

PRESIDENZA DEL CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI
SERVIZIO TECNICO CENTRALE

LINEE GUIDA SUL CALCESTRUZZO STRUTTURALE

Presentazione

Il problema della qualificazione e conseguente certificazione dei prodotti da costruzione è, com'è noto, regolato, a livello europeo, dalla Direttiva 89/106/CEE, recepita in ambito nazionale attraverso il D.P.R. n. 246/93.

Peraltro, la recente Legge Quadro sui lavori pubblici ha ulteriormente rafforzato l'esigenza della qualificazione dei soggetti, dei processi e dei prodotti relativi al settore.

Nell'ambito della certificazione dei prodotti da costruzione il Servizio Tecnico Centrale è stato individuato dal legislatore nazionale quale organismo di certificazione e di benessere tecnico ai fini dell'apposizione della marcatura CE sui prodotti da costruzione.

All'uopo è il caso di rammentare che già nel quadro delle leggi nazionali regolanti il settore delle costruzioni (leggi 1086/71, legge 64/74 e relativi decreti ministeriali), il Servizio, nell'ambito del Consiglio Superiore dei LL.PP., svolge funzioni di certificazione ed ispezione e, in conformità alla legge istitutiva, sono ad esso affidati studi tecnici di carattere generale e normativo, ricerche sperimentali sui materiali da costruzione.

Il Servizio Tecnico, quindi, quale punto di riferimento e di cerniera istituzionale tra attività di normazione tecnica, attività tecnico-progettuale, ed esigenze della produzione, per quanto attiene la salvaguardia dei requisiti essenziali concernenti la sicurezza strutturale e la tutela della pubblica incolumità, si è posto l'obiettivo di elaborare e pubblicare, accanto alle consuete Circolari esplicative ed interpretative delle norme tecniche, anche specifici documenti tecnici a carattere monografico, aventi un precipuo scopo informativo ed illustrativo in ordine alle basi tecnico-scientifiche dello specifico argomento trattato, ed ai relativi risvolti rispetto al pertinente contesto normativo, e quindi, in senso lato, anche una funzione di supporto nell'attività progettuale.

Le «Linee guida sul calcestruzzo strutturale» qui presentate, basate sull'esperienza nazionale ed europea (ENV 206, CEB-FIP Model Code 1990, Richtlinien für Hochfesten Beton 1995, DIN1045/88), sono rivolte a dare indicazioni ed informazioni di carattere generale e di dettaglio per una progettazione, lavorazione, realizzazione e controllo del materiale calcestruzzo, che troppo spesso appare come l'anello più debole di un processo, quello concernente il ciclo costruttivo delle opere civili, sul quale si sono scaricati nel recente passato, problematiche e tensioni di varia origine.

Nel documento vengono per la prima volta trattati i calcestruzzi «ad alte prestazioni» (A.P.), cioè quelli che possono raggiungere resistenze caratteristiche a compressione su provini cubici (R_{ck}) superiori a 55 N/mm^2 ed inferiori a 75 N/mm^2 , ed i calcestruzzi «ad alta resistenza» (A.R.), quelli con $R_{ck} > 75 \text{ N/mm}^2$. Questa apertura ai calcestruzzi non disciplinati dal D.M. 9 gennaio 1996 potrebbe avviare, anche nel nostro Paese, una fase di ricerca e di studio cui potranno utilmente concorrere il mondo scientifico e quello dell'industria. Le Linee Guida propongono, in analogia ad altre norme estere ed ai documenti prenormativi internazionali, la possibilità di estendere ai calcestruzzi A.P. le modalità di verifica strutturale attualmente impiegate per i calcestruzzi ordinari e rimettendo alla valutazione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici la possibilità di impiegare in determinate opere calcestruzzi ad A.R. sulla base di una idonea documentazione tecnica.

Il Direttore

Presentation

The problem of qualifying construction products with a view to their certification is governed, at the Europe-wide level, by Directive 89/106/EEC, which was transposed through Decree of the President of the Republic no. 246/93.

The recent Framework Law on Public Works has further strengthened the need for qualification of the concrete sector's operators, processes and products.

In the field of construction-products certification the Central Technical Service of the Higher Council of the Public Works has been indicated by Italian law as the body that certifies construction products and gives the technical go-ahead for the placement of a CE mark on them.

In this regard it is worthwhile noting that already within the framework of Italian laws governing the construction sector (laws 1086/71, 64/74, and the pertinent ministerial decrees), the Service, as a part of the Higher Council of the Public Works Ministry, performs the functions of certification and inspection Body. Furthermore, in compliance with the law setting it up, assigned to it are technical studies of a general and standards-codifying nature, and experimental research studies on construction materials.

The Technical Service then, as a reference point for and institutional hinge between the activities of technical standards codification, technical and design activities, and the needs of production, as they concern the safeguarding of the essential requisites concerning structural safety and the safeguarding of public health, has set as its objective to work up and publish, side by side with the usual explanatory and interpretative Circulars for technical standards, also specific technical documents dealing with a single subject. These documents will have as their foremost purpose to inform and explain matters concerning the technical and scientific bases of the specific subject dealt with, and concerning their influence on the standards context. Therefore, in a broader sense, it has as its objective as well to act in support of design activity.

The document, presented, concerns the «Guidelines on structural concrete», based on Italian and European experience (ENV 206, CEB-FIP Model Code 1990, Richtlinie für Hochfesten Beton 1995, DIN 1045/88). The Guidelines give indications and information of both general and detailed nature for the design, working, construction and inspection of concrete. Concrete too often appears as the weakest link in a process — that concerns the construction cycle of civil works — on which problems and tensions of various origin have been discharged in the recent past.

Dealt with in the document for the first time is the «high performance» (HP) concrete, that can reach characteristic cube crushing strengths (R_{ck}) exceeding 55 N/mm^2 and lower than 75 N/mm^2 , and the «high-strength» (HS) concrete, having an $R_{ck} > 75 \text{ N/mm}^2$.

This opening up to consideration of concretes not dealt with by the Ministerial Decree of January 9th 1996 could start up, in our country too, a phase of research and of study in which the Italian scientific and industrial world could usefully participate.

The Guidelines propose, like other foreign standards and international pre-standards documents, the possibility of extending to HP concretes the structural verification procedures currently in use for ordinary concretes. They remand to the assessment of the Higher Works Council the possibility of using HS concretes in certain works, on the basis of suitable technical documentation.

The Director

Riepilogo degli argomenti

1. OGGETTO E SCOPO DELLE PRESENTI LINEE GUIDA
2. CAMPO DI APPLICAZIONE
3. DEFINIZIONI
4. LAVORABILITÀ
 - 4.1 Misura della consistenza
 - 4.2 Fattori che influenzano la lavorabilità
 - 4.3 Perdita di lavorabilità
5. STAGIONATURA
 - 5.1 Controllo delle differenze di temperatura durante la stagionatura
 - 5.2 Stagionatura ordinaria
 - 5.2.1 Effetto del tempo e dell'umidità
 - 5.3 Stagionatura accelerata con vapore a bassa pressione
 - 5.4 Conclusione
6. PRESCRIZIONI PER IL CALCESTRUZZO
 - 6.1 Generalità
 - 6.2 Calcestruzzo indurito
 - 6.2.1 Resistenza a compressione
 - 6.2.2 Resistenza a trazione
 - 6.2.3 Energia di frattura
 - 6.2.4 Resistenze caratteristiche
 - 6.2.5 Norme di riferimento e modalità
7. DURABILITÀ E VITA IN SERVIZIO
 - 7.1 Durabilità del calcestruzzo e durabilità della struttura
 - 7.2 Vita in servizio
8. IL CALCESTRUZZO AD ALTE PRESTAZIONI E AD ALTA RESISTENZA
 - 8.1 Materiali componenti
 - 8.1.1 Cementi
 - 8.1.2 Rapporto a/c
 - 8.1.3 Additivi
 - 8.1.4 Aggiunte minerali
 - 8.1.5 Aggregato
 - 8.2 Lavorabilità
 - 8.3 Proprietà meccaniche del calcestruzzo ad alte prestazioni e ad alta resistenza
 - 8.3.1 Resistenza a compressione
 - 8.3.2 Curve tensione-deformazione
 - 8.3.3 Resistenza alla trazione
 - 8.3.4 Modulo di elasticità
 - 8.3.5 Ritiro
 - 8.3.6 Scorrimento viscoso

1. — Oggetto e scopo delle presenti linee guida

Le presenti linee guida intendono porsi quale primo avvio di un successivo sviluppo normativo relativo al confezionamento ed all'impiego del calcestruzzo strutturale. In particolare esse definiscono le condizioni operative per meglio ottenere le caratteristiche prestazionali richieste. Esse, inoltre, introducono una innovazione nell'attuale quadro delle prescrizioni tecniche attraverso la definizione del calcestruzzo ad alte prestazioni, finora non regolato da alcuna norma.

Nella predisposizione del testo sono stati tenuti in conto i più recenti documenti normativi in Europa, tra i quali i codici CEB-FIP ed EC2 e la ENV 206.

2. — Campo di applicazione

Le presenti linee guida si applicano al calcestruzzo per usi strutturali, armato e non, ordinario e precompresso, con esclusione dei calcestruzzi leggeri.

3. — Definizioni

Il calcestruzzo deve essere specificato in funzione della classe di resistenza, della classe di esposizione, della dimensione nominale massima dell'aggregato, della classe di consistenza e della prevista vita in servizio.

La composizione, cemento, aggregato, acqua, additivi ed eventuali aggiunte deve essere stabilita in modo da soddisfare le specifiche prestazionali e di minimizzare i fenomeni di segregazione e di essudazione del calcestruzzo fresco.

Nella scelta del tipo e della classe di cemento si deve tenere conto delle condizioni di esposizione, della velocità di sviluppo della resistenza, del calore di idratazione e della velocità alla quale esso si libera.

Il contenuto minimo di cemento ed il rapporto massimo acqua/cemento vanno definiti principalmente sulla base delle condizioni ambientali di esposizione e delle prestazioni richieste; in ogni caso il calcestruzzo armato, ordinario o precompresso, deve contenere sufficiente cemento per assicurare un adeguato grado di protezione dell'acciaio contro la corrosione.

4. — Lavorabilità

La lavorabilità, designata con il termine «consistenza» nella normativa vigente, è un indice delle proprietà e del comportamento del calcestruzzo nell'intervallo di tempo tra la produzione e la compattazione dell'impasto in situ nella cassaforma o tra la produzione e la finitura, se richiesta. Poiché le caratteristiche desiderate di durabilità e di resistenza meccanica possono essere effettivamente raggiunte soltanto se la movimentazione, la posa in opera e la stagionatura avvengono correttamente, la lavorabilità è imposta dal tipo di costruzione e dai metodi di posa in opera adottati, in particolare dal metodo di compattazione la cui efficacia va comunque garantita. Nello studio della composizione del calcestruzzo occorre conciliare le caratteristiche dell'impasto fresco con i requisiti di resistenza meccanica e di durabilità dell'impasto indurito.

Le proprietà del calcestruzzo fresco collegate con la lavorabilità sono:

- 1) la stabilità, ossia la capacità dell'impasto a mantenere, sotto l'azione di forze esterne, l'uniformità di distribuzione dei componenti;
- 2) la mobilità, ossia la facilità con la quale l'impasto fluisce nella cassaforma fino a raggiungere le zone meno accessibili;
- 3) la compattabilità, ossia la facilità con la quale l'impasto può essere assestato nella cassaforma e l'aria intrappolata rimossa.

Mobilità e stabilità sono in rapporto con la consistenza o rigidità propria dell'impasto e come questa dipendono dal contenuto di acqua, dalla temperatura, dalla presenza di additivi.

Benché la consistenza non rappresenti l'intera storia della lavorabilità, tuttavia nella tecnologia del calcestruzzo è prassi consolidata controllare la lavorabilità dell'impasto fresco attraverso misure di consistenza, essendo queste ultime di semplice e rapida esecuzione.

4.1 — *Misura della consistenza.*

La consistenza, come la lavorabilità, è il risultato di più proprietà reologiche, e di conseguenza non è suscettibile di definizione quantitativa, ma soltanto di valutazione relativa, sulla base del comportamento dell'impasto fresco a determinate modalità di prova.

Nessuno dei metodi di prova proposti od in uso per la misura della consistenza è pienamente soddisfacente e le proprietà del calcestruzzo fresco che vengono prese ad indice della sua lavorabilità sono diverse da metodo a metodo. Pertanto, in generale la massima sensibilità di ogni metodo riguarda campi differenti di lavorabilità, e, a seconda del tipo di opera e delle condizioni di getto, va scelto il metodo più appropriato di controllo del grado di consistenza.

I metodi di misura della consistenza più largamente adottati sono i seguenti:

- abbassamento al cono (UNI 9418)
- prova Vébé (UNI 9419)
- indice di compattabilità (UNI 9420)
- spandimento (UNI 8020 - Metodo B).

Su tali metodi è basata la classificazione del calcestruzzo in funzione della consistenza (Tabb.1-4)

TABELLA 1 – *Classi di consistenza mediante la misura dell'abbassamento al cono*

Classe di consistenza	Abbassamento mm	Denominazione corrente
S1	da 10 a 40	Umida
S2	da 50 a 90	Plastica
S3	da 100 a 150	Semifluida
S4	da 160 a 210	Fluida
S5	> 210	Superfluida

TABELLA 2 – *Classi di consistenza mediante il metodo Vébé*

Classe di consistenza	Tempo Vébé s
V0	≥ 31
V1	da 30 a 21
V2	da 20 a 11
V3	da 10 a 6
V4	da 5 a 3

TABELLA 3 – *Classi di consistenza mediante la misura della compattabilità*

Classe di consistenza	Indice di compattabilità
C0	$\geq 1,46$
C1	da 1,45 a 1,26
C2	da 1,25 a 1,11
C3	da 1,10 a 1,04

TABELLA 4 – *Classi di consistenza mediante la misura dello spandimento*

Classe di consistenza	Spandimento mm
FB1	≤ 340
FB2	da 350 a 410
FB3	da 420 a 480
FB4	da 490 a 550
FB5	560-620
FB6	≥ 630

Il metodo di misura più diffuso è quello che propone la valutazione della consistenza mediante la misura dell'abbassamento al cono.

Al riguardo si hanno tre principali forme di abbassamento, come indicato in figura 1

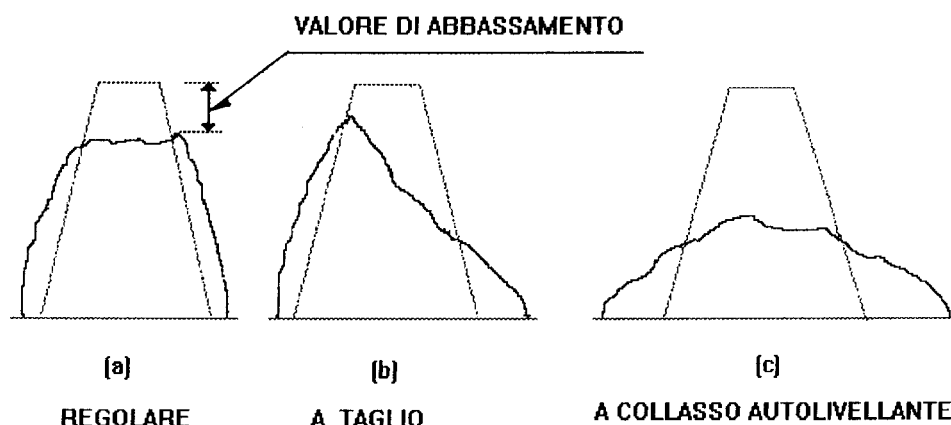


Figura 1 – *Forme di abbassamento al cono.*

La prima forma, con abbassamento uniforme, senza alcuna rottura della massa, indica comportamento regolare.

La seconda con abbassamento asimmetrico (a taglio) spesso indica mancanza di coesione; essa tende a manifestarsi con miscele facili alla segregazione. In caso di persistenza, a prova ripetuta, il calcestruzzo è da ritenere inidoneo al getto.

La terza, con abbassamento generalizzato (collasso), indica miscele magre oppure molto umide o calcestruzzi autolivellanti, additivati con superfluidificanti.

Miscele molto asciutte hanno un abbassamento nullo e quindi, in un certo campo di consistenza, è possibile che non si registri alcuna differenziazione fra miscele pur dotate di diversa lavorabilità. È allora necessario il ricorso al metodo Vébé.

Le miscele a consistenza plastica-semifluida cadono nel campo di maggior sensibilità del metodo di abbassamento al cono.

Può anche succedere che per miscele magre tendenti alla rigidità, un abbassamento regolare facilmente si tramuti in uno di tipo a taglio od a collasso. In tal caso ci si deve accertare del fenomeno, onde evitare che si indichino valori diversi di abbassamento per campioni della stessa miscela.

Per i calcestruzzi fluidi e molto fluidi, è preferibile determinare la consistenza mediante la prova di spandimento alla tavola a scosse (UNI 8020 - Metodo B).

In generale, data la selettività dei vari metodi di prova, si raccomanda di interpretare con cautela i risultati delle misure, quando i valori cadono al di fuori dei limiti sottoindicati:

abbassamento al cono:	< 10 mm	e	> 210 mm
tempo Vèbè:	< 5 secondi	e	> 30 secondi
indice di compattabilità:	< 1,04	e	> 1,45
spandimento:	< 340 mm	e	> 620 mm

4.2 — *Fattori che influenzano la lavorabilità.*

La lavorabilità di un calcestruzzo è influenzata da più fattori: dal contenuto d'acqua, dalle caratteristiche particellari degli aggregati, dal tempo, dalla temperatura, dalle caratteristiche del cemento, dagli additivi.

4.3 — *Perdita di lavorabilità.*

La lavorabilità è una proprietà del calcestruzzo fresco che diminuisce col procedere delle reazioni di idratazioni del cemento. È pertanto necessario che l'impasto possenga la lavorabilità richiesta non solo al momento della confezione, ma soprattutto al momento della sua posa in opera.

Se l'intervallo di tempo che intercorre fra confezione e getto non è breve e soprattutto se la temperatura ambiente è elevata, la lavorabilità iniziale deve essere maggiore di quella richiesta per la posa in opera. Nella pratica di cantiere si può ricorrere, appena prima del getto, ad aggiunte di acqua (entro il rapporto a/c massimo consentito) e/o di additivi superfluidificanti (punto 10.4 UNI 9858).

La perdita di lavorabilità è un fenomeno che avviene nell'ambito della prima ora (o delle prime 2 ore al massimo) dal termine delle operazioni d'impasto.

Si riporta nella figura 2 un'indicazione dell'andamento della perdita di lavorabilità di un insieme di calcestruzzi a consistenza iniziale fluida (v. Tab. 1).

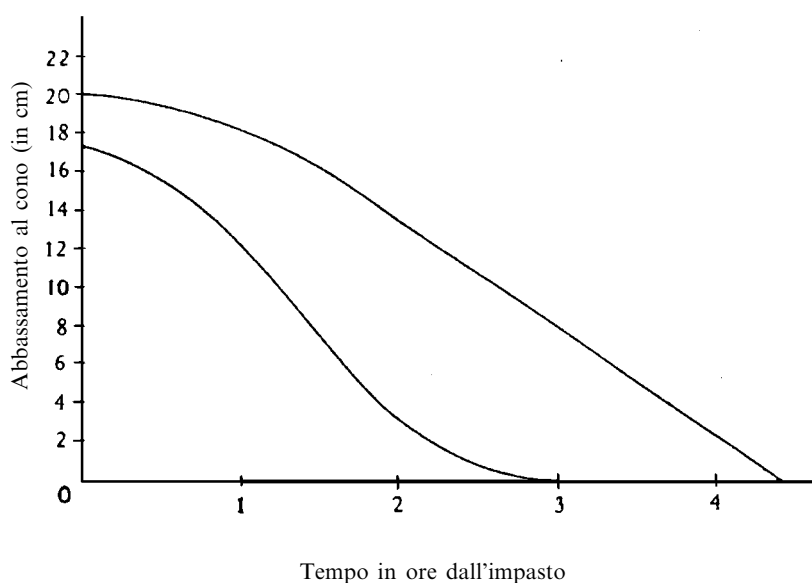


Figura 2 – *Andamento della diminuzione di lavorabilità degli impasti di calcestruzzo.*

Accelerazioni della perdita di lavorabilità si possono verificare, senza variazioni del periodo di presa, con l'uso di additivi riduttori di acqua.

A parità di altre condizioni, la temperatura dei costituenti influisce sulla quantità d'acqua d'impasto necessaria per ottenere una determinata lavorabilità iniziale.

A titolo orientativo si possono indicare i seguenti valori di lavorabilità iniziale che un calcestruzzo assume, a parità di composizione, al variare della sua temperatura.

temperatura °C	lavorabilità abbassamento al cono (cm)
5	15
10	13
20	9
30	6
40	5

Oltre ad una minore lavorabilità iniziale, l'aumento di temperatura, inducendo una maggiore velocità della reazione di idratazione del cemento, accentua il fenomeno della perdita di lavorabilità.

In particolare si osserva che per temperature di $40 \div 50$ °C, raddoppia la velocità di decadimento della lavorabilità rispetto a quello che si avrebbe con una temperatura intorno a 20 °C.

5. — Stagionatura

È l'insieme di precauzioni che, durante il processo di indurimento, permette di trasformare l'impasto fresco in un materiale resistente, privo di fessure e durevole. Con un adeguato periodo di stagionatura protetta, iniziato immediatamente dopo aver concluso le operazioni di posa in opera, il calcestruzzo può raggiungere le sue proprietà potenziali nella massa ed in particolare nella zona superficiale.

La protezione consiste nell'impedire durante la fase iniziale del processo di indurimento:

a) l'essiccazione della superficie del calcestruzzo in primo luogo perché l'acqua è necessaria per l'idratazione del cemento e per il progredire delle reazioni pozzolaniche, nel caso in cui si impieghino cementi di miscela, ed in secondo luogo per evitare che gli strati superficiali del manufatto indurito risultino porosi. L'essiccazione prematura rende il copriferro permeabile e quindi scarsamente resistente alla penetrazione delle sostanze aggressive presenti nell'ambiente di esposizione.

Nei manufatti a sviluppo orizzontale, in particolare lastre e pavimentazioni, la perdita di umidità nella fase in cui l'impasto è ancora plastico può dar luogo alla fessurazione da ritiro plastico.

In generale, impedendo l'essiccazione superficiale (stagionatura protetta), ed ottenendo di conseguenza un manufatto dotato di un copriferro pressoché impermeabile e privo di fessure, si garantisce anche il raggiungimento della resistenza meccanica desiderata per il calcestruzzo.

b) il congelamento dell'acqua di impasto prima che il calcestruzzo abbia raggiunto un grado adeguato di indurimento.

c) che i movimenti differenziali, dovuti a differenze di temperatura attraverso la sezione del manufatto, siano di entità tale da generare fessure.

La risposta del calcestruzzo al processo di stagionatura dipende:

– *dalla sua composizione*: rapporto a/c, tipo e classe di cemento come pure tipo e qualità delle aggiunte.

Un calcestruzzo di basso rapporto a/c prodotto con un cemento a rapido indurimento raggiunge più rapidamente la resistenza superficiale che assicura un ridotto grado di permeabilità, e perciò necessita di una minore stagionatura rispetto ai calcestruzzi con cemento che si idrata più lentamente od ai calcestruzzi contenenti un quantitativo elevato di aggiunte di natura pozzolanica.

Con quest'ultimo tipo di calcestruzzo si può raggiungere il grado di durabilità atteso senza prolungare il periodo di stagionatura protetta, scegliendo un rapporto a/c più basso rispetto a quanto necessario in relazione alla sola normativa sulla durabilità;

– *dalla sua temperatura.* Questa può aumentare a causa delle reazioni esotermiche tra il cemento e l'acqua. La velocità di indurimento è in larga misura determinata dalla temperatura del calcestruzzo. Ad esempio a 35°C la velocità di indurimento è doppia che a 20°C, ed a 10°C tale velocità è circa metà che a 20°C.

La temperatura del calcestruzzo in opera dipende dalle condizioni ambientali (temperatura, umidità relativa, presenza/assenza di vento), dalla temperatura dei costituenti il calcestruzzo, dal dosaggio, tipo e classe di cemento, dalle dimensioni dell'elemento strutturale e dal sistema di isolamento delle casseforme.

Elementi a sezione sottile, in casseforme senza isolamento termico, esposti sin dall'inizio a basse temperature ambientali e gettati con cementi a basso calore di idratazione necessitano di una attenta e sorvegliata stagionatura.

Se nel calcestruzzo avvengono fenomeni di congelamento prima che esso abbia raggiunto una sufficiente resistenza a compressione ($\geq 5 \text{ N/mm}^2$), il materiale riceve un danno permanente. Il valore di soglia $\geq 5 \text{ N/mm}^2$ corrisponde ad un grado di idratazione sufficiente a produrre una autoessiccazione accompagnata dalla formazione di un volume di pori che permette all'acqua che gela di espandere senza danno per il calcestruzzo. Il tempo necessario perché il calcestruzzo raggiunga la resistenza a compressione voluta dovrebbe essere determinato sperimentalmente.

– *dalle condizioni ambientali* durante e dopo la stagionatura. Una bassa umidità relativa, l'insolazione e l'alta ventosità accelerano l'essiccazione del calcestruzzo non adeguatamente protetto nei primi stadi dell'idratazione.

Finché la idratazione del cemento non abbia progredito per almeno 10-20 h, l'evaporazione dell'acqua dalle superfici esposte del calcestruzzo avviene come da una superficie bagnata purché acqua sufficiente essudi in superficie. È perciò di notevole importanza impedire che durante le prime 24 h dopo il getto la essiccazione sia eccessiva, se si vuole prevenire la fessurazione da ritiro plastico. La effettiva quantità di acqua che può essere perduta da una superficie esposta bagnata di calcestruzzo può essere stimata dalle fig. 3 e 4. Il fattore decisivo che determina la velocità di evaporazione è la differenza Δp tra la pressione parziale del vapore sullo strato di acqua alla superficie del calcestruzzo e la pressione parziale nell'aria ambiente.

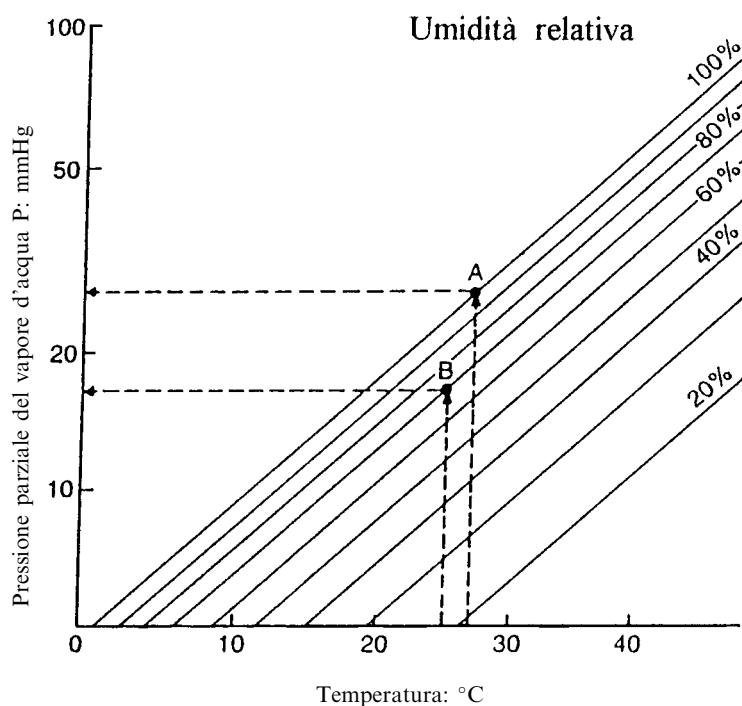


Figura 3 – Pressione parziale del vapore acqueo in funzione della temperatura.

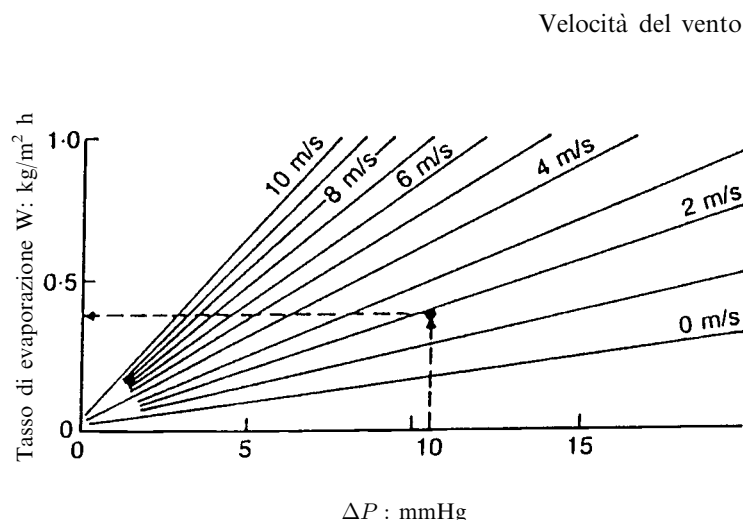


Figura 4 – *Velocità di evaporazione funzione della velocità del vento e della pressione parziale del vapore.*

N.B. – I diagrammi delle figg. 3 e 4 sono ripresi dal Cap. 10 della pubblicazione CEB «Durable concrete structures» Reprint 1992.

L'uso dei diagrammi può essere illustrato con un esempio in cui la temperatura dell'acqua e del calcestruzzo sia di 27°C, l'umidità relativa U_R sullo strato di acqua sia 100% (punto A di fig. 3); per l'aria la temperatura sia 25°C e $U_R = 70\%$ (punto B). La differenza Δp è $(27 - 16,5) = 10,5$ mmHg. Se si assume una velocità del vento di 2m/sec la fig. 4 dà una velocità di evaporazione di 0,39 kg/m² h.

Non è possibile dare regole generali circa la velocità di evaporazione permessa dalle superfici di calcestruzzo nelle fasi iniziali dell'indurimento, dipendendo la velocità dal tipo di calcestruzzo e specialmente dalla sua tendenza ad essiccare.

Per i calcestruzzi di Portland ordinario, le norme ACI (American Concrete Institute) raccomandano di prendere speciali precauzioni se la velocità di evaporazione è vicina ad 1 kg/m² h. Nel caso dei cementi di miscela che essudano meno, la soglia è molto più bassa.

Benché un'essudazione non eccessiva sia vantaggiosa nel ridurre il rischio del ritiro plastico, non si deve tuttavia dimenticare che essa conduce ad un calcestruzzo poroso, in particolare in vicinanza della superficie.

5.1 — *Controllo delle differenze di temperatura durante la stagionatura.*

Non è possibile stabilire esatti limiti per le differenze di temperatura che sono accettabili nelle sezioni trasversali in fase di indurimento poiché esse dipendono non solo dalla composizione dell'impasto e dalle caratteristiche di sviluppo della resistenza ma anche dalla forma geometrica dell'elemento strutturale e dalla velocità con la quale il manufatto, dopo la rimozione dei casseri, raggiunge l'equilibrio termico con l'ambiente.

In base all'esperienza, si raccomanda di rispettare i limiti seguenti per limitare le tensioni di origine termica:

- a) una differenza massima di 20°C sulla sezione durante il raffreddamento dopo la rimozione dei casseri;
- b) una differenza massima di 10-15°C attraverso i giunti di costruzione e per strutture con sezioni di dimensioni molto variabili.

5.2 — *Stagionatura ordinaria.*

Si definisce «ordinaria» la stagionatura che avviene alla temperatura ambiente, nell'intervallo 5-35°C, con esclusione di qualsiasi intervento esterno di riscaldamento o di raffreddamento.

5.2.1 — Effetto del tempo e dell'umidità.

In condizioni di temperatura e umidità costanti e tali da consentire il procedere delle reazioni di idratazione con andamento regolare, lo sviluppo della resistenza a compressione del calcestruzzo in funzione della classe del cemento ed a parità di ogni altro fattore di composizione, presenta l'andamento tipico mostrato nella Fig. 5.

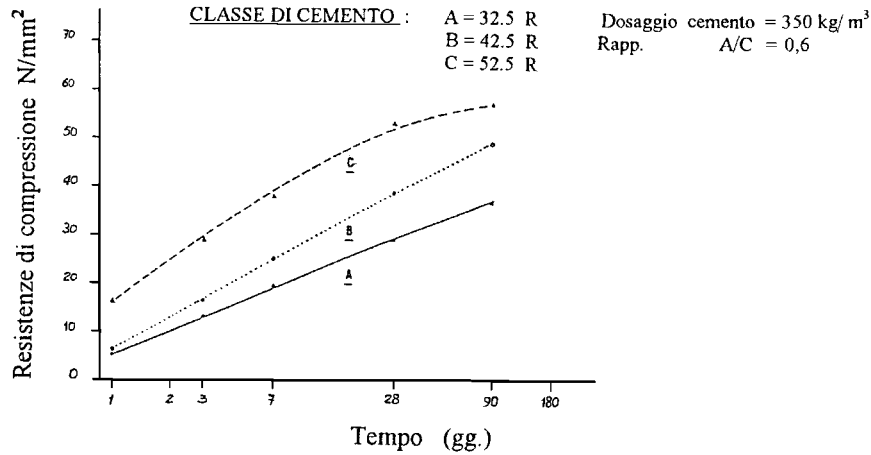


Figura 5 — Esempio di sviluppo della resistenza a compressione di calcestruzzi di pari composizione in relazione alle tre classi di cemento. CNR, Boll. Ufficiale 23-12-1992, Parte IV Norme Tecniche.

La presa e l'indurimento dell'impasto cementizio dipendono dalla continua presenza di acqua. Il calcestruzzo all'atto del getto, contiene una quantità di acqua libera che assicura l'idratazione del cemento. È necessario fare in modo che quest'acqua resti disponibile o comunque possa essere rapidamente ripristinata sino a quando lo spazio riempito da acqua e cemento non sia in gran parte sostituito da prodotti di idratazione. Il processo di idratazione (e quindi l'indurimento) può infatti progredire significativamente quando la tensione di vapore nei pori della pasta cementizia è prossima al valore di saturazione ($U_R > 90\%$).

In Fig. 6 è messo in luce il ridotto sviluppo di resistenza di provini di calcestruzzo conservati in ambiente secco o con moderata umidità relativa (50% e 75%) rispetto a quella di provini mantenuti in un ambiente umido ($U_R > 95\%$).

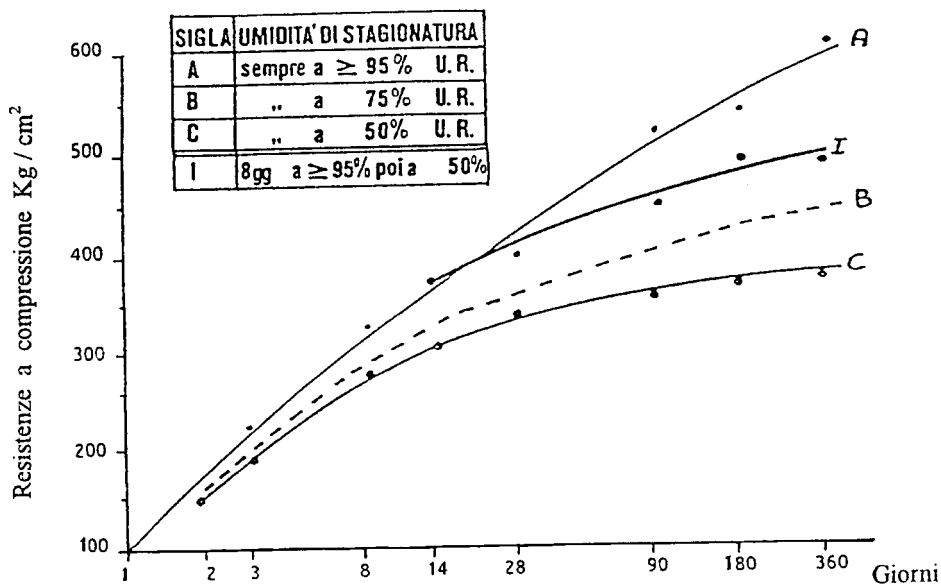


Figura 6 — Effetto di diverse condizioni igrometriche di stagionatura sullo sviluppo delle resistenze del calcestruzzo. (Provino 10 cm di lato) CNR, Boll. Ufficiale 23-12-1992, Parte IV Norme Tecniche.

Occorre far notare che anche i provini lasciati idratare per i primi giorni in ambiente umido (curva I) risentono di una successiva conservazione in ambiente a ridotta umidità relativa. Essi presentano infatti uno sviluppo della resistenza più attenuato rispetto a quello dei provini conservati sempre in ambiente umido.

Gli effetti dell'umidità di stagionatura vengono quantitativamente evidenziati dalla normativa europea ove tratta dell'esecuzione delle strutture (1995 - CEN/TC104 doc. n. 179):

- la durata della stagionatura protetta dipende dalle prevalenti condizioni climatiche della regione ove è situato il getto. Una distinzione tra classi climatiche viene data in Tab. 5.

TABELLA 5 – *Classi climatiche.*

CLASSI CLIMATICHE		UMIDITÀ RELATIVA MEDIA
Classe U	umida	> 80%
Classe M	moderata	nell'intervallo tra 65 e 80%
Classe S	secca	nell'intervallo tra 45 e 65%
Classe SS	molto secca	< 45%

- la stagionatura protetta deve essere prolungata finché la idratazione raggiunga un grado tale da assicurare le resistenze relative elencate in Tab. 6.

TABELLA 6 – *Valori di proporzioni di resistenza(*) del calcestruzzo alla fine della stagionatura.*

CLASSI CLIMATICHE	PROPORZIONE DI RESISTENZA
U	0,10
M	0,40
S	0,50
SS	0,60

(*) *La proporzione di resistenza* è data dal rapporto tra la resistenza media del calcestruzzo alla fine del periodo di stagionatura e la resistenza media a 28 gg. del calcestruzzo confezionato, stagionato e provato in accordo con EN ISO 2735/2 e EN ISO 4102/1.

Per quanto detto la stima della durata ottimale della stagionatura ordinaria protetta è un problema di una certa complessità. L'approccio migliore sarebbe quello di definire il valore limite di permeabilità che dovrebbe essere raggiunto negli strati superficiali del calcestruzzo al termine della stagionatura protetta. Poiché allo stato attuale non sono stati ancora definiti ed accettati né i valori limite di permeabilità né le modalità secondo le quali misurare le proprietà negli strati superficiali del manufatto, la durata della stagionatura protetta potrebbe essere stimata con riferimento alla resistenza meccanica in superficie.

Occorre però tenere presente che non vi è una stretta corrispondenza tra permeabilità e resistenza. Pertanto se l'importanza dell'opera o se le condizioni estreme di esposizione lo giustificano, si raccomanda di eseguire prove di permeabilità in laboratorio, secondo EN ISO 7031 (1994) su provini appaiati alla struttura e che hanno quindi «vissuto» la medesima stagionatura, ovvero su carote estratte dalla struttura stessa.

Nella Tab. 7 sono riportati i tempi minimi di stagionatura, in giorni, raccomandati dalla ENV 206 (UNI 9858) per le strutture esposte in ambiente secco, umido o debolmente aggressivo. Quando le condizioni di esposizione sono più gravose, i tempi di stagionatura suggeriti nella Tab. 7 debbono essere aumentati per essere sicuri che il copriferro sia diventato pressoché impervio alla penetrazione delle sostanze contenute nell'ambiente di esposizione.

TABELLA 7

Sviluppo della resistenza del calcestruzzo	Rapido			Medio			Lento		
	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Temperatura del calcestruzzo, °C	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Condizioni ambientali durante la stagionatura	(tempi espressi in giorni)								
I Non esposto ad insolazione diretta; U_r dell'aria circostante $\geq 80\%$	2	2	1	3	3	2	3	3	2
II Insolazione diretta media o vento di media velocità o $U_r > 50\%$	4	3	2	6	4	3	8	5	4
III Insolazione intensa o vento di forte velocità o $U_r < 50\%$	4	3	2	8	6	5	10	8	5

La velocità di sviluppo della resistenza del calcestruzzo può essere valutata dalla Tab. 8 (ENV 206 o UNI 9858). I dati riportati nella tabella sono relativi ai cementi Portland 42.5R e 32.5R.

TABELLA 8

Velocità di sviluppo della resistenza	a/c	Classe di resistenza del cemento
rapida	< 0.5	42.5 R
media	0.5-0.6 < 0.5	42.5 R 32.5 R-42.5 R
lenta	in tutti gli altri casi	

Le indicazioni sopra riportate relative alle condizioni di stagionatura per conseguire una adeguata impermeabilità dello strato superficiale, non prendono in considerazione gli aspetti della sicurezza strutturale in relazione ai quali deve essere stabilito un tempo minimo per raggiungere la resistenza voluta alla rimozione dei casseri.

5.3 — Stagionatura accelerata con vapore a bassa pressione.

Tra i vari procedimenti di stagionatura accelerata che essenzialmente fanno intervenire un apporto di calore, quello del riscaldamento mediante vapore libero è il più diffuso. Esso consiste nel sottoporre il calcestruzzo, dopo il getto, all'effetto combinato di calore ed umidità mediante invio di vapor saturo a bassa pressione nell'ambiente di trattamento. Un trattamento adeguato può consentire lo sviluppo a 24 ore, od anche a tempi più brevi, di resistenze meccaniche a compressione dell'ordine del 60% di quelle che si potrebbero ottenere a 28 gg con la maturazione normale (20°C; 100% U_R). Per contro, i calcestruzzi maturati a temperature elevate mostrano, in seguito, resistenze finali minori di quelli maturati normalmente. Poiché però in pratica difficilmente si realizza una stagionatura umida per periodi prolungati, ne consegue che anche a tempi lunghi la resistenza effettiva risulta spesso maggiore per i calcestruzzi maturati ad alta temperatura iniziale che per gli altri.

Nel trattamento del calcestruzzo con vapore a bassa pressione si possono distinguere: una fase di prestagionatura, una di aumento della temperatura, una di permanenza alla temperatura massima ed una di raffreddamento (Fig. 7).

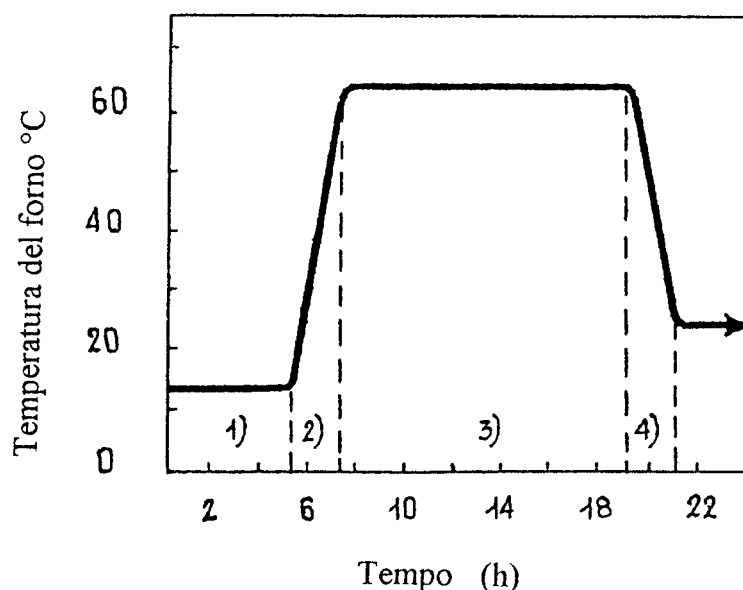


Figura 7 – Esempio di stagionatura a vapore alla pressione ordinaria. 1) Prestagionatura da 2 a 6h. 2) Riscaldamento non superiore a 20°C/h. 3) Periodo alla massima temperatura. 4) Raffreddamento non superiore a 10°C/h. La temperatura iniziale dell'impasto è di 13°C.

Le caratteristiche delle fasi hanno una influenza determinante sulle resistenze finali. Inoltre l'effetto del trattamento termico dipende anche dalla natura del cemento.

Perciò prima dell'inizio della produzione conviene procedere a indagini sperimentali sui componenti e sul trattamento termico previsto, tenendo presenti regole e limitazioni, relativamente a ciascuna fase, riportate nel punto 10.7 della ENV 206 o UNI 9858.

L'impiego di additivi superfluidificanti che consentono di confezionare calcestruzzi fluidi con rapporto a/c estremamente basso sta portando a modifiche rilevanti nelle modalità della stagionatura accelerata a vapore a bassa pressione.

Vi è infatti la possibilità, se non di eliminare il trattamento a vapore, di ridurre la temperatura massima di processo intorno ai 30-40°C ovvero a circa la metà di quelli normalmente in uso.

Vengono così soppressi gli svantaggi dovuti alla scelta di tempi troppo brevi di prestagionatura, svantaggi tanto maggiori quanto più alta è la temperatura di processo e più alto è il rapporto a/c, e di quelli dovuti a variazioni termiche troppo rapide, poiché dimezzando la temperatura di processo si può, a parità di tempo, dimezzare la velocità di riscaldamento. In questa situazione la resistenza meccanica a lungo termine si avvicina notevolmente a quella del calcestruzzo stagionato normalmente.

La riduzione del rapporto a/c, permessa dall'uso dei superfluidificanti, contribuisce all'incremento della resistenza meccanica entro le prime 24 h.

5.4 — Conclusione.

Una buona stagionatura è necessaria per conseguire un risultato ottimale da un buon calcestruzzo. Una stagionatura non corretta rende mediocre un calcestruzzo altrimenti buono, ma una stagionatura corretta non può compensare le deficienze di composizione e di scelta dei componenti del calcestruzzo. Tutti gli sforzi tesi a migliorare le condizioni di stagionatura risultano vani se la qualità del calcestruzzo è inadeguata.

6. — Prescrizioni per il calcestruzzo

6.1 — Generalità.

Il calcestruzzo va di regola specificato dal progettista come «miscela progettata» con riferimento alle proprietà richieste al calcestruzzo (a prestazione garantita). Tuttavia, su richiesta della Stazione Appaltante, il calcestruzzo può essere specificato come miscela prescritta (calcestruzzo a composizione richiesta) prescrivendo la composizione in base ai risultati di prove preliminari effettuate secondo la procedura di seguito definita, o in base all'esperienza a lungo termine acquisita su calcestruzzo simile.

Per «miscela progettata» si intende un calcestruzzo per il quale il progettista ha la responsabilità di specificare le prestazioni richieste ed ulteriori caratteristiche e per il quale il produttore è responsabile della fornitura di una miscela conforme alle prestazioni richieste ed alle ulteriori caratteristiche.

Per miscela a composizione richiesta si intende un calcestruzzo del quale il progettista specifica la composizione della miscela ed i materiali da utilizzare. Il produttore è responsabile della fornitura della miscela specificata così come richiesta, ma non risponde delle prestazioni effettive della stessa.

Nel caso di calcestruzzo a composizione richiesta, occorre presentare una documentazione delle prove preliminari effettuate, volte a garantire che la composizione richiesta sia adeguata per soddisfare tutti i requisiti riguardanti le prestazioni del calcestruzzo nella fase fresca ed indurita, tenendo conto dei materiali componenti da utilizzare e delle particolari condizioni del cantiere.

I dati fondamentali per i calcestruzzi a prestazione garantita, da indicarsi in tutti i casi, comprendono:

- a) Classe di resistenza
- b) Massima dimensione nominale degli aggregati
- c) Prescrizioni sulla composizione del calcestruzzo a seconda della sua destinazione d'uso (per es. classe di esposizione ambientale; calcestruzzo semplice o armato, normale o precompresso)
- d) Classe di consistenza.

Se del caso, dovranno essere determinate le seguenti caratteristiche:

e.1) Caratteristiche del calcestruzzo indurito:

- resistenza alla penetrazione dell'acqua ai fini della permeabilità;
- resistenza ai cicli di gelo e disgelo;
- resistenza all'azione combinata del gelo e di agenti disgelanti;
- resistenza agli attacchi chimici;
- requisiti tecnici aggiuntivi.

e.2) Caratteristiche della miscela:

- tipo di cemento;
- classe di consistenza;
- contenuto d'aria;
- sviluppo di calore durante l'idratazione;
- requisiti speciali riguardanti gli aggregati;
- requisiti speciali concernenti la resistenza alla reazione alcali-silice;
- requisiti speciali riguardo alla temperatura del calcestruzzo fresco;
- requisiti tecnici aggiuntivi.

Nel caso di calcestruzzo preconfezionato, vanno prese in considerazione condizioni supplementari relative al trasporto ed alle procedure di cantiere (tempo e frequenza delle consegne, trasferimento per pompaggio o per nastro trasportatore, etc.).

6.2 — Calcestruzzo indurito.

6.2.1 — Resistenza a compressione.

La resistenza a compressione del calcestruzzo viene espressa in termini di resistenza caratteristica, definita come quel valore al di sotto del quale viene a trovarsi dal punto di vista probabilistico il 5% dell'insieme di tutti i possibili valori di resistenza misurati sul calcestruzzo in esame. La resistenza dovrà essere determinata con le modalità previste dalle norme in seguito elencate.

Classi di resistenza a compressione

Il calcestruzzo è classificato in base alla resistenza a compressione, espressa come resistenza caratteristica R_{ck} oppure f_{ck} . La resistenza caratteristica R_{ck} viene determinata sulla base dei valori ottenuti da prove a compressione a 28 giorni su cubi di 150 mm di lato; la resistenza caratteristica f_{ck} , viene determinata sulla base dei valori ottenuti da prove a compressione a 28 giorni su cilindri di 150 mm. di diametro e 300 mm. di altezza; i valori, espressi in N/mm^2 , risultano compresi in uno dei seguenti campi:

- calcestruzzo non strutturale: C8/10 - C12/15
- calcestruzzo ordinario: C16/20 - C45/55
- calcestruzzo ad alte prestazioni: C50/60 - C60/75
- calcestruzzo ad alta resistenza: C70/85 - C100/115

elencati nella tabella seguente.

CLASSI DI RESISTENZA PER CALCESTRUZZO NORMALE.

Classe di resistenza	f_{ck} N/mm^2	R_{ck} N/mm^2	Categoria del calcestruzzo
C8/10 C12/15	8 12	10 15	NON STRUTTURALE
C16/20 C20/25 C25/30 C30/37 C35/45 C40/50 C45/55	16 20 25 30 35 40 45	20 25 30 37 45 50 55	ORDINARIO
C50/60 C55/67 C60/75	50 55 60	60 67 75	ALTE PRESTAZIONI
C70/85 C80/95 C90/105 C100/115	70 80 90 100	85 95 105 115	ALTA RESISTENZA

6.2.2 — *Resistenza a trazione.*

La resistenza a trazione del calcestruzzo dovrà essere prescritta e misurata o come resistenza «indiretta» (per spacco, $f_{ct,sp}$, prova brasiliana; a flessione, $f_{ct,fl}$, prova su tre punti; rispettivamente UNI 6135 e UNI 6130) o come resistenza «diretta» (prova assiale, f_{ct} , RILEM CPC7 ovvero ISO 4108).

I risultati ottenuti con i metodi di prova sopra elencati, non sono strettamente intercambiabili.

Classi di resistenza a trazione

Il calcestruzzo può essere classificato, se richiesto, in base alla sua resistenza a trazione assiale f_{ct} come indicato nella seguente tabella:

CLASSI DI RESISTENZA A TRAZIONE ASSIALE PER CALCESTRUZZO DI PESO NORMALE.

Classe di resistenza a trazione	f_{ctk} N/mm ²
T1.0	1.0
T1.5	1.5
T2.0	2.0
T2.5	2.5
T3.0	3.0
T3.5	3.5
T4.0	4.0

6.2.3 — Energia di frattura.

L'energia di frattura, definita come l'energia dissipata durante la propagazione unitaria (cioè per unità di superficie) di una fessura dovuta a trazione, ovvero (a meno del segno) come il lavoro necessario per far propagare di una quantità unitaria una fessura, è una caratteristica intrinseca del materiale calcestruzzo, la cui valutazione è utile per la modellazione del comportamento in trazione (fase fratturata).

In mancanza di prove specifiche (in trazione diretta o indiretta), l'energia di frattura può essere valutata con la seguente relazione:

$$G_F = 0.2 \alpha_F f_{cm}^{0.7} \text{ (} J/m^2 \text{ ovvero } N/m \text{)}$$

dove $\alpha_F = 10 + 1.25 d_a$, essendo $d_a (= 8 \div 32 \text{ mm})$ la dimensione massima dell'aggregato. L'espressione suddetta vale per calcestruzzi non additivati con fumo di silice, essendo questi ultimi caratterizzati da minore tenacità (minore energia di frattura) e da minore sensibilità alla dimensione massima dell'aggregato. Tale determinazione è in accordo con le raccomandazioni RILEM TC50, (Recomendations Materials and Structures, vol 18/1985).

6.2.4 — Resistenze caratteristiche.

La resistenza del calcestruzzo viene espressa in termini di resistenza caratteristica R_{ck} e f_{ck} , come indicato in precedenza, ed è determinata sulla base dei valori ottenuti a 28 giorni su cubi di 150 mm di lato o cilindri 150/300 mm (rapporto diametro/altezza).

La resistenza media a trazione f_{ctm} , può anche essere espressa, in via approssimata, sempre a 28 giorni, dai risultati della prova di trazione indiretta, oppure tramite la seguente relazione (FIP-CEB MC90 ed EC2):

$$f_{ctm} = 0.30 f_{ck}^{2/3} = 0.27 R_{ck}^{2/3} \text{ (} N/mm^2 \text{)}$$

La resistenza caratteristica a trazione f_{ctk} (se richiesta) può essere assunta pari a $0.70 f_{ctm}$.

6.2.5 — Norme di riferimento e modalità.

I procedimenti e le modalità per la preparazione e la conservazione dei provini e per l'esecuzione delle prove sono oggetto delle seguenti norme:

- UNI 6126 e 6128, che stabiliscono rispettivamente le modalità per il prelievo dei campioni di calcestruzzo in cantiere e per la confezione in laboratorio di calcestruzzi sperimentali;
- UNI 6127 e 6129, che stabiliscono le modalità per la preparazione e la stagionatura dei provini di calcestruzzo rispettivamente prelevati in cantiere e confezionati in laboratorio;
- UNI 6130, che si riferisce a forme e dimensioni dei provini di calcestruzzo per prove di resistenza meccanica, e relative casseforme; questa norma prescrive l'utilizzazione, in via normale, di provini cubici per la rottura a compressione e a trazione indiretta per spacco, e di provini prismatici di sezione quadrata per la rottura a trazione indiretta per flessione.

Per la rottura a compressione e a trazione indiretta è tuttavia previsto che, in casi particolari, possano essere anche impiegati provini cilindrici aventi altezza doppia del diametro.

- UNI 6131, che stabilisce i criteri e le modalità per il prelievo di campioni di calcestruzzo già indurito e per la preparazione di provini;
- UNI 6132 e 6134, che stabiliscono il procedimento da seguire per la determinazione della resistenza a compressione di provini predisposti allo scopo e, rispettivamente, di monconi di prismi rotti a flessione;
- UNI 6133, relativa alla esecuzione della prova di rottura a trazione per flessione;
- UNI 6135, relativa alla esecuzione delle prove di rottura a trazione diretta e indiretta;
- UNI 6186, che riguarda le presse idrauliche appositamente progettate e costruite per prove di compressione su materiali, come il calcestruzzo, che presentano piccola deformazione prima della rottura.

Con riferimento alla prova di rottura a compressione, l'attendibilità e la ripetibilità dei risultati sono condizionati dal rispetto delle modalità esecutive precisate nelle norme.

In particolare:

- deviazioni di planarità sulle facce del provino superiori a quelle di norma ($100\ \mu = 0.10\ \text{mm}$) possono determinare riduzioni significative nella resistenza rilevata dalla prova;
- gradienti di carico superiori a quello previsto dalla norma ($0.5 \pm 0.2N/\text{mm}^2/\text{s}$) portano ad una sovrastima della resistenza a compressione, e gradienti minori ad una sottostima.

Per la misura della resistenza a compressione è permesso, in alternativa ai cubi, l'impiego di provini cilindrici o prismatici. In tal caso occorre spianare le facce ed eventualmente molarle, oppure ricoprirle con strato cementizio rasato, di adeguata resistenza e rigidità (capping). Non è consentito procedere alla rottura tramite interposizione, fra i provini e i piatti della pressa, di materiali deformabili: in tal modo si ottengono valori di resistenza più bassi, in quanto l'espansione trasversale dello strato deformabile tende a spaccare longitudinalmente il provino.

I valori della resistenza a compressione sono dipendenti dalla geometria e dalle dimensioni del provino. Per tenere conto di tali influenze, si utilizzano i fattori di conversione riportati nelle tabelle seguenti:

Fattori di conversione fra resistenze a compressione misurate su cubi di diversa dimensione.

Spigolo 1 in mm	100	150	200	250	300
Indici delle resistenze a compressione su cubi di spigolo 1	110%	100%	95%	92%	90%

Fattori di conversione fra resistenze a compressione misurate su cilindri di diversa dimensione e di pari snellezza $h/d = 2.00$

Dimensioni h/d mm/mm	100/200	150/300	200/400	250/500	300/600
Indici delle resistenze a compressione su cilindri di dimensioni h/d	102%	100%	97%	95%	91%

*Fattori di conversione fra resistenze
a compressione di cubi $l = 150 \text{ mm}$ e cilindri $d = 150/h = 300 \text{ mm}$*

Res. cubica $< 25 \text{ N/mm}^2$	$R_{\text{cilindro}} = 0.80 R_{\text{cubo}}$
» » $\geq 25 \text{ e } < 60 \text{ N/mm}^2$	$R_{\text{cilindro}} = 0.83 R_{\text{cubo}}$
» » $\geq 60 \text{ N/mm}^2$	$R_{\text{cilindro}} = 0.85 R_{\text{cubo}}$

*Fattori di conversione fra resistenze a compressione
misurate su cilindri di pari diametro ma di diversa snellezza (h/d)*

Snellezza h/d	1.00	2.00	4.00
Indici della resistenza a compressione di cilindri di snellezza h/d	118%	100%	92%

I fattori di conversione riportati nelle diverse tabelle non sono fra loro correlabili.

In generale i provini grandi danno resistenze minori dei provini piccoli; i cilindrici danno resistenze minori dei provini cubici, ed i provini snelli danno resistenze minori dei provini tozzi.

Inoltre, quanto maggiore è la resistenza a compressione del calcestruzzo in esame, tanto più i rapporti di conversione tendono all'unità.

7. — Durabilità e vita in servizio

7.1 — Durabilità del calcestruzzo e durabilità della struttura.

Agli effetti della vita in servizio occorre distinguere tra durabilità potenziale del calcestruzzo, inteso come materiale da utilizzare in una specificata condizione ambientale, e durabilità effettiva del calcestruzzo in opera, cioè con le proprietà che esso ha nel contesto della struttura.

Premesso che ogni fenomeno di deterioramento che si manifesta in una struttura è la conseguenza della incompatibilità tra qualità locali del calcestruzzo e condizioni locali di esposizione, appare evidente che la vita in servizio associata al calcestruzzo come materiale potrà essere effettivamente raggiunta nella struttura purché, a posa in opera avvenuta, la qualità del calcestruzzo non sia stata in qualche modo compromessa e purché le condizioni di esposizione stimate in sede di progetto non subiscano nel tempo variazioni di rilievo.

I fattori responsabili di variazioni negative nelle proprietà locali del calcestruzzo possono avere origine:

- a) dalla complessità delle scelte architettoniche e progettuali;
- b) dall'adozione di procedure di lavorazione non adatte alla specifica applicazione o, se adatte, non attuate correttamente;
- c) dalla inefficacia del controllo di qualità;
- d) dall'impiego di materiali non idonei, negli interventi di ripristino.

Poiché quanto specificato nel presente paragrafo circa la composizione del calcestruzzo (Tab. 11) ha come scopo l'ottenimento di un materiale con ridotta permeabilità, è fondamentale per la durabilità della struttura evitare:

- a) la presenza di vuoti dovuti ad inadeguata compattazione o a non omogenea distribuzione dell'impasto nella cassaforma;
- b) la formazione di fessure da ritiro plastico;
- c) l'interruzione anticipata della stagionatura protetta;
- d) la riduzione del copriferro al di sotto del limite minimo previsto.

Ai fini della durabilità, il calcestruzzo dovrebbe avere un coefficiente di permeabilità K inferiore o uguale a $1 \cdot 10^{-11}$ m/s o una resistenza alla penetrazione di acqua secondo ISO 7031-1994 (UNI E 07.04.113.0), con valore massimo non superiore a 50 mm e valore medio non superiore a 20 mm. Quindi sono da considerare equivalenti le prescrizioni seguenti, relative all'impermeabilità di un calcestruzzo:

- coefficiente di permeabilità $K \leq 1 \cdot 10^{-11}$ m/s
- spessore medio di penetrazione dell'acqua ≤ 20 mm.

Il valore medio di penetrazione non superiore a 20 mm per il quale il materiale è ritenuto adeguatamente impermeabile non ha giustificazione fisica ma è stato dedotto sulla base di indagini sperimentali.

Come è stato detto in precedenza il controllo della permeabilità attraverso prove di penetrazione dell'acqua è giustificato soltanto nel caso di opere di particolare importanza, considerando gli oneri derivanti dagli studi di laboratorio che occorre effettuare nella fase di scelta dei rapporti di composizione e dalle verifiche della qualità del calcestruzzo in opera, attraverso il prelievo di carote.

Nella pratica ordinaria il controllo di qualità del calcestruzzo durabile è, più semplicemente, basato sulla misura della resistenza a compressione (resistenza caratteristica). Il criterio ha come riferimento la relazione permeabilità-rapporto a/c-resistenza meccanica. Al diminuire di a/c, diminuisce il volume dei pori capillari o penetrabili dalle sostanze presenti nell'ambiente di esposizione e di conseguenza diminuisce la permeabilità mentre aumenta la resistenza meccanica. Benché non vi sia una relazione lineare decrescente tra permeabilità e resistenza, tuttavia il controllo della durabilità attraverso la resistenza risulta sufficientemente affidabile.

Il grado di affidabilità è senz'altro maggiore di quello che si avrebbe qualora il controllo venisse effettuato mediante la misura del rapporto a/c, considerando che i metodi per valutare il dosaggio di acqua e di cemento in un calcestruzzo non sono semplici e soprattutto non sufficientemente precisi.

La tabella 11 mostra come quasi sempre la resistenza caratteristica per la durabilità sia piuttosto elevata, al punto da poter risultare maggiore della resistenza introdotta usualmente nel calcolo strutturale.

In tali circostanze, la classe del calcestruzzo da adottare nel progetto, va definita in base alle esigenze della durabilità, anche se in tal modo risulterà esuberante rispetto alle pure esigenze statiche.

La interruzione anticipata della stagionatura protetta ha notevoli effetti negativi sulla permeabilità perché causa una diminuzione del grado di idratazione del legante. Alle temperature ordinarie la velocità di idratazione del cemento diminuisce a valori trascurabili se la umidità relativa interna dell'impasto scende al di sotto dell'80%.

Quando la stagionatura protetta viene interrotta, e l'acqua che non ha ancora reagito è allontanata a causa dell'essiccamento subito dal calcestruzzo nell'equilibrare la sua umidità interna con quella dell'aria, la porosità dei pori penetrabili dalle sostanze contenute nell'ambiente — cioè dei pori che determinano la permeabilità, anche noti come pori capillari — risulterà piuttosto alta, indipendentemente dal basso rapporto a/c usato. Pertanto la permeabilità sarà maggiore proprio negli strati più esterni cioè nella zona della struttura alla quale è affidato il compito di rallentare la penetrazione degli agenti esterni.

Oltre ai fattori discussi, sulla durabilità della struttura influiscono il microclima ed i dettagli di progetto.

Il microclima rappresenta le condizioni di esposizione effettivamente esistenti a contatto con la superficie della struttura; esso può essere diverso dal macroclima e, con riferimento alla struttura, diverso da zona a zona. A causare diversità e variabilità concorrono i dettagli di progetto e situazioni particolari che si manifestano durante il servizio.

Pertanto natura ed entità del deterioramento nel tempo dipenderanno dalla maggiore o minore compatibilità tra microclima e qualità locale del calcestruzzo in opera.

In conclusione, tenuto conto che, allo stato attuale delle conoscenze, non è possibile sottoporre le decisioni assunte ad un'analisi del rischio, progettare in funzione di una data vita in servizio, non esclude a priori la necessità di dover effettuare interventi di manutenzione al fine di mantenere la funzionalità della costruzione.

Lo scopo che in ogni caso si raggiunge è di limitare gli effetti deleteri della penetrazione delle sostanze potenzialmente aggressive, presenti nell'ambiente di esposizione e quindi di ridurre numero, estensione e gravità degli interventi di manutenzione.

Durabilità

I processi a rischio per la durabilità di una struttura in calcestruzzo armato esposta in ambiente naturale, fatta eccezione per la reazione alcali-aggregato, sono l'attacco chimico, la corrosione dell'armatura, i cicli di gelo e disgelo.

Gli agenti aggressivi che attaccano con effetti deleteri la matrice legante del calcestruzzo sono elencati nella tabella 9, insieme al grado di attacco prodotto in base alla concentrazione.

TABELLA 9

	GRADO DI ATTACCO		
	Debole	Moderato	Forte
<i>Agente aggressivo nelle acque</i>			
pH	6,5-5,5	5,5-4,5	4,5-4,0
CO ₂ aggressiva (mg CO ₂ /l)	15-30	30-60	60-100
Ioni ammonio (mg NH ₄ ⁺ /l)	15-30	30-60	60-100
Ioni magnesio (mg MG ²⁺ /l)	100-300	300-1500	1500-3000
Ioni solfato (mg SO ₄ ²⁻ /l)	200-600	600-3000	3000-6000
<i>Agente aggressivo nel terreno</i>			
Ioni solfato (mg SO ₄ ²⁻ /kg di terreno seccato all'aria)	2000-6000	6000-12000	> 12000

La corrosione dell'acciaio nel calcestruzzo è un processo elettrochimico con un anodo dove il ferro si discioglie, un catodo dove si producono ioni OH⁻ e si consuma ossigeno gassoso ed un elettrolita per il passaggio della corrente.

Fino a quando il pH della fase liquida che permea i pori della matrice è al suo livello naturale, cioè nell'intervallo 13-13,8 e la concentrazione degli ioni cloruro, espressa come percentuale in peso sul contenuto di cemento, non supera la soglia critica, variabile da 0,2% a 0,4%, la reazione anodica è controllata da un film di ossido ferrico passivante di caratteristiche tali da costituire una efficace barriera tra metallo e liquido dei pori. Quando però l'alcalinità del liquido dei pori viene neutralizzata dalla anidride carbonica dell'aria ed il pH scende al di sotto di 11,5 o quando nella fase liquida la concentrazione dei cloruri penetrati dall'ambiente esterno supera il livello critico, il film passivante viene distrutto e può iniziare il processo di corrosione attiva.

La concentrazione in volume della anidride carbonica nell'aria è intorno a 0,03-0,04% nelle zone rurali, ma può raggiungere 0,4% in alcune aree urbane.

La penetrazione dell'anidride carbonica avviene secondo un fronte di avanzamento abbastanza distinto e nella reazione sono coinvolte tutte le fasi idrate della pasta di cemento. L'anidride carbonica reagisce come acido carbonico e perciò la reazione avviene se nei pori del calcestruzzo è presente un minimo di acqua. Considerando che in pratica, per raggiungere il fronte di carbonatazione, la anidride carbonica deve diffondersi attraverso lo spessore di impasto già carbonatato, qualora i pori siano pieni di acqua, la velocità di carbonatazione decade per la lentezza con la quale la anidride carbonica diffonde attraverso il liquido.

Gli ioni cloruro penetrano nella matrice legante dell'impasto per diffusione ed avanzano più rapidamente del fronte di carbonatazione. La penetrazione avviene sia nel calcestruzzo saturo di acqua che in quello parzialmente essiccato. I cloruri reagiscono soltanto con l'alluminato di calcio a formare cloroalluminato di calcio idrato ma la reazione è meno determinante per quanto riguarda il rallentamento della penetrazione.

In definitiva i fattori ambientali che promuovono il processo di corrosione sono la anidride carbonica e/o i cloruri; una volta che il metallo è stato depassivato, concorrono a mantenere attivo il processo l'umidità relativa dell'aria, che determina quella interna del calcestruzzo, ed il rifornimento di ossigeno indispensabile per mantenere attiva la reazione catodica.

In condizioni di clima secco, quando la resistività del calcestruzzo può superare 100.000 Ohm cm, il processo di corrosione è inibito anche in presenza di una alta concentrazione di cloruro e nonostante che la porosità priva di acqua faciliti l'ingresso dell'ossigeno.

La velocità di corrosione aumenta con l'umidità relativa interna del calcestruzzo, diventa significativa quando questa supera il 75%, raggiunge un massimo intorno al 95%, quindi decade rapidamente e diventa trascurabile a saturazione per la bassa velocità con la quale l'ossigeno si diffonde nei pori pieni di acqua o quasi.

Il comportamento descritto suggerisce che il fattore controllante della velocità di corrosione è soprattutto la resistività del calcestruzzo; sono considerati critici i valori di resistività minori di 5000-10000 Ohm cm. La velocità di corrosione aumenta con la temperatura.

Oltre al processo di corrosione, anche l'attacco da gelo-disgelo e quello chimico sono influenzati dal grado di saturazione del calcestruzzo e quindi dalle condizioni prevalenti di umidità dell'ambiente di esposizione.

Tutti i processi di deterioramento richiedono acqua; il fattore importante è lo stato di umidità nel calcestruzzo che si mantiene costante quando è stazionaria l'umidità esterna. Quando questa ultima è variabile occorre tenere presente che il calcestruzzo assume acqua dall'ambiente più rapidamente di quanto la perde e di conseguenza l'umidità media interna tende ad essere più alta dell'umidità dell'ambiente.

Il principio vale anche per le strutture in ambiente marino, nella zona del bagnasciuga, e questo significa che anche durante il periodo non bagnato il calcestruzzo continua ad essere pressoché saturo.

L'influenza dell'umidità interna del calcestruzzo sui vari tipi di processo è mostrata nella tabella 10:

TABELLA 10

U_R del calcestruzzo	Reazione di carbonatazione	Corrosione dell'acciaio nel calcestruzzo		Cicli di gelo e disgelo	Attacco chimico
		Calcestruzzo carbonatato	Calcestruzzo contaminato da cloruri		
Molto bassa < 45%	1	0	0	0	0
Bassa 45-65%	3	1	1	0	0
Media 65-85%	2	3	3	0	0
Alta 85-98%	1	2	3	2	1
Satura	0	1	1	3	3

(0 = rischio trascurabile; 1 = rischio modesto; 2 = rischio medio; 3 = rischio alto)

Le sostanze naturali più comuni che si attivano in presenza di umidità relativa del calcestruzzo sono: l'anidride carbonica necessaria per la carbonatazione, l'ossigeno necessario per la corrosione, gli ioni cloruro che promuovono la corrosione depassivando l'acciaio dell'armatura, gli acidi che sciolgono la matrice cementizia, i solfati che danno reazione espansiva con il cemento, gli alcali liberati nella idratazione del cemento che possono eventualmente reagire con alcuni tipi di aggregato.

Le misure di prevenzione che debbono essere adottate nel caso della reazione alcali-aggregato e nel caso di attacchi da parte di sostanze provenienti da ambienti non naturali (ad esempio da lavorazioni e scarichi industriali) vanno decise in relazione alla specifica situazione. Per la reazione alcali-aggregato è consigliabile consultare un esperto con competenza diretta sull'argomento.

Per il calcestruzzo, inteso come materiale, la composizione ed i componenti in grado di meglio garantire la durabilità sono stati individuati essenzialmente sulla base di ricerche di laboratorio studiando il comportamento di provini, a volte di elementi strutturali di geometria semplice e di limitate dimensioni, in ogni caso di campioni accuratamente preparati e conservati in condizioni di esposizione ben definita e controllata.

I criteri in base ai quali si definisce la durabilità del calcestruzzo fanno riferimento al tipo e al contenuto di cemento, al rapporto a/c ed allo spessore del copriferro.

Questi criteri sono comuni a tutte le normative riguardanti la durabilità: all'aumentare della intensità dell'attacco si aumenta il contenuto minimo di cemento, si riduce il rapporto a/c, si aumenta lo spessore del copriferro. Pertanto, tenuto conto che il controllo di qualità del calcestruzzo è basato sulla resistenza caratteristica a compressione, la durabilità è tanto più alta quanto maggiore è la resistenza caratteristica.

Nelle tabelle 11 e 12 sono indicate rispettivamente le prescrizioni per la durabilità riferite alla esposizione ambientale e le classi di esposizione in funzione delle condizioni ambientali.

TABELLA 11 – (Portland 32.5R, d_{max} 20-32 mm)

a/c_{max}	Contenuto minimo di cemento (kg/m^3)	Resistenza caratteristica minima N/mm^2	Classi di esposizione (Tab. 12)
0,60	280	30	XC1, XC2
0,55	300*	37	XC3, XF1, XA1, XD1
0,50	320*	37-40	XS1, XD2, XF2, XA2, XF3, XC4
0,45	350*	45	XS2, XS3, XA3, XD3, XF4

* In presenza di solfati impiegare cemento resistente ai solfati.

TABELLA 12
Classi di esposizione in funzione delle condizioni ambientali

Denominazione della classe	Descrizione dell'ambiente di esposizione	Esempi di condizioni ambientali (a titolo informativo)
<i>1 – Nessun rischio di corrosione delle armature o di attacco chimico</i>		
X0	Molto secco	Edifici con interni a umidità relativa molto bassa
<i>2 – Corrosione indotta da carbonatazione</i>		
XC1	Secco	Interni di edifici a bassa umidità relativa
XC2	Bagnato, raramente secco	Parti di strutture di contenimento liquidi; fondazioni
XC3	Umidità moderata	Edifici con interni a umidità relativa da moderata ad alta; calcestruzzo esterno riparato dalla pioggia
XC4	Ciclicamente secco e bagnato	Superfici soggette al contatto con acqua, non comprese nella classe XC2
<i>3 – Corrosione indotta dai cloruri</i>		
XD1	Umidità moderata	Superfici esposte a spruzzi diretti di acqua contenente cloruri
XD2	Bagnato, raramente secco	Piscine, calcestruzzo esposto ad acque industriali contenenti cloruri
XD3	Ciclicamente secco e bagnato	Parti di ponti, pavimentazioni, parcheggi per auto

Segue: TABELLA 12 - Classi di esposizione in funzione delle condizioni ambientali

Denominazione della classe	Descrizione dell'ambiente di esposizione	Esempi di condizioni ambientali (a titolo informativo)
<i>4 – Corrosione indotta dai cloruri dell'acqua di mare</i>		
XS1	Esposto ad atmosfera salina ma non in contatto diretto con acqua di mare	Strutture sulla costa o in prossimità di essa
XS2	Sommerso	Parti di strutture marine
XS3	Nella zona delle maree, nelle zone soggette a spruzzi	Parti di strutture marine
<i>5 – Attacco da cicli di gelo e disgelo</i>		
XF1	Grado moderato di saturazione in assenza di sali disgelanti	Superfici verticali esposte alla pioggia e al gelo
XF2	Grado moderato di saturazione in presenza di sali disgelanti	Superfici verticali di strutture stradali esposte a nebbie contenenti agenti disgelanti
XF3	Grado elevato di saturazione in assenza di sali disgelanti	Superfici orizzontali esposte alla pioggia ed al gelo
XF4	Grado elevato di saturazione in presenza di sali disgelanti	Superfici verticali od orizzontali esposte a spruzzi di acqua contenente sali disgelanti
<i>6 – Attacco chimico</i>		
XA1	Aggressività debole (secondo Tab. 9)	
XA2	Aggressività moderata (secondo Tab. 9)	
XA3	Aggressività forte (secondo Tab. 9)	
da: Draft pr EN 206: 1996 - 15, CEN/TC 104		

Quando l'ambiente è soggetto a cicli di gelo e disgelo, si prescrive, in aggiunta, l'uso di aggregati non gelivi e l'impiego di un aerante. L'introduzione di microbolle d'aria abbassa la resistenza meccanica potenziale dell'impasto ed a ciò si può ovviare modificando i rapporti di composizione, ovvero riducendo il rapporto a/c e/o aumentando il contenuto di cemento.

Per la scelta dello spessore minimo di copriferro il riferimento è la classe di esposizione del calcestruzzo (Tab. 11). Per le opere, le cui classi di esposizione richiedono un calcestruzzo di resistenza caratteristica minima variabile nell'intervallo $37 \div 40 \text{ N/mm}^2$, si raccomanda un copriferro minimo di 30 mm; per le opere, le cui classi di esposizione richiedono un calcestruzzo di resistenza caratteristica minima maggiore di 40 N/mm^2 , lo spessore minimo raccomandato è di 40 mm. Per assicurare i valori minimi indicati, il costruttore deve adottare un copriferro nominale maggiore di almeno 5 mm del valore minimo prescritto.

Per le condizioni di aggressività chimica che nella tabella 9 sono definite forti, e per le strutture in acqua di mare situate nella zona del bagnasciuga o soggette a spruzzi, si raccomanda (CEB 1995) un contenuto minimo di cemento di 370 kg/m^3 e un rapporto a/c di 0,4.

7.2 — Vita in servizio.

La vita in servizio è il tempo durante il quale le strutture e/o i materiali conservano le loro prestazioni, mantenendo il livello di sicurezza e di efficienza funzionale di progetto, per qualsiasi azione e condizione ambientale prevista, fatta salva la normale manutenzione.

In accordo ai dati della letteratura i calcestruzzi durabili specificati nella tab. 11 dovrebbero assicurare una vita in servizio di circa 40-50 anni purché la struttura sia stata costruita a regola d'arte e le condizioni di esposizione restino quelle previste in sede di progetto.

La gran parte delle informazioni al momento disponibili riguardano la vita in servizio di strutture soggette a carbonatazione (costruzioni edilizie e infrastrutturali non esposte a cicli di gelo e disgelo o all'ambiente marino) e di strutture soggette a penetrazione di cloruri (costruzioni in acqua di mare, infrastrutture stradali ed autostradali esposte all'azione del gelo nelle quali per mantenere la sede libera dal ghiaccio è fatto uso di sali disgelanti).

L'approccio seguito per stabilire la vita in servizio delle strutture soggette a carbonatazione e penetrazione dei cloruri si basa sui seguenti assunti:

- ogni fenomeno di deterioramento osservato indica incompatibilità tra qualità del calcestruzzo e condizioni locali di esposizione;
- la durabilità riferita alla corrosione dell'armatura dipende soltanto dal comportamento del calcestruzzo degli strati esterni, non dal calcestruzzo del nucleo;
- il copriferro non è una barriera che mantiene fuori dalla struttura le sostanze potenzialmente aggressive e perciò il problema non consiste nell'impedire l'ingresso delle sostanze aggressive ma di fare in modo che la qualità del copriferro, come materiale e come getto, ed il suo spessore siano tali che il tempo impiegato dalle sostanze aggressive a raggiungere l'armatura e dare inizio al processo di corrosione sia pari alla vita in servizio desiderata;
- la penetrazione delle sostanze aggressive inizia dal momento in cui la struttura è liberata dalle casseforme;
- per ogni struttura esiste un grado di deterioramento inaccettabile per la sua funzionalità. La perdita di funzionalità può riguardare la sicurezza, la destinazione d'uso o semplicemente l'estetica come nel caso degli edifici con calcestruzzo in vista.

Da questi assunti consegue:

- che il tempo impiegato perché gli effetti deleteri prodotti dalla corrosione dell'armatura raggiungano il livello di deterioramento ritenuto inaccettabile risulta suddiviso in due periodi distinti. Il primo, t_0 , è rappresentato dal tempo impiegato da CO_2 o da Cl^- a raggiungere l'armatura, cioè ad attraversare il copriferro; il secondo t_1 è il tempo occorrente perché si manifesti il danno di livello inaccettabile. Generalmente la vita in servizio desiderata è basata sulla durata di t_0 . I contributi del secondo periodo non sono presi in considerazione perché dipendenti dal microclima e soprattutto dalla risposta locale del calcestruzzo che potrebbe essere tale da accelerare la progressione del danno;
- che il deterioramento nel tempo è un evento da prendere in considerazione. Pertanto si raccomanda, in particolare per le opere infrastrutturali o per opere di una certa importanza, di attuare un programma di ispezioni sistematiche al fine di identificare e quantificare i fenomeni di degrado e decidere tempestivamente gli interventi di manutenzione mediante i quali la struttura sia riportata alle condizioni iniziali. Il grado di deterioramento difficilmente risulterà lo stesso in ogni parte della struttura. Le differenze possono essere dovute alla variabilità del microclima, agli effetti non correttamente valutati dei dettagli di progetto, alla variabilità delle proprietà del calcestruzzo, alla eventuale esistenza di parti provviste di protezioni aggiuntive.

I dati raccolti sullo stato di conservazione di strutture esposte nelle diverse condizioni ambientali hanno mostrato che i processi di penetrazione di CO_2 e Cl^- possono essere interpretati con buona approssimazione assumendo una semplice legge di diffusione. I diagrammi riportati nelle figure 8 e 9 sono il risultato dell'applicazione di modelli semplificati dei processi di penetrazione.

Nel diagramma di Fig. 8 è riportato, in funzione del rapporto a/c, del tipo di cemento e dell'ambiente di esposizione, la profondità raggiunta dalla carbonatazione dopo uno specificato numero di anni di esposizione. I contenuti di cemento (32,5 R) partono da un minimo di 280 kg/m³.

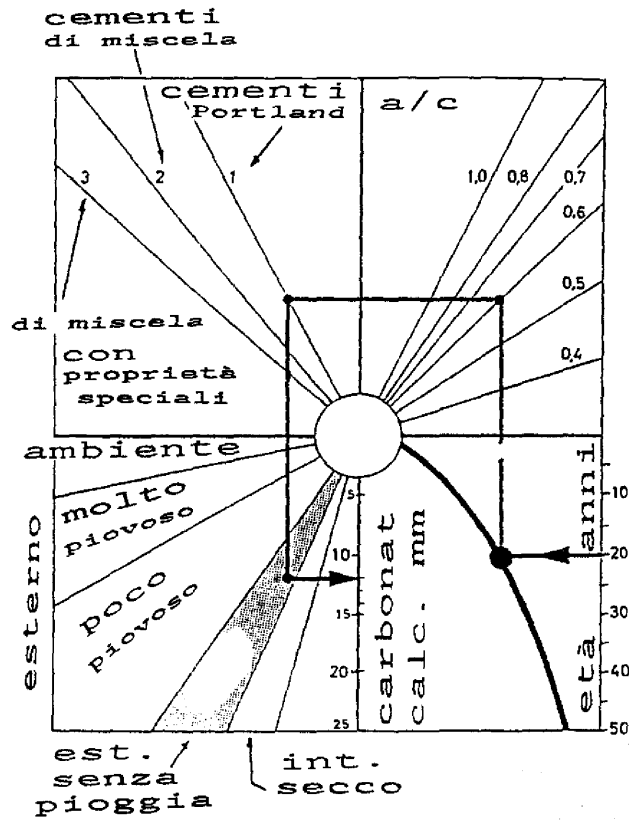


Figura 8 – (cfr. ACI Sp. 100, 1987 Concrete durability Vol. I)

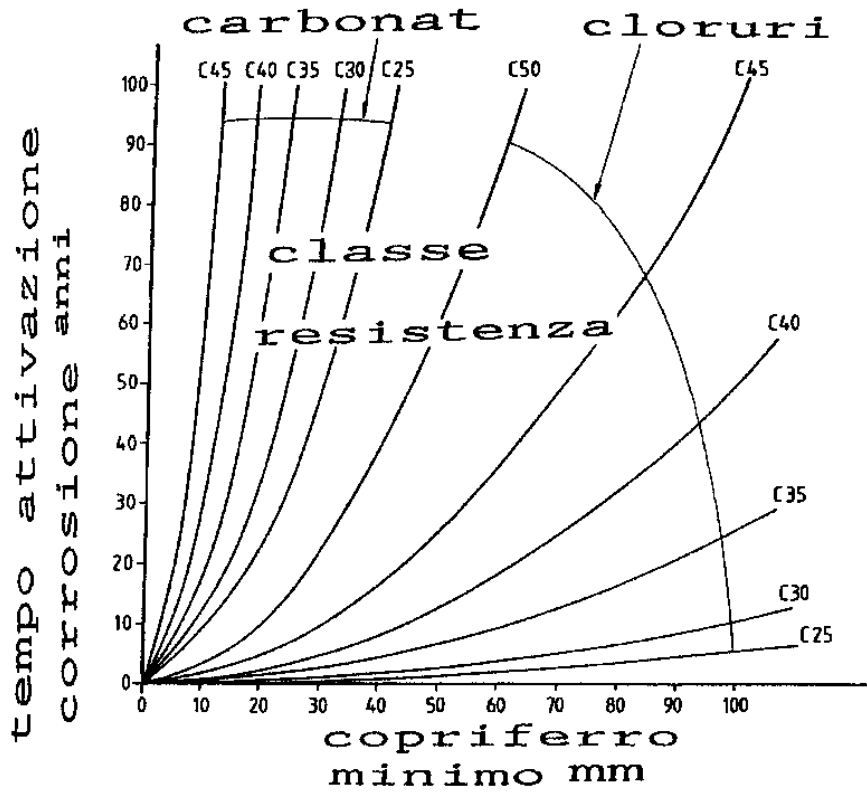


Figura 9 – (cfr. Institution of Civil Eng., 1986 Improvement of concrete durability)

Il diagramma di figura 9 indica gli anni di vita in servizio in funzione della classe di resistenza e per un dato spessore del copriferro. Per i cloruri è stato assunto un livello critico di 0.4% sul peso di cemento. Per limitare la velocità di penetrazione dei cloruri occorre utilizzare calcestruzzi di elevata classe di resistenza, e ciò significa usare bassi rapporti a/c, superfluidificante, cemento preferibilmente del tipo 42,5 R, contenuti di cemento ben al di sopra di 300 kg/m³. Un contenuto alto di cemento abbassa la velocità di penetrazione in primo luogo perché dà al calcestruzzo una elevata capacità di combinazione nei confronti della sostanza aggressiva, in secondo luogo perché produce un aumento del volume di matrice cementizia, diminuendo proporzionalmente l'estensione dell'interfaccia aggregato-matrice, che è notoriamente l'anello «debole» della catena resistente.

Sulla base delle considerazioni precedenti risulta che una maggiorazione dello spessore del copriferro non potrà compensare né la maggiorazione del rapporto a/c, né la rinuncia ad un elevato contenuto di cemento.

8. — Il calcestruzzo ad alte prestazioni e ad alta resistenza

Le attuali norme tecniche (D.M.9.1.96) stabiliscono che nei calcoli statici non può essere considerata una $R_{ck} > 55 \text{ N/mm}^2$.

Peraltro, sulla base delle disposizioni di cui al punto 5 della Parte Generale, dei punti 1 e 2 della Sezione I del citato Decreto, l'impiego dei calcestruzzi strutturali aventi resistenza caratteristica cubica $55 \text{ N/mm}^2 < R_{ck} \leq 75 \text{ N/mm}^2$ (calcestruzzi ad alte prestazioni - A.P.) potrà essere ammesso, previo esame e valutazione del Consiglio Superiore LL.PP., al quale dovranno essere sottoposte, caso per caso, le documentazioni di progetto.

Per la definizione delle caratteristiche fisico-meccaniche di tali calcestruzzi, in linea orientativa può farsi riferimento alle norme tecniche, valide per i calcestruzzi aventi resistenza caratteristica $R_{ck} \leq 55 \text{ N/mm}^2$, e possono applicarsi le indicazioni contenute nel successivo paragrafo 8.3.

Per calcestruzzi aventi resistenza caratteristica $R_{ck} > 75 \text{ N/mm}^2$ (calcestruzzi ad alta resistenza - A.R.), la documentazione di progetto, da presentare al Consiglio Superiore LL.PP., dovrà comprendere la modellazione del materiale, operata sulla base di specifica documentazione teorica e sperimentale, nonché una adeguata giustificazione delle regole di calcolo adottate.

L'impiego del calcestruzzo in strutture complesse, o fortemente caricate, o di grandi dimensioni, od esposte a condizioni ambientali estreme, ha condotto all'introduzione selettiva di calcestruzzi «ad alte prestazioni», che sono caratterizzati da:

- elevata resistenza, velocità di indurimento e lavorabilità;
- contenute deformazioni da ritiro e viscosità;
- grande compattezza, con positivi risvolti per la durabilità.

È ormai prassi corrente indicare in 50 N/mm^2 la soglia delle «alte prestazioni» ($f_{ck} \geq 50 \text{ N/mm}^2$; $R_{ck} \geq 60 \text{ N/mm}^2$), mentre per calcestruzzi di classe superiore (oltre C60/75 e fino a C100/115) si parla di «alta resistenza». In particolare, fino alla classe C60/75 sono ritenuti ancora validi i modelli di calcolo e i risultati sperimentali frutto dell'estesa ricerca svolta nel passato sui calcestruzzi ordinari.

Come riportato nel paragrafo 6.2.1, il calcestruzzo ad alta resistenza considerato in queste linee guida, comprende le classi superiori a C60/75 e fino a C100/115, con i numeri di classe a rappresentare la resistenza caratteristica a compressione dopo 28 giorni di maturazione umida. Il primo numero è riferito alla resistenza di provini cilindrici di diametro 150 mm e altezza 300 mm, il secondo alla resistenza di provini cubici di lato 150 mm.

Quando i provini sono di dimensioni diverse da quelle indicate si possono usare i fattori di conversione suggeriti nel paragrafo 6.2.5 che rappresentano una accettabile approssimazione.

Per il confezionamento, la maturazione e la rottura dei provini si adottano i metodi normalizzati in uso per il calcestruzzo ordinario o convenzionale con l'avvertenza di impiegare soltanto casseforme metalliche.

Rispetto a quanto avviene con i provini di calcestruzzo convenzionale, i risultati delle misure sono molto sensibili alle modalità di prova. Si raccomanda perciò che le modalità stabilite dalle norme siano rigorosamente osservate e perché sia possibile raggiungere lo standard richiesto è necessario:

- a) che i tecnici di laboratorio abbiano una documentata esperienza nel settore dei calcestruzzi A.P. ed A.R.;

b) che il laboratorio destinato a qualificare gli impasti di prova ed a certificare il calcestruzzo fornito in cantiere sia dotato di apparecchiature di adeguato livello tecnico e soprattutto di accertata funzionalità.

Per una corretta utilizzazione dei calcestruzzi A.P. ed A.R. occorre compilare un piano di assicurazione della qualità nel quale debbono essere elencate in dettaglio le caratteristiche dell'impasto fresco e di quello indurito da controllare, le modalità e la frequenza dei controlli, i valori limite da rispettare, il laboratorio responsabile delle prove. È inoltre indispensabile che nel piano di assicurazione della qualità siano definiti i provvedimenti da adottare nel caso di deviazioni dai valori limite e siano indicati i responsabili destinati a prendere le decisioni finali.

Il metodo di proporzionamento dei calcestruzzi A.P. ed A.R. non differisce sostanzialmente da quello in uso per il calcestruzzo ordinario. Poiché allo stato attuale delle conoscenze non è possibile basare la progettazione degli impasti sulle caratteristiche dei materiali componenti, i rapporti di composizione sono scelti sulla base della lavorabilità, della durabilità, della resistenza ad una data stagionatura e della economia.

Lo studio degli impasti di prova richiede un notevole lavoro di laboratorio e la determinazione dei rapporti ottimali è più difficoltoso che per il calcestruzzo ordinario. In particolare si deve controllare con molta cura la compatibilità tra cemento e additivi e l'operazione risulta alquanto complessa quando si impiega una combinazione di additivi con diversa funzionalità.

8.1 — *Materiali componenti.*

La composizione del calcestruzzo di resistenza $R_{ck} > 55 \text{ N/mm}^2$ è tipicamente caratterizzata dall'uso:

- 1) di cementi delle classi 42,5 R e 52,5 R, in dosaggio piuttosto elevato;
- 2) di rapporti a/c generalmente $\leq 0,35$;
- 3) di superfluidificanti ed eventualmente di altri additivi;
- 4) di aggiunte minerali (ceneri volanti, loppe granulate d'altoforno, fumo di silice).

8.1.1 — *Cementi.*

I fattori che agiscono sulla resistenza iniziale e su quella finale di un cemento sono la composizione del clinker e la finezza di macinazione. Fattore importante di composizione è il rapporto tra silicato tricalcico (C_3S) e silicato bicalcico (C_2S), il primo si idrata più rapidamente, sviluppando una notevole quantità di calore, il secondo più lentamente. Perciò un clinker a maggior contenuto di C_3S permette un rapido guadagno di resistenza mentre uno che contiene una sostanziale quantità di C_2S sviluppa resistenza meno velocemente ma raggiunge resistenze finali altrettanto soddisfacenti.

Finezza di macinazione significa maggiore superficie specifica e quindi maggiore velocità di idratazione. Di conseguenza il fattore finezza influisce in particolare sullo sviluppo della resistenza iniziale.

È generalmente desiderabile usare la quantità di cemento minima indispensabile per raggiungere la resistenza desiderata.

Il criterio è valido, oltre che per evidenti motivi economici, soprattutto per limitare la quantità di calore liberata nel corso della idratazione, per controllare il ritiro e quindi la fessurazione indotta dal ritiro.

Per una data resistenza, il contenuto ottimale di cemento è condizionato dalle caratteristiche della sabbia e dell'aggregato grosso. Tuttavia un eccesso di cemento può rendere necessaria una tale quantità d'acqua da portare ad un calo della resistenza finale.

8.1.2 — *Rapporto a/c.*

I rapporti a/c cadono in generale nell'intervallo 0,35-0,22; la soglia 0,35 per il rapporto a/c corrisponde al valore per il quale il sistema dei pori capillari diventa discontinuo dopo un giorno circa di stagionatura umida. Il conseguimento dopo poche ore di stagionatura della discontinuità capillare assicura che le strutture che abbiano subito un ciclo di stagionatura protetta di durata conforme a quella suggerita dalle norme possiedano, all'atto della sformatura, soddisfacenti caratteristiche di durabilità. La bassa e discontinua porosità capillare assicura che la velocità di penetrazione delle sostanze contenute nell'ambiente di esposizione sia notevolmente lenta.

8.1.3 — Additivi.

Per ottenere la lavorabilità richiesta ai bassi rapporti a/c prescritti è indispensabile ricorrere all'impiego di superfluidificanti la cui attività deve essere tanto maggiore quanto minore è il rapporto a/c. Insieme ai superfluidificanti si usano spesso ritardanti per ritardare la perdita di lavorabilità dell'impasto, aeranti quando la struttura è esposta a cicli di gelo e disgelo, e a volte inibitori della corrosione dell'armatura.

A causa dell'alto contenuto di cemento, gli impasti A.P. ed A.R. tendono ad irrigidire piuttosto rapidamente, indipendentemente dalla temperatura più o meno moderata dell'ambiente. Con il ritardante si posticipa l'inizio dello stadio nel quale il processo di idratazione diventa rapido provocando l'irrigidimento della massa. Tuttavia tali impasti ritardati hanno una maggiore tendenza al ritiro plastico: l'alto contenuto di cemento è fattore di riduzione dell'essudazione superficiale e, se l'indurimento è ritardato, maggiore è il tempo disponibile per lo sviluppo della fessurazione da ritiro plastico.

Il rischio di fessurazione è concreto nel getto di strutture costituite da elementi con estese superfici a sviluppo orizzontale, in particolare nel getto di lastre e di pavimentazioni. Si consiglia in questi casi di impiegare, immediatamente dopo il getto, composti stagionanti che formino sulla superficie del calcestruzzo una membrana protettiva. Con la riduzione della perdita di umidità dalla superficie esposta dell'impasto, il rischio di fessurazione diventa molto piccolo.

Gli aspetti della durabilità al gelo dei calcestruzzi A.R. non sono completamente definiti. Nei calcestruzzi convenzionali, gli aeranti migliorano la resistenza al gelo in dipendenza dalla dimensione delle bolle di aria introdotte, dalla distanza tra le bolle e dalla permeabilità dell'impasto indurito. Sulla velocità di deterioramento agiscono il contenuto di umidità dell'impasto nel momento in cui si raggiunge la temperatura di gelo, il numero dei cicli e la velocità di gelo e disgelo, la presenza di sali disgelanti nell'ambiente di esposizione e di gradienti di concentrazione salina nel materiale.

Nel calcestruzzo A.R., forse a causa della presenza di altri additivi o per altri motivi ancora non chiariti, le bolle di aria introdotte con l'aerante assumono dimensioni maggiori e quindi, a parità di contenuto di aria, la mutua distanza è maggiore di quella raccomandata per la resistenza al gelo dei calcestruzzi ordinari.

D'altra parte non è stato ancora stabilito se i calcestruzzi A.R. richiedano per la resistenza ai cicli di gelo e disgelo un sistema di bolle d'aria avente le stesse caratteristiche di quello richiesto per i calcestruzzi ordinari. Si deve considerare che la durabilità al gelo è anche funzione della distribuzione dimensionale dei pori della pasta di cemento. Poiché la temperatura di gelo dell'acqua contenuta nei pori si abbassa al diminuire della dimensione dei pori e alle dimensioni tipiche dei pori dei calcestruzzi A.R. è probabile che le più basse temperature ambientali non siano sufficienti per la solidificazione dell'acqua in essi contenuta. Inoltre, a causa della ridotta permeabilità del calcestruzzo è molto poco probabile che il contenuto di acqua al momento del gelo raggiunga il grado di saturazione richiesto perché l'aumento di volume associato al passaggio di stato liquido-solido dia luogo a fenomeni pericolosi. È realistico supporre che le strutture in calcestruzzo A.R. con rapporto a/c uguale o inferiore a 0,3 non raggiungano mai la saturazione critica purché correttamente poste in opera.

Allo stato attuale dell'esperienza, l'impiego di aeranti è richiesto per i calcestruzzi di resistenza non superiore a 70 N/mm^2 .

Tuttavia, tenuto conto di quanto è stato appena riportato, è prudente inserire tra le prove di qualificazione del materiale la resistenza ai cicli di gelo e disgelo anche quando la classe di resistenza del calcestruzzo è maggiore del limite suindicato ed anche se le temperature di esposizione raggiunte nei mesi invernali non sono eccessivamente al di sotto dello zero.

Attualmente l'inibitore di corrosione, di cui si favorisce l'impiego in relazione ai buoni risultati di laboratorio e all'andamento positivo osservato nelle prime applicazioni pratiche, è il nitrito di calcio.

Tale composto però è anche un accelerante dell'indurimento e nella quantità che occorre impiegare per inibire la corrosione l'azione accelerante è molto intensa. Pertanto se le condizioni della posa in opera non si conciliano con la lavorabilità richiesta all'impasto, la soluzione di nitrito di calcio dovrebbe essere aggiunta a piè d'opera.

Occorre però tener presente che il volume di soluzione da usare, circa 25 l per m³ d'impasto, è una frazione significativa dell'acqua necessaria per l'impasto, ed è perciò molto probabile che prima dell'aggiunta di tale acqua la lavorabilità durante la miscelazione nella betoniera, risulti difficoltosa. Il problema viene superato con l'impiego di ritardanti o con l'aggiunta di una maggiore quantità di superfluidificante. L'allungamento dei tempi di indurimento controbilancia l'effetto accelerante del nitrito.

Nella tecnologia del calcestruzzo A.P. ed A.R. la pratica del ridosaggio di superfluidificante a piè d'opera, allo scopo di compensare la perdita di lavorabilità è piuttosto comune.

Quando gli additivi includono anche l'aerante per la durabilità ai cicli di gelo e disgelo, si raccomanda di controllare l'effetto del dosaggio aggiuntivo di superfluidificante sul contenuto di aria. Tale effetto varia in modo notevole con il tipo di impasto e con la natura dei componenti.

8.1.4 — *Aggiunte minerali.*

Le aggiunte minerali sono spesso critiche per le prestazioni dei calcestruzzi A.P. ed A.R. e sono usate o per migliorare le caratteristiche di resistenza meccanica o per migliorare la durabilità.

La grande maggioranza dei dati della letteratura riguarda l'impiego di ceneri volanti, di loppa granulata d'altoforno e di fumo di silice.

Quest'ultimo è un sottoprodotto della fabbricazione del silicio metallico e delle leghe ferro-silicio, costituito da silice amorfa (85-98%) in particelle sferiche, di 1-2 ordini di grandezza inferiori a quelle dei granuli anidri di cemento.

Le ceneri volanti e la loppa granulata rallentano lo sviluppo iniziale della resistenza ma contribuiscono al guadagno di resistenza finale. Entro certi limiti, il rallentamento iniziale può essere compensato aumentando la finezza di macinazione e agendo sulle condizioni di stagionatura. Con la loppa granulata d'altoforno l'effetto negativo sulla resistenza iniziale è importante quando il contenuto di aggiunta è elevato e la temperatura di stagionatura è relativamente modesta.

Sostituendo una parte del cemento con fumo di silice si ottiene un miglioramento della resistenza a tutte le stagionature con un notevole incremento della resistenza finale e perciò l'impiego del fumo di silice permette di evitare dosaggi troppo alti di cemento. Il mezzo più semplice per ottenere un calcestruzzo con resistenza superiore ad 80 N/mm² e lavorabilità adeguata è l'aggiunta di fumo di silice.

All'azione positiva del fumo di silice sulla resistenza concorrono, oltre alla spiccata reattività del materiale nei confronti dell'idrossido di calcio, reattività nettamente superiore a quella delle altre aggiunte citate, anche effetti di natura essenzialmente fisica ricollegabili alle dimensioni submicroniche delle particelle.

Nella fase iniziale le particelle di fumo di silice accelerano il processo di idratazione del cemento perché agiscono come centri di nucleazione per gli idrati in via di formazione e di conseguenza la resistenza ad un giorno è maggiore che in assenza di aggiunta. Ai fini del contributo sulla resistenza finale è considerato importante l'effetto densificante o di riempimento (effetto «filler»): le particelle di fumo di silice a causa delle piccole dimensioni possono inserirsi nei vuoti esistenti tra le particelle del cemento cosicché il prodotto della reazione silice amorfa-idrossido di calcio può rendere molto compatta la matrice legante. Questo riduce sensibilmente la permeabilità e a livello dell'interfaccia pasta-aggregato si traduce in un netto miglioramento della forza legante, se non altro per la diminuzione di prodotti indesiderati (idrossido di calcio ed ettringite) nella zona di transizione.

Le ceneri volanti e le loppe granulate migliorano la durabilità all'attacco solfatico, hanno un ruolo nella riduzione della reazione alcali/aggregato, riducono il calore sviluppato nel corso del processo di idratazione e determinano una diminuzione di permeabilità.

Con le ceneri volanti l'acqua richiesta per una data lavorabilità risulta minore. Ai fini dell'attività pozzolanica, la composizione della cenere volante deve essere di natura silico-alluminosa, con basso contenuto di ossidi basici (CaO).

I calcestruzzi con ceneri volanti hanno buona durabilità ai cicli di gelo e disgelo se nell'impasto fresco si può realizzare e mantenere un sistema di bolle con le dimensioni e la distanza richieste. Questo obiettivo può essere raggiunto, con le normali quantità di aerante, soltanto nel caso in cui il contenuto di carbonio della cenere volante sia uguale o inferiore al valore fissato dalla norma europea di accettazione UNI-EN 450.

Le ceneri volanti e le loppe granulate di altoforno debbono essere usate soltanto con cemento Portland e non debbono mai essere aggiunte ad un cemento di miscela. Il divieto non riguarda il fumo di silice che di frequente è usato in combinazione con cemento Portland e con cenere volante.

Il fumo di silice, in accordo alla elevata superficie specifica, di 50 volte circa superiore a quella del cemento, possiede una spiccata azione pozzolanica e perciò migliora notevolmente la durabilità del calcestruzzo alla gran parte degli attacchi chimici. Particolarmente efficace è l'azione sulla permeabilità, che risulta decisamente minore rispetto a quella di un calcestruzzo con la stessa resistenza a compressione, non contenente fumo di silice. Anche supponendo che la porosità totale rimanga pressoché invariata, il cemento con fumo di silice dà luogo, idratandosi, ad una pasta con pori più dispersi e quindi di dimensioni minori.

Per il significativo affinamento dei pori ed il basso rapporto a/c, i calcestruzzi con fumo di silice potrebbero essere resistenti al gelo senza il ricorso all'impiego di aeranti o con un sistema di bolle di caratteristiche diverse da quelle dei calcestruzzi convenzionali. In attesa che gli studi di laboratorio ed i risultati delle indagini sperimentali diano le risposte definitive, è raccomandabile che le prove di qualificazione del calcestruzzo prevedano il controllo della resistenza al gelo.

Il contenuto di fumo di silice è generalmente limitato nell'intervallo 5-10%, percentuale in peso riferita al totale cemento più aggiunte. La effettuazione delle prove per stabilire la proporzione ottimale è una necessità sia per il costo unitario del materiale, di più volte superiore a quello del cemento, sia per la messa a punto della lavorabilità desiderata che richiede un'attenta scelta del contenuto di supefluidificante, eventualmente in combinazione con altri additivi. Si raccomanda che l'abbassamento al cono (slump) del calcestruzzo con fumo di silice sia di 20-25 mm maggiore di quello che sarebbe richiesto nel caso di un calcestruzzo di pari lavorabilità ma privo dell'aggiunta minerale.

Il rischio di fessurazione da ritiro plastico è maggiore in presenza di fumo di silice perché la presenza di un materiale di alta superficie specifica come il fumo di silice causa la diminuzione ulteriore dell'essudazione che per i calcestruzzi A.P. ed A.R. è già piuttosto bassa.

La stagionatura dei calcestruzzi con fumo di silice deve essere condotta con molta attenzione: una essiccazione prematura causa perdite di resistenza maggiori rispetto a quanto potrebbe avvenire con un calcestruzzo di pari rapporto a/c, non contenente fumo di silice.

I dati della letteratura suggeriscono che per i calcestruzzi A.R. di rapporto a/c intorno a 0,3 e contenenti fumo di silice il prolungamento della stagionatura umida oltre 7 gg non ha effetti significativi sul guadagno di resistenza perché l'impasto indurito è diventato impervio all'acqua. Lo stesso non avviene che molto dopo con i calcestruzzi contenenti aggiunte meno reattive del fumo di silice.

8.1.5 — *Aggregato.*

L'aggregato ha un ruolo chiave nella produzione del calcestruzzo A.R. perché limita la resistenza potenziale ottenibile. Non si conoscono né i meccanismi attraverso i quali si manifesta l'azione limitante né le proprietà fisiche e chimiche del materiale effettivamente coinvolte. Comunque gli aggregati ordinari di buone caratteristiche permettono di raggiungere resistenze fino a 120-140 N/mm². Soltanto con alcuni tipi di aggregato è possibile raggiungere resistenze finali di 170 N/mm².

È opinione accettata che fattore determinante sia la forza del legame che si stabilisce all'interfaccia tra l'aggregato e la pasta e non la resistenza meccanica della roccia che, salvo qualche eccezione, risulta generalmente adeguata. La forza del legame d'interfaccia è in relazione con la mineralogia e la tessitura superficiale della roccia e con la composizione della pasta.

Una indicazione circa la natura del legame di interfaccia può essere ottenuta dalla curva sforzo-deformazione del calcestruzzo, eseguendo una prova di carico e scarico entro l'intervallo elastico. La estensione dei cicli isteretici dipende dalle caratteristiche meccaniche della roccia e dal legame d'interfaccia: se la resistenza meccanica della roccia è entro i limiti normali di accettazione, la maggiore o minore estensione della isteresi è indicativa di una forza di legame più debole o più forte.

Dai dati della letteratura risulta che per ottenere la resistenza ottimale occorre impiegare preferibilmente aggregati con dimensione massima, nominale, piuttosto bassa, fino a 10-12 mm perché diminuisce in tal modo la tensione media all'interfaccia essendo maggiore l'area superficiale dell'aggregato, per unità di volume. Occorre poi sottolineare che nei calcestruzzi A.R. le concentrazioni tensionali all'interfaccia sono più basse perché minore è la differenza tra i moduli elastici dell'aggregato e della pasta.

Tuttavia la riduzione della dimensione massima nominale comporta un aumento del contenuto ottimale di cemento e ha inoltre un effetto negativo sulla resistenza a trazione indiretta per flessione.

Anche se la tendenza è verso la scelta di dimensioni massime nominali inferiori a 20 mm, non mancano casi in cui sono stati usati con successo aggregati fino a 19-25 mm.

Come per i calcestruzzi convenzionali, l'aggregato, oltre a influire sulla resistenza meccanica, è determinante ai fini del modulo elastico, del ritiro, della viscosità (creep) e, nel caso delle pavimentazioni, anche della resistenza all'abrasione.

La sabbia ha influenza sull'acqua necessaria, sul contenuto di aggregato grosso, e sulle caratteristiche di finitura. È preferibile che la sua granulometria sia spostata sul grossolano al fine di ridurre l'adesività dell'impasto, generalmente elevato a causa dell'alto contenuto di pasta di cemento. Di conseguenza la quantità di fino inferiore a 0,25 mm deve essere mantenuta bassa.

Mentre per la sabbia si preferiscono materiali costituiti da particelle arrotondate e con superficie liscia cioè materiali che richiedono meno acqua, per l'aggregato grosso la preferenza è data al pietrisco, con tessitura superficiale rugosa cioè a materiali che assicurano un migliore legame d'interfaccia.

D'altra parte un pietrisco di elevata angolarità, potrebbe avere un effetto negativo sulla lavorabilità, aumentare l'acqua necessaria e quindi causare un aumento del rapporto a/c che, a sua volta condurrebbe ad una riduzione della resistenza del legame di interfaccia.

Pertanto la scelta tra pietrisco e ghiaia è un problema di ottimizzazione.

Per evitare la segregazione dell'aggregato grosso durante la posa in opera, è preferibile usare una granulometria continua.

I requisiti di accettazione della sabbia e dell'aggregato grosso debbono essere conformi a quanto riportato nella norma UNI 8520/1^a.

8.2 — *Lavorabilità.*

Poiché l'uso strutturale del calcestruzzo ad alta resistenza è solitamente accompagnato da una elevata densità di armatura, per assicurare un'appropriata posa in opera è necessario che il calcestruzzo sia altamente lavorabile. È usuale specificare valori di abbassamento al cono superiori a 200 mm.

La lavorabilità ottenuta con alti dosaggi di superfluidificante è a volte inferiore a quella risultante da contenuti di acqua elevati, in quanto l'impasto tende ad essere alquanto tenace, e quindi occorre in tali casi un più prolungato assestamento.

Il superfluidificante influisce sulla velocità di decadimento della lavorabilità. Per avere la lavorabilità desiderata al momento del getto è frequente il ricorso ad un ulteriore dosaggio di superfluidificante a piè d'opera.

8.3 — *Proprietà meccaniche del calcestruzzo ad alte prestazioni e ad alta resistenza.*

8.3.1 — *Resistenza a compressione.*

I metodi di previsione delle proprietà fondamentali del calcestruzzo si riferiscono a materiali di resistenza cilindrica inferiore a 45 N/mm².

Per i calcestruzzi A.P. ed A.R. i rapporti tra la resistenza sviluppata a 7 giorni e quella sviluppata a 28 giorni variano da 0.8 a 0.9, mentre per il calcestruzzo ordinario, variano da 0.7 a 0.75; i rapporti tipici tra le resistenze a 7 e 95 giorni, per il calcestruzzo A.R., sono pari a circa 0.73, e per il calcestruzzo di media resistenza sono 0.65.

È plausibile ritenere che la più alta velocità di sviluppo della resistenza per i calcestruzzi ad A.P. ed A.R. sia dovuto in primo luogo alla maggiore temperatura interna, dovuta al maggiore calore di idratazione, ed in secondo luogo alla minore distanza tra le particelle di cemento, in quanto più basso è il rapporto a/c.

Il guadagno di resistenza dopo 28 giorni, per i calcestruzzi ad A.P. ed A.R., è generalmente inferiore rispetto a quello osservato per il calcestruzzo ordinario essenzialmente a causa della mancanza di una sufficiente quantità di acqua per il proseguimento dell'idratazione.

Per i calcestruzzi contenenti fumo di silice, il guadagno di resistenza, dopo 28 giorni, è inferiore rispetto a quello di un calcestruzzo avente lo stesso rapporto a/c, ma privo di fumo di silice.

8.3.2 — Curve tensione-deformazione.

Le principali differenze tra le curve tensione-deformazione in compressione dei calcestruzzi con $R_{ck} > 55 \text{ N/mm}^2$, ed in particolare per i calcestruzzi con $R_{ck} > 75 \text{ N/mm}^2$, e di quelli ordinari sono:

- maggiore linearità nel tratto ascendente della curva;
- deformazione leggermente maggiore alla tensione massima;
- maggiore ripidità del tratto discendente, indice di un comportamento più fragile.

La risposta più lineare fino alla tensione massima è conseguenza del migliorato legame di interfaccia pasta-aggregato; la maggiore linearità del tratto iniziale è indicativa del fatto che a bassi livelli di carico vi è una minore microfessurazione nell'interfaccia.

Essendo poi nei calcestruzzi A.P. ed A.R. minore la differenza di rigidità fra pasta di cemento ed aggregato, ne segue che la distribuzione interna delle tensioni risulta essere più omogenea, quindi con minori concentrazioni tensionali, e minore microfessurazione.

In tema di curva tensione-deformazione, occorre sottolineare che nel ramo discendente la deformazione misurata è una «deformazione media», cui dà il massimo contributo la progressiva apertura e localizzazione del processo fessurativo, al punto che nel ramo discendente è più corretto parlare di curva tensione-apertura di fessura.

L'area sottesa dal ramo discendente rappresenta l'energia di frattura del materiale, cioè (a meno del segno) il lavoro necessario per far propagare di una quantità unitaria la superficie di una fessura dovuta a trazione.

I calcestruzzi A.P. ed A.R. sono meno tenaci (cioè perdono più rapidamente resistenza all'aumentare della deformazione, nel ramo discendente) e le loro strutture (se prive di armatura) sono meno duttili, ovvero meno deformabili.

L'energia di frattura è un parametro del materiale, fortemente legato alla resistenza a trazione ed alla dimensione massima dell'aggregato, utile nella modellazione del comportamento in trazione del calcestruzzo (fase fessurata).

La presenza del fumo di silice riduce drasticamente l'energia di frattura (che passa da 100-200 J/m^2 , a 50-100 J/m^2).

8.3.3 — Resistenza alla trazione.

La resistenza alla trazione diretta (f_{ct}) tende a ridursi a valori prossimi al 5% della resistenza a compressione su cilindro (f_c).

Per la valutazione della resistenza a trazione diretta in funzione della resistenza a compressione, vale ancora la relazione già proposta ed accettata per i calcestruzzi ordinari:

$$f_{ct} = 0,3 (f_{ck})^{2/3} = 0,27 R_{ck}^{2/3} (\text{N/mm}^2)$$

ove f_{ct} è da intendere come resistenza media. La resistenza caratteristica è valutabile in $0,9 f_{ct}$.

Per la valutazione della resistenza a trazione indiretta per spacco (prova brasiliana) le norme DIN (1992) indicano la seguente relazione, valida per tutti i calcestruzzi con $f_{ck} = 35 \div 115 \text{ N/mm}^2$:

$$f_{ct,sp} = 0,59 f_c^{0,5} (\text{N/mm}^2)$$

ove f_c è misurata su cilindri con $d = 150 \text{ mm}$ ed $h = 300 \text{ mm}$. Peraltro, valutazione analoga si ottiene con la relazione indicata nel MC90 del CEB:

$$f_{ct,sp} = 1,11 f_{ct} = 0,33 f_c^{2/3} (\text{N/mm}^2)$$

La resistenza a trazione indiretta per flessione (prova su tre punti) è circa 1.4-1.6 volte la resistenza a trazione diretta; in particolare secondo il MC90:

$$f_{ct,fl} = 1,50 f_{ct} = 0,40 f_c^{2/3} (\text{N/mm}^2)$$

Occorre osservare che essendo l'effetto delle dimensioni del provino molto forte nella prova indiretta a flessione, i provini-campione vanno rigorosamente preparati in accordo con la norma UNI6130.

8.3.4 — Modulo di elasticità.

Il modulo di elasticità è strettamente correlato alle proprietà della pasta di cemento ed a quelle dell'aggregato; inoltre, poiché gli impasti di calcestruzzi con $R_{ck} > 55 \text{ N/mm}^2$ contengono additivi chimici e spesso aggiunte pozzolaniche, oltre ad essere caratterizzati da un basso rapporto a/c, e contenere particolari tipi di aggregato, gli effetti sul modulo di elasticità possono essere notevoli.

Tuttavia, con gli usuali aggregati disponibili in Italia, continua a valere per il modulo elastico istantaneo secante ($\sigma_c \leq 0,5 f_c$) la stessa espressione già largamente adottata per i calcestruzzi ordinari (MC90, EC2):

$$E_c = 9500 f_c^{2/3} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

cui corrisponde il seguente valore tangente all'origine:

$$E_{co} = 1,2 E_c \approx 11000 f_c^{1/3} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

con f_c si intende la resistenza media a compressione.

Il modulo di Poisson dei calcestruzzi A.P. ed A.R. in campo elastico, può variare tra 0.18 e 0.24 in funzione del livello di resistenza.

Sulla base di questi valori, il modulo di Poisson è confrontabile con i valori che si ottengono per il calcestruzzo ordinario.

8.3.5 — Ritiro.

È opinione comune che per i calcestruzzi con resistenza a compressione fino a 80-85 N/mm², la velocità iniziale di ritiro sia maggiore, mentre, dopo i primi tre mesi, il ritiro per i calcestruzzi a bassa ed alta resistenza è all'incirca lo stesso.

Infatti, a causa del relativamente elevato contenuto di cemento e della relativamente bassa quantità di acqua, nei calcestruzzi ad alta resistenza tende a prevalere il ritiro «endogeno» (auto-essiccazione dovuta alla combinazione dell'acqua negli idrati) rispetto al ritiro da «essiccazione» (scambio di acqua con l'ambiente di esposizione), ed il primo fenomeno è più veloce del secondo, che essendo di natura diffusiva è più lento. Tuttavia la presenza del fumo di silice tende ad accelerare anche il ritiro da essiccazione.

Il prevalere dell'autoessiccazione spiega anche perché il ritiro tenda ad essere approssimativamente proporzionale al volume percentuale d'acqua, piuttosto che al rapporto a/c e perché sia più conveniente ridurre il rapporto a/c grazie all'impiego di superfluidificanti, piuttosto che aumentando il contenuto di cemento.

8.3.6 — Scorrimento viscoso.

Lo scorrimento viscoso, inteso come deformazione differita nel tempo sotto carico costante, risulta minore che nei calcestruzzi ordinari. In particolare, il coefficiente di viscosità (rapporto fra deformazione viscosa e deformazione elastica iniziale) risulta circa del 25-50% inferiore in provini non sigillati.

Inoltre il coefficiente di viscosità si mantiene costante (viscoelasticità lineare) fino a percentuali più elevate della resistenza a compressione ($\sigma_c \leq 0,7 f_c$ per calcestruzzi A.R.; $\sigma_c \leq 0,5 f_c$ per calcestruzzi ordinari).

Le minori deformazioni viscosse osservate si possono spiegare:

- con l'indurimento accelerato (dovuto al fumo di silice), che riduce la viscosità «propria» o «di base» (cioè in assenza di scambi di umidità con l'ambiente di esposizione) anche se la messa in carico è precoce;
- con la pressoché nulla viscosità «da essiccazione».

Per la viscosità (creep) a trazione esistono dati limitati. Le prove al 35% della resistenza mostrano che la deformazione viscosa aumenta al crescere di a/c e al diminuire del rapporto aggregato/cemento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ACI Sp. 65, 1980 *Performance of concrete in marine environment*
- [2] ACI Sp. 100, 1987 *Concrete durability* Vol. I and II
- [3] ACI Sp. 108, 1988 *Permeability of concrete*
- [4] ACI *State of the art report on high strength concrete*
- [5] CEB, 1992 *Durable concrete structures. Design guide*
- [6] CEB, 1994 *Application of high performance concrete*
- [7] CEB FIP Model Code, 1990 - *High strength concrete*
- [8] CEB, FIP, 1995 *High performance concrete (Recommended extensions to the Model Code 90)*
- [9] Cement and Concrete Assoc., 1987 *A review of carbonatation in reinforced concrete*
- [10] CNR, Bollettino ufficiale 23-12-1992, Parte IV *Norme Tecniche*
- [11] DIN 1045, 1988 - *Beton und Stahlbeton*
- [12] DAfStb - *Richtlinie für hochfesten Beton*, 1995
- [13] ENV 206, 1989 - *Calcestruzzo: prestazioni, produzione, getto e criteri di conformità*
- [14] Institution of Civil Eng., 1986 *Improvement of concrete durability*
- [15] RILEM TC 50 «*Recomandations Materials and Structures*» Vol. 18/1985