

Carlo Sigmund



Dario Flaccovio Editore

Procedure rapide di dimensionamento del cemento armato

secondo Eurocodici, Norme Tecniche
e relativa Circolare

Casi studio delle situazioni progettuali più frequenti

[Scheda sul sito >](#)



Compatibile Windows



28 fogli di calcolo Excel

- Materiali del cemento armato: calcestruzzo, acciaio ordinario per armature ✓
- Dimensionamento strutture scatolari, fondazioni profonde, strutture soggette a instabilità ✓
- Strutture a piastra, mensole tozze per carriponte e selle Gerber ✓
- Dimensionamento elementi sottoposti a torsione e taglio, flessione o pressoflessione deviata ✓

*Alla piccola Filomena Zolfo,
un piccolo ricordo...
una piccola dedica*

Carlo Sigmund

Procedure rapide di dimensionamento del cemento armato

CASI STUDIO DELLE SITUAZIONI PROGETTUALI PIÙ FREQUENTI



Dario Flaccovio Editore

Carlo Sigmund

PROCEDURE RAPIDE DI DIMENSIONAMENTO DEL CEMENTO ARMATO

ISBN 9788857901794

© 2013 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: marzo 2013

Sigmund, Carlo <1971->

Procedure rapide di dimensionamento del cemento armato : casi studio
delle situazioni progettuali più frequenti / Carlo Sigmund. - Palermo : D. Flaccovio, 2013.

ISBN 978-88-579-0179-4

I. Strutture in cemento armato – Calcolo.

624.18341 CDD-22 SBN Pal0253994

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, marzo 2013

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.
La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

INDICE

Premessa
Introduzione

1. Materiali del cemento armato

1.1. Calcestruzzo.....	pag. 1
1.1.1. Specifiche secondo UNI EN 206-1:2006, UNI 11104:2004, NTC 2008 »	1
1.1.2. Caratteristiche principali del calcestruzzo.....	5
1.1.2.1. Lavorabilità.....	6
1.1.2.2. Segregazione.....	8
1.1.2.3. Rapporto acqua-cemento.....	9
1.1.2.4. Bleeding.....	12
1.1.2.5. Contenuto in aria.....	13
1.1.2.6. Contenuto in cemento.....	16
1.1.2.7. Tipo di cemento.....	20
1.1.2.8. Classi di esposizione (ambientale).....	21
1.1.2.9. Contenuto in cloruri (e classi).....	22
1.1.2.10. Durabilità (requisiti, prescrizioni).....	24
1.1.2.11. Specifiche per calcestruzzo a prestazione garantita.....	28
1.1.2.12. Controlli di accettazione (criteri).....	42
1.1.2.13. Copriferro nominale (limiti).....	55
1.1.2.14. Resistenze meccaniche (caratteristiche e di progetto).....	65
1.2. Acciaio ordinario per armature.....	77
1.2.1. Acciaio tipo B450C.....	77
1.2.2. Acciaio tipo B450A.....	80
1.2.3. Acciai inossidabili.....	82
1.2.4. Acciai zincati e inox.....	84
1.2.5. Identificazione e rintracciabilità degli acciai secondo norma.....	85
1.2.6. Alcune prescrizioni comuni a tutti gli acciai.....	86
1.2.7. Procedure di controllo per acciai da cemento armato ordinario.....	88
1.2.8. Parametri e peculiarità fondamentali di controllo nelle prove.....	90
1.2.9. Gamme armature per cemento armato ordinario.....	93

2. Dimensionamento strutture scatolari

2.1. Strutture interrate soggette a carichi viaggianti.....	» 107
2.1.1. Tubi rettangolari prefabbricati in cemento armato vibrocompresso.....	» 107
2.1.2. Strutture scatolari in opera: sottopassi ferroviari.....	» 113
2.2. Riepilogo formule semplificate di dimensionamento delle armature.....	» 127
2.2.1. Solette superiore e di fondazione: flessione semplice e taglio.....	» 127
2.2.2. Piedritti: pressoflessione retta e taglio.....	» 129

3. Dimensionamento fondazioni profonde

3.1. Pali di fondazione.....	» 131
3.1.1. Pali prefabbricati: tipologie, particolari aspetti tecnologici e di progetto.....	» 131
3.1.2. Pali infissi gettati: tipologie, particolari aspetti tecnologici e di progetto.....	» 137
3.2. Diagrammi e formule per il dimensionamento a rottura dei pali.....	» 141

3.2.1. Sezioni circolari piene: ipotesi, modello di calcolo adottato, abachi ...	» 141
3.2.2. Sezioni circolari cave: ipotesi, modello di calcolo adottato, abachi.....	» 151
4. Dimensionamento strutture soggette ad instabilità	
4.1. L'instabilità secondo l'UNI EN 1992-1-1:2005.....	» 167
4.1.1. Metodi di calcolo adottati: ipotesi e modelli	» 167
4.2. Procedure di progetto e verifica di elementi snelli in c.a.....	» 173
5. Dimensionamento strutture a piastra	
5.1. Procedura di progetto e verifica a flessione delle piastre: soluzione esatta	» 189
5.1.1. Ipotesi e formule di calcolo	» 189
5.1.2. Tabelle di calcolo	» 191
5.2. Procedura di progetto e verifica a flessione secondo soluzione semplificativa di Grashov	» 200
5.2.1. Ipotesi di calcolo.....	» 200
5.2.2. Formule di calcolo e schemi di vincolo	» 200
5.3. Procedura di progetto e verifica a punzonamento con parametri tabellati.....	» 206
5.3.1. Ipotesi di calcolo e vincoli normativi	» 206
5.3.2. Formule di calcolo con parametri e grandezze tabellati	» 208
6. Dimensionamento mensole tozze per carriponte e selle gerber	
6.1. Procedure di progetto e verifica di mensole tozze	» 225
6.1.1. Ipotesi e modelli di calcolo.....	» 225
6.1.2. Formule di calcolo	» 228
6.2. Procedura di progetto e verifica di selle Gerber	» 233
6.2.1. Ipotesi e modelli di calcolo.....	» 233
6.2.2. Formule di calcolo	» 234
7. Dimensionamento elementi sottoposti a torsione e taglio	
7.1. Procedure di progetto e verifica secondo UNI EN 1992-1-1:2005.....	» 241
7.1.1. Ipotesi e vincoli normativi	» 241
7.1.2. Formule di calcolo	» 243
7.2. Procedure di progetto e verifica con parametri tabellati.....	» 252
7.2.1. Ipotesi di calcolo e approssimazioni.....	» 252
7.2.2. Formule di calcolo con parametri e grandezze tabellati	» 252
8. Dimensionamento elementi sottoposti a flessione o pressoflessione deviata	
8.1. Progetto e verifica di sezioni di travi	» 257
8.1.1. Ipotesi e vincoli normativi	» 257
8.1.2. Formule di calcolo mediante metodo tabellare.....	» 258
8.2. Progetto e verifica di sezioni di pilastri	» 275
8.2.1. Ipotesi e vincoli normativi	» 275
8.2.2. Formule di calcolo mediante abachi	» 277
9. Proposta di procedure di calcolo di sezioni inflesse o presso-tensoinflesse: metodo parametrico	
9.1. Procedure di calcolo semplificate per sezioni quadrangolari semplicemente inflesse o presso-tensoinflesse	» 297

9.1.1. Ipotesi e limiti di validità	» 297
9.1.2. Formulazione per sezioni quadrangolari semplicemente inflesse, con rottura al massimo della duttilità.....	» 298
9.1.3. Formulazione per sezioni quadrangolari pressoinflesse con grande eccentricità.....	» 307
9.1.4. Formulazione per sezioni quadrangolari tensoinflesse con grande eccentricità.....	» 314
9.1.5. Formulazione per sezioni quadrangolari pressoinflesse con piccola eccentricità.....	» 318
9.1.6. Formulazione per sezioni quadrangolari tensoinflesse con piccola eccentricità.....	» 321
9.2. Formulazioni parametriche generalizzate in forma operativa	» 323
9.2.1. Formulazione parametrica per progetto e verifica di sezioni inflesse...	» 323
9.2.2. Formulazione parametrica per progetto e verifica di sezioni presso-tensoinflesse	» 327
BIBLIOGRAFIA.....	» 345

PREMESSA

La Sezione 2 della UNI EN 1992-1-1:2005 (Eurocodice 2) sottolinea che le strutture di calcestruzzo vanno progettate in accordo con le regole generali contenute nella EN 1990 (*Principi di progettazione strutturale*) e con le azioni previste nella EN 1991 (*Eurocodice 1 – Azioni sulle strutture*). I requisiti di base della Sezione 2 della EN 1990 (*Eurocodice 0*), infatti, si considerano soddisfatti per le strutture in calcestruzzo se:

- si adotta la progettazione agli stati limite con il metodo dei coefficienti parziali in accordo con la EN 1990,
- si definiscono le azioni di progetto in accordo con la EN 1991 e le combinazioni di carico coerentemente con la EN 1990, e
- si computano le resistenze, le caratteristiche di durabilità ed esercizio secondo la UNI EN 1992 stessa (Eurocodice 2).

Quanto riportato nella presente pubblicazione tiene ovunque conto, implicitamente, di quanto appena detto. Ciò, necessariamente, in accordo con quanto stabilito nell'attuale D.M. 14.01.2008 e relativa Circolare di applicazione.

In questa pubblicazione, coerentemente con la ISO 1000, si sono applicate le unità di misura del S.I. utilizzando in linea generale le seguenti unità:

- massa specifica: kg/m^3
- peso specifico: kN/m^3
- forze e carichi: kN , kN/m^2 , daN/cm^2 ; MN/m^2 ; kN/m
- momenti: kNm
- tensioni: MPa , N/mm^2 .

In tutte le applicazioni numeriche proposte, i valori sono stati approssimati alla prima o alla seconda cifra decimale, in relazione all'unità di misura adottata nel singolo esempio proposto. Come separatore decimale è usata la virgola.

Tutti gli esempi di calcolo sono proposti come casi-studio rappresentativi delle situazioni progettuali che più frequentemente si verificano nella pratica tecnica. In tutti gli esempi riportati nella presente pubblicazione, le indicazioni sulle analisi dei carichi e le ipotesi sull'entità delle sollecitazioni di progetto vanno intese come orientative, quindi devono essere controllate dall'utilizzatore.

Il testo e le illustrazioni potrebbero presentare qualche imprecisione o refuso, sebbene ogni sforzo sia stato fatto per ridurre al minimo ogni inconveniente. I lettori sono pertanto invitati a proporre correzioni e suggerimenti, affinché si possa migliorare nel futuro questo lavoro.

L'autore

INTRODUZIONE

Il presente lavoro è pensato come raccolta di nozioni tecniche e pratiche aventi il proposito di mettere al servizio del professionista e della sua esperienza tutti quegli strumenti di calcolo che possano rendergli più agevole, veloce e semplice un primo proporzionamento della struttura, ai fini della ricerca e dell'individuazione della soluzione ottimale e, quindi, della via verso il metodo più idoneo a garantire i livelli di sicurezza necessari, secondo gli attuali standard normativi.

Quanto qui proposto è rivolto non solo a tutti quei tecnici e calcolisti che si occupano quotidianamente di strutture in calcestruzzo armato, ma anche a tutti coloro che si avvicinano per la prima volta all'argomento o che, nella pratica corrente delle costruzioni, non hanno il tempo di dedicarsi nuovamente a studi specialistici. A tal fine, è proposta una vasta gamma di esempi svolti e tabelle di calcolo tali da agevolare anche il *cross check* per la valutazione complessiva dell'affidabilità di eventuali risultati ottenuti con l'analisi automatica dei post-processor attualmente in commercio e soprattutto per soddisfare la richiesta al capitolo 10.2 del D.M. 14.01.2008 in merito al "Giudizio motivato di accettabilità dei risultati" condotti con l'ausilio di codici di calcolo.

Dato il carattere eminentemente applicativo della trattazione e data la vastità della materia, si è deciso (almeno fino al capitolo 8 compreso) di ridurre al minimo le parti descrittive. Molte formulazioni, per evitare di doverle dedurre da complicate, se pur necessarie, trattazioni analitiche, vengono giustificate con semplici ragionamenti intuitivi e presentate in forma operativa. Unica eccezione è l'argomento trattato nell'ultimo capitolo (il 9), dove viene proposta nel dettaglio una procedura di calcolo manuale per il progetto e la verifica di sezioni in cemento armato ordinario. Tale procedura ("metodo parametrico"), strutturata in modo da essere implementata eventualmente su foglio di calcolo, è già stata presentata dall'autore in *Cemento Armato* della Dario Flaccovio Editore (2008). L'intento questa volta è quello di stilare una sorta di check-list per poterla facilmente utilizzare. In ogni caso, qualora qualcuno lo desiderasse, nel CD allegato è possibile trovare il file di validazione con la procedura stessa informatizzata. A tal proposito, per la validazione è stata seguita la teoria presentata a suo tempo da Antonio Migliacci e Franco Mola nel loro testo di riferimento *Progetto agli stati limite delle strutture in c.a.*, parte I (maggiori dettagli in bibliografia).

Per facilitare la lettura e l'eventuale approfondimento degli argomenti toccati, ciascun capitolo è corredato da illustrazioni e da un cospicuo numero di grafici e tabelle. Inoltre, si è cercato quanto più possibile di semplificare la numerazione dei paragrafi, delle illustrazioni e dei riferimenti esterni.

Alla fine del testo, una dettagliata bibliografia permette a tutti coloro che lo desiderino di documentarsi ulteriormente in merito agli argomenti trattati.

1. Materiali del cemento armato

1.1. Calcestruzzo

1.1.1. Specifiche secondo UNI EN 206-1:2006, UNI 11104:2004, NTC 2008

All'atto del progetto, la prescrizione del calcestruzzo deve essere caratterizzata almeno mediante:

- la classe di resistenza
- la classe di consistenza (al getto)
- il diametro massimo dell'aggregato (inerti).

CLASSE DI RESISTENZA

La classe di resistenza è contraddistinta dai valori caratteristici delle resistenze cubica R_{ck} e cilindrica f_{ck} a compressione uniassiale, misurate su provini normalizzati e cioè rispettivamente su cilindri di diametro 150 mm e di altezza 300 mm e su cubi di spigolo 150 mm. Al fine delle verifiche sperimentali, i provini prismatici di base 150 mm \times 150 mm e di altezza 300 mm sono equiparati ai cilindri di cui sopra.

La resistenza caratteristica a compressione è definita come la resistenza per la quale si ha il 5% di probabilità di trovare valori inferiori. Nelle NTC 2008 la resistenza caratteristica designa quella dedotta da prove su provini confezionati e stagionati dopo 28 giorni di maturazione. In generale, si dovrà tenere conto degli effetti prodotti da eventuali processi accelerati di maturazione. In tal caso, potranno essere indicati altri tempi di maturazione a cui riferire le misure di resistenza e il corrispondente valore caratteristico. In tabella 1.1 le classi di resistenza definite nella UNI EN 206:2006.

Le NTC 2008 definiscono 16 classi di resistenza normalizzate, facendo riferimento alla UNI EN 206-1:2006 e alla UNI 11104:2004. Per classi di resistenza superiori a C70/85, le NTC 2008 rinviano al paragrafo 4.6 del D.M. 14.01.2008 considerando in tal caso il caso di materiali non tradizionali e non trattati specificatamente nella norma stessa, rinviando all'autorizzazione del Servizio Tecnico Centrale su parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, autorizzazione che riguarderà l'utilizzo del materiale nelle specifiche tipologie strutturali proposte sulla base di procedure definite dal Servizio Tecnico Centrale.

Tabella 1.1. Calcestruzzo normale e pesante, secondo prospetto 7, UNI EN 206-1:2006

Classe resistenza a compressione	Resistenza caratteristica cilindrica minima $f_{ck,cyl}$ (N/mm ²)	Resistenza caratteristica cubica minima $f_{ck,cube}$ (N/mm ²)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Tabella 1.2. Calcestruzzo normale e pesante, secondo tabella 4.1.I, NTC 2008

Classe resistenza a compressione	Resistenza caratteristica cilindrica minima $f_{ck,cyl}$ (N/mm ²)	Resistenza caratteristica cubica minima $f_{ck,cube}$ (N/mm ²)
C8/10 ^(*)	8	10
C12/15	12	15
C16/20 ^(**)	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C28/35 ^(**)	28	35
C32/40	32	40
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C80/95	80	95
C90/105	90	105

^(*) Per strutture non armate o a bassa percentuale di armatura.

^(**) Minimo per strutture semplicemente armate.

^(***) Minimo per strutture precomprese.

Relativamente al calcestruzzo di aggregati leggeri minerali, artificiali o naturali (ad esclusione dei calcestruzzi aerati), le NTC 2008 rinviano a quanto riportato nella UNI EN 206-1:2006. In tabella 1.3 si riportano le classi di resistenza dei calcestruzzi leggeri così come specificato nella UNI EN 2006-1.

Tabella 1.3. Calcestruzzo leggero, secondo prospetto 8, UNI EN 206-1:2006

Classe resistenza a compressione	Resistenza caratteristica cilindrica minima $f_{ck,cyl}$ (N/mm ²)	Resistenza caratteristica cubica minima ^(*) $f_{ck,cube}$ (N/mm ²)
LC8/10	8	10
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

(*) Possono essere utilizzati anche altri valori, se la relazione fra questi e la resistenza cilindrica di riferimento è stabilita con sufficiente accuratezza ed è documentata.

CLASSE DI CONSISTENZA

Viene espressa anche in termini di *slump* di riferimento (o “abbassamento al cono”). Viene utilizzato uno stampo a forma di tronco di cono, alto 300 mm, riempito con quattro strati successivi di calcestruzzo. Ogni strato viene costipato con 25 colpi di una barra di ferro arrotondata standardizzata, del diametro di 16 mm. Successivamente, lo stampo viene tenuto fermo sulla superficie liscia con delle staffe rette ai piedi dell'operatore.

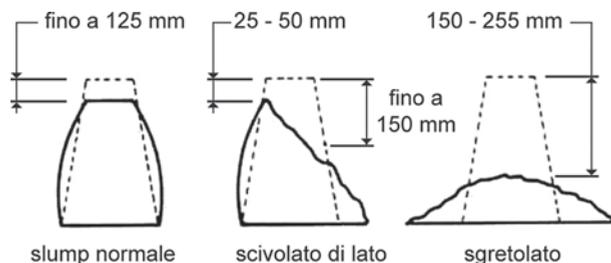


Figura 1.1. Differenti tipi di cedimento al cono: normale, scivolo per taglio, sgretolato

Una volta riempito lo stampo, esso viene sollevato lentamente lasciando cadere il calcestruzzo verso il basso. La diminuzione di altezza nella parte rimasta più alta viene a determinare l'abbassamento al cono o slump e viene misurata con l'approssimazione di 5 mm. La figura 1.1 sintetizza quanto descritto.

Come si può notare, se il cono scivola su un lato, a causa della scarsa coesione dell'impasto, la prova deve essere ripetuta. Impasti con consistenza molto rigida possono avere slump praticamente nullo. Al contrario, in impasti ricchi, questa particolare prova rende evidenti le differenze di lavorabilità.

Questa prova è molto utile per i controlli giornalieri in sede operativa della riproducibilità degli impasti. Pertanto, deviazioni della prova dai parametri indicati, costituiscono la necessità di intervenire con le opportune correzioni. Facendo riferimento alla UNI EN 206-1 (*Calcestruzzo – Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità*), si definiscono 5 classi di abbassamento al cono (S1, S2, S3, S4, S5). La tabella 1.4 riporta la classificazione secondo UNI EN 206-1: 2006.

Tabella 1.4. Classi di abbassamento al cono, secondo UNI EN 206-1:2006

Classe	Abbassamento al cono (mm)	Denominazione di uso comune ^(**)
S1	10÷40	Umida
S2	50÷90	Plastica
S3	100÷150	Semifluida
S4	160÷210	Fluida
S5 ^(*)	≥ 220	Super fluida

^(*) Non viene specificato alcun limite superiore nella norma: più idoneo individuare la classe di spandimento F1-F6.

^(**) Non specificato espressamente nella norma.

DIAMETRO MASSIMO DELL'AGGREGATO

Gli aggregati o inerti sono dei componenti che costituiscono quasi i tre quarti del volume dell'impasto e che influenzano proprietà tipiche del calcestruzzo come la resistenza finale, la durabilità e anche alcuni suoi aspetti strutturali. Al contrario della loro denominazione, essi non sono completamente *inerti*, ma avendo proprietà chimiche, fisiche e termiche, influenzano a volte le caratteristiche del calcestruzzo. In più, oltre ad essere la parte più economica del calcestruzzo, gli conferiscono vantaggi tecnici e una maggiore stabilità di volume e una migliore resistenza al deterioramento rispetto alla semplice pasta cementizia. Le dimensioni degli inerti variano dal millimetro a diversi centimetri. Normalmente, viene impiegata una miscela di diverse dimensioni degli inerti (caratterizzata da opportuna distribuzione granulometrica). Al fine di ottenere calcestruzzi di buona qualità, infatti, si utilizzano inerti di almeno due granulometrie: inerti fini, o sabbia, non superiori a 2 mm, e inerti grossi (ghiaia e pietrisco), quindi oltre i 2 mm.

Secondo le NTC 2008 (paragrafo 11.2.9.2 – Aggregati), sono idonei alla produzione di calcestruzzo per uso strutturale gli aggregati ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali, artificiali, ovvero provenienti da processi di riciclo conformi alla norma

europea armonizzata UNI EN 1260 e, per gli aggregati leggeri, alla norma europea armonizzata UNI EN 13055-1, come d'altronde riportato espressamente al paragrafo 5.1.3 della UNI EN 206-1:2006. La dimensione massima dell'aggregato viene scelta in modo tale che il calcestruzzo risulti gettato e compattato attorno alla gabbia d'armatura in assenza di segregazione del calcestruzzo. A tal proposito, sia le NTC 2008 sia gli Eurocodici stabiliscono precisi vincoli geometrici per il diametro D_{\max} (dimensione massima nominale) dell'inerte. Secondo quanto riportato espressamente al punto 5.4 della UNI 9858 (*Calcestruzzo – prestazioni, produzione, posa e criteri di conformità*), deve essere (con $D_{\max} \leq 32$ mm)¹:

- $D_{\max} < 1/4$ della dimensione minima dell'elemento strutturale (ad esempio, la dimensione minima della sezione trasversale di una trave o pilastro)
- $D_{\max} <$ interfero tra le armature (in mm) diminuito di 5 mm
- $D_{\max} <$ dello spessore adottato per il copriferro (distanza minima tra superficie interna casseri e armature più esterne) aumentato del 30%.

In particolare, la UNI EN 206-1 al paragrafo 5.2.3 (“Utilizzo degli aggregati, generalità”), oltre al vincolo della dimensione minima, dello spessore adottato per il copriferro, enfatizza anche l'importanza delle condizioni ambientali a cui sarà esposto il calcestruzzo sin dalla fase del getto.

1.1.2. Caratteristiche principali del calcestruzzo

In linea generale, per il calcestruzzo si possono distinguere le seguenti caratteristiche o peculiarità:

- lavorabilità
- segregazione
- rapporto acqua-cemento *A/C* (limiti)
- *bleeding*
- contenuto in aria
- contenuto minimo di cemento
- tipo di cemento
- classi di esposizione (ambientale)
- contenuto in cloruri (e classi)
- durabilità (requisiti, prescrizioni)
- specifiche per calcestruzzo a prestazione garantita
- controlli di accettazione (criteri)
- copriferro nominale (limiti)
- resistenze meccaniche (caratteristiche e di progetto).

¹ Serie 2 previste dalla EN 12620:2008 (*Aggregati per calcestruzzo*): 8-12-16-20-32-40-63.

1.1.2.1. Lavorabilità

Viene definito *lavorabile* un calcestruzzo il cui impasto abbia una consistenza tale grazie alla quale possa essere gettato e trasportato con facilità e che non presenti fenomeni di segregazione². Un parametro fondamentale per la lavorabilità di un calcestruzzo è il contenuto di acqua nell'impasto, espresso in chilogrammi d'acqua per metro cubo di calcestruzzo. Quando la quantità di acqua e le proporzioni degli altri componenti sono costanti, la lavorabilità è determinata solo dal diametro massimo degli inerti, dalla loro granulometria, dalla loro forma e superficie. Infatti, per un determinato rapporto acqua/cemento, vi è un dato valore del rapporto tra inerti fini e inerti grossi per il quale si ottiene la migliore lavorabilità. Al contrario, per poter decidere di ottenere una specifica lavorabilità, vi è un dato rapporto di inerti grossi/inerti fini per il quale il contenuto di acqua diminuisce. L'influenza degli inerti sulla lavorabilità diminuisce con l'aumentare del tenore in cemento dell'impasto, fino a scomparire quando il rapporto inerti/cemento scende al di sotto di $2,5 \div 2$. Infatti, con un rapporto più basso inerti/cemento aumenta l'area superficiale totale della fase solida e conseguentemente si crea un maggiore adsorbimento di acqua sulla superficie, con successiva diminuzione della lavorabilità. Normalmente, si ovvia a questo problema utilizzando inerti di dimensioni maggiori.

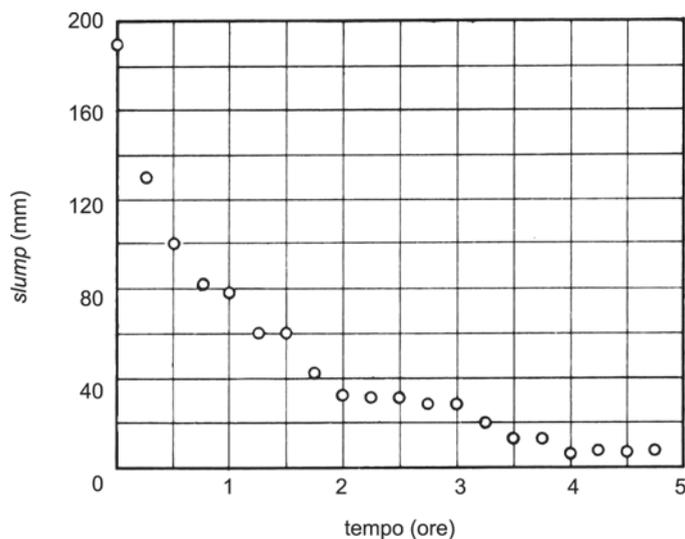


Figura 1.2. Decremento dello slump in funzione del tempo trascorso dal termine del mescolamento (calcestruzzo con rapporto acqua/cemento pari a 0,775) (fonte: Wingmore V.S., *Ready-mixed concrete*, "Reinf. Concr. Rev." 5, n. 12, pp. 793-816, London, dicembre 1961)

² Si anticipa che per *segregazione* si intende una non completa costipazione dell'impasto con separazione dei diversi componenti (acqua, cemento e aggregati). Per maggiori dettagli, si veda più avanti.

Dopo la miscelazione del calcestruzzo, e prima che inizi la presa, si osserva una graduale diminuzione della lavorabilità. Ciò è dovuto al fatto che gli inerti assorbono parte dell'acqua dell'impasto.

Una parte di questa acqua evapora e una parte viene utilizzata dal processo d'idratazione. L'esatto valore della perdita della lavorabilità dipende dal tenore in cemento, dalla temperatura e dal valore iniziale della lavorabilità stessa. Un esempio di curva slump-tempo è riportato in figura 1.2.

Oltre che dal tempo, la lavorabilità dipende dalla temperatura interna del calcestruzzo e dell'ambiente esterno. La figura 1.3 mostra, infatti, l'effetto di quest'ultima sullo slump. Dalle prove effettuate è risultato che in una giornata calda è necessario aumentare il contenuto in acqua per ottenere una voluta lavorabilità.

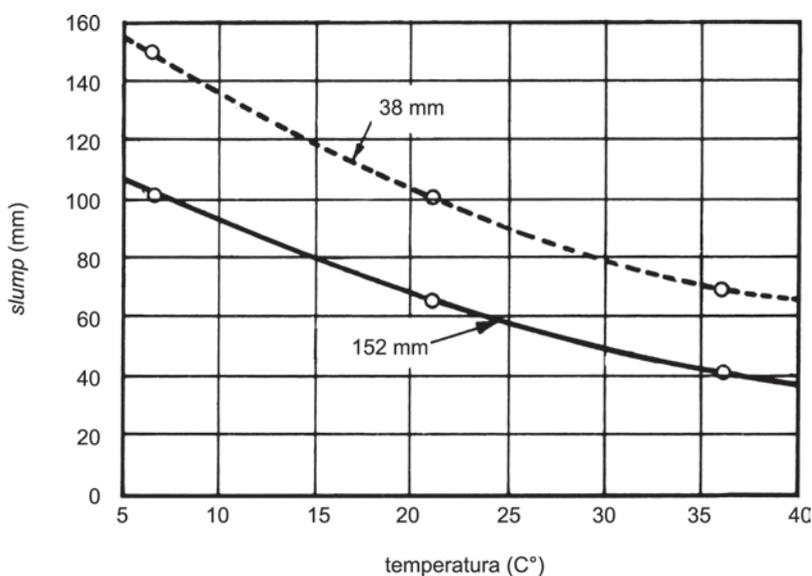


Figura 1.3. Influenza della temperatura sullo slump di calcestruzzi con differente D_{max} (fonte: U.S. Bureau of Reclamation, *Concrete Manual*, VII Ed.)

La figura 1.4 mostra come con l'aumento della temperatura interna del calcestruzzo aumenti anche la quantità di acqua necessaria per far aumentare il valore dello slump. La misura della lavorabilità dovrà essere condotta in accordo con la UNI EN 206-1:2006 dopo aver proceduto a scaricare dalla betoniera 0,30 m³ di calcestruzzo. In particolare, la misura della lavorabilità potrà essere effettuata mediante:

- il valore dell'abbassamento al cono (UNI EN 12350-2)
- la misura del diametro di spandimento alla tavola a scosse (UNI EN 12350-5).

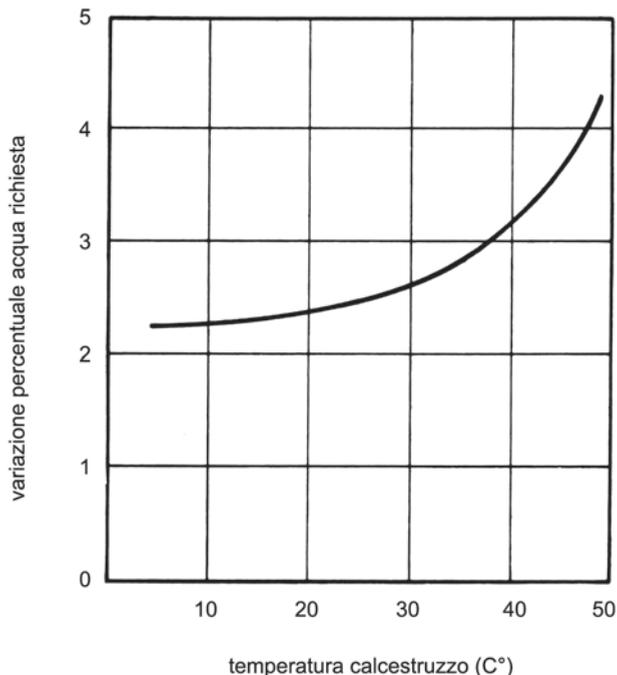


Figura 1.4. Influenza della temperatura sulla quantità di acqua richiesta per variare il valore dello slump di 25 mm (fonte: Klieger P., *Effect of mixing and curing temperature on concrete strength*, "J. Amer. Concr. Inst.", 54, pp. 1063-81, giugno 1958)

È cura del Fornitore garantire in ogni situazione la classe di consistenza prescritta per le diverse miscele tenendo conto che sono assolutamente proibite le aggiunte di acqua in betoniera al momento del getto dopo l'inizio dello scarico del calcestruzzo dalla betoniera. La classe di consistenza verrà garantita per un intervallo di tempo non oltre i 30 minuti circa dall'arrivo della betoniera in cantiere. Trascorso questo tempo sarà l'Impresa esecutrice la responsabile dell'eventuale minore lavorabilità rispetto a quella prevista dal progetto.

1.1.2.2. Segregazione

Per ottenere una buona lavorabilità e il raggiungimento di una completa costipazione, in termini rigorosi, dovrebbero esserci condizioni di assenza di segregazione. La segregazione può essere definita come la separazione tra loro dei costituenti di una miscela eterogenea, fino al punto che la loro distribuzione nella massa ne risulti disomogenea. Nel calcestruzzo, la causa principale di segregazione è la disomogeneità dimensionale delle particelle costituenti.

Esistono due tipi di segregazione. Un primo tipo si ha quando le particelle più grandi tendono a scorrere più velocemente lungo un piano inclinato o a sedimentare più velocemente delle particelle fini. Nel secondo tipo, la poltiglia di cemento

(cemento più acqua) si separa dalla massa degli inerti. Per ovviare al primo caso di segregazione, essendo l'impasto troppo asciutto, si può aggiungere dell'acqua all'impasto; ma l'aggiunta eccessiva può portare comunque al verificarsi del secondo caso di segregazione.

Infine, per evitare i fenomeni di segregazione, è importante che il calcestruzzo sia posto nella posizione in cui deve rimanere, senza trasporti o scorrimenti lungo le casseformi. Inoltre, si deve evitare di sottoporlo a vibrazioni inappropriate o prolungate durante il costipamento, per evitare che i costituenti più grandi si concentrino verso il fondo del getto.

1.1.2.3. Rapporto acqua-cemento

Il quantitativo di acqua, in rapporto al cemento, presente nell'impasto ha un'importanza decisiva sulla resistenza delle malte e del calcestruzzo. In linea generale, a parità di altre condizioni, diminuendo l'acqua d'impasto si migliora la qualità del calcestruzzo; impasti più asciutti presentano una resistenza a compressione e alla trazione maggiore di quella registrata su impasti più fluidi. In particolare, la resistenza a trazione aumenta leggermente col diminuire della percentuale d'acqua; mentre la resistenza a compressione aumenta più rapidamente col diminuire di questa percentuale. Ovviamente, esiste sempre un limite inferiore al rapporto acqua-cemento (A/C) tale per cui la resistenza non aumenta più ulteriormente, poiché esiste sempre un minimo quantitativo (stechiometrico) di acqua per permettere lo sviluppo completo delle reazioni chimiche senza che una parte del legante resti inerte chimicamente.

Abrams stabilì infatti sperimentalmente su calcestruzzi non troppo asciutti (plastici) che la resistenza allo schiacciamento di un calcestruzzo, confezionato con una data qualità di cemento e dopo una conveniente stagionatura, a parità di altre condizioni, dipende essenzialmente dal rapporto fra il quantitativo d'acqua e quello di cemento con cui è stato confezionato l'impasto³.

La figura 1.5 mostra le curve tempo-resistenza per campioni di calcestruzzo cilindrici con diversi rapporti acqua/cemento, stagionati a temperatura ambiente. Nel caso particolare di un calcestruzzo confezionato con cemento alluminoso e con clinker di cemento alluminoso come inerte, adottando già un rapporto $A/C = 0,5$, si possono raggiungere resistenze di 100 MN/m^2 (1020 kg/cm^2) in 24 ore e 120 MN/m^2 (1225 kg/cm^2) in 28 giorni. La resistenza estremamente elevata di un simile calcestruzzo è dovuta evidentemente alle elevate proprietà cementizie dell'inerte, ma è ovvio che anche il prezzo della qualità del calcestruzzo diviene altrettanto elevato.

³ Abrams D.A., *Effect of hydrated Lime and other powdered admixtures in concrete* (Bull. 8 – S.M.R. L. Lewis I.).

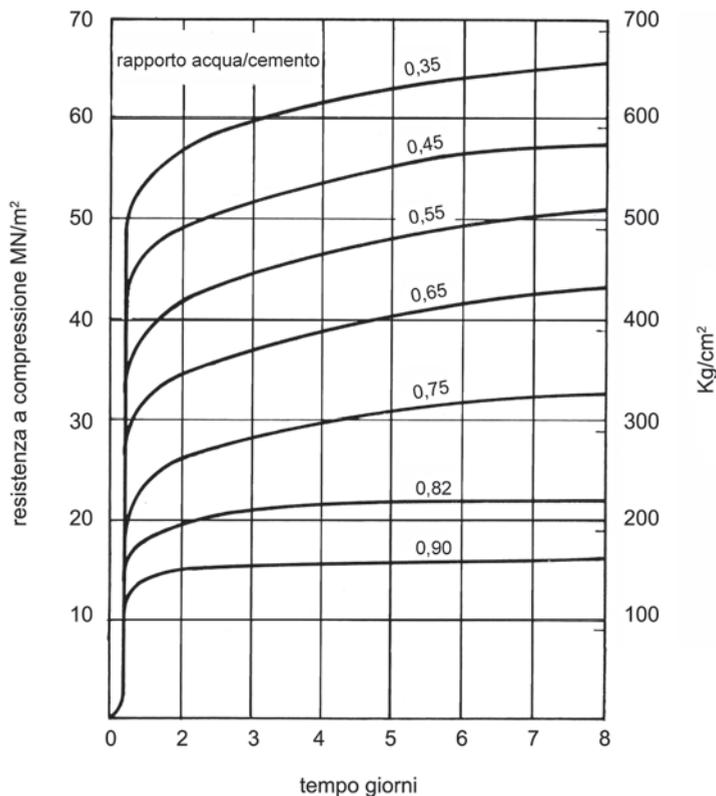


Figura 1.5. Sviluppo della resistenza di cilindri di calcestruzzo con diversi rapporti A/C confezionati con cemento alluminoso e stagionati a $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ al 95% di umidità relativa (fonte: Neville A.M., *Tests on the strenght of high-alumina cement concrete*, "J. New Zealand Inst.", E., 14, n. 3, pp. 73-6, marzo 1959)

Operativamente, il quantitativo di acqua (efficace) da prendere in considerazione nel calcolo del rapporto A/C (equivalente) è quello realmente a disposizione dell'impasto, ed è dato dai seguenti contributi:

- A_{aggr} : quantitativo di acqua ceduto o sottratto dall'aggregato se caratterizzato rispettivamente da un tenore di umidità maggiore o minore dell'assorbimento (tenore di umidità che individua la condizione di satura a superficie asciutta)
- A_{add} : aliquota di acqua introdotta tramite gli additivi liquidi (se impiegati in misura maggiore di 3 litri per metro cubo) o le aggiunte minerali in forma di *slurry*⁴

⁴ Il fumo di silice si presta ad essere usato vantaggiosamente in cantiere o nelle centrali di betonaggio anche sotto forma di sospensione acquosa (*slurry*, appunto). L'estrema finezza del fumo di silice (circa un centinaio di volte più del cemento) lo rende molto più efficace rispetto alle ceneri volanti e consente di conferire al calcestruzzo caratteristiche importanti oltre che per l'effetto pozzolanico anche per un effetto filler e quindi di densificazione della pasta cementizia che consente di diminuire la permeabilità e di aumentare in modo marcato il fattore di durabilità del calcestruzzo stesso.

- A_{gh} : aliquota di acqua introdotta tramite l'utilizzo di *chips*⁵ di ghiaccio
- A_m : aliquota di acqua introdotta nel mescolatore/betoniera.

Il quantitativo di acqua efficace, risulta dalla somma dei precedenti contributi:

$$A_{eff} = A_m + A_{agg} + A_{add} + A_{gh}$$

Il rapporto acqua/cemento equivalente $(A/C)_{eq}$ deve essere considerato come un rapporto acqua/cemento equivalente, individuato dall'espressione generale:

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{eq} = \frac{A_{eff}}{c + k_{cv}c_v + k_{fs}f_s}$$

nella quale vengono considerate le eventuali aggiunte di ceneri volanti o fumi di silice all'impasto nell'impianto di betonaggio. I termini utilizzati nell'espressione precedente sono:

- c : dosaggio di cemento in m³ di impasto
- c_v : dosaggio di cenere volante per m³ di impasto
- f_s : dosaggio di fumo di silice per m³ di impasto
- k_{cv} , k_{fs} : coefficienti di equivalenza, rispettivamente, della cenere volante e del fumo di silice, coerentemente con la UNI EN 206-1:2006 (punto 5.2.5.2) e UNI 11104:2004 (prospetto 3).

I valori k_{cv} permessi per il calcestruzzo confezionato con cemento tipo CEM I conforme alla EN 197-1 sono i seguenti:

- CEM I 32,5 $k_{cv} = 0,2$
- CEM I 42,5 e oltre $k_{cv} = 0,4$.

Il dosaggio minimo di cemento in funzione della classe di esposizione (vedere punto 5.3.2, UNI EN 206-1) può essere diminuito della quantità massima $k_{cv} \times$ (dosaggio minimo di cemento – 200) kg/m³ e, in aggiunta, la quantità di (cemento + ceneri volanti) non deve essere minore del dosaggio minimo di cemento richiesto in accordo con il punto 5.3.2 della UNI EN 206-1.

La quantità massima di fumi di silice che può essere considerata agli effetti del rapporto acqua/cemento e del contenuto di cemento deve soddisfare il requisito:

- fumi di silice/cemento $\leq 0,11$ in massa.

Se la quantità di fumi di silice che viene utilizzata è maggiore, l'eccesso non deve essere considerato agli effetti del concetto del valore k_{fs} .

I valori di k_{fs} permessi per il calcestruzzo con cemento tipo CEM I conforme alla EN 197-1 sono i seguenti:

- per un rapporto acqua/cemento prescritto $\leq 0,45$ $k_{fs} = 2,0$
- per un rapporto acqua/cemento prescritto $> 0,45$ $k_{fs} = 2,0$ eccetto $k_{fs} = 1,0$ per le classi di esposizione XC e XF.

⁵ Nella realizzazione delle grandi dighe, unitamente all'impiego di cementi a basso sviluppo di calore e a calcestruzzi con ridotto dosaggio di cemento, si ricorre all'utilizzo di *chips* di ghiaccio in parziale sostituzione dell'acqua d'impasto con lo scopo di abbassare la temperatura iniziale del calcestruzzo.

La quantità (cemento + $k_{fs} \times$ fumi di silice) non deve essere minore del dosaggio minimo di cemento richiesto in funzione della classe di esposizione (vedere punto 5.3.2, UNI EN 206-1). Il dosaggio minimo di cemento non deve essere diminuito più di 30 kg/m³ per calcestruzzi in classi di esposizione per le quali esso è non superiore a 300 kg/m³.

1.1.2.4. *Bleeding*

Il fenomeno del *bleeding* (o essudamento) si può osservare nei calcestruzzi appena gettati, con la segregazione di parte dell'acqua d'impasto che tende ad affiorare in superficie. Ciò si verifica quando i componenti solidi della miscela, sotto il loro peso, sedimentano verso il basso e non riescono a trattenere tutta l'acqua d'impasto. Pertanto, il *bleeding* può essere definito come una particolare forma di sedimentazione. Esso viene misurato, infatti, dall'assestamento totale per unità di altezza del calcestruzzo. Per determinare tale assestamento si aspira, con una pipetta, l'acqua essudata in un dato intervallo di tempo; quindi si determina il volume di acqua aspirata per unità di superficie del calcestruzzo o come percentuale di acqua totale d'impasto.

Come effetto del *bleeding*, la parte superiore del getto diventa troppo umida e, se si effettuano ulteriori getti, si otterrà un calcestruzzo debole e poroso. Se, invece, l'acqua essudata viene reimpastata nell'operazione di finitura, ne risulterà una superficie poco resistente all'usura. Questo problema può essere risolto rimandando l'operazione di finitura finché tutta l'acqua non sia evaporata o asportata.

La tendenza al *bleeding* dipende dalle proprietà del cemento. Essa si riduce all'aumentare della finezza di macinazione e in presenza di un alto tenore di alcali, in presenza di C₃A o per aggiunta di cloruro di calcio. Invece, un aumento della temperatura ne aumenta la velocità di formazione. Anche le caratteristiche fisiche dei componenti fini degli inerti possono influenzare la formazione del *bleeding*, particolarmente quelli inferiori a 0,15 mm.

Una riduzione di questo fenomeno può essere effettuata aggiungendo alla miscela pozzolana o polvere di alluminio. Il *bleeding* dei calcestruzzi procede nel tempo fino a che l'impasto è divenuto abbastanza consistente da porre fine al processo di sedimentazione.

Il *bleeding* non è sempre necessariamente dannoso. Se non viene disturbato e l'acqua formata ha la possibilità di evaporare, il rapporto *A/C* dell'impasto sottostante diminuisce, con conseguente aumento della resistenza finale. D'altra parte, però, se l'acqua che sale in superficie trasporta una quantità sufficiente di particelle di cemento solido, si forma uno strato di poltiglia umida che, dopo essiccazione, risulterà porosa dando luogo a una superficie che continuerà a spolverare nel tempo. Se su di essa si effettua un'altra gettata, anche in questo caso rimarrà interposto uno strato in cui la coesione non è adeguata. Si può ovviare all'inconveniente asportando in qualche modo lo strato superficiale prima del getto. L'essudamento di acqua, coerentemente

con la UNI 7122:2008 (*Prova sul calcestruzzo fresco – Determinazione delle quantità d'acqua e d'impasto essudata*), non dovrà superare lo 0,1% (sull'acqua d'impasto).

1.1.2.5. *Contenuto in aria*

Per ogni tipo di miscela vi è una quantità minima di aria occlusa necessaria per assicurare una protezione dal gelo. Si è riscontrato sperimentalmente che questa quantità è il 9% della “malta” cementizia contenuta nel calcestruzzo. Il fattore determinante è la distribuzione di questa aria nell'ambito della pasta cementizia, cioè, in pratica, lo spessore della pasta che circonda ciascuna bollicina. Si ritiene che 0,25 mm di spessore sia il massimo consentito per assicurare una completa protezione dal gelo.

Poiché la resistenza di un calcestruzzo dipende dal volume totale dei vuoti d'aria, è opportuno che essi rimangano nel numero minore possibile. Le dimensioni delle bolle d'aria occlusa dipendono in larga misura dal metodo con cui sono state prodotte e poiché non sono tutte di uguale diametro è conveniente esprimere la loro concentrazione in termini della loro area superficiale.

È opportuno ricordare che in un calcestruzzo è sempre presente anche aria accidentale e che, qualunque sia il metodo di indagine, i due tipi di vuoti non sono distinguibili, tanto che l'area superficiale rappresenta il valore medio per tutti i vuoti contenuti nell'impasto. Per un calcestruzzo aerato di buona qualità, la superficie specifica varia da 15 a 25 mm²/mm³, con punte fino a oltre 30 mm²/mm³. Al contrario, la superficie specifica dell'aria accidentale è di solito inferiore a 10 mm²/mm³. Le dimensioni delle bollicine variano da 0,05 a 1 mm circa.

Per una determinata percentuale di aria, la distanza tra le bollicine dipende dal rapporto A/C. Valori tipici della quantità di aria richiesta perché distino di 0,25 mm in diverse miscele, basati su risultati di origine sperimentale, sono riportati in tabella 1.5.

La tabella 1.5 mostra che, per un certo valore della superficie specifica, le miscele ricche richiedono un volume maggiore di aria occlusa rispetto alle miscele povere. Tuttavia, quanto più la miscela è ricca, tanto maggiore è la superficie specifica dei vuoti per un dato contenuto d'aria.

Il volume dell'aria occlusa in un certo calcestruzzo è indipendente dal volume dell'aria accidentale. Il suo contenuto è regolabile variando la quantità dell'agente aerante aggiunto. Per basse concentrazioni, la quantità di aria aumenta all'aumentare dell'aerante, ma tende a un limite oltre il quale il volume d'aria non aumenta ulteriormente.

Ad esempio, miscele con inerte di dimensione massima di 19,05 mm (3/4 di pollice) hanno fornito i seguenti valori di superficie specifiche dei vuoti (tabella 1.6).

Altri fattori influenzano la quantità di aria effettivamente trattenuta a parità di quantità di agente aerante. Ad esempio, una miscela più lavorabile trattiene più aria di una miscela più asciutta. Una maggiore finezza del cemento sembra diminuire la quantità di aria anche se il ruolo esatto delle varie proprietà del cemento stesso non è stato determinato.

Tabella 1.5. Contenuto in aria richiesto per ottenere una distanza tra le bollicine di 0,25 mm (fonte: Powers T.C., *Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete*, "J. Amer. Concr. Inst.", 50, pp. 741-60, maggio 1954, and Discussion, pp. 760-6, 760-15, dicembre 1954)

Contenuto in cemento (kg/m ³)	Rapporto A/C	Aria richiesta (% in volume sul calcestruzzo) per superficie dei vuoti specifica di mm ² /mm ³				
		14	18	20	24	31
445	0,35	8,5	6,4	5,0	3,4	1,8
390		7,5	5,6	4,4	3,0	1,6
330		6,4	4,8	3,8	2,5	1,3
445	0,49	10,2	7,6	6,0	4,0	2,1
390		8,9	6,7	5,3	3,5	1,9
330		7,6	5,7	4,5	3,0	1,6
280		6,4	4,8	3,8	2,5	1,3
445	0,66	12,4	9,4	7,4	5,0	2,6
390		10,9	8,2	6,4	4,3	2,3
330		9,3	7,0	5,5	3,7	1,9
280		7,8	5,8	4,6	3,1	1,6
225		6,2	4,7	3,7	2,5	1,3

Tabella 1.6. Contenuto in aria raccomandato dalla A.C.I. Committee 211 per calcestruzzi con vari diametri massimi degli inerti (fonte: A.C.I. Committee 211, *Recommended practice for selecting proportions for normal weight concrete* (A.C.I. 211. 1-70), "J. Amer. Concr. Inst.", 66, pp. 612-628, agosto 1969; "J. Amer. Concr. Inst.", 67, pp. 192-194, febbraio 1970; "J. Amer. Concr. Inst.", p. 67, 953, dicembre 1970)

Diametro massimo degli inerti (mm)	Contenuto medio aria occlusa (%)
10	8
12,5	7
20	6
25	5
40	4,5
50	4
70	3,5
150	3

La granulometria dell'inerte ha effetto e in particolare il contenuto di aria occlusa diminuisce in presenza di un eccesso di sabbia finissima, mentre aumenta in presenza di un eccesso di materiale da 30 a 600 mm. In generale, sembra che i costituenti solidi dell'impasto influiscano in quanto competono con l'assorbimento dell'acqua. La superficie di ogni bollicina deve infatti essere costituita da una sottile pellicola

d'acqua, e maggiore è la superficie solida che deve venire bagnata, minore è la quantità di acqua disponibile per i contorni delle bolle.

L'operazione di miscelamento ha naturalmente un'importanza non secondaria. Se essa è troppo breve, l'agente aerante può risultare insufficientemente disperso, mentre un miscelamento troppo prolungato libera gradualmente l'aria occlusa. Esiste pertanto un tempo di miscelamento ottimale anche se, in pratica, altre considerazioni impongono generalmente tempi di miscelamento più brevi. Un'alta temperatura favorisce la perdita d'aria, solo in parte compensata dal maggiore volume che una determinata quantità di aria occupa. Un aumento, ad esempio, da 10 a 32 °C riduce la quantità di aria occlusa a circa la metà.

La vibrazione del calcestruzzo provoca la perdita di parte dell'aria e specialmente le bolle più grandi che interessano però in misura minore ai fini della protezione dal gelo. Una prolungata vibrazione può tuttavia provocare una perdita considerevole. Ad esempio, 3 minuti possono provocare la perdita del 50% dell'aria e 9 minuti la perdita dell'80%.

Il motivo di occludere aria nel calcestruzzo è essenzialmente quello di renderlo resistente al gelo. All'inizio del processo di congelamento, i vuoti assorbono la pressione idraulica che si genera all'interno dei pori nella pasta cementizia e durante lo stadio successivo essi impediscono, o limitano, la crescita dei corpi microscopici di ghiaccio già formati nella pasta. Ogni vuoto protegge solo un piccolo spessore circostante e, se la distanza tra essi è eccessiva, possono verificarsi effetti di espansione, mentre solo se gli spessori protetti si sovrappongono, l'intera struttura diviene immune da danni, e il materiale, al pari di qualunque altro solido, si contrae anziché espandersi allorché la temperatura diminuisce. Al momento del disgelo, l'acqua ritorna nella sua posizione capillare (in virtù proprio degli effetti di capillarità) e il materiale rimane protetto permanentemente.

Nei getti di grandi dimensioni, dove lo sviluppo di calore ha più importanza della resistenza stessa, l'occlusione di aria permette l'impiego di miscele più povere e perciò con minori effetti termici. Nelle miscele ricche, l'effetto sulla lavorabilità è minore e il rapporto acqua/cemento può essere abbassato in misura relativamente modesta, con netta diminuzione di resistenza. In generale, il 5% di aria occlusa aumenta l'abbassamento del cono da 15 a 50 mm a seconda delle caratteristiche della miscela. Anche in calcestruzzi a inerti leggeri, l'impiego di aeranti può risultare vantaggioso. La ragione per cui la lavorabilità aumenta risiede nel fatto che le bollicine, mantenute in forma sferica dalla tensione superficiale all'interfase aria/acqua, si comportano come un inerte fine con bassissimo coefficiente di attrito ed elevata elasticità. Il componente fine dell'inerte risulterebbe quindi sovra dosato e sarebbe opportuno ridurre il tenore di sabbia, cosa che permetterebbe un'ulteriore riduzione del contenuto in acqua nella miscela, cioè un'ulteriore compensazione alla perdita di resistenza.

Si ritiene talvolta che l'occlusione d'aria riduca la tendenza alla segregazione. Questo è vero, in particolare durante l'impasto e il trasporto del calcestruzzo

fresco in quanto la miscela è più coesiva, ma i rischi di segregazione per eccessiva vibrazione rimangono, anche perché in questo caso l'aria viene rapidamente espulsa. L'occlusione di aria diminuisce la densità del calcestruzzo, con conseguente vantaggio economico, che bilancia l'aggravio dovuto al costo dell'agente aerante (peraltro, in generale, non eccessivo).

Contestualmente alla misura della lavorabilità del conglomerato dovrà essere determinato il contenuto di aria nel calcestruzzo in accordo alla procedura descritta nella UNI EN 12350-7, basata sull'impiego del porosimetro. Il contenuto di aria in ogni miscela prodotta dovrà essere conforme subordinatamente al diametro massimo dell'aggregato e dell'eventuale esposizione a classi ambientali particolari⁶.

1.1.2.6. Contenuto in cemento

Il cemento deve essere scelto, fra quelli considerati idonei, tenendo in considerazione:

- l'esecuzione dell'opera
- l'uso finale del calcestruzzo
- le condizioni di maturazione (per esempio trattamento termico)
- le dimensioni della struttura (subordinatamente allo sviluppo di calore)
- le condizioni ambientali alle quali la struttura sarà esposta (vedere punto 4.1, UNI EN 206-1)
- la potenziale reattività degli aggregati agli alcali provenienti dai componenti.

Cementi conformi alla norma EN 197-1:2011 (*Cemento – Parte 1: Composizione, specifiche e criteri di conformità per cementi comuni*) sono da considerarsi generalmente idonei. Qualora si presenti l'esigenza di eseguire getti massivi, al fine di limitare l'innalzamento della temperatura all'interno del getto, in conseguenza alla reazione di idratazione del cemento, sarà opportuno utilizzare cementi comuni a basso calore di idratazione contraddistinti dalla sigla LH contemplati nella EN 197-1:2011.

Imposto un minimo "contenuto in cemento" C (kg/m³), un volume di acqua d'impasto A (kg/m³) e le due quantità di inerti fini I_{fini} (kg/m³) e di inerti grossi I_{grossi} (kg/m³), può calcolarsi il volume occupato da una miscela di impasto completamente costipata mediante il cosiddetto *metodo dei volumi assoluti*, basato sull'ipotesi che il volume finale (1 m³) sia uguale alla somma dei volumi dei singoli componenti. In formula:

$$\frac{A}{1000} + \frac{C}{1000\rho_c} + \frac{I_{fini}}{1000\rho_{fini}} + \frac{I_{grossi}}{1000\rho_{grossi}} = 1$$

dove con ρ_i si è indicato, genericamente, il peso specifico dei diversi ingredienti

⁶ Classe di esposizione ambientale XF: strutture soggette a cicli di gelo/disgelo in presenza o meno di sali disgelanti (prospetto 4.1 della UNI EN 1992-1-1:2005, classe di denominazione n. 5, attacco di cicli gelo/disgelo).

relativamente all'acqua in fase liquida. Per qualsiasi altro ingrediente che venga aggiunto (esempio pozzolana o diversi tipi di inerte) basta aggiungere i corrispondenti termini all'equazione sopra riportata. Se è presente aria occlusa in percentuale a sul volume del calcestruzzo, è sufficiente sostituire a destra dell'equazione il valore 1 con il valore $1 - a/100$ ottenendo:

$$\frac{A}{1000} + \frac{C}{1000\rho_c} + \frac{I_{fini}}{1000\rho_{fini}} + \frac{I_{grossi}}{1000\rho_{grossi}} = 1 - \frac{a}{100}$$

dove per entrambe, si ribadisce, A e C sono, rispettivamente, il contenuto in acqua (kg/m^3) e il contenuto in cemento (kg/m^3). Se l'inerte contiene umidità libera in quantità $u\%$ sul peso dell'inerte asciutto, le quantità di acqua aggiunta, A , e di inerte umido devono essere modificate nelle due equazioni sopra. Se il peso dell'acqua libera in I_{inerte} chilogrammi di inerte è x , tanto che:

$$\frac{u\%}{100} = \frac{x}{I_{inerte} - x}$$

si avrà:

$$x = I_{inerte} \frac{u\%}{100 + u\%}$$

Questa quantità x si aggiunge a I_{inerte} per avere l'effettivo peso di inerte bagnato per carica:

$$I_{inerte} \left[1 + \frac{u\%}{100 + u\%} \right]$$

e si sottrae ad A per dare il peso (reale) dell'acqua aggiunta:

$$A - I_{inerte} \left[\frac{u\%}{100 + u\%} \right]$$

Nella preparazione di calcestruzzi a bassa o media resistenza si può evitare la determinazione dell'umidità degli inerti purché la loro distribuzione granulometrica sia sufficientemente costante e il dosaggio venga effettuato a peso. In questo caso, variazioni di umidità possono essere compensate da un operatore esperto semplicemente variando la quantità di acqua aggiunta, in modo da mantenere costante la lavorabilità (misurata, ad esempio, dalla potenza assorbita dal miscelatore), cosa che mantiene sensibilmente costante anche il rapporto acqua/cemento. Se la misura viene effettuata a volume, non è necessario tener conto dell'umidità degli inerti grossi, mentre è necessario valutare gli eventuali effetti dell'espansione degli inerti fini.

ESEMPIO 1. CALCOLO MISCELA COSTRUZIONE MANTO STRADALE

Una miscela destinata alla costruzione di manti stradali deve avere una resistenza minima a compressione di 28,9 MPa (295 kg/cm²). Il peso specifico relativo del cemento utilizzato nell'impasto sia 3,15. La costipazione verrà effettuata per vibrazione e si prevede un buon grado di controllo. Verrà utilizzato cemento Portland normale e inerte la cui curva granulometrica ha permesso di individuare 3 classi di inerti (fine, 19,05-4,76 mm e 38,1-19,05 mm) che stanno tra loro nei seguenti rapporti 1:0,94:2,59, rispettivamente. Si ipotizzi che il rapporto tra la resistenza minima e la resistenza media della miscela sia stato valutato circa 0,75 a cui si è visto corrispondere un rapporto acqua/cemento (idoneo anche dal punto di vista della durabilità) pari a $A/C = 0,48$ (coerentemente con il fatto che si richiede una miscela con lavorabilità molto bassa) per una resistenza media di $295/0,75 = 393$ kg/cm² (38,5 MPa). Si è visto che a tale rapporto A/C risulterebbe idoneo un rapporto inerte/cemento pari a 7,2. Ciò posto, si calcoli la densità del calcestruzzo fresco che si otterrà e il contenuto in cemento C (kg/m³) nella miscela, sapendo che quello degli inerti grossi e fini è, rispettivamente, di 2,50 e 2,60.

Soluzione

Le tre classi di inerti sono tra loro in rapporto 1:0,94:2,59. Se il rapporto inerti/cemento deve essere pari a 7,2, le proporzioni della miscela divengono (riferite a 1 parte di cemento), rispettivamente:

$$(1:0,94:2,59) \times 7,2/4,53 = (1,59:1,50:4,11)$$

parti di ciascun inerte.

Rispetto, quindi, al cemento staranno nel rapporto:

$$1:1,59:1,50:4,11$$

con $A/C = 0,48$.

Poiché il peso specifico relativo del cemento, degli inerti grossi e fini è rispettivamente 3,15, 2,50, 2,60 dall'espressione del metodo dei volumi assoluti si ha:

$$\frac{0,48 C}{1000} + \frac{C}{1000 \times 3,15} + \frac{1,59 C}{1000 \times 2,60} + \frac{(1,50 + 4,11)C}{1000 \times 2,50} = 1$$

da cui si ricava: $C = 275$ kg/m³.

Seguono, quindi, i pesi dei singoli ingredienti (per 1 m³):

cemento: 275 kg

acqua: $0,48 \times 275 = 132$ kg

inerte fine: $1,59 \times 275 = 437$ kg

inerte (grosso) 19,5-4,76 mm: $1,5 \times 275 = 412$ kg

inerte (grosso) 38,1-19,05 mm: $4,11 \times 275 = 1130$ kg

totale somma ingredienti: 2386 kg

La densità del calcestruzzo è quindi pari a 2386 kg/m³.

ESEMPIO 2. CALCOLO MISCELA CON CONTENUTO ARIA RESIDUA 1%

Si richiede di confezionare una miscela con resistenza media di 39 MN/m² (circa 400 kg/cm²) e con slump di 50 mm. Il diametro massimo degli inerti sia 40 mm e la densità in mucchio dell'inerte grosso sia 1600 kg/m³ con peso specifico relativo 2,64. Il peso specifico relativo degli inerti fini sia 2,58. Supponendo un rapporto acqua/cemento di $A/C = 0,48$, un fabbisogno d'acqua di 160 kg/m³ (con contenuto di aria residua a dell'1%) e per l'inerte un volume in mucchio di 0,74 (per unità di volume di calcestruzzo), calcolare il volume dell'inerte fine e la densità del calcestruzzo ottenuto.

Soluzione

Per $A/C = 0,48$ si trova il contenuto in cemento $(160 \text{ kg/m}^3)/0,48 = 334 \text{ kg/m}^3$. Il volume in mucchio per unità di volume del calcestruzzo è pari a 0,74 e, di conseguenza, il peso dell'inerte per metro cubo di calcestruzzo sarà $0,74 \times (1600 \text{ kg/m}^3) = 1180 \text{ kg/m}^3$ circa. Dalla relazione:

$$\frac{A}{1000} + \frac{C}{1000\rho_c} + \frac{I_{fina}}{1000\rho_{fina}} + \frac{I_{grosso}}{1000\rho_{grosso}} = 1 - \frac{a}{100}$$

sostituendo i valori numerici si ha:

$$\frac{160}{1000} + \frac{334}{1000 \times 3,15} + \frac{I_{fina}}{1000 \times 2,58} + \frac{1180}{1000 \times 2,64} = 1 - \frac{1}{100}$$

da cui si ricava: $I_{fina} = 637 \text{ kg}$.

I volumi assoluti degli ingredienti per metro cubo di calcestruzzo saranno perciò:

cemento: $334/(3,15 \times 1000) = 0,106 \text{ m}^3$

acqua: $160/1000 = 0,160 \text{ m}^3$

inerte grosso: $1180/(2,64 \times 1000) = 0,477 \text{ m}^3$

aria residua: $0,01 \times 1 = 0,010 \text{ m}^3$

inerte fino: $637/(2,58 \times 1000) = 0,247 \text{ m}^3$

Risultando infatti: $0,106 + 0,160 + 0,477 + 0,010 = 1,000 - 0,247$.

I pesi dei diversi costituenti saranno:

cemento: 334 kg

acqua: 160 kg

inerte fine: 637 kg

inerte grosso: 1180 kg

totale somma ingredienti: 2311 kg

La densità del calcestruzzo sarà quindi circa 2310 kg/m³.

1.1.2.7. Tipo di cemento

La tipologia di cemento è fondamentale che sia presa in considerazione quando sia reale la possibilità di presenza di solfati nei terreni e nelle acque a contatto con le strutture. I solfati possono provenire o dagli scarichi industriali o dalla decomposizione biologica di sostanze organiche contenenti zolfo. I terreni alluvionali e quelli coerenti, inoltre, possono contenere solfuro di ferro che in alcune situazioni può dare origine alla formazione massiccia di CaSO_4 . In particolar modo, le vasche degli impianti di depurazione accolgono reflui con alte concentrazioni di solfati. Gli effetti di degrado causati dall'attacco solfatico si manifestano sotto forma di espansioni o disallineamenti delle strutture, cui consegue la nascita di quadri fessurativi e di espulsioni di parti delle strutture. Fino a giungere, in condizioni estreme, alla completa disgregazione della matrice legante. Al fine di classificare il grado di aggressione, la UNI 11104:2004 e la UNI EN 206-1:2006 (prospetto 2) elencano le più diffuse tipologie di agenti chimici e la loro concentrazione. Di fatto, le norme suddette obbligano, quando le condizioni al contorno lo richiedessero, di accertare con precisione le caratteristiche dell'ambiente eseguendo le dovute analisi chimiche. Nel prospetto 4 della UNI 11104:2004 sono indicati i valori limite per le proprietà del calcestruzzo. È importante evidenziare che per le classi XA2 e XA3 la suddetta norma stabilisce, oltre alle ordinarie prescrizioni, l'utilizzo di un cemento resistente ai solfati conforme alla UNI 9156:1997 (*Cementi resistenti ai solfati. Classificazione e composizione*). All'atto pratico, qualora in alcuni ambienti particolarmente severi i valori delle concentrazioni di sostanza dovessero superare i limiti del Prospetto 2 della UNI EN 206-1:2006, si renderebbe indispensabile la protezione delle superfici a contatto con l'ambiente prescrivendo guaine, resine o pitture impermeabilizzanti. Come noto, il cemento alluminoso è stato studiato per resistere all'attacco solfatico, rispondendo egregiamente a questo requisito. La resistenza ai solfati è imputabile soprattutto all'assenza di Ca(OH)_2 nell'impasto idratato e all'azione protettiva esercitata dal gel⁷ di allumina, relativamente inerte. La resistenza diminuisce tuttavia in miscele più povere (per rapporti 1:8). Il cemento alluminoso non viene attaccato dalla CO_2 disciolta in acqua pura ed è perciò adatto alla fabbricazione di condutture idrauliche. Non resiste agli acidi, sebbene possa resistere molto bene a soluzioni diluite (con pH non inferiore a 3,5÷4) riscontrate ad esempio nei reflui industriali. Al contrario, gli alcali, anche in soluzione diluita, aggrediscono facilmente il cemento alluminoso idrato combinandosi con il gel di allumina per dar luogo ad alluminati solubili.

⁷ Molte proprietà meccaniche della pasta di cemento indurita e del calcestruzzo dipendono dalla struttura fisica dei prodotti di idratazione, il cosiddetto *gel di cemento*. L'impasto di cemento fresco è una dispersione di particelle solide in acqua, che devono la loro plasticità alla caratteristica di essere debolmente legate tra loro, ma lubrificate dall'acqua che si trova libera tra di esse. Il gel di cemento è costituito da due fasi che si estendono con continuità su tutto il sistema: una fase costituita dall'acqua (che riempie un secondo tipo di porosità detta *porosità di gel*) e una fase costituita dai silicati idrati che formano un reticolo continuo di particelle solide tra le quali si estende la porosità capillare. Vista la natura colloidale dei prodotti di idratazione e l'esistenza di un gran numero di pori, l'area superficiale della fase solida risulta estremamente elevata.

Il comportamento di questo cemento in presenza di un gran numero di agenti aggressivi è stato studiato da Hussey e Robson.

Sebbene il cemento alluminoso resista molto bene all'acqua di mare, questa non deve essere usata come acqua di impasto, a causa dell'influenza esercitata dalla formazione di cloro alluminati sui processi di presa e di indurimento, per lo stesso motivo non devono venire usati additivi a base di cloruri (ad esempio, CaCl_2).

1.1.2.8. Classi di esposizione (ambientale)

Le condizioni di esposizione sono le condizioni chimiche e fisiche alle quali la struttura è esposta, in aggiunta alle azioni meccaniche. Le condizioni ambientali sono classificate secondo il prospetto 4.1 della UNI EN 206-1:2006. La denominazione delle classi di esposizione sono le seguenti:

- X0, assenza di rischio di corrosione o attacco (ad esempio, pavimentazioni industriali interne per le quali risulta praticamente trascurabile l'attacco per carbonatazione)⁸;
- XC1, XC2, XC3, XC4, corrosione indotta da carbonatazione (ad esempio, in condizioni normali le armature all'interno di una trave o pilastro si trovano in condizioni di ambiente altamente basico con $\text{pH} > 13$, in virtù della reazione chimica di idratazione del cemento, con sviluppo di idrossido di calce. Successivamente, per carbonatazione il pH si attesta attorno a 9, quindi abbassandosi. Da questo punto in poi, lo strato di ossido protettivo che avvolge le armature diventa sempre più poroso fino a che si genera ruggine sulle superfici, con l'inevitabile successiva espulsione del copriferro);
- XD1, XD2, XD3, corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti da acqua di mare⁹ (ad esempio, analogamente alla carbonatazione, l'azione dei cloruri intacca lo strato protettivo iniziale di ossido sulla superficie delle armature. A differenza però del fenomeno della carbonatazione, l'attacco dei cloruri sulle armature è di natura intensa e localizzata, per via di particolari processi elettrochimici. Tale fenomeno di corrosione localizzata a forma di crateri viene chiamata appunto col termine corrispondente inglese *pitting*. Un calcestruzzo umido e con elevato contenuto di cloruri in prossimità delle armature può subire un processo di corrosione per cloruri con velocità di penetrazione di circa $1 \div 1,5$ mm/anno);
- XS1, XS2, XS3, corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare (viene distinta l'azione corrosiva per cloruri di origine marina perché i cristalli dei sali, depositati dall'acqua nei periodi di alta marea, aumentano di volume nella fase successiva di bassa marea generando tensioni nella pasta cementizia. Tali tensioni inducono fessurazioni e delaminazioni parallelamente all'azione abrasiva sulla

⁸ Per carbonatazione si intende il processo mediante il quale l'anidride carbonica penetra attraverso il copriferro e reagisce con l'idrossido di calcio presente nella pasta cementizia idratata, determinando una notevole riduzione della basicità del conglomerato fino a valori di pH prossimi a 9.

⁹ La norma UNI 11104:2004 divide in due classi differenti l'attacco da cloruri: quelli provenienti dal mare (classe di esposizione XS) e quelli provenienti da altre fonti (classe di esposizione XD) come ad esempio le vasche dei processi industriali, piscine, infrastrutture varie sottoposte a sali disgelanti, ecc.

- superficie del conglomerato attuata dai solidi in sospensione agitati dal moto ondoso. In questo caso, il maggior degrado che subisce il calcestruzzo si riflette quindi sulla velocità di penetrazione dei cloruri sulla superficie delle armature);
- XF1, XF2, XF3, XF4, attacco di cicli gelo/disgelo o senza sali disgelanti (in ambienti dal clima molto rigido, può formarsi del ghiaccio all'interno delle porosità della malta cementizia. Il degrado si manifesta inizialmente sotto forma di dilavamento della pasta di cemento superficiale, con messa a nudo degli aggregati e in fase avanzata sotto forma di scagliature e delaminazioni degli strati più esterni, soprattutto su parti esterne di strutture orizzontali in cui siano ostacolate le condizioni di smaltimento delle acque. La soluzione al problema è offerta dall'utilizzo di particolari additivi, detti *aeranti*, all'atto del confezionamento in centrale di betonaggio. Essi aggiungono un opportuno quantitativo di aria nell'impasto, assicurando la formazione di un sistema di microbolle omogeneamente disperso nella malta cementizia, dove la pressione dell'acqua liquida, generata dalla formazione del ghiaccio nei pori capillari, possa scaricarsi e disperdersi nelle cavità evitando di superare la resistenza del materiale per trazione. In altre parole, tali additivi innalzano la soglia di saturazione critica, in termini di rapporto volume d'acqua/volume pori, che innesca il degrado);
 - XA1, XA2, XA3, attacco chimico (i processi chimici di degrado delle strutture in calcestruzzo sono ascrivibili essenzialmente ai solfati, di cui si è accennato sopra, al magnesio, all'ammonio e all'anidride carbonica libera. Ad esempio, il magnesio e lo ione ammonio, derivanti da prodotti fertilizzanti, reagiscono con lo ione calcio dei prodotti di idratazione generando sali solubili di calcio che vengono facilmente rimossi dall'azione delle acque. In particolare, il magnesio si sostituisce ai composti che garantiscono la resistenza meccanica generando un silicato idrato responsabile della perdita parziale delle prestazioni meccaniche del conglomerato).

1.1.2.9. Contenuto in cloruri (e classi)

Il cloruro di calcio e gli additivi a base di cloruri non devono essere utilizzati nel calcestruzzo contenente armatura di acciaio, di acciaio da precompressione o di altri inserti metallici. L'aggiunta di cloruri (ad esempio, CaCl_2) all'impasto aumenta la velocità di indurimento. Questo additivo viene utilizzato per gettare in climi freddi ($2\div 4\text{ }^\circ\text{C}$) o per fare riparazioni urgenti. Nelle prime ore dell'impasto lo sviluppo di calore è maggiore. Il CaCl_2 svolge un'azione catalitica nei confronti dell'idratazione del C_2S e del C_3S . L'idratazione del C_3A è leggermente ritardata e il processo generale d'idratazione rimane inalterato. Questo additivo può essere aggiunto sia ai cementi Portland (normale) che a quelli a rapido indurimento; non deve però venire usato con il cemento alluminoso, perché la resistenza del cemento alluminoso all'attacco solfatico è dovuta proprio all'assenza di $\text{Ca}(\text{OH})$ nell'impasto idrato e alla protezione del gel di allumina, relativamente inerte.

La quantità di CaCl_2 deve essere sempre attentamente controllata. Normalmente, l'aggiunta dell'1% (sul peso del cemento) aumenta la velocità di indurimento in modo analogo a un aumento di temperatura di 6 °C. Un eccesso di questo additivo può causare una presa troppo immediata. La tabella 1.7 mostra gli andamenti tipici di accelerazione della presa. L'uso di additivi acceleranti invece di cementi a presa rapida presenta il vantaggio di ottenere una resistenza finale migliore.

Tabella 1.7. Influenza del CaCl_2 sui tempi di presa (fonte: Shideler J.J., *Calcium chloride in concrete*, "J. Amer. Concr. Inst.", 48, pp. 537-59, marzo 1952)

Percentuale in peso di CaCl_2 sul peso di cemento	Accelerazione della presa (minuti)
0,1	25
0,3	15
0,5	45
1,0	85

È importante che il cloruro di calcio sia distribuito uniformemente nella miscela; ciò si ottiene sciogliendolo nell'acqua dell'impasto. L'uso del cloruro di calcio può avere degli effetti indesiderati. La resistenza all'attacco solfatico diminuisce, mentre la reattività degli alcali con gli inerti aumenta; inoltre, il ritiro idraulico durante l'essiccamento aumenta del 10÷15%. Malgrado migliori la resistenza al gelo nei primi giorni, grazie a un maggiore sviluppo di calore, nel tempo la resistenza al gelo e disgelo di calcestruzzi aerati risulta influenzata negativamente come mostra la figura 1.6. Tra gli effetti positivi si riscontra, invece, che la resistenza all'abrasione e all'erosione sembra aumentare in modo durevole nel tempo.

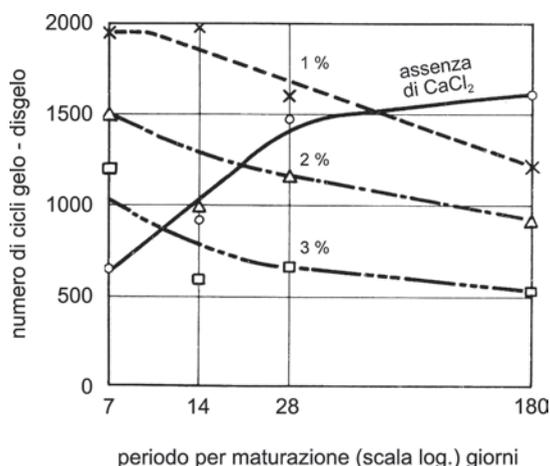


Figura 1.6. Resistenza al gelo e disgelo di calcestruzzo maturato a 4 °C con diversi contenuti di cloruro di calcio (fonte: Shideler J.J., *Calcium chloride in concrete*, "J. Amer. Concr. Inst.", 48, pp. 537-59, marzo 1952)

Per la determinazione del contenuto in cloruri del calcestruzzo, si deve calcolare la somma dei contributi apportati dai materiali componenti utilizzando uno dei metodi di seguito riportati, oppure una loro combinazione:

- calcolo basato sul contenuto massimo di cloruri permesso dalla norma relativa al componente oppure dichiarato dal produttore, per ciascun materiale componente;
- calcolo basato sul contenuto in cloruri dei materiali componenti ricavato mensilmente a partire dalla somma delle medie delle ultime 25 determinazioni del contenuto in cloruri più 1,64 volte lo scarto tipo calcolato per ciascun materiale componente. Quest'ultimo metodo è applicabile in particolare agli aggregati marini e a quei casi per i quali esistono valori dichiarati o necessari fissati dalle norme.

Il contenuto in cloruri di un calcestruzzo, espresso come percentuale di ioni cloruro rispetto alla massa del cemento, non deve superare il valore per la classe prescelta di cui alla tabella 1.8 che richiama il prospetto 10 della UNI EN 206-1:2006.

Tabella 1.8. Contenuto massimo di cloruri nel calcestruzzo, secondo prospetto 10 – UNI EN 206-1:2006

Impiego del calcestruzzo	Classe di contenuto in cloruri*	Massimo contenuto di Cl ⁻ rispetto alla massa del cemento**
In assenza di armatura di acciaio o di altri inserti metallici (ad eccezione dei dispositivi di sollevamento resistenti alla corrosione)	Cl 1.0	1,0%
In presenza di armatura d'acciaio o di altri inserti metallici	Cl 0.20	0,20%
	Cl 0.40	0,40%
In presenza di armatura d'acciaio da precompressione	Cl 0.10	0,10%
	Cl 0.20	0,20%

(*) La classe da applicare per uno specifico utilizzo del calcestruzzo dipende da disposizioni valide nel luogo d'impiego del calcestruzzo.

(**) Qualora siano impiegate aggiunte di tipo II e siano considerate nel computo del dosaggio di cemento, il contenuto in cloruri viene espresso come percentuale di ioni cloruro in massa rispetto al cemento + la massa totale delle aggiunte considerate.

1.1.2.10. Durabilità (requisiti, prescrizioni)

In fase di progetto, devono essere prese adeguate disposizioni al fine di proteggere ogni elemento strutturale dalle azioni ambientali rilevanti. I requisiti di durabilità devono essere presi in conto quando si considerano (testualmente da UNI EN 1992-1-1:2005):

- la concezione della struttura
- la scelta dei materiali
- i dettagli costruttivi
- l'esecuzione
- il controllo di qualità
- l'ispezione
- le verifiche
- particolari disposizioni (per esempio, utilizzo di acciaio inossidabile, rivestimenti, protezione catodica).

Tabella 1.9. Valori limiti per la composizione e le proprietà del calcestruzzo, secondo UNI 11104:2004

	Classi di esposizione																
	Nessun rischio di corrosione armatura	Corrosione armature indotta dalla carbonatazione				Corrosione armature indotta da cloruri			Attacco da cicli gelo/disgelo				Ambiente aggressivo per attacco chimico				
		XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2
Massimo apporto A/C	X0				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	C28/35	C32/40	C32/40	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	360	320	340	360	320	340	360	360
Contenuto minimo in aria (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0 ^(a)	-	-	-	-	-
Altri requisiti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

^(a)Nel prospetto 7 della UNI EN 206-1 viene riportata la classe C8/10 corrispondente a specifici calcestruzzi destinati a sottofondazioni 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 a un calcestruzzo aerato, per il quale è provata la resistenza al gelo/disgelo, da determinarsi secondo la UNI 8087, per la relativa classe di esposizione.

^(c) Qualora la presenza di solfati comporti le classi di esposizione XA2 e XA3 è essenziale utilizzare un cemento resistente ai solfati secondo la UNI 9156.

Aggregati conformi alla UNI EN 12620 di adeguata resistenza al gelo/disgelo

È richiesto l'impiego di cementi resistenti ai solfati^(b)

Il prospetto 4 della UNI 11104:2004 fornisce i valori limite per la composizione e le proprietà del calcestruzzo in relazione alle classi di esposizione definite al punto 3.1 della stessa norma. I valori riportati nel prospetto 4 sono idonei per i cementi di classe 32.5 e 42.5 conformi alla UNI EN 197-1 e a un aggregato avente dimensione massima del granulo compresa fra 20 mm e 32 mm. Per il cemento di classe 52.5 devono essere rispettati i limiti del prospetto 4 relativi al rapporto acqua/cemento e al dosaggio minimo di cemento, mentre i valori di resistenza minima devono essere opportunamente elevati. Nel caso di calcestruzzi destinati ad opere massive o di calcestruzzi speciali i requisiti prestazionali e di composizione devono essere verificati e riconsiderati nei riguardi delle classi di esposizione.

I valori per il rapporto massimo acqua/cemento, il contenuto minimo in cemento e la classe minima di resistenza si applicano a tutte le classi di esposizione; tali valori non devono essere considerati come un progetto di miscela ma limiti che devono essere soddisfatti contemporaneamente e indipendentemente gli uni dagli altri.

La durabilità delle strutture è vincolata anche al rispetto dei valori di copriferro¹⁰ previsti nella UNI ENV 1992-1-1 per le corrispettive classi di esposizione. Il limite superiore del contenuto d'aria deve essere il 4% in più rispetto al valore minimo. Nel caso si usino delle ceneri volanti il loro contenuto in carbone può influire in modo non prevedibile sul contenuto d'aria inglobata. Per quanto concerne la prevenzione della reazione alcali-silice è opportuno far riferimento alla UNI 8981-8 e alla UNI 8520-22. Ulteriori dettagli sul progetto di miscela, per soddisfare i requisiti di durabilità nei riguardi delle condizioni ambientali, sono riportati nelle diverse parti della UNI 8981.

Secondo quanto riportato anche nella UNI EN 206-1:2006, ogni calcestruzzo dovrà soddisfare i seguenti requisiti (detti appunto *di durabilità*) in base alle classi di esposizione ambientale della struttura cui il calcestruzzo è destinato:

Tabella 1.10. Esempio particolare di tabella utilizzata per la classificazione dei calcestruzzi (struttura civile ordinaria)

Impiego	Classe di esposizione ambientale	Classe di resistenza CX/Y	A/C (max)	Contenuto (min) in cemento (kg/m ³)	Contenuto di aria ^(*)	D _{max} (mm)	Slump	c _{nom} (mm)
Fondazioni e muri contro terra	XC2 + XA1 ^(a)	C28/35	0,55	320	–	32	S4	45 ^(c)
Strutture in elevazione	XC1	C25/30	0,60	300	–	32 ^(b)	S4/S5	25

^(*) Solo per classi XF2, XF3, XF4.

^(a) Ipotesi di terreni in cui è stata individuata presenza di gesso tale da poter innescare un attacco solfatico.

^(b) Per interferri a 35 mm utilizzare aggregati con pezzatura 20 mm.

^(c) Copriferro portato a 75 mm per calcestruzzi gettati direttamente contro il terreno senza lisciatura delle pareti verticali di scavo (es. muri contro terra e di sostegno).

¹⁰ Si veda anche più avanti, per maggiori dettagli, su come valutare il copriferro nominale.

- classe di resistenza minima a compressione (valore caratteristico)
- copriferro nominale (ricoprimento superficie più esterna armature)
- massimo rapporto acqua/cemento $(A/C)_{\max}$
- dimensione massima D_{\max} dell'aggregato
- contenuto minimo in cemento (in termini di kg/m^3)
- classe di consistenza
- tipo di cemento (quando necessario)
- classe di contenuto di cloruri
- aria inglobata o aggiunta (solo per classi di esposizione XF2, XF3, XF4).

In accordo con l'UNI EN 1992-1-1:2005, una struttura si può considerare durevole se, effettuando una manutenzione ordinaria, essa mantiene le caratteristiche di resistenza, stabilità e di servizio durante tutto l'arco di vita definito in fase di progetto. La durabilità può essere identificata come la capacità di conservazione delle caratteristiche (fisiche e meccaniche) e delle prestazioni delle strutture e dei materiali con cui le opere sono realizzate. La durabilità, in sostanza, è una prerogativa essenziale per poter mantenere i previsti livelli di sicurezza durante tutta la vita utile di progetto. Fondamentale è quindi una corretta esecuzione delle opere, con particolare riferimento al calcestruzzo che, oltre ad essere realizzato secondo una ricetta tale da renderlo durevole, deve essere posto in opera secondo le procedure previste e che deve mantenere in conformità alle condizioni di progetto prescritte.

Per garantire la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato ordinario o precompresso, esposte all'azione dell'ambiente, si devono adottare i provvedimenti atti a limitare gli effetti di degrado indotti dall'attacco chimico, fisico e derivante dalla corrosione delle armature e dai cicli di gelo e disgelo. A tal fine in fase di progetto la prescrizione – valutate opportunamente le condizioni ambientali del sito ove sorgerà la costruzione o quelle di impiego – deve fissare le caratteristiche del calcestruzzo da impiegare (composizione e resistenza meccanica), i valori del copriferro e le regole di maturazione. Ai fini della valutazione della durabilità, nella formulazione delle prescrizioni sul calcestruzzo, si potranno prescrivere anche prove per la verifica della resistenza alla penetrazione agli agenti aggressivi, ad esempio si può tener conto del grado di impermeabilità del calcestruzzo. A tal fine può essere determinato il valore della profondità di penetrazione dell'acqua in pressione in mm. Per la prova di determinazione della profondità della penetrazione dell'acqua in pressione nel calcestruzzo indurito vale quanto indicato nella norma UNI EN 12390-8:2002. Al fine di ottenere la prestazione richiesta in funzione delle condizioni ambientali, nonché per la definizione della relativa classe, si potrà fare utile riferimento alle indicazioni contenute nelle Linee Guida sul calcestruzzo strutturale edite dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ovvero alle norme UNI EN 206-1:2006 e UNI 11104:2004.

In merito alle prescrizioni relative al calcestruzzo confezionato con processo industrializzato, il D.M. 14.01.2008 fornisce precise indicazioni al paragrafo 11.2.8. Secondo tale norma, gli impianti devono dotarsi di un sistema permanente di controllo

interno della produzione allo scopo di assicurare che il prodotto risponda ai requisiti previsti dalle suddette norme e che tale rispondenza sia costantemente mantenuta fino all'impiego. I documenti che accompagnano ogni fornitura di calcestruzzo confezionato con processo industrializzato devono indicare gli estremi di tale certificazione. Inoltre, il Direttore dei Lavori, che è tenuto a verificare quanto sopra indicato e a rifiutare le eventuali forniture provenienti da impianti non conformi, dovrà comunque effettuare le prove di accettazione previste al paragrafo 11.2.5 e ricevere, prima dell'inizio della fornitura, copia della certificazione del controllo del processo produttivo. In particolare, per produzioni di calcestruzzo inferiori ai 1500 m³ di miscela omogenea, effettuate direttamente in cantiere, mediante processi di produzione temporanei e non industrializzati, la stessa deve essere confezionata sotto la diretta responsabilità del costruttore. Il Direttore dei Lavori deve avere, prima dell'inizio delle forniture, evidenza documentata dei criteri e delle prove che hanno portato alla determinazione della resistenza caratteristica di ciascuna miscela omogenea di conglomerato, così come indicato al punto 11.2.3 della norma.

1.1.2.11. Specifiche per calcestruzzo a prestazione garantita

Coerentemente con quanto indicato nella UNI EN 206-1:2006, il calcestruzzo a prestazione garantita deve essere specificato per mezzo dei seguenti requisiti di base:

- una richiesta di conformità alla EN 206-1
- la classe di resistenza a compressione
- le classi di esposizione ambientale
- la dimensione massima nominale dell'aggregato
- la classe di contenuto in cloruri in accordo con il prospetto 10 (UNI EN 206-1).

In aggiunta, per il calcestruzzo leggero:

- la classe di massa volumica, o il valore di riferimento per la massa volumica.

In aggiunta, per il calcestruzzo pesante:

- il valore di riferimento per la massa volumica.

In aggiunta, per il calcestruzzo preconfezionato e per il calcestruzzo miscelato in cantiere:

- la classe di consistenza oppure, in casi speciali, un valore di riferimento per la consistenza.

Inoltre, sempre in virtù dell'UNI EN 206-1:2006, qualora le condizioni di getto richiedano maggiori dettagli e puntualizzazioni conviene evidenziare i seguenti requisiti aggiuntivi (a seconda dei casi):

- tipi o classi speciali di cemento (per esempio cemento a basso calore di idratazione)
- tipi o classi speciali di aggregato

- caratteristiche richieste per la resistenza al gelo-disgelo, per esempio il contenuto d'aria (vedere 5.4.3 della UNI EN 206-1)
- requisiti per la temperatura del calcestruzzo fresco, se diversi da quelli riportati in 5.2.8 della UNI EN 206-1
- sviluppo della resistenza (vedere prospetto 12, UNI EN 206-1)
- sviluppo di calore durante l'idratazione
- presa ritardata
- resistenza alla penetrazione d'acqua
- resistenza all'abrasione
- resistenza alla trazione indiretta (vedere 5.5.1.3, UNI EN 206-1)
- altri requisiti tecnici (per esempio requisiti relativi all'ottenimento di una particolare finitura oppure ad un metodo speciale di posa in opera).

ESEMPIO 3. CALCESTRUZZO PER FONDAZIONI (TERRENI NON AGGRESSIVI)

È prevista una costruzione civile ordinaria a telaio in calcestruzzo armato (Classe d'uso II – D.M. 14.01.2008 par. 2.4.2, vita nominale $V_N \geq 50$ anni, secondo tabella 2.4.I, e volume complessivo di calcestruzzo minore di 1500 m³). Dal punto di vista delle sole verifiche di resistenza strutturale è sufficiente un calcestruzzo di classe C25/30. Analisi chimiche effettuate sui terreni di fondazione hanno escluso la presenza di solfati (totali, come SO₄⁻²). Si prevedono, in particolare, strutture di fondazione superficiali continue a T rovescia con nervatura larga 60 cm, altezza totale 90 cm e larghezza impronta di 120 cm circa su magrone di pulizia.

Individuare le corrette prescrizioni di capitolato per: 1) gli ingredienti di confezionamento del getto, 2) il calcestruzzo e 3) la struttura.

Soluzione

Per tale tipo di strutture, si prescrive:

- 1) **ingredienti:** acqua di impasto conforme alla UNI EN 1008:2003. Additivo (CE) superfluidificante conforme ai prospetti 3.1 e 3.2 o superfluidificante ritardante conforme ai prospetti 11.1 e 11.2 (norma UNI EN 934-2:2012). Aggregati provvisti di marcatura CE conformi alle UNI EN 12620:2008 e UNI EN 8520-2:2005. Cemento CE II/A-L 42.5R conforme alla norma UNI EN 197-1:2011. Aggiunte minerali come ceneri volanti e fumi di silice conformi, rispettivamente, alla UNI EN 450 e UNI EN 13263 (entrambe le norme: Parti 1 e 2);
- 2) **calcestruzzo:** calcestruzzo a prestazione garantita (secondo UNI EN 206-1:2006). Classe di esposizione ambientale XC2. Rapporto (massimo) acqua/cemento $A/C = 0,60$. Classe di resistenza a compressione minima C25/30. Dosaggio minimo di cemento: 300 kg/m³. Controllo di accettazione: tipo A (par. 11.2.5 – D.M. 14.01.2008). Aria intrappolata: $1,5 \pm 0,5\%$. Diametro massimo dell'aggregato: 32 mm (per interferri minori di 35 mm utilizzare inerti di pezzatura 20 mm). Lavorabilità al getto: S4÷S5 (slump). Volume di acqua di bleeding < 0,1% sull'acqua d'impasto (secondo UNI 7122:2008). Classe contenuto in cloruri: Cl 0.4 (Prospetto 10, UNI EN 206-1:2006);
- 3) **struttura:** copriferro (nominale) minimo 30 mm per armatura più esterna. Controllo esecuzione dell'opera: definito, in fase di progetto, il valore medio R_{mP} della resistenza cubica del calcestruzzo (delle fondazioni) e misurata, con tecniche distruttive e non, la corrispondente resistenza del calcestruzzo in opera R_{mS} (resistenza strutturale: paragrafo 11.2.6 – D.M. 14.01.2008), si ritiene esito accettabile se risulta (in MPa):

$$R_{mS} \geq 0,85R_{mP} = 0,85 \times (0,83f_{cm}) = 0,85 \times 0,83 \times (f_{ck} + 8)$$

Durata minima della maturazione umida: 7 giorni, con ricoprimento delle superfici non casserate mediante geotessile bagnato (o con altro metodo di protezione equivalente) ogni 24 ore. Acciaio per armature di tipo B450C conforme a quanto riportato al paragrafo 11.3.2 del D.M. 14.01.2008.

ESEMPIO 4. PRESCRIZIONI MATERIALI: DATI ESEMPIO PRECEDENTE

Costruire la tabella delle prescrizioni dei materiali da apporre sulle tavole esecutive di carpenteria delle fondazioni. Si ammetta, che il valore del copriferro nominale (delle strutture di fondazione) sia stato precedentemente calcolato (pari ad un minimo di 30 mm per le staffe e per le armature di ripartizione più esterne orizzontali) utilizzando quanto indicato nel paragrafo 4.4.1 dell'UNI EN 1992-1-1:2005.

*Soluzione***Tabella 1.11. Prescrizioni dei materiali**

Classe di esposizione ambientale	Classe di resistenza CX/Y	A/C (max)	Contenuto (min) in cemento (kg/m ³)	D _{max} (mm)	Slump	c _{nom} (mm)
XC2	C25/30	0,60	300	32 ^(a)	S4/S5	30 ^(b)

^(a) Per interferri inferiori a 35 mm utilizzare inerti di pezzatura 20 mm.

^(b) Copriferro portato a 75 mm per calcestruzzi gettati direttamente contro il terreno senza lisciatura delle pareti verticali di scavo (es. muri contro terra e di sostegno).

ESEMPIO 5. STESSA STRUTTURA ESEMPIO PRECEDENTE IN TERRENI AGGRESSIVI

Per le sole strutture di fondazione della struttura a telaio degli esempi precedenti determinare le relative prescrizioni nel caso le analisi chimiche abbiano rilevato terreni mediamente aggressivi con un tenore totale di solfati compreso tra 3000 e 12000 mg/kg. Riportate solo le prescrizioni che differenziano un terreno aggressivo da uno non. Si mantenga l'ipotesi che il valore del copriferro nominale (delle strutture di fondazione) sia stato precedentemente calcolato (pari a un minimo di 30 mm per le staffe) utilizzando quanto indicato nel paragrafo 4.4.1 dell'UNI EN 1992-1-1:2005.

Soluzione

In presenza di solfati con concentrazione non trascurabile (tabella 1.12), in accordo alle UNI EN 197-1 e UNI 9156, si prescrive cemento ARS (cemento ad alta resistenza contro i solfati).

Tabella 1.12. Presenza di solfati

Concentrazione totale di solfati (SO ₄ ⁻²) (mg/kg)	Tipo di cemento (secondo UNI 9156)
2000÷3000	MRS (moderata resistenza ai solfati)
3000÷12000	ARS (alta resistenza ai solfati)
12000÷24000	AARS (altissima resistenza ai solfati)

In generale, per strutture in classe di partenza XC2, tenendo anche conto del Prospetto 2 ("Valori limite per le classi di esposizione all'attacco chimico nel suolo naturale e nell'acqua del terreno") della UNI EN 206-1:2006, è possibile redigere la tabella 1.13.

Tabella 1.13. Classe di esposizione

Classe di esposizione	Concentrazione (totale) solfati come SO ₄ ⁻² (mg/kg)	Massimo rapporto acqua/cemento (A/C) _{max}	Minima classe di resistenza (CX/Y) _{min}	Dosaggio (min) di cemento (kg/m ³)
XC2 + XA1	2000÷3000	0,55	C28/35	320
XC2 + XA2	3000÷12000	0,50	C32/40	340
XC2 + XA3	12000÷24000	0,45	C35/45	360

Ci si trova, effettivamente, in classe di esposizione XC2 + XA2 con rapporto $(A/C)_{max} = 0,50$, minima classe di resistenza del calcestruzzo C32/40 (indipendentemente dalla resistenza minima sufficiente per le verifiche di resistenza: C25/30) e dosaggio minimo di cemento di 340 kg/m³.

Le rimanenti prescrizioni rimangono invariate.

La tabella 1.14 riporta le prescrizioni dei materiali (prendendo come riferimento il prospetto 4 della UNI 11104:2004).

Tabella 1.14. Prescrizione dei materiali

Classe di esposizione ambientale	Classe di resistenza CX/Y	A/C (max)	Contenuto (min) in cemento (kg/m³)	D_{max} (mm)	Slump	c_{nom} (mm)
XC2 + XA2	C32/40	0,50	340	32 ^(a)	S4/S5	30 ^(b)

^(a) Per interferri inferiori a 35 mm utilizzare inerti di pezzatura 20 mm.

^(b) Copriferro portato a 75 mm per calcestruzzi gettati direttamente contro il terreno senza lisciatura delle pareti verticali di scavo (es. muri contro terra e di sostegno).

ESEMPIO 6. DEFINIZIONE DELLE PRESCRIZIONI DEI MATERIALI PER STRUTTURA IN C.A. ORDINARIO

Sia dato un fabbricato residenziale a telaio in cemento armato ordinario (edificio pubblico o adibito ad attività commerciale o terziaria). Definire le prescrizioni dei materiali per pilastri, travi, solai, rampe e nuclei ascensore. Si ammetta Classe d'uso II – D.M. 14.01.2008 par. 2.4.2, vita nominale $V_N \geq 50$ anni, secondo tabella 2.4.I, e volume complessivo di calcestruzzo minore di 1500 m³.

Individuare le corrette prescrizioni di capitolato per: 1) gli ingredienti di confezionamento del getto, 2) il calcestruzzo e 3) la struttura.

Valutare solamente il copriferro minimo dovuto alle condizioni ambientali ($c_{min,dur}$).

Soluzione

Per tale tipo di strutture, si prescrive:

- 1) ingredienti:** acqua di impasto conforme alla UNI EN 1008:2003. Additivo (CE) superfluidificante conforme ai prospetti 3.1 e 3.2 o superfluidificante ritardante conforme ai prospetti 11.1 e 11.2 (norma UNI EN 934-2:2012). Aggregati provvisti di marcatura CE conformi alle UNI EN 12620:2008 e UNI EN 8520-2:2005. Cemento CE II/A-L 42.5R conforme alla norma UNI EN 197-1:2011. Aggiunte minerali come ceneri volanti e fumi di silice conformi, rispettivamente, alla UNI EN 450 e UNI EN 13263 (entrambe le norme: Parti 1 e 2);
- 2) calcestruzzo:** calcestruzzo a prestazione garantita (secondo UNI EN 206-1:2006). Classe di esposizione ambientale XC1. Rapporto (massimo) acqua/cemento $A/C = 0,60$. Classe di resistenza a compressione minima C25/30. Dosaggio minimo di cemento: 300 kg/m³. Controllo di accettazione: tipo A (par. 11.2.5 – D.M. 14.01.2008). Aria intrappolata: $1,5 \pm 0,5\%$. Diametro massimo dell'aggregato: 32 mm (per interferri minori di 35 mm utilizzare inerti di pezzatura 20 mm). Lavorabilità al getto: S4+S5 (slump). Volume di acqua di bleeding < 0,1% sull'acqua d'impasto (secondo UNI 7122:2008). Classe contenuto in cloruri: Cl 0.4 (Prospetto 10, UNI EN 206-1:2006);
- 3) struttura:** secondo quanto indicato nella UNI EN UNI EN 1990:2006 – *Eurocodice. Criteri generali di progettazione strutturale* esistono 4 categorie (base) di classi strutturali (tabella 1.15).

Tabella 1.15. Classi strutturali

Classe strutturale	Vita utile di progetto (anni)	Esempio esplicativo
S1	10	Strutture temporanee ^(a)
S2	da 10 a 25	Parti strutturali sostituibili (apparecchi di appoggio, carroponti, torri, cavalletti, etc.)
S3	da 15 a 30	Strutture ad uso agricolo e simili
S4	50	Fabbricati e altre strutture comuni
S5	100	Strutture imponenti, ponti, etc.

^(a) Strutture o parti di strutture che possono essere smantellate in previsione di un loro riutilizzo non dovrebbero essere considerate come temporanee.

Nota: tali classi strutturali si estendono a 6 quando per la classe strutturale (base) S4 necessiti considerare una vita utile di progetto di 100 anni anziché 50. In tal caso, coerentemente con gli Eurocodici, occorre aumentare la classe strutturale di 2: S6 (ovvero S4 + 2).

Pertanto, la struttura in oggetto ricade in classe strutturale S4. Secondo il prospetto 4.4N della UNI EN 1992-1-1:2005 (“Valori del copriferro minimo, $c_{min,dur}$, requisiti con riferimento alla durabilità per acciai da armatura ordinaria, in accordo alla EN 10080”), il copriferro minimo dovuto (solo) alle condizioni ambientali $c_{min,dur}$ è quello riportato in tabella 1.16.

Tabella 1.16. Valori copriferro minimo

Requisito ambientale per $c_{min,dur}$ (mm)							
Classe strutturale	Classe esposizione secondo il prospetto 4.1 (UNI EN 1992-1-1)						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Per classe strutturale S4 e classe di esposizione S4 risulta quindi: $c_{min,dur} = 15$ mm. Il valore del copriferro nominale, relativo a ciascuna tipologia di elemento strutturale (travi, pilastri, solai, solette e setti) verrà trattato più avanti in un’apposita sezione, per maggiore ordine e chiarezza.

Controllo esecuzione dell’opera: definito, in fase di progetto, il valore medio R_{mP} della resistenza cubica del calcestruzzo (delle fondazioni) e misurata, con tecniche distruttive e non, la corrispondente resistenza del calcestruzzo in opera R_{mS} (resistenza strutturale: par. 11.2.6 – D.M. 14.01.2008), si ritiene esito accettabile se risulta (in MPa):

$$R_{mS} \geq 0,85R_{mP} = 0,85 \times (0,83f_{cm}) = 0,85 \times 0,83 \times (f_{ck} + 8)$$

Durata minima della maturazione umida: 7 giorni, con ricoprimento delle superfici non casserate mediante geotessile bagnato (o con altro metodo di protezione equivalente) ogni 24 ore. Acciaio per armature di tipo B450C conforme a quanto riportato al paragrafo 11.3.2 del D.M. 14.01.2008.

ESEMPIO 7. PRESCRIZIONI MATERIALI PER PAVIMENTAZIONE STRADALE IN AREE A CLIMA RIGIDO

Si prenda in considerazione una pavimentazione stradale, ubicata in zona a clima rigido, che durante il periodo invernale sia sottoposta a trattamento con sali disgelanti a base di cloruri. Si ipotizzi, in particolare, zone di montagna con superfici direttamente esposte agli schizzi d'acqua (per il transito degli autoveicoli) durante il periodo invernale. Si considerino, per le parti strutturali orizzontali interessate, delle solette monolitiche di 28 cm di spessore (strutturale) armate inferiormente e superiormente (mediamente) con barre $\varnothing 14$, maglia 15×15 . Si ipotizzi una vita nominale di 50 anni. Si utilizzi un cemento pozzolanico in modo da ostacolare la penetrazione dei cloruri e rallentare il processo di corrosione.

Soluzione

In base al prospetto 4 della UNI EN 11104:2004, si nota che sono interessate contemporaneamente 3 classi di esposizione ambientale:

- XC4 (corrosione per carbonatazione, ciclicamente asciutto e bagnato): calcestruzzo armato ordinario (o precompresso) in esterni con superfici soggette ad alternanze di asciutto e umido;
- XD3 (corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare, ciclicamente asciutto e bagnato): calcestruzzo armato ordinario (o precompresso) di elementi strutturali direttamente soggetti agli agenti disgelanti o agli spruzzi contenenti agenti disgelanti;
- XF4 (elevata saturazione di acqua con presenza di agente antigelo oppure acqua di mare): superfici orizzontali quali strade o pavimentazioni esposte al gelo e ai sali disgelanti in modo diretto o indiretto.

I dati di partenza sono riportati in tabella 1.17 (se si assume classe di struttura S4 e si adotta uno slump S4/S5).

Tabella 1.17. Prescrizione dei materiali

Classe di esposizione ambientale	Classe di resistenza CX/Y	A/C (max)	Contenuto (min) in cemento (kg/m ³)	D _{max} (mm)	Slump	c _{nom} (mm)
XC4	C32/40	0,50	340	32	S4/S5	30
XD3	C35/45	0,45	360	32	S4/S5	45
XF4 ^(a)	C28/35	0,45	360	32	S4/S5	— ^(b)

^(a) Aggregati conformi alla UNI EN 12620 di adeguata resistenza gelo/disgelo.

^(b) Copriferro minimo dovuto alle condizioni ambientali non considerato nel prospetto 4.4N della UNI EN 1992-1-1:2005.

Nota: coerentemente con UNI EN 1992-1-1:2005 per il calcolo del copriferro nominale si applica qui una tolleranza $\Delta c_{dev} = 5$ mm (controllo dei copriferri in cantiere). Pertanto (Prospetto 4.2 UNI EN 1992-1-1:2005) essendo per barre isolate di armatura $c_{min,b} =$ diametro barra ($\varnothing 14 = 14$ mm in questo caso), si calcola subito:

$$c_{nom} = \max[c_{min,b}; c_{min,dev}] + \Delta c_{dev} = c_{min,dur} + \Delta c_{dev} = (45 + 5) \text{ mm} = 50 \text{ mm}.$$

Maggiori dettagli sul calcolo di c_{nom} sono riportati più avanti per ordine e chiarezza.

Il diametro massimo dell'aggregato (si veda relativo punto alle pagine precedenti) è stato valutato tenendo conto che la soletta monolitica di spessore 280 mm (sezione

resistente minima della sezione) è armata con barre a maglia incrociata 15 cm × 15 cm e con interferro (minimo su piani orizzontali pari a 150 mm). Pertanto è:

$$D_{\max} < (280 \text{ mm})/4 = 70 \text{ mm}$$

$$D_{\max} < \text{interferro} - 5 \text{ mm} = (150 \text{ mm}) - 5 \text{ mm} = 100 \text{ mm}$$

$$D_{\max} < 1,3 \times c_{\text{nom}} = 1,3 \times (50 \text{ mm}) = 65 \text{ mm}$$

Si impiegano inerti con diametri $D_{\max} = 32 \text{ mm}$.

La tabella di riferimento che soddisfa contemporaneamente i requisiti di durabilità ambientale per le tre classi ambientali sarà quella corrispondente alla classe XF4 (in linea generale, si predilige la classe con rapporto A/C minore, e tra classi con medesimo A/C si valuta se opportuna quella con CX/Y minore) (tabella 1.18).

Tabella 1.18. Requisiti di durabilità ambientale

Classe di esposizione ambientale	Classe di resistenza CX/Y	A/C (max)	Contenuto (min) in cemento (kg/m ³)	D_{\max} (mm)	Slump	c_{nom} (mm)
XC4 + XD3 + XF4 ^(a)	C28/35	0,45	360	32	S4/S5	50 ^(b)

^(a) Aggregati conformi alla UNI EN 12620 di adeguata resistenza gelo/disgelo.

^(b) Avendo scelto, invece, per $c_{\text{min,dur}}$ il valore maggiore delle tre classi considerate.

Con aggregato di diametro massimo 32 mm l'aria inglobata deve essere $5,0 \pm 0,5\%$. Volume dell'acqua di bleeding (UNI 7122): $< 0,1\%$ sull'acqua di impasto.

La struttura da realizzare è soggetta alla presenza di cloruri apportati dai sali disgelanti; pertanto, è necessario limitare la presenza di cloruri all'interno della miscela a Cl 0.2. Si utilizza, ad esempio, un cemento pozzolanico di tipo CEM IV/A 42.5R conforme alla norma UNI EN 197-1 e provvisto di marcatura CE.

Acqua d'impasto conforme alla UNI EN 1008. Additivo superfluidificante di tipo acrilico provvisto di marcatura CE conforme ai prospetti 11.1 e 11.2 della norma UNI EN 934-2; additivo aerante provvisto di marcatura CE conforme al prospetto 5 della norma UNI EN 934-2.

Aggregati provvisti di marcatura CE conformi alle norme UNI EN 12620 e 8520-2 e caratterizzati da assorbimento d'acqua inferiore all'1% oppure di classe F_1 o MS_{18} (clima atlantico/continentale).

Si impone una maturazione umida da effettuarsi per almeno 5 giorni con fogli impermeabili o di materiale geotessile bagnato. Durata minima della maturazione umida con teli impermeabili o con geotessili bagnati: 5 giorni.

ESEMPIO 8. PRESCRIZIONI DURABILITÀ E PRESCRIZIONI STRUTTURA

I muri di sostegno (paramento verticale: $0,35 \times 3,80 \text{ m}^3/\text{m}$, soletta fondazione: $0,50 \times 2,20 \text{ m}^3/\text{m}$) ai bordi di un'autostrada in zona di montagna devono essere completamente ricostruiti (350 metri lineari). In base ad uno spedito precalcolo, si prevedono muri di spessore 30 cm con armature longitudinali portanti $1 + 1\varnothing 18/20$ (media dallo spiccato alla testa) e armature di ripartizione orizzontali esterne $\varnothing 10/20$, fissato un copriferro minimo di 30 mm (dalle armature più esterne). Successivamente, in testa agli elementi in c.a., è previsto l'ancoraggio di una protezione in acciaio. La costruzione è prevista nel periodo invernale con temperatura media esterna di $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Volendo velocizzare le pratiche di cantiere si chiede che dopo 7 giorni dal getto il calcestruzzo raggiunga una resistenza a compressione di almeno C12/15. I produttori di calcestruzzo della zona hanno a disposizione un cemento CEM IV/A 42.5R, un additivo superfluidificante a base di naftalensolfonato (SN) da dosare allo 0,8% rispetto alla massa del cemento, aggregati tondeggianti con pezzatura massima di 20 o 32 mm e gli impianti distano tutti dal cantiere all'incirca 30 minuti di macchina. Stabilire i requisiti fondamentali di durabilità e di predimensionamento strutturale e i requisiti aggiuntivi per esigenze costruttive in cantiere. Infine, stabilire il tipo di controllo di accettazione secondo 11.2.5 – D.M. 14.01.2008.

Soluzione

I muri di sostegno sono esterni e quindi sottoposti a cicli di asciutto/bagnato. Essendo in zona montana, risentono della temperatura rigida invernale (XC4 + XF4). Inoltre, per assicurare una viabilità sicura anche in inverno, il manto stradale (come anche parte delle superfici dei muri) sarà sottoposto a trattamento con sali disgelanti (XD3), in condizioni cicliche di asciutto e bagnato. In virtù delle considerazioni fatte nell'esempio precedente, si avranno i valori riportati in tabella 1.19.

Tabella 1.19. Requisiti di durabilità

Classe di esposizione ambientale	Classe di resistenza CX/Y	A/C (max)	Contenuto (min) in cemento (kg/m^3)	D_{max} (mm)	Slump	c_{nom} (mm)
XC4 + XD3 + XF4 ^(a)	C28/35	0,45	360	32	S4/S5	55 ^(b)

^(a) Aggregati conformi alla UNI EN 12620 di adeguata resistenza gelo/disgelo.

^(b) Avendo scelto, invece, per $c_{\text{min,dur}}$ il valore maggiore delle tre classi considerate.

Requisiti durabilità

In questo caso, coerentemente con UNI EN 1992-1-1:2005 per il calcolo del copriferro nominale si applica qui una tolleranza in eccesso $\Delta c_{\text{dev}} = 10 \text{ mm}$ (controllo dei copriferri in cantiere). Pertanto (prospetto 4.2, UNI EN 1992-1-1:2005) essendo per barre isolate di armatura $c_{\text{min,b}} =$ diametro barra ($\varnothing 18 = 18 \text{ mm}$ in questo caso, valore medio), si calcola subito:

$$c_{\text{nom}} = \max[c_{\text{min,b}}; c_{\text{min,dur}}] + \Delta c_{\text{dev}} = c_{\text{min,dur}} + \Delta c_{\text{dev}} = (45 + 10) \text{ mm} = 55 \text{ mm}$$

Per la verifica della dimensione massima dell'aggregato:

$$D_{\max} < (300 \text{ mm})/4 = 75 \text{ mm}$$

$$D_{\max} < \text{interfero} - 5 \text{ mm} = (200 \text{ mm}) - 5 \text{ mm} = 195 \text{ mm}$$

$$D_{\max} < 1,3 \times c_{\text{nom}} = 1,3 \times (55 \text{ mm}) = 71,5 \text{ mm}$$

Si possono impiegare tutte e due le gamme di inerti disponibili in cantiere: $D_{\max} = 20 \text{ mm}$ o 32 mm .

Ad esempio, utilizzando l'aggregato con diametro massimo $D_{\max} = 32 \text{ mm}$ l'aria inglobata deve essere pari a: $5,0 \pm 0,5 \text{ (\%)}$

Volume acqua di bleeding (UNI 7122) $< 0,1 \text{ \%}$ sull'acqua d'impasto.

Calcestruzzo a prestazione garantita (secondo UNI EN 206-1).

La lavorabilità richiesta si pone pari a S4 ($L_g = 160 \div 210 \text{ mm}$).

Acqua di impasto: conforme alla UNI EN 1008.

Aggregati provvisti di marcatura CE conformi alle norme UNI EN 12620 e 8520-2.

Additivo superfluidificante a base di naftalensolfonato provvisto di marcatura CE conforme ai prospetti 3.1 e 3.2 della norma UNI EN 934-2.

Additivo aerante provvisto di marcatura CE conforme al prospetto 5 della norma UNI EN 934-2.

Aggregati provvisti di marcatura CE conformi alle norme UNI EN 12620 e 8520-2.

Assorbimento d'acqua inferiore all'1% oppure di classe F_1 o MS_{18} (clima atlantico/continentale).

Si imporrà una maturazione umida da effettuarsi con geotessili bagnati per almeno 5 giorni.

Requisito predimensionamento strutturale

In fase di predimensionamento strutturale, si è imposta una classe di resistenza minima C25/30 ($R_{ck,st} = 30 \text{ MPa}$). Per poter fare dei paragoni con gli altri due requisiti (durabilità e aggiuntivi), si passa alla resistenza media ($R_{cm,28,st}$), ipotizzato uno scarto quadratico medio del produttore di circa $\sigma(X) = 5,0 \text{ MPa}$:

$$R_{cm,28,st} = R_{ck,st} + 1,48 \times \sigma(X) = (30 + 1,48 \times 5,0) \text{ MPa} = 37,4 \text{ MPa}.$$

La struttura è sottoposta a cicli di gelo/disgelo. È necessario l'utilizzo di un additivo aerante nell'impasto, con conseguente riduzione del 20% circa della resistenza. Considerando la resistenza $R_{cm,28,st}$ del predimensionamento strutturale già penalizzata di questo 20%, si calcola subito il valore effettivo di resistenza a 28 giorni senza additivo aerante:

$$R_{cm,28,st,eff} = R_{cm,28,st}/(1 - 0,20) = (37,4 \text{ MPa})/0,80 = 47 \text{ MPa} \text{ (cifra tonda)}$$

Con l'ausilio dei grafici di correlazione di A/C in funzione della resistenza media (a compressione) e in particolare, in funzione del tipo/classe di cemento assegnato (ipotizzato in questo caso in cantiere un cemento CEM IV/A 42.5R), nella relativa curva a 28 giorni, si legge il rapporto (A/C) minimo corrispondente e, dunque, imposto ai fini del soddisfacimento dei requisiti strutturali:

$$(A/C)_{st} = 0,49$$

Requisiti aggiuntivi: esigenze esecutive

La resistenza caratteristica richiesta a 7 giorni alla temperatura di 15 °C è pari a C12/15. La resistenza media è:

$$R_{cm,7,st,15^{\circ}C} = R_{ck,st,15^{\circ}C} + 1,48 \times \sigma(X) = (15 + 1,48 \times 5,0) \text{ MPa} = 22,4 \text{ MPa}$$

Valore effettivo senza additivo aerante:

$$R_{cm,7,st,15^{\circ}C,eff} = R_{cm,7,st,15^{\circ}C} / (1 - 0,20) = (22,4 \text{ MPa}) / 0,80 = 28 \text{ MPa}$$

Considerando il calcestruzzo equivalente maturato a 20 °C, si ha (per un range di temperatura 13÷17 °C corrisponde circa $f_t/100 = 0,90$ a 7 giorni):

$$R_{cm,7,st,20^{\circ}C,eff} = R_{cm,7,st,15^{\circ}C,eff} / (f_t/100) = R_{cm,7,st,15^{\circ}C,eff} / 0,90 = (28 \text{ MPa}) / 0,90 = 31 \text{ MPa}$$

(cifra tonda)

Sempre tramite l'ausilio dei grafici di correlazione di A/C in funzione della resistenza media e del tipo/classe di cemento impiegato (CEM IV/A 42.5R), nella curva relativa a 7 giorni, si legge:

$$(A/C)_{AGG} = 0,55$$

Scelta del rapporto acqua/cemento idoneo a tutti e tre i requisiti (valore minore)

$$A/C = \min[0,45; 0,49; 0,55] = 0,45$$

Il valore più stringente per il rapporto (A/C) è dato dal soddisfacimento dei requisiti di durabilità.

Calcolo delle resistenze caratteristiche effettive

Adottando il valore (A/C) = 0,45, si procede a ritroso leggendo dalle curve di correlazione il valore della resistenza media a compressione per il fissato valore A/C . Si trova, senza additivo aerante (curva a 28 giorni):

$$R_{cm,28,st,eff} = 53 \text{ MPa}$$

Resistenza penalizzata per additivo aerante:

$$R_{cm,28,st} = 0,8 \times R_{cm,28,st,eff} = 0,8 \times (53 \text{ MPa}) = 42,4 \text{ MPa}$$

Da cui si deduce la resistenza media:

$$R_{ck,st} = R_{cm,28,st} - 1,48 \times \sigma(X) = 42,4 \text{ MPa} - 1,48 \times (5,0 \text{ MPa}) = 35 \text{ MPa}$$

a cui corrisponde una classe di resistenza C28/35 a 28 giorni (20 °C).

Analogamente, rieseguendo a ritroso analoghe calcolazioni, però sulla curva di correlazione a 7 giorni, in corrispondenza di $A/C = 0,45$ si legge (a 20 °C):

$$R_{cm,7,st,20^{\circ}C,eff} = 41 \text{ MPa}$$

Resistenza media a 15 °C senza additivo aerante (per un range di temperatura 13÷17 °C corrisponde circa $f_t/100 = 0,90$ a 7 giorni):

$$R_{cm,7,st,15^{\circ}C,eff} = 0,90 \times R_{cm,7,st,20^{\circ}C,eff} = 0,90 \times (41 \text{ MPa}) = 36,9 \text{ MPa}$$

Resistenza a 15°C con additivo aerante:

$$R_{cm,7,st,15^{\circ}C} = 0,80 \times R_{cm,7,st,15^{\circ}C,eff} = 0,80 \times (36,9 \text{ MPa}) = 29,5 \text{ MPa}$$

Resistenza caratteristica a 15 °C e a 7 giorni:

$$R_{ck,st,15^{\circ}C} = R_{cm,7,st,15^{\circ}C} - 1,48 \times \sigma(X) = 29,5 \text{ MPa} - 1,48 \times (5,0 \text{ MPa}) = 22 \text{ MPa}$$

(cifra tonda)

a cui corrisponde una classe di resistenza C16/20 a 7 giorni (15 °C).

Risulta quindi verificato il richiesto raggiungimento di una resistenza a compressione di almeno C12/15 dopo 7 giorni dal getto, con temperature esterne sui 15 °C.

Controllo di accettazione

Dal computo dei materiali (paramento verticale: $0,35 \times 3,80 \text{ m}^3/\text{m}$, soletta fondazione: $0,50 \times 2,20 \text{ m}^3/\text{m}$), si deduce un volume di getto complessivo:

$$V_{cls} = (350 \text{ m}) \times (0,35 \times 3,80 + 0,50 \times 2,20) \text{ m}^3/\text{m} = 350 \times 2,43 = 850,5 \text{ m}^3 < 1500 \text{ m}^3$$

Secondo il paragrafo 11.2.5 – D.M. 14.01.2008 il controllo è dunque di tipo A.

Per ogni giorno di getto è obbligatorio effettuare almeno un prelievo. Per ogni 300 m³ massimo di getto va eseguito un controllo di accettazione (che, nel tipo A, è rappresentato da 3 prelievi: ciascuno dei quali eseguito su un massimo di 100 m³ di getto di miscela omogenea).

In questo caso particolare, saranno necessari tre controlli di tipo A. Maggiori dettagli di seguito.

1.1.2.12. Controlli di accettazione (criteri)

Secondo quanto stabilito al paragrafo 11.2.2 del D.M. 14.01.2008, il calcestruzzo va prodotto in regime di controllo di qualità, per garantire il rispetto delle prescrizioni date in fase progettuale. Il controllo è costituito dalle seguenti fasi:

- valutazione preliminare della resistenza: necessaria per poter produrre la miscela di calcestruzzo che abbia la resistenza prevista in fase di progetto. Il costruttore, prima di procedere alla costruzione, è tenuto ad effettuare idonee prove preliminari, per ciascuna miscela omogenea di calcestruzzo, affinché vengano raggiunte le prestazioni richieste dal progettista. In questa fase, il costruttore è responsabile della qualità del calcestruzzo prodotta che dovrà a sua volta essere controllata dal Direttore dei Lavori, secondo le procedure di norma (controllo di accettazione);
- controllo di produzione: necessario per poter monitorare la qualità e l'esattezza della produzione del calcestruzzo stesso in modo che il processo di produzione sia corretto;
- controllo di accettazione: necessario per poter verificare effettivamente che il processo di produzione della miscela abbia atteso tutte le prescrizioni di progetto in termini di qualità, resistenza, etc.;
- prove complementari: eseguite, qualora si ritenga necessario, come completamento al controllo di accettazione.

Secondo quanto stabilito al punto 11.2.4 del D.M. 14.01.2008, un prelievo di campioni consiste nel prelevare dagli impasti il calcestruzzo necessario per confezionare una coppia di provini, ciò va eseguito necessariamente al momento della posa in opera e alla presenza del Direttore dei Lavori o persona di sua fiducia. Il valore medio delle resistenze a compressione dei due provini di un prelievo viene detta *resistenza di prelievo* che costituisce il valore mediante il quale vengono eseguiti i controlli del calcestruzzo. Il Direttore dei Lavori è obbligato a prescrivere ulteriori prelievi, rispetto al numero minimo dettato dalla norma (si veda punto 11.2.5 – D.M. 14.01.2008), quando esistono i presupposti per variazioni di qualità e/o di provenienza dei costituenti dell'impasto che possano far presumere una variazione di qualità del calcestruzzo stesso tale da non farlo considerare più omogeneo.

Come già accennato, secondo il D.M. 14.01.2008, il Direttore dei Lavori è obbligato ad eseguire sistematici controlli in corso d'opera per verificare la conformità delle caratteristiche del calcestruzzo in opera rispetto a quanto stabilito in sede di progetto e sperimentalmente verificato in sede di valutazione preliminare. Il controllo di accettazione va eseguito su miscele omogenee e dipende dal quantitativo di calcestruzzo in accettazione. Sono previste, in particolare, due tipologie di controllo di accettazione:

- controllo di tipo A
- controllo di tipo B.

Per entrambi i criteri di controllo di accettazione, vengono imposte comuni

prescrizioni sul prelievo, sulla modalità di prova di resistenza e sui contenuti (minimi obbligatori) nei certificati di prova:

- prelievo dei provini da eseguire necessariamente in presenza del Direttore dei Lavori o di un tecnico di sua fiducia (ad esempio, il Laboratorio stesso autorizzato per l'incarico delle prove) che provvede alla redazione di apposito verbale di prelievo e dispone l'identificazione dei provini mediante sigle, etichettature indelebili, etc. La certificazione effettuata dal Laboratorio prove materiali deve riportare riferimento a tale verbale;
- la domanda di prove di laboratorio deve essere sottoscritta dal Direttore dei Lavori;
- le prove non richieste dal Direttore dei Lavori non possono fare parte dell'insieme statistico che serve per la determinazione della resistenza caratteristica del materiale;
- le prove di compressione vanno eseguite conformemente alla UNI EN 12390-3:2003;
- i certificati di prova devono contenere precisi punti e indicazioni, specificati in dettaglio dalla norma.

Secondo la UNI EN 12390-2:2009 (*Prove sul calcestruzzo indurito – Parte 2: Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza*), è necessario lasciare i provini nella cassaforma per almeno 16 ore e non oltre i 3 giorni, proteggendoli da urti, vibrazioni e disidratazione e conservandoli alla temperatura di $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Nei climi caldi invece è necessaria una conservazione alla temperatura di $(25 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Una volta rimossi dalla cassaforma, è necessario conservare i provini fino al momento della prova in acqua alla temperatura di $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$, oppure in ambiente alla stessa temperatura ma con umidità relativa $\geq 95\%$. Il controllo di accettazione ha esito positivo e il quantitativo di calcestruzzo viene accettato se risultano verificati i vincoli riassunti nella tabella 1.20.

Tabella 1.20. Vincoli di accettazione in accordo con la tabella 11.2.1 – D.M. 14.01.2008

Controllo tipo A	Controllo tipo B
$R_1 \geq R_{ck} - 3,5$	
$R_m \geq R_{ck} + 3,5$ (N. prelievi: 3)	$R_m \geq R_{ck} + 1,4s$ $s/R_m \leq 0,3^{(*)}$ (N. prelievi ≥ 15)

dove

R_m = resistenza media dei prelievi (MPa)

R_1 = valore minore di resistenza dei prelievi (MPa)

s = scarto quadratico medio $\sigma(X)$.

(*) Se $s/R_m > 0,15$ occorrono controlli più accurati, mediante integrazione con prove complementari (punto 11.2.6 – D.M. 14.01.2008)

In termini di getto di miscela omogenea, si ha in sintesi:

- *controllo tipo A*: per volumi $V_{cls} \leq 300 \text{ m}^3$. Necessario almeno 1 prelievo giornaliero (per ogni giorno di getto). Su non più di 300 m^3 per volta va eseguito 1

controllo: 3 prelievi/300 m³ con il vincolo di eseguire 1 prelievo su un massimo di 100 m³. Per $V_{cls} < 100$ m³ c'è l'obbligo di almeno 3 prelievi ma è consentito derogare dall'obbligo di prelievo giornaliero per ogni giorno di getto;

- *controllo di tipo B*: controllo di tipo statistico per volumi $V_{cls} > 1500$ m³. La frequenza del controllo deve essere almeno 1 controllo ogni 1500 m³. Il numero minimo di prelievi sui 1500 m³ è 15. Per ogni giorno di getto va effettuato almeno 1 prelievo. Non sono accettabili calcestruzzi con coefficiente di variazione $s/R_m > 0,3$. Per calcestruzzi con coefficiente di variazione $s/R_m > 0,15$ occorrono controlli più accurati mediante prove distruttive o non distruttive da intendersi sostitutive a quelle dei controlli di accettazione (vedere punto seguente);
- *controllo in opera*: il valore medio della resistenza del calcestruzzo in opera (definita precedentemente come *resistenza strutturale*) è in genere inferiore al valore medio della resistenza dei prelievi in fase di getto maturati in condizioni di laboratorio (resistenza potenziale). È accettabile un valore medio della resistenza strutturale, misurata con tecniche opportune (distruttive e non) e debitamente trasformata in resistenza cilindrica o cubica, non inferiore all'85% del valore medio definito in fase di progetto. Per la modalità di determinazione della resistenza strutturale si farà riferimento alle norme UNI EN 12504-1:2002, UNI EN 12504-2:2001, UNI EN 12504-3:2005, UNI EN 12504-4:2005 nonché alle Linee Guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo pubblicate dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

ESEMPIO 9. FREQUENZA DI CONTROLLO DI TIPO A PER STRUTTURA CIVILE IN C.A. ORDINARIO

Sia dato un edificio a telaio in c.a. ordinario (circa 400 cubi), destinato a civile abitazione, ubicato nella fascia prealpina a un'altitudine di 850 m circa. La struttura portante è costituita da fondazioni superficiali continue, 3 ordini di pilastrate e travi (2 interpiani, di cui il primo a pilotis, e una copertura a falde) con solai tutti in laterocemento. Dalle indagini sui terreni è risultata una concentrazione media di solfati totali (come SO_4^{2-}) attorno ai 13000 mg/kg. Supponendo che la struttura venga gettata nell'arco di 7 mesi con una tempistica media di 1 mese per tipologia di struttura (fondazioni, pilastri, travi e solaio, etc.), abbozzare un possibile lotto di accettazione (quindi di tipo A). Si consideri un tipo di costruzione 2 ($V_N \geq 50$ anni) e una classe d'uso II.

Soluzione

Le condizioni ambientali di contorno ipotizzate per la struttura coinvolgono le classi di esposizione riportate in tabella 1.21.

Tabella 1.21. Classi di esposizione

Parti di struttura	Classi esposizione	Descrizione	$(CX/Y)_{\min}$	$(A/C)_{\max}$
Copertura	XC3	Elemento in elevazione all'esterno ma riparato dall'azione diretta della pioggia (dal manto in tegole)	C28/35	0,55
Elevazione (da pilotis)	XC1	Elementi strutturali in elevazione che operano in servizio all'interno dell'edificio	C25/30	0,60
Pilastri a pilotis	XC4 + XF1	Elementi strutturali verticali che operano in servizio all'esterno e quindi esposti alla pioggia e ai cicli gelo/disgelo	C32/40	0,50
Fondazioni	XC2 + XA3	Attacco intenso da solfati	C35/45	0,45

Sono quindi presenti 4 classi di cemento differente. In base all'ipotesi fissata per la tempistica, si può supporre orientativamente la cronologia dei periodi di getto riportata in tabella 1.22.

Tabella 1.22. Cronologia dei periodi di getto

	Tipologia strutturale	$(CX/Y)_{\min}$	V_i (m ³) (volumi getti)	Periodo getto (ipotizzato)
1	Fondazioni	C35/45	100	Gennaio
2	Pilastri pilotis	C32/40	50	Febbraio
3	Travi/solaio I piano (non considerate nel pilotis)	C25/30	70	Marzo
4	pilastri (II tesa)	C25/30	50	Aprile
5	Travi/solaio II piano	C25/30	70	Maggio
6	Pilastri (III tesa)	C25/30	50	Giugno
7	Solaio copertura	C28/35	60	Luglio

Il volume complessivo dei getti è $V_{cls} = 450 \text{ m}^3 < 1500 \text{ m}^3$. Per rispettare le prescrizioni date dal paragrafo 11.2 del D.M. 14.01.2008, secondo un controllo di tipo A, si possono programmare i prelievi riportati in tabella 1.23.

Tabella 1.23. Prelievi

	$(CX/Y)_{\min}$	Numero prelievi (giorno del getto)	V_i (m ³) (volumi getti)	Periodo getto (ipotizzato)
1	C35/45	3	100 (< 300)	Gennaio
2	C32/40	3	50 (< 300)	Febbraio
3	C25/30	1 al giorno/getto	70 (< 100)	Marzo
4	C25/30	1 al giorno/getto	50 (< 100)	Aprile
5	C25/30	1 al giorno/getto	70 (< 100)	Maggio
6	C25/30	1 al giorno/getto	50 (< 100)	Giugno
7	C28/35	3	60 (< 300)	Luglio

Si stabiliscono in totale: 3 prelievi C35/45 a gennaio, 3 prelievi C32/40 a febbraio, 4 prelievi C25/30 da marzo a giugno, 3 prelievi C28/35 a luglio.

ESEMPIO 10. CONTROLLO DI ACCETTAZIONE DI TIPO A

Ipotizzando che le prove di resistenza meccanica su tre prelievi 1, 2, 3 siano state effettuate secondo le norme UNI EN 121390-1 e UNI EN 12390-2 per il confezionamento e la stagionatura dei provini e secondo la UNI EN 12390-3 e 4 per la determinazione della resistenza meccanica, vengono in tabella 1.24 riassunte le relative resistenze sulle rispettive 3 coppie di campioni (cubetti) su travi in elevazione.

Tabella 1.24. Resistenze su campioni su travi in elevazione

Prelievo n.	Elemento trave	Carico rottura (N/mm ²)	$R_{cm,pot,i}$ (N/mm ²)	$R_{1,i}$ (N/mm ²)
1	T1el	34,3	$(34,3 + 34,6)/2 = 34,5$	$\min[34,3; 34,6] = 34,3$
	T1el	34,6		
2	T2el	36,1	$(36,1 + 36,3)/2 = 36,2$	$\min[36,1; 36,3] = 36,1$
	T2el	36,3		
3	T3el	34,5	$(34,5 + 34,7)/2 = 34,7$	$\min[34,5; 34,7] = 34,5$
	T3el	34,7		

Verificare se il controllo di accettazione (di tipo A) ha esito positivo, considerando che la resistenza (cubica) assunta in fase di progetto è $R_{ck} = R_{ck,prog} = 30 \text{ N/mm}^2$.

Soluzione

In funzione dei dati soprastanti, si calcola $R_{ck,pot} = R_{cm,pot} - 3,5$ (tabella 1.25).

Tabella 1.25. Valori di $R_{ck,pot}$

Prelievo n. i-esimo	Carico rottura (N/mm ²)	$R_{cm,pot,i}$ (N/mm ²)	$R_{1,i}$ (N/mm ²)	$R_{ck,pot,i}$ (N/mm ²)
1	34,3	$(34,3 + 34,6)/2 = 34,5$	$\min[34,3; 34,6] = 34,3$	$34,5 - 3,5 = 31,0$
	34,6			
2	36,1	$(36,1 + 36,3)/2 = 36,2$	$\min[36,1; 36,3] = 36,1$	$36,2 - 3,5 = 32,7$
	36,3			
3	34,5	$(34,5 + 34,7)/2 = 34,7$	$\min[34,5; 34,7] = 34,5$	$34,7 - 3,5 = 31,2$
	34,7			

Considerando i valori mediati tra quelli calcolati, si calcolano i valori riportati in tabella 1.26 con appunto:

$$R_{ck,pot} = (R_{cm,pot} - 3,5) = 35,1 - 3,5 = 31,6 \text{ N/mm}^2$$

Tabella 1.26. Valori calcolati

$R_{cm,pot,i}$ (N/mm ²)	$R_{l,i}$ (N/mm ²)	$R_{ck,pot,i}$ (N/mm ²)
34,5	34,3	31,0
36,2	36,1	32,7
34,7	34,5	31,2
<hr/>		
$R_{cm,pot}$ (N/mm ²)	R_l (N/mm ²)	$R_{ck,pot}$ (N/mm ²)
$(34,5 + 36,2 + 34,7)/3 = 35,1$	$\min[34,3; 36,1; 34,5] = 34,3$	$(31,0 + 32,7 + 31,2)/3 = 31,6$

Con gli ultimi valori calcolati, risultando per entrambi i vincoli:

$$R_l = 34,3 \text{ N/mm}^2 > (R_{ck,prog} - 3,5) = 30 - 3,5 = 26,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (verificato)}$$

$$R_{cm,pot} = 35,1 \text{ N/mm}^2 > (R_{ck,prog} + 3,5) = 30 + 3,5 = 33,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (verificato)}$$

Il controllo di accettazione ha esito positivo.

Notare che l'ultimo vincolo equivale a verificare che risulti direttamente

$$R_{ck,pot} > R_{ck,prog}$$

$$(R_{cm,pot} - 3,5) = R_{ck,pot} = 31,6 \text{ N/mm}^2 > R_{ck,prog} = 30 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Risultando } 100 \times (R_{ck,pot}/R_{ck,prog} - 1) = + 5,3\%$$

ESEMPIO 11. CONTROLLO DI ACCETTAZIONE TIPO A (NEGATIVO)

Per una struttura in c.a. in parte prefabbricata, vengono fatti tre prelievi sulle strutture in fondazione (XC2 + XA1), la cui resistenza caratteristica cubica a 28 gg è stata fissata in sede di progetto pari a $R_{ck} = R_{ck,prog} = 35$ MPa. Si chiede di valutare l'esito dell'accettazione (che è supposta di tipo A). In caso di esito negativo, si chiede di valutare il valore della resistenza caratteristica cubica consegnata ($R_{ck,fornito}$) al Laboratorio di analisi. Sapendo che i risultati delle prove di schiacciamento su un numero sufficiente di carote (diametro compreso fra 100 e 150 mm e rapporto lunghezza/diametro = 1) hanno fornito una resistenza caratteristica del conglomerato in opera pari a $R_{ck,opera} = 25$ MPa, stabilire se è possibile dichiarare l'opera collaudabile secondo la EN 13791:2008 (*Valutazione della resistenza a compressione in sito nelle strutture e nei componenti prefabbricati di calcestruzzo*). I risultati delle prove di laboratorio sono riassunti nella tabella 1.27.

Tabella 1.27. Risultati prove laboratorio

Prelievo n. i-esimo	Carico rottura (N/mm ²)	$R_{cm,pot,i}$ (N/mm ²)	$R_{1,i}$ (N/mm ²)	$R_{ck,pot,i}$ (N/mm ²)
1	38,2	38,2	38,1	34,7
	38,1			
2	38,4	38,3	38,1	34,8
	38,1			
3	38,2	38,1	38,0	34,6
	38,0			

Soluzione

Dai dati delle prove di laboratorio, risultano quindi i valori riportati in tabella 1.28.

Tabella 1.28. Valori calcolati

$R_{cm,pot,i}$ (N/mm ²)	$R_{1,i}$ (N/mm ²)	$R_{ck,pot,i}$ (N/mm ²)
38,2	38,1	34,7
38,3	38,1	34,8
38,1	38,0	34,6
$R_{cm,pot}$ (N/mm ²)	R_1 (N/mm ²)	$R_{ck,pot}$ (N/mm ²)
$(38,2 + 38,3 + 38,1)/3 = 38,2$	$\min[38,1; 38,1; 38,0] = 38,0$	$(34,7 + 34,8 + 34,6)/3 = 34,7$

Con gli ultimi valori calcolati, si ha:

$$R_1 = 38,0 \text{ N/mm}^2 > (R_{ck,prog} - 3,5) = 35 - 3,5 = 31,5 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{cm,pot} = 38,2 \text{ N/mm}^2 > (R_{ck,prog} + 3,5) = 35 + 3,5 = 38,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (non verificato)}$$

Il controllo di accettazione ha quindi esito negativo: $R_{ck,pot} < R_{ck,prog}$

Il valore della resistenza R_{ck} effettivamente consegnata al Laboratorio ($R_{ck,fornito}$) di prova si ricava dalla relazione:

$$R_{ck,fornito} = \min[(R_1 + 3,5); (R_{cm,pot} - 3,5)] = \min[41,5; 34,7] = 34,7 \text{ N/mm}^2$$

Risultando $R_{ck,fornito} < R_{ck,prog}$ si può affermare che il produttore ha fornito un materiale con caratteristiche non conformi a quanto prescritto nel progetto.

In accordo con la norma europea (EN 13791) una struttura è collaudabile se è verificata la disuguaglianza:

$$R_{ck,opera} \geq 0,85 \times R_{ck,prog}$$

Risultando $R_{ck,opera} = 25 \text{ MPa} \geq 0,85 \times (35 \text{ N/mm}^2) = 29,75 \text{ N/mm}^2$ (**non verificato**) la struttura non è collaudabile: sarà necessaria una nuova verifica strutturale degli elementi.

L'Impresa costruttrice risulta corresponsabile con il Fornitore risultando:

$$R_{ck,opera} = 25 \text{ MPa} \geq 0,85 \times R_{ck,fornito} = 0,85 \times (34,7 \text{ N/mm}^2) = 29,50 \text{ N/mm}^2 \text{ (**non verificato**)}$$

Entrambi i soggetti (Fornitore e Impresa) dovranno quindi assumersi gli oneri di calcolo ed eventuale rinforzo, demolizione e ricostruzione per poter dichiarare l'opera collaudabile.

Sarà necessario rieseguire tutte le calcolazioni di verifica strutturale su modello FEM utilizzando come nuova resistenza caratteristica (per le strutture interessate) il valore:

$$R_{ck,Ricalcolo} = R_{ck,opera} / 0,85 = (25 \text{ MPa}) / 0,85 = 29,4 \text{ MPa}$$

da cui (sempre ai fini del ricalcolo e per gli elementi interessati):

$$f_{ck,Ricalcolo} = 0,83 \times R_{ck,Ricalcolo} = 0,83 \times (29,4 \text{ MPa}) = 24,4 \text{ MPa}$$