordare che il costruttore dell'opera, ai sensi dell'art. 1669 del Codice Civile, è responsabile se, nel corso di dieci anni dal compimento, l'opera "per vizio del suolo o per difetto di costruzione, rovina in tutto o in parte, ovvero presenta evidenti segni di rovina o gravi difetti".

A partire dalla seconda metà degli anni '80 si è cominciato a stipulare polizze

assicurative “decennali postume”, e al di sopra di determinati importi le Compagnie di Assicurazione pretendono che i controlli siano seguiti da **Organismi di ispezione accreditati**, indipendenti da tutti i soggetti coinvolti nei lavori, che svolgono una attività denominata “**controllo tecnico**”.

Per l’assicurabilità delle opere è fondamentale l’accertamento in opera della **qualità** e delle **prestazioni** dei materiali impiegati, che l’Organismo di ispezione svolge supervisionando l’attività del Direttore dei lavori e del Collaudatore.

Questo è un altro valido motivo perché ci si preoccupi di accertare la qualità del prodotto finito “in opera” e non ci si limiti al “controllo di accettazione” del materiale, nell’interesse sia dei **Costruttori** sia delle **Compagnie di Assicurazione**.

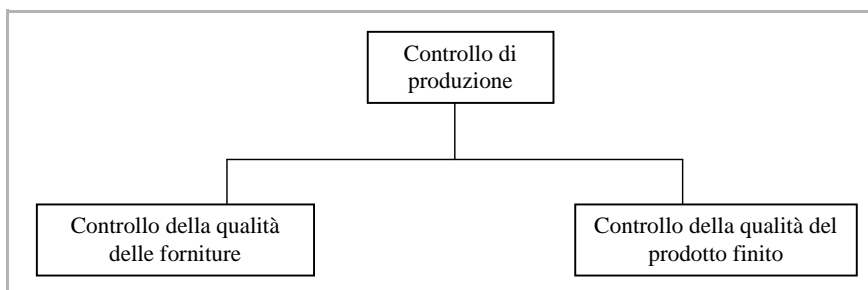


IL CONTROLLO DI PRODUZIONE

L'obiettivo che ci si deve porre nella gestione in qualità di un processo costruttivo deve essere quello di rispondere a requisiti ben definiti che, per una costruzione, sono: una destinazione d'uso nota; soddisfare le aspettative richieste; essere in regola con i requisiti normativi vigenti. Per il raggiungimento di questi obiettivi è opportuno inserire momenti di verifica e controllo che devono articolarsi in due fasi tra loro temporalmente distinte:

- un controllo sul progetto;
- un controllo sull'esecuzione.

In questo libro si vuole affrontare il tema del controllo sull'esecuzione dell'opera, che può essere inteso come un vero e proprio controllo di "produzione". Un corretto controllo di produzione deve articolarsi in una procedura di verifica della qualità, sia delle forniture delle materie prime costituenti il prodotto, sia del processo produttivo che si completa con verifiche a campione sul prodotto finito.



Per qualità di un prodotto si intende: **“L’insieme delle qualità che caratterizzano un prodotto per un determinato uso”**. In qualsiasi settore produttivo l'esecuzione di un corretto controllo sui risultati della produzione è un requisito fondamentale per “produrre in qualità”, e “produrre in qualità” significa sostanzialmente produrre in **“conformità ai requisiti”**.



Figura 1.1

I requisiti richiesti ad una struttura in calcestruzzo armato sono sostanzialmente due:

- **Resistenza:** Capacità di resistere alle sollecitazioni che agiscono sull'elemento strutturale.
- **Durabilità:** Capacità di conservare le caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture nel tempo.

Questi requisiti devono essere soddisfatti per mantenere, per tutta la vita utile dell'opera, i livelli di sicurezza previsti in fase di progetto. Ogni fenomeno di deterioramento che si manifesta in una struttura è la conseguenza della inadeguatezza delle condizioni locali del calcestruzzo rispetto alle condizioni locali di esercizio e di esposizione ambientale.

La vita di "servizio" attribuita a qualsiasi elemento strutturale in calcestruzzo armato può essere effettivamente raggiunta nella struttura purché la qualità del calcestruzzo non sia stata in qualche modo compromessa, e le condizioni di esposizione ambientale ed i carichi stimati in sede di progetto non subiscano nel tempo variazioni di rilievo.

I **controlli di produzione** nel settore edile sono affidati al **Direttore dei lavori**. Nel capitolo 11 del D.M. 14/01/2008, vengono riportate precise indicazioni sui requisiti che materiali e prodotti per uso strutturale devono possedere per poter essere messi in opera, al fine di ottenere un prodotto finito di qualità. Tali requisiti devono essere:

- **Identificati** univocamente a cura del produttore, mediante la descrizione del materiale stesso e dei suoi componenti elementari.
- **Qualificati** sotto la responsabilità del produttore.
- **Accettati** dal Direttore dei lavori mediante acquisizione e verifica della documentazione di qualificazione, nonché mediante eventuali prove sperimentali di accettazione.

IL CALCESTRUZZO

Il calcestruzzo è un materiale **non soggetto a marcatura CE ai sensi delle direttive europee sui prodotti da costruzione**. E' previsto che la produzione di calcestruzzo "confezionato con processo industrializzato" (cioè: "quello prodotto mediante impianti, strutture e tecniche organizzate sia in cantiere che in uno stabilimento esterno al cantiere stesso") sia soggetta ad un **Controllo del Processo di Fabbrica (FPC - Factory Production Control)**. Tale controllo viene certificato anche attraverso ispezioni periodiche annuali presso gli stabilimenti di produzione effettuato da Organismi autorizzati.

L'obbligo di certificazione del Controllo del Processo di Fabbrica deriva dall'applicazione delle Norme Tecniche Italiane e non direttamente dal recepimento di normative europee. La certificazione del Controllo del Processo di Fabbrica attesta sostanzialmente la sussistenza di un sistema di controllo interno della produzione attuato dal produttore con il fine di garantire la conformità di quanto prodotto e fornito in cantiere.

Il processo di **accettazione** è articolato in verifiche da eseguirsi direttamente in cantiere, sotto la diretta responsabilità del Direttore dei lavori, rimanendo a carico del Costruttore la **responsabilità** di "accettare" o "non accettare" il materiale ritenuto non idoneo.

Per un corretto controllo della qualità del calcestruzzo, si deve tenere presente che questo viene fornito in cantiere come prodotto semilavorato, e pertanto il controllo deve svilupparsi in due fasi temporalmente distinte:

- una prima fase di **accettazione** del materiale fornito;
- una seconda fase di **controllo** dei requisiti del materiale in opera.

Per diversi anni l'attenzione nella scelta del calcestruzzo, per realizzare un determinato elemento strutturale, era rivolta esclusivamente alla resistenza meccanica a compressione nella convinzione che il rispetto di questo requisito fosse sufficiente a garantire i livelli di sicurezza dell'opera, per l'intero periodo di servizio richiesto. Ora tra i requisiti richiesti vi è anche quello della durabilità.

Una prima verifica deve quindi essere eseguita sulla fornitura, facendo



riferimento ai “requisiti” di resistenza e durabilità richiesti dalla NTC 2008 § 11.2.1 “Specifiche per il calcestruzzo”. Tali requisiti richiedono che la prescrizione del calcestruzzo, all’atto del progetto, debba essere caratterizzata almeno mediante:

- Classe di resistenza.
- Classe di consistenza.
- Diametro massimo dell’aggregato.

Caratteristiche che vengono completate al §11.2.11 “Durabilità”, dove si richiede che il progettista, valutate opportunamente le condizioni ambientali ove sorgerà la costruzione, debba fissare le caratteristiche del calcestruzzo da impiegare completando la prescrizione definendo i valori del copriferro e le regole di maturazione.

E’ utile ricordare che il calcestruzzo che viene ordinato in cantiere è un **calcestruzzo a prestazione garantita**, definito nella norma UNI EN 206-1, come:

“Calcestruzzo le cui proprietà sono specificate al produttore, il quale è responsabile della fornitura di un calcestruzzo conforme alle richieste”.

Pertanto i requisiti fondamentali per prescrivere un calcestruzzo a prestazione garantita sono:

- Classe di resistenza.
- Classe di consistenza.
- Dimensione massima nominale dell’aggregato.
- Classe di esposizione ambientale.
- Classe di contenuto in cloruri.

Possono essere richieste anche prestazioni aggiuntive, al fine di garantire particolari prestazioni del materiale e della struttura, ad esempio:

- *Per particolari esigenze di cantiere:*
 - acceleranti di presa;
 - ritardanti di presa;
 - getti “faccia a vista”;
 - finiture particolari;
- *Per i getti massivi:*



- tipi o classi speciali di cemento (es. cemento a basso calore di idratazione);
- sviluppo di calore durante l'idratazione;
- *Per strutture in clima rigido:*
 - tipi o classi speciali di aggregato (es. aggregati non gelivi);
 - caratteristiche richieste per la resistenza al gelo-disgelo, per esempio il contenuto di aria;
- *Per strutture idrauliche:*
 - resistenza alla penetrazione dell'acqua.

Il calcestruzzo va prodotto in regime di controllo di qualità; le norme descrivono chiaramente come articolare questo controllo:

- *valutazione preliminare della resistenza:* ogni impianto di betonaggio ha le sue "ricette" di mix design per garantire le resistenze caratteristiche di progetto;
- *controllo di produzione,* che sono i controlli a campione fatti dal produttore, come controllo di qualità di ogni settore merceologico;
- *controllo di accettazione,* che si effettua con prelievi contestualmente al getto degli elementi strutturali, i cosiddetti prelievi a "bocca di betoniera".

2.1 Specifiche per il calcestruzzo

2.1.1 *Classe di resistenza e prescrizioni per la durabilità*

Le classi di resistenza del calcestruzzo sono convenzionalmente indicate con la lettera C seguita da due numeri, il primo rappresenta la resistenza a compressione cilindrica caratteristica, il secondo la resistenza cubica caratteristica.

La resistenza PROGETTUALE a compressione del calce-

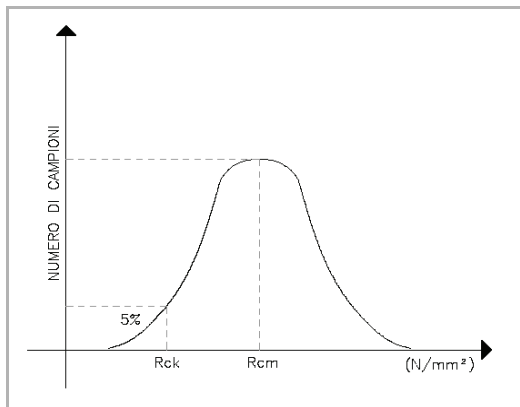


Figura 2.1

struzzo viene espressa in termini di resistenza caratteristica, definita come quel valore di resistenza al di sotto del quale si può attendere di trovare il 5% della popolazione di tutte le misure di resistenza, che nella distribuzione normale standardizzata si ricava con:

$$R_{ck} = R_{cm} - 1,64*s$$

con $s =$ (scarto quadratico medio).

La resistenza caratteristica cubica R_{ck} viene dedotta sulla base dei valori ottenuti da prove a compressione a 28 giorni su cubi di 150 mm di lato, per aggregati con diametro massimo fino a 32 mm.

La resistenza caratteristica cilindrica f_{ck} viene dedotta sulla base dei valori ottenuti da prove a compressione a 28 giorni su cilindri di 150 mm di diametro e 300 mm di altezza.

Tab. 2.1

	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C28/35	C32/40	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
f_{ck}	12	16	20	25	28	32	35	40	45	50
R_{ck}	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60

Viene intesa come resistenza POTENZIALE la resistenza determinata sperimentalmente su provini cubici fatti prelevare dal Direttore dei lavori durante il controllo di accettazione della fornitura del calcestruzzo, ed è la **resistenza media delle resistenze di prelievo**. Si diversifica a seconda che l'opera preveda l'impiego di più o meno di 1.500 mc di miscela omogenea di calcestruzzo, soglia oltre la quale si richiede obbligatoriamente un controllo di accettazione di tipo statistico.

La norma definisce che:

< 1.500 m³ per i controlli di tipo A $R_{cm} \geq R_{ck} + 3,5$ [N/mm²]

> 1.500 m³ per i controlli di tipo B $R_{cm} \geq R_{ck} + 1,4*s$ [N/mm²]

Nella curva normale standardizzata con un fattore di probabilità $k = 1,4$ si ottiene un valore caratteristico di resistenza al di sotto del quale si può attendere di trovare l'8% della popolazione di tutti i valori di resistenza. Il legislatore concedendo questo piccolo sconto ha pertanto ritenuto di rimanere comunque in condizioni di sicurezza.

La resistenza del PRELIEVO è la resistenza media dei valori di rottura dei due cubetti costituenti il prelievo

$$R_1 = \frac{(R_{c1.1} + R_{c1.2})}{2}$$

$$R_n = \frac{(R_{cn.1} + R_{cn.2})}{2}$$

Ed infine la resistenza STRUTTURALE è il valore **medio** della resistenza del **calcestruzzo in opera**, ed è in genere inferiore al valore medio della resistenza dei prelievi eseguiti in fase di getto e maturati in condizioni di laboratorio.

E' accettabile un **valore medio** della resistenza strutturale, misurata con tecniche opportune (distruttive / non distruttive) e debitamente trasformata in resistenza cilindrica o cubica, non inferiore all'85% del valore medio in fase di progetto.

$$R_{cm, stru} \geq 0,85 \times R_{cm, prog}$$

Le attuali norme tecniche prescrivono al § 4.1 che per strutture in calcestruzzo armato si debba utilizzare un calcestruzzo con una resistenza progettuale minima così come prescritto nella seguente tabella:



Figura 2.2
Carota estratta da una struttura esistente, con valori di resistenza a rottura di 4,37 MPa

Tab. 2.2

STRUTTURE DI DESTINAZIONE	CLASSE DI RESISTENZA MINIMA
Per strutture non armate o a bassa percentuale di armatura	C8/10
Per strutture semplicemente armate	C16/20
Per strutture precomprese	C28/35

Per le strutture in calcestruzzo armato gettato in opera non si può utilizzare un calcestruzzo con resistenza meccanica inferiore a C16/20, **fatti salvi i limiti derivanti dal rispetto della durabilità.**

Nel § 7.4.2.1 le norme integrano questi minimi normativi imponendo che in zona sismica non sia possibile l'uso di conglomerati di classe inferiore a C20/25.

I limiti per la durabilità ci vengono imposti dalla norma UNI 11104 che, al prospetto 4, per le strutture in ambiente XC1/XC2, prescrive una classe di resistenza minima C25/30.

Figura 2.3

prospetto 4 Valori limiti per la composizione e le proprietà del calcestruzzo																	
	Classi di esposizione																
	Nessun rischio di corrosione dell'armatura	Corrosione delle armature indotta dalla carbonatazione				Corrosione delle armature indotta da cloruri			Attacco da cicli di gelo/sgelo				Ambiente aggressivo per attacco chimico				
						Acqua di mare		Cloruri provenienti da altre fonti									
	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Massimo rapporto a/c	-	0,80	0,55	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	
Minima classe di resistenza ^{a)}	C12/15	C25/30	C25/35	C30/40	C32/40	C35/45	C28/35	C32/40	C35/45	32/40	25/30	28/35	28/35	28,35	32/40	35/45	
Minimo contenuto in cemento (kg/m ³)	-	300	320	340	340	360	320	340	360	320	340	360	320	320	340	360	
Contenuto minimo in aria (%)														3,0 ^{b)}			
Altri requisiti														Aggregati conformi alla UNI EN 12620 di adeguata resistenza al gelo/sgelo	È richiesto l'impiego di cementi resistenti ai solfati ^{b)}		

^{a)} Nel prospetto 7 della UNI EN 205-1 viene riportata la classe CB10 che corrisponde a specifici calcestruzzi destinati a soletti, fondazioni e ricoprimenti. Per tale classe dovrebbero essere definite le prescrizioni di durabilità nei riguardi di acque o terreni aggressivi.

^{b)} Quando il calcestruzzo non contiene aria aggiunta, le sue prestazioni devono essere verificate rispetto ad un calcestruzzo aereo per il quale è prevista la resistenza al gelo/sgelo, da determinarsi secondo UNI 7187, per la relativa classe di esposizione.

^{c)} Qualora la presenza di solfati comporti le classi di esposizione XA2 e XA3 è auspicabile utilizzare un cemento resistente ai solfati secondo UNI 9166.

I valori riportati nella tabella presuppongono una vita utile di 50 anni. Per una vita di esercizio diversa da 50 anni, per le strutture di edifici ritenuti strategici, o in condizioni ambientali particolarmente aggressive, occorre affrontare il progetto alla durabilità basandosi su un metodo prestazionale (appendice j della norma UNI EN 206).

2.1.2 Il calcestruzzo ad alta resistenza

Il Direttore dei lavori deve porre particolare attenzione nel caso in cui il progetto strutturale preveda l'utilizzo di calcestruzzo di **classi di resistenza superiori a C45/55**, perché in questo caso dovrà far accertare prima dell'inizio dei lavori, tramite una apposita sperimentazione preventiva, tutte le grandezze che hanno influenza sulla resistenza e la durabilità del calcestruzzo. Qualora fosse previsto l'utilizzo di **calcestruzzo di classe superiore a C70/85** questo potrà essere utilizzato solo dopo l'ottenimento di specifica autorizzazione da parte del Servizio Tecnico Centrale e su parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Il Servizio Tecnico Centrale ha pubblicato le Linee Guida sui calcestruzzi strutturali ad alta resistenza, definendo calcestruzzi ad alta resi-



stenza quelli aventi una resistenza caratteristica $75 \text{ MPa} < R_{ck} < 115 \text{ MPa}$, e prescrivendo che nella domanda di autorizzazione si debba allegare:

- la modellazione del materiale operata sulla base di specifica documentazione teorica e sperimentale;
- una trattazione circostanziata a giustificazione delle regole di calcolo adottate;
- le procedure da seguire nella realizzazione delle strutture;
- il piano di assicurazione della qualità, nel quale debbono essere elencati nel dettaglio:
 - le caratteristiche dell'impasto fresco ed indurito da controllare;
 - le modalità e la frequenza dei controlli;
 - la provenienza e le certificazioni dei materiali componenti;
 - i provvedimenti da adottare nel caso di deviazioni dai valori ammissibili richiesti;
 - i responsabili autorizzati a prendere decisioni;
 - il laboratorio responsabile delle prove.

Nella corretta definizione della "ricetta" di questo tipo di calcestruzzo, è di fondamentale importanza l'apporto di un tecnologo esperto e che i tecnici di laboratorio abbiano acquisito esperienza nel settore dei calcestruzzi AR (Alta Resistenza), perché il comportamento meccanico di questi calcestruzzi è per alcuni aspetti diverso da quello di un calcestruzzo normale. Le proprietà meccaniche del calcestruzzo AR non possono

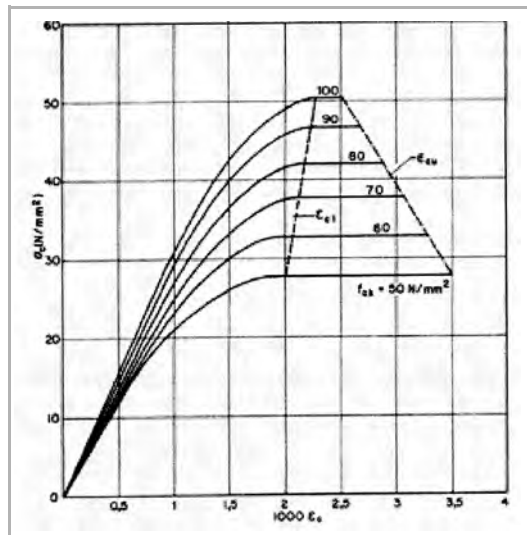


Figura 2.4

essere dedotte per estrapolazione da quelle del calcestruzzo normale e non risulta corretto applicare le relazioni tra la resistenza a compressione e le altre proprietà. Pertanto è fortemente raccomandato di procedere alla misura diretta di tutte le proprietà di rilevanza progettuale come: modulo di elasticità; resistenza a trazione; ecc.