

DURABILITÀ DEL CALCESTRUZZO: TEORIA, PRATICA E PRESCRIZIONI DI CAPITOLATO

Parte III(*): Calcestruzzo durevole secondo
le norme nazionali ed europee

MARIO COLLEPARDI (**)

1. INTRODUZIONE

In precedenti lavori sono state esaminate le cause di degrado chimico [1] e fisico-meccanico [2] delle opere in calcestruzzo. In particolare, sono stati esaminati i fenomeni di degrado connessi con l'ossidazione dei ferri di armatura, con l'attacco solfatico, con la reazione alcali-aggregato [1], oltre che con le fessurazioni indotte dal ritiro plastico, dai gradienti termici e dai cicli di gelo-disgelo [2]. Relativamente alle suddette cause di degrado la norma nazionale UNI 9858 [3] e la pre-norma europea ENV 206 [4] stabiliscono sia i criteri per valutare i rischi di questi degradi attraverso le definizioni di classi di esposizione ambientale, sia le misure preventive per evitarli attraverso vincoli compositivi nel calcestruzzo (massimo rapporto acqua/cemento e minimo dosaggio di cemento). Val la pena di segnalare che la norma UNI 9858 è stata di recente recepita dal D.M. del 14/02/92 pubblicato sul supplemento ordinario della G.U. del 18/03/92 [5], e diviene pertanto cogente anche dal punto di vista legale per tutte le opere in c.a. e c.a.p. regolamentate dalla legge N. 1086.

Inoltre, l'Eurocodice N. 2 [6] stabilisce il minimo spessore di copriferro per garantire alle opere in c.a. e c.a.p. un'adeguata protezione in relazione alle condizioni aggressive dell'ambiente in cui è destinata ad essere costruita l'opera.

Nei paragrafi che seguono vengono illustrati i criteri per una corretta progettazione ed esecuzione delle opere in calcestruzzo normale, armato e precompresso di adeguata durabilità in relazione alle condizioni aggressive dell'ambiente.

Per una corretta progettazione ed esecuzione delle strutture in calcestruzzo verranno presi in considerazione i seguenti elementi:

1) **classe di esposizione:** individua la categoria dell'ambiente in base al grado di aggressione nei confronti del calcestruzzo e/o dei ferri di armatura [3, 4];

2) **limite compositivo:** individua i vincoli nella composizione del calcestruzzo (soprattutto il massimo rapporto a/c e il minimo dosaggio di cemento) ed i requisiti delle materie prime in relazione alla classe di ambiente [3, 4];

3) **limite prestazionale:** individua i vincoli nella prestazione corrispondenti ai vincoli compositivi, da confrontare con la R_{ck} del progetto;

4) **limite del copriferro:** individua lo spessore minimo di copriferro adeguato a garantire la protezione delle armature in relazione alla classe di esposizione [6];

5) **classe di consistenza:** individua la lavorabilità richiesta per la posa in opera e la compattazione [3, 4];

6) **stagionatura:** individua la durata minima per la protezione

(* La prima e la seconda parte dell'articolo sono state pubblicate rispettivamente nei numeri 671 del novembre 1992, alle pagine 707-726 e 675 del marzo 1993, alle pagine 199-209.

(**) Enco, Engineering Concrete, Spresiano (TV).

dei getti in relazione alle condizioni termoigrometriche dell'ambiente al momento del getto ed allo sviluppo della resistenza del calcestruzzo [3, 4].

Il primo e fondamentale elemento è quello di stabilire l'ambiente nel quale l'opera dovrà sorgere. La norma UNI 9858 [3] e quella europea ENV 206 [4] stabiliscono le varie classi di esposizione ambientale (Tabella 1). A seconda della classe indi-

TABELLA 1

CLASSI DI ESPOSIZIONE IN FUNZIONE DELLE CONDIZIONI AMBIENTALI SECONDO ENV 206 ED UNI 9858	
CLASSE DI ESPOSIZIONE	ESEMPI DI CONDIZIONI AMBIENTALI
1) Ambiente secco	- interni di abitazioni o uffici* (UR < 70%)
a) senza gelo	- interni con umidità elevata (UR > 70%) - elementi strutturali esterni - elementi strutturali in acqua o in terreni non aggressivi
2) Ambiente umido	b) con gelo - elementi esterni esposti al gelo - elementi in acqua o in terreni non aggressivi ma esposti al gelo - elementi interni con umidità elevata ed esposti al gelo
3) Ambiente con gelo ed uso di sali	- elementi interni esposti al gelo ed ai sali disgelanti: viadotti autostradali, solette da ponte, aereoporti, ecc.
a) senza gelo	- elementi parzialmente o completamente sommersi in mare o situati nella zona di battigia - elementi in aria ricca di salsedine (zone costiere)
4) Ambiente marino	b) con gelo - elementi parzialmente o completamente sommersi in mare o posti nella zona di battigia, esposti al gelo - elementi in aria ricca di salsedine ed esposti al gelo
Le seguenti classi possono presentarsi da sole o insieme alle precedenti	
a)	- ambiente debolmente aggressivo (gas, liquidi o solidi)
b)	- atmosfera industriale aggressiva
5) Ambiente chimicamente aggressivo**	- ambiente moderatamente aggressivo (gas, liquidi, solidi)
c)	- ambiente fortemente aggressivo (gas, liquidi, solidi)

* Questa classe di esposizione resta valida se, prima che la costruzione sia terminata, la struttura o i componenti non si trovino esposti a condizioni più severe per un prolungato periodo di tempo.

** Gli ambienti chimicamente aggressivi per la presenza di ioni solfato e di anidride carbonica aggressiva sono classificati nella UNI 8981 (per la UNI 9858) e nella ISO 9690 (per la ENV 206).

TABELLA 2
PRESCRIZIONI PER UN CALCESTRUZZO DUREVOLE
IN RIFERIMENTO ALLA CLASSE DI ESPOSIZIONE
INDIVIDUATA NELLA TABELLA 1

PRESCRIZIONE	CLASSE DI ESPOSIZIONE									
	1	2a	2b	3	4a	4b	5a	5b	5c1	
Rapporto a/c massimo ¹⁾										
- calcestruzzo normale	-	0,70	0,55	0,50	0,50 ⁷⁾	0,50	0,55	0,50	0,45	
- calcestruzzo armato	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50 ⁷⁾	0,50	0,55	0,50	0,45	
- calcestruzzo precompresso	0,60	0,60	0,55	0,50	0,50 ⁷⁾	0,50	0,55	0,50	0,45	
Dosaggio minimo cemento Kg/m ³ ²⁾										
- calcestruzzo normale	150	200	200	200	300	300	280	300	300	
- calcestruzzo armato	260	280	280	300	300	300	280	300	300	
- calcestruzzo precompresso	300	300	300	300	300	300	280	300	300	
Volume minimo di aria (%) inglobata per aggregati con diametro massimo di: ³⁾										
32 mm				4)	4)		4)			
16 mm				5	5		5			
8 mm				6	6		6			
Aggregati resistenti al gelo ⁴⁾				si	si		si			
Calcestruzzo impermeabile				si	si	si	si	si	si	
Tipi di cemento per calcestruzzo normale e armato secondo UNI-ENV 197/1										resistente ai solfati ⁵⁾ se il contenuto di solfati è > 500 mg/kg in acqua, > 3000 mg/Kg nel suolo
Copriferro minimo (mm) secondo	c.a.	15	20	25	40	40	40	25	30	40
l'Eurocodice 2 [6]	c.a.p.	25	30	35	50	50	50	35	40	50

1) In aggiunta, il calcestruzzo deve essere protetto dal contatto diretto con il mezzo aggressivo mediante rivestimenti, tranne nei casi in cui questa protezione non sia ritenuta necessaria.

2) I tipi di cemento permessi sono quelli previsti dalla prenorma UNI-ENV 197/1 o dalle norme di legge nazionali finché vigenti. Quando dei fini pozzolanici o ad attività idraulica latente vengono introdotti nella miscela, essi non devono essere tenuti in conto nel calcolo del dosaggio minimo di cemento e del massimo rapporto a/c consentito.

3) Con un fattore di spazatura delle microbolle d'aria inglobata di 0,20 mm, misurato sul calcestruzzo indurito.

viduata per la specifica opera da costruire, vengono fissati (Tabella 2) alcuni limiti riguardanti i parametri compositivi del calcestruzzo (rapporto massimo a/c e dosaggio di cemento minimo) e la qualità delle materie prime impiegate (tipo di aggregato, di cemento, ecc.).

Per quanto concerne la Tabella 1 esiste una completa coincidenza tra la norma UNI 9858 ed ENV 206, con la sola eccezione sull'interpretazione di "ambiente chimicamente aggressivo" per la classe di esposizione 5 sulla quale si tornerà più avanti (paragrafo 6).

Per quanto riguarda la Tabella 2, invece, la norma UNI 9858 si differenzia dalla ENV 206 principalmente per il più basso rapporto a/c (0,50 invece di 0,55) proposto per la classe di esposizione 4a: è difficile dire se il Comitato responsabile della norma UNI 9858 abbia voluto adottare un criterio di maggior prudenza rispetto alla norma europea, o non si sia trattato piuttosto di un banale errore tipografico nella stesura della norma UNI 9858.

Per poter meglio apprezzare il limite imposto alla composizione del calcestruzzo (ed in particolare al suo rapporto a/c e al dosaggio di cemento) che appare nella Tabella 2 in relazione alle classi di esposizione ambientale descritte nella Tabella 1, si riportano nella Fig. 1 i tipici valori di resistenza meccanica a compressione media a 28 giorni (R_{cm28}) in funzione del rapporto a/c per le varie classi di cemento disponibili in Italia ("325", "425", "525") di tipo Portland, pozzolanico e d'altoforno. I valori di R_{cm28} riportati in Fig. 1 possono essere facilmente tramutati nei valori di R_{ck} con il controllo di tipo A sottraendo 3,5 MPa dalle ordinate lette sul diagramma di Fig. 1. Nel caso si adotti il controllo di tipo B (assumendo uno scarto quadratico medio di 5 MPa) i valori di R_{cm28} letti in Fig. 1 dovrebbero essere diminuiti di 7 MPa.

In sostanza, tramite la Fig. 1 è possibile trasformare il limite compositivo (massimo rapporto a/c) in un limite prestazionale (resistenza caratteristica) di più sicura e semplice adozione nelle prescrizioni di capitolato. Se fossero disponibili dati diretti del produttore di calcestruzzo con gli specifici cementi ed inerti locali, sarebbe preferibile utilizzare questi dati, anziché la Fig. 1, per convertire il rapporto a/c nella corrispondente R_{cm28} .

Nei paragrafi che seguono (da 2 a 5) sono esaminate, per ogni singola classe di esposizione ambientale, le relative raccomandazioni per la produzione del calcestruzzo e per lo spessore di copriferro. Gli aspetti riguardanti la posa in opera, la stagionatura ed il capitolato, verranno esaminati rispettivamente nei paragrafi 7, 8 e 9.

4) Nei casi in cui il grado di saturazione del calcestruzzo resti elevato per lunghi periodi di tempo, valori o misure diversi possono essere utilizzati qualora venga accertato mediante prove che il calcestruzzo possiede un'adeguata resistenza al gelo in accordo con UNI 7087.

5) La resistenza ai solfati di un cemento deve essere determinata secondo UNI 9156 ed UNI 9607.

6) Determinazione secondo UNI 8520/20

7) Il rapporto a/c massimo previsto dalla norma ENV 206 per la classe di esposizione 4a è di 0,55.

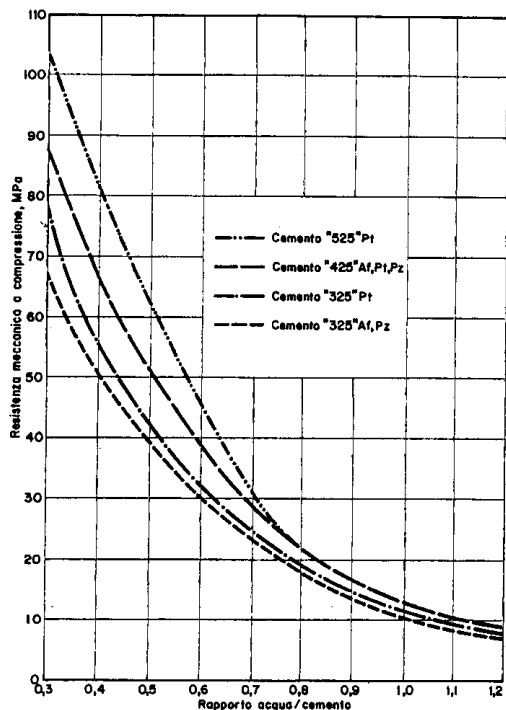


Fig. 1 - Influenza del rapporto a/c sulla resistenza meccanica a compressione media a 28 giorni del calcestruzzo (valori medi indicativi).

2. CLASSE DI ESPOSIZIONE 1: AMBIENTE SECCO

Alla classe di esposizione 1 appartengono gli ambienti caratterizzati da condizioni termo-igrometriche tipiche di abitazioni ed uffici (Tabella 1): temperatura (T) > 0°C; umidità relativa (U.R.) < 70%. In queste condizioni, l'unico agente aggressivo temibile è l'anidride carbonica dell'aria la quale può

provocare la completa neutralizzazione della calce (carbonatazione) nello spessore di copriferro delle strutture in c.a. e c.a.p. creando le premesse per la corrosione delle armature non più protette dallo strato di ossido passivante (paragrafo 2.2.3.2 del riferimento [1]). E' evidente, quindi, che mentre nessun limite viene imposto per le opere in calcestruzzo normale (non armato), per le opere in c.a. e c.a.p. è necessario impiegare calcestruzzi non molto porosi caratterizzati da un rapporto a/c rispettivamente non superiore a 0,65 e 0,60 e da un dosaggio minimo di cemento di 260 e 300 Kg/m³ (Tabella 2). Da un punto di vista pratico è interessante verificare, con l'aiuto della Fig. 1, quali siano le resistenze caratteristiche richieste per soddisfare questi limiti composizionali (rapporto a/c e dosaggio di cemento) capaci di garantire la durabilità dell'opera nella specifica classe di esposizione 1. Questi particolari valori di resistenza caratteristica imposti dal vincolo della durabilità verranno nel seguito indicati con il simbolo di R_{ckd} per distinguerlo da quello usuale (R_{ck}) riservato alla resistenza caratteristica prescelta dal progettista solo sulla base dei calcoli statici.

Affinchè sia soddisfatta anche la condizione di durabilità dovrà essere verificata la seguente diseuguaglianza:

$$R_{ck} > R_{ckd} \quad (1)$$

Se ciò non fosse e se risultasse cioè:

$$R_{ck} < R_{ckd} \quad (2)$$

ne conseguirebbe che alla R_{ck} calcolata dal progettista, sulla base dei soli calcoli statici, corrisponde un rapporto a/c maggiore di quello massimo accettabile ai fini della durabilità che corrisponde alla R_{ckd} : in questo caso è necessario prescrivere una resistenza caratteristica R_{ckd} in luogo di R_{ck} anche se esuberante da un punto di vista statico, ma assolutamente necessaria per garantire la durabilità del materiale.

Per esempio dalla Fig. 1 si evince che con a/c di 0,65 (limite massimo per la classe di esposizione 1 nelle strutture in c.a.) e con cemento Portland "325", la R_{cm28} è di 27,5 MPa. Pertanto, per una struttura in c.a. un calcestruzzo con cemento Portland "325" non dovrebbe presentare una resistenza caratteristica (R_{ckd}) inferiore a 24 MPa (con controllo di tipo A) per garantire il rispetto del limite composizionale (a/c < 0,65) e quindi la durabilità delle strutture in c.a. nello specifico ambiente considerato.

Qualora, per esempio, il progettista avesse previsto sulla base solo dei calcoli statici una R_{ck} di 20 MPa, quindi inferiore alla R_{ckd} di 24 MPa, dovrebbe abbandonare in favore di quest'ultimo valore la "tradizionale" resistenza caratteristica per garantire la durabilità del materiale. E' ovvio che nel caso in cui dai calcoli statici risultasse necessario adottare un

calcestruzzo con R_{ck} maggiore di 24 MPa, risulterebbe automaticamente verificata la condizione (1) per la durabilità del materiale.

Nella Tabella 3 sono riportati gli altri possibili valori di R_{ckd} per i vari tipi di cemento disponibili in Italia e per le varie strutture (in calcestruzzo normale, armato o precompresso) tutte destinate alla classe di esposizione 1.

I valori di R_{ckd} della Tabella 3 sono stati calcolati trasformando i limiti composizionali (massimo rapporto a/c: 0,65 e 0,60) della Tabella 2 per la classe di esposizione 1 in limiti resistenziali (minimo R_{ckd}) con l'ausilio della Fig. 1.

Val la pena di segnalare che, per quanto in teoria sarebbe sufficiente la prescrizione del massimo rapporto a/c (Tabella 2) per garantire la durabilità del materiale, da un punto di vista pratico è preferibile tramutare il vincolo sul massimo rapporto a/c in uno sulla minima R_{ckd} (Tabella 3): infatti, il controllo della resistenza caratteristica attraverso il prelievo dei provini appare molto più rapido, affidabile e semplice che non la determinazione del rapporto a/c, operazione laboriosa ed imprecisa soprattutto sul calcestruzzo indurito.

Si è sopra accennato al fatto che la prescrizione di una R_{ck} maggiore della R_{ckd} è condizione necessaria ma non sufficiente per garantire la durabilità della struttura: infatti, un'altra condizione essenziale per la protezione dei ferri di armatura dalla corrosione è la prescrizione e l'esecuzione di un copriferro di adeguato spessore. Nella Tabella 3 sono anche riportati i valori minimi dello spessore di copriferro previsti dall'Eurocodice 2 [6] in relazione alla classe di esposizione 1. Nel caso delle strutture destinate alla classe di esposizione ambientale 1 lo spessore di copriferro deve essere almeno di 15 mm per le opere in c.a. e di 25 mm per le opere in c.a.p..

TABELLA 3

RESISTENZA CARATTERISTICA MINIMA (R_{ckd} *) RICHIESTA PER LA DURABILITÀ DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO ESPOSTE ALLA CLASSE AMBIENTALE 1

Struttura in calcestruzzo	R_{ckd} (MPa) con cemento:						copriferro minimo (mm)
	325Pt	325Pz	325Af	425Pt	425Pz	425Af	
normale	—	—	—	—	—	—	—
armato	24	23	23	29	29	29	34
precompresso	29	27	27	34	34	34	41

* I valori di R_{ckd} sono stati calcolati con il controllo di tipo A. Se il controllo è di tipo B, il valore di R_{ckd} deve essere diminuito (rispetto ai valori in Tabella) di 3,5 MPa se si assume uno scarto quadratico medio di 5 MPa.

3. CLASSE DI ESPOSIZIONE 2: AMBIENTE UMIDO CON O SENZA GELO

Alla classe di esposizione 2 appartengono gli ambienti caratterizzati da una U.R. maggiore del 70%: essi comprendono gli ambienti aerei esterni in genere, quelli sotto acqua e in terreni ancorchè non contenenti specifici sali aggressivi (Tabella 1). In questa classe di esposizione, rispetto alla precedente, interviene l'azione dell'acqua (piovana, corrente, di condensa, di risalita capillare) che, in aggiunta alla presenza di anidride carbonica, comporta un elemento addizionale di potenziale degrado per il dilavamento del calcestruzzo, oltre che per la corrosione dei ferri (paragrafi 2.2.3.1 e 2.2.3.2 del riferimento [1]).

Val la pena di segnalare che l'azione dell'anidride carbonica in ambiente secco, cioè con U.R. < 70%, comporta un processo (carbonatazione) che è di potenziale rischio solo per la corrosione dei ferri di armatura, ma non di degrado per il calcestruzzo nel quale la trasformazione della calce in calcare provoca semmai un ulteriore consolidamento del materiale. L'azione dell'anidride carbonica in presenza di acqua, invece, comporta anche una parziale dissoluzione del calcestruzzo (trasformazione del calcare insolubile in bicarbonato di calcio solubile).

E' evidente che negli ambienti esterni possano alternarsi periodi con U.R. < 70% a periodi di pioggia: in queste condizioni sono esaltati gli effetti della carbonatazione del copriferro sulla corrosione delle armature e si manifestano anche quelli del dilavamento delle acque sul calcestruzzo.

Inoltre, l'acqua rappresenta un'ulteriore e grave causa di degrado negli ambienti freddi dove la temperatura può scendere al di sotto di 0°C per gli effetti dirompenti connessi con la formazione del ghiaccio (paragrafo 2.1.1 del riferimento [2]). Pertanto le norme UNI 9858 ed ENV 206 (Tabella 1) prevedono una distinzione nella classe di esposizione 2 a seconda che siano assenti o meno fenomeni di gelo nella stagione invernale: 2a (ambiente umido senza gelo) e 2b (ambiente umido con gelo).

Per tutte queste ragioni i vincoli composizionali per la classe di esposizione 2 appaiono più severi che non quelli della classe di esposizione 1 (Tabella 2).

Innanzitutto essi riguardano anche le opere in calcestruzzo normale: a/c < 0,70 per la classe di esposizione 2a ed a/c < 0,55 per la classe di esposizione 2b ed un contenuto minimo di cemento di 200 Kg/m³; per le opere in c.a. e c.a.p. vengono uniformati i vincoli composizionali: il dosaggio minimo di cemento risulta di 280 e 300 Kg/m³ per strutture in c.a. e c.a.p. rispettivamente, ed il massimo rapporto a/c diventa per entrambe 0,60 in ambienti umidi senza gelo e 0,55 in ambienti umidi con gelo.

Infine, nel caso di opere esposte in ambienti umidi con gelo sono previsti altri tre vincoli:

a) la non gelività degli aggregati (da determinare con il metodo UNI 8520 parte 20*);

TABELLA 4

RESISTENZA CARATTERISTICA MINIMA (R_{ckd}) RICHIESTA PER LA DURABILITÀ DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO ESPOSTE ALLA CLASSE AMBIENTALE 2a

Struttura in calcestruzzo	R_{ckd} (MPa) con cemento:							copriferro minimo (mm)
	325Pt	325Pz	325Af	425Pt	425Pz	425Af	525Pt	
normale	21	20	20	24	24	24	28	—
armato	29	27	27	34	34	34	41	20
precompresso	29	27	27	34	34	34	41	30

* I valori di R_{ckd} sono stati calcolati con controllo di tipo A. Se il controllo è di tipo B, il valore di R_{ckd} deve essere diminuito (rispetto ai valori in Tabella) di 3,5 MPa se si assume uno scarto quadratico medio di 5 MPa.

TABELLA 5

RESISTENZA CARATTERISTICA MINIMA (R_{ckd}) RICHIESTA PER LA DURABILITÀ DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO ESPOSTE ALLA CLASSE AMBIENTALE 2b**

Struttura in calcestruzzo	R_{ckd} (MPa) con cemento:							copriferro minimo (mm)
	325Pt	325Pz	325Af	425Pt	425Pz	425Af	525Pt	
normale	27	25	25	32	32	32	40	—
armato	27	25	25	32	32	32	40	25
precompresso	27	25	25	32	32	32	40	35

* I valori di R_{ckd} sono stati calcolati con controllo di tipo A. Se il controllo è di tipo B, il valore di R_{ckd} deve essere diminuito (rispetto ai valori in Tabella) di 3,5 MPa se si assume uno scarto quadratico medio di 5 MPa.

**Si richiede anche che il volume d'aria sia conforme ai valori della Tabella 2 e che gli aggregati non siano gelivi.

b) la presenza di un minimo volume di aria (4-6%) in forma di microbolle provocata dall'aggiunta di additivi aeranti;

c) la impermeabilità del calcestruzzo (da determinare con il metodo ISO 7031 oppure DIN 1048*).

* La norma UNI 7699, citata dalla UNI 9858, è in revisione giacché essa nella forma attuale non prevede la misura di permeabilità all'acqua sotto pressione, ma soltanto la determinazione dell'assorbimento.

In realtà, la condizione di impermeabilità è automaticamente soddisfatta se per il rapporto a/c non si supera il valore di 0,55 che corrisponde ad una penetrazione di acqua sotto la pressione massima di 7 bar non superiore a 20 mm [7]. La presenza dell'aria, invece, comporta l'aggiunta di additivi aeranti e provoca un abbattimento di circa il 20% della resistenza meccanica rispetto al corrispondente calcestruzzo (pari a/c) privo di additivo aerante. Per esempio, un calcestruzzo con cemento Portland "425" ed a/c di 0,55 presenta una resistenza caratteristica di 40 MPa (Fig. 1); il corrispondente calcestruzzo aerato presenta, invece, una resistenza caratteristica di 32 MPa.

Sulla base di queste considerazioni, utilizzando i vincoli compositivi per il rapporto a/c ed il volume di aria per la classe di esposizione 2 (Tabella 2), con l'ausilio della Fig. 1 si possono calcolare i vincoli resistenziali (R_{ckd}) che assicurano la durabilità del calcestruzzo in ambienti umidi senza gelo (Tabella 4) e con gelo (Tabella 5).

Si può notare come l'aggravante del gelo in un ambiente umido non richieda necessariamente un valore di R_{ckd} maggiore come ci si potrebbe aspettare dalla riduzione del rapporto a/c massimo: per esempio, nel caso delle strutture in precompresso, la R_{ckd} con cemento Portland 425 diminuisce da 34 a 32 MPa (Tabella 4 e 5) nonostante la riduzione del rapporto a/c massimo da 0,60 per la classe ambientale 2a a 0,55 per la classe ambientale 2b (Tabella 2). Quest'apparente contraddizione è giustificata dalla necessità di inglobare aria nel calcestruzzo precompresso resistente al gelo per il quale, in aggiunta, viene prescritto dall'Eurocodice 2 un maggiore spessore di copriferro (35 mm anziché 30 mm) a maggiore garanzia della resistenza ai cicli di gelo-disgelo.

4. CLASSE DI ESPOSIZIONE 3: AMBIENTE UMIDO CON GELO E SALI DISGELANTI

Questa classe di esposizione riguarda le opere in calcestruzzo (per lo più pavimentazioni, solette, piste, ecc.) sulle cui superfici nella stagione invernale vengono sparsi sali disgelanti (a base di NaCl e/o $CaCl_2$) per rimuovere il ghiaccio. I fenomeni di degrado del calcestruzzo, in aggiunta a quelli descritti per la classe di esposizione 2b (carbonatazione, dilavamento, gelo-disgelo) comprendono l'attacco del sodio dell'NaCl sugli aggregati eventualmente reattivi (paragrafo 2.2.4.2.1 del riferimento [1]), e l'attacco del $CaCl_2$ sulla matrice legante del calcestruzzo (paragrafo 2.2.4.2.2 del riferimento [1]). Inoltre, il cloruro, qualunque sia il sale disgelante impiegato, è in grado di provocare la corrosione dei ferri (paragrafo 2.2.4.1 del riferimento [1]) ancor più che non la carbonatazione.

Le prescrizioni compositivi previste dalla norma UNI 9858 ed ENV 206 (Tabella 2) per la classe di esposizione 3 includono:

- un rapporto a/c non superiore a 0,50;
- un dosaggio di cemento non inferiore a 300 e 200 Kg/m³ per strutture armate e non, rispettivamente;
- la non gelività degli aggregati;
- la presenza di un minimo volume di aria (4-6%);
- l'impermeabilità del calcestruzzo.

Si tratta in sostanza delle stesse limitazioni compositivi previste per la classe 2b con la variante di un rapporto a/c massimo più basso (0,50 anziché 0,55).

Purtroppo non appare nelle suddette norme (Tabella 2) alcun limite circa l'impiego del tipo di cemento che, sulla base dell'esperienza maturata recentemente [8-12], è preferibile per garantire un'opera durevole per quanto attiene sia al calcestruzzo che ai ferri di armatura.

Si ricorda, infatti, che l'esposizione al cloruro di sodio comporta l'impiego di cemento pozzolanico o d'altoforno per eliminare o comunque ridurre il rischio derivante dalla presenza di aggregati alcali-reattivi [1]. D'altra parte, l'esposizione al cloruro di calcio comporta l'impiego di un cemento d'altoforno ad alto tenore di loppa (almeno 50%) o in alternativa la presenza di fumo di silice (almeno 15%) accanto al cemento Portland [1]. Poiché i due sali, NaCl e $CaCl_2$, vengono impiegati indifferenziate come agenti disgelanti, è preferibile adottare cemento d'altoforno ad alto tenore di loppa o cemento Portland con 15% di fumo di silice che assicurano la durabilità nei confronti dell'attacco di entrambi i sali. A questo proposito il capitolato della Società Autostrade (Norme Tecniche di Appalto - Autostrade S.p.A., Ed. 1992) prevede per i calcestruzzi esposti al gelo ed ai sali disgelanti l'impiego di cemento d'altoforno ad alto contenuto di loppa oppure un'aggiunta pozzolanica a base di fumo di silice.

Per quanto attiene all'impiego del cemento d'altoforno ad alto contenuto di loppa (almeno 50%), va precisato che la normativa italiana sui cementi [13] non prevede alcun limite nel contenuto di loppa e pertanto non è facile una diretta prescrizione di questo tipo di cemento ancorché esso sia commercialmente disponibile.

Tuttavia, poiché il contenuto di loppa influenza il calore di idratazione come è stato mostrato nella Tabella 3 del riferimento [2], è possibile, attraverso una prescrizione di quest'ultima caratteristica, porre di fatto un limite minimo nel contenuto di loppa: per esempio, un cemento d'altoforno di classe "325" con un calore di idratazione a 3 giorni non superiore a 130 KJ/Kg da determinare secondo UNI 7208, comporta automaticamente un contenuto di loppa nel cemento sicuramente superiore al 50%. La normativa europea (UNI-ENV 197/1) sui cementi [14], invece, prevede espressamente tre diversi tipi di cemento d'altoforno differenziati per il contenuto di loppa:

- CEM III/A: contenuto di loppa nell'intervallo 36-65%;
- CEM III/B: contenuto di loppa nell'intervallo 66-80%;
- CEM III/C: contenuto di loppa nell'intervallo 81-95%.

I cementi III/B di classe 32,5 oppure 42,5 (corrispondenti rispettivamente al "325" oppure al "425" della normativa italiana) sono in grado, pertanto, di soddisfare sicuramente il requisito compositivo del cemento (loppla > 50%) per produrre calcestruzzi resistenti all'azione degradante del cloruro di sodio e di calcio.

Nella Tabella 6 sono riportati i limiti prestazionali (in termini di R_{ckd}) desunti dai limiti compositivi della Tabella 2 per la classe di esposizione 3 (rapporto $a/c = 0,50 +$ aria) con i vari tipi e classi di cemento.

5. CLASSE DI ESPOSIZIONE 4: AMBIENTE MARINO CON O SENZA GELO

Alla classe di esposizione 4 appartengono gli ambienti marini: sia quelli sotto acqua o semi-immersi, sia quelli in prossimità della costa dove può pervenire acqua marina trascinata eolicamente (Tabella 1).

L'acqua di mare si presenta aggressiva sia nei confronti del calcestruzzo che dei ferri di armatura soprattutto per il suo contenuto di ioni solfato, sodio e cloruro. Il calcestruzzo può essere aggredito tanto dagli ioni solfato nei confronti della pasta cementizia, quanto dagli ioni sodio nei confronti degli aggregati eventualmente reattivi. I ferri di armatura, invece, possono essere corrosi a causa della presenza degli ioni cloruro.

Per impedire il processo aggressivo delle opere in ambiente marino è necessario prevedere un calcestruzzo impenetrabile dagli agenti aggressivi, e quindi con un rapporto a/c non superiore ad un certo limite, oltre che un copriferro di adeguato spessore.

I limiti nel massimo rapporto a/c e nel contenuto minimo di cemento previsti dalla norma UNI 9858 (Tabella 2) sono di 0,50 e 300 Kg/m³ rispettivamente, indipendentemente dal fatto che l'ambiente marino sia in aree climaticamente temperate (classe 4a) o esposte al gelo (classe 4b). La norma ENV 206, invece, prevede per il rapporto a/c un limite di 0,55 in aree senza gelo e di 0,50 in quelle con gelo ed un contenuto minimo di 300 Kg/m³.

Per entrambe le norme, in ambienti marini con gelo debbono essere prese misure preventive per l'inglobamento di aria e per l'impiego di aggregati non gelivi, soprattutto nelle costruzioni con un grado di saturazione superiore a quello critico.

Tenendo conto dei limiti compositivi previsti dalla norma UNI 9858, sono stati calcolati i limiti prestazionali, in termini di R_{ckd} , riportati nelle Tabelle 7 e 8 rispettivamente per le classi di esposizione ambientale 4a e 4b. Per quanto concerne la norma ENV 206 i limiti prestazionali per la classe 4b sono identici

TABELLA 6
RESISTENZA CARATTERISTICA MINIMA ($R_{ck,d}$) RICHIESTA PER LA DURABILITÀ DELLE OPERE ESPOSTE ALLA CLASSE AMBIENTALE 3**

Struttura in calcestruzzo	$R_{ck,d}$ (MPa) con cemento:							copriferrito minimo (mm)
	325Pt	325Pz	325Af	425Pt	425Pz	425Af	525Pt	
normale	30	28	28	37	37	37	45	—
armato	30	28	28	37	37	37	45	40
precompresso	30	28	28	37	37	37	45	50

* I valori di $R_{ck,d}$ sono stati calcolati con il controllo di tipo A. Se il controllo è di tipo B, il valore di $R_{ck,d}$ deve essere diminuito (rispetto ai valori in Tabella) di 3,5 MPa se si assume uno scarto quadratico medio di 5 MPa.
** Sono anche richiesti aggregati non gelivi ed un volume di aria inglobata conforme alla Tabella 2.

TABELLA 7
RESISTENZA CARATTERISTICA MINIMA ($R_{ck,d}$) RICHIESTA PER LA DURABILITÀ DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO ESPOSTE ALLA CLASSE AMBIENTALE 4a.

Struttura in calcestruzzo	$R_{ck,d}$ (MPa) con cemento:							copriferrito minimo (mm)
	325Pt	325Pz	325Af	425Pt	425Pz	425Af	525Pt	
normale	39	35	35	48	48	48	60	—
armato	39	35	35	48	48	48	60	40
precompresso	39	35	35	48	48	48	60	50

* I valori di $R_{ck,d}$ sono stati calcolati con il controllo di tipo A. Se il controllo è di tipo B, il valore di $R_{ck,d}$ deve essere diminuito (rispetto ai valori in Tabella) di 3,5 MPa se si assume uno scarto quadratico medio di 5 MPa.

TABELLA 8
RESISTENZA CARATTERISTICA MINIMA ($R_{ck,d}$) RICHIESTA PER LA DURABILITÀ DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO ESPOSTE ALLA CLASSE AMBIENTALE 4b**.

Struttura in calcestruzzo	$R_{ck,d}$ (MPa) con cemento:							copriferrito minimo (mm)
	325Pt	325Pz	325Af	425Pt	425Pz	425Af	525Pt	
normale	31	28	28	38	38	38	48	—
armato	31	28	28	38	38	38	48	40
precompresso	31	28	28	38	38	38	48	50

* I valori di $R_{ck,d}$ sono stati calcolati con il controllo di tipo A. Se il controllo è di tipo B, il valore di $R_{ck,d}$ deve essere diminuito (rispetto ai valori in Tabella) di 3,5 MPa se si assume uno scarto quadratico medio di 5 MPa.
** Sono anche richiesti aggregati non gelivi ed un volume di aria inglobata conforme alla Tabella 2.

a quelli previsti dalla norma UNI 9858 (Tabella 8), mentre quelli previsti per la classe 4a di fatto coincidono con i limiti prestazionali della classe 5a (stesso rapporto a/c massimo = 0,55) che verrà esaminata più avanti.

Dal confronto delle Tabelle 7 e 8 emerge che l'ambiente marino con gelo richiede una $R_{ck,d}$ minima inferiore a quella richiesta in un ambiente marino senza gelo.

La differenza nella $R_{ck,d}$ minima, che appare nelle Tabelle 7 e 8 per la stessa struttura in calcestruzzo, è ovviamente da attribuire alla presenza di aria inglobata - richiesta per un calcestruzzo che debba resistere al gelo - che penalizza la resistenza meccanica.

6. CLASSE DI ESPOSIZIONE 5: AMBIENTE CHIMICAMENTE AGGRESSIVO

Alla classe di esposizione 5 appartengono gli ambienti genericamente definiti "chimicamente aggressivi" e suddivisi in tre classi di esposizione ambientale: 5a, 5b e 5c a seconda che l'aggressione sia rispettivamente debole, moderata o forte. Purtroppo non sempre è chiaro dalla lettura diretta, tanto della UNI 9858 quanto della ENV 206, quali siano le sostanze che rendono chimicamente aggressivo un ambiente, e quali siano i livelli di concentrazione di queste sostanze che rendono l'aggressione debole, moderata o forte.

È questa, come si è già accennato nel paragrafo 1, la classe ambientale per la quale esistono maggiori elementi di incertezza sia nell'interpretare comparativamente la UNI 9858 con la ENV 206, sia la UNI 9858 con le altre norme precedentemente menzionate dallo stesso Ente sulla durabilità delle opere in calcestruzzo (UNI 9858 parte 1^a, 2^a, 3^a, 4^a, 5^a e 6^a). D'altra parte anche la norma ENV 206 si presta a qualche critica, in quanto per la definizione di classe ambientale 5 rimanda alla ISO 9690 ancora in forma di bozza [16].

Stante questa situazione, alquanto confusa e talvolta contraddittoria, ci si limiterà ad esaminare le situazioni ambientali più frequenti che possano rientrare nella classe di esposizione 5. Per quanto riguarda i limiti composizionali, ed in particolare i rapporti a/c massimi, saranno presi in considerazione solo i valori della Tabella 1, desunti dalla UNI 9858 ed ENV 206, anche se in contrasto con altri valori riportati in altre norme UNI.

Inoltre, per quanto concerne la definizione del grado di aggressione (debole, moderato e forte) si farà riferimento rispettivamente alle classificazioni A₁, A₂ ed A₃ della ISO 9690 [16] per ambienti gassosi, liquidi e solidi.

In particolare, per quanto riguarda gli ambienti gassosi (Tabella 9) chimicamente aggressivi - individuabili genericamente nelle aree industriali con atmosfera inquinata - il grado di aggressione dipende oltre che dalla concentrazione del composto

TABELLA 9
GRADO DI AGGRESSIONE E CLASSE DI ESPOSIZIONE PER AMBIENTI GASSOSI

Composto	Concentrazione (mg/m ³)	U.R. (%)	Grado di aggressione (ISO 9690)	Classe di esposizione (ENV 206)
CO ₂ (an. carbonica)	<1000	>75	debole	5a
CO ₂ (an. carbonica)	>1000	60-75	debole	5a
CO ₂ (an. carbonica)	>1000	>75	moderato	5b
SO ₂ (an. solforosa)	<0,5	>75	debole	5a
SO ₂ (an. solforosa)	0,5-10	60-75	debole	5a
SO ₂ (an. solforosa)	10-200	<75	debole	5a
SO ₂ (an. solforosa)	0,5-10	>75	moderato	5b
SO ₂ (an. solforosa)	10-200	>75	forte	5c
Cl ₂ (cloro)	<0,1	>75	debole	5a
Cl ₂ (cloro)	0,1-1	60-75	debole	5a
Cl ₂ (cloro)	1-20	<75	debole	5a
Cl ₂ (cloro)	0,1-1	>75	moderato	5b
Cl ₂ (cloro)	1-20	>75	forte	5c
HCl (ac. cloridrico)	<0,05	>75	debole	5a
HCl (ac. cloridrico)	0,05-5	60-75	debole	5a
HCl (ac. cloridrico)	5-100	<75	debole	5a
HCl (ac. cloridrico)	0,05-5	>75	moderato	5b
HCl (ac. cloridrico)	5-100	>75	forte	5c
H ₂ S (ac. solfidrico)	<0,1	>75	debole	5a
H ₂ S (ac. solfidrico)	0,1-10	60-75	debole	5a
H ₂ S (ac. solfidrico)	10-200	<75	debole	5a
H ₂ S (ac. solfidrico)	0,1-10	>75	moderato	5b
H ₂ S (ac. solfidrico)	10-200	>75	forte	5c

TABELLA 10
GRADO DI AGGRESSIONE E CLASSE DI ESPOSIZIONE PER AMBIENTI LIQUIDI (ACQUOSI)

Composto	Concentrazione (mg/m ³)	Grado di aggressione (ISO 9690)	Classe di esposizione (ENV 206)
acidi	pH=6,5-5	debole	5a
acidi	pH=5-4	moderato	5b
acidi	pH=4-2*	forte	5c
CO ₂ aggressiva	15-40	debole	5a
CO ₂ aggressiva	40-100	moderato	5b
CO ₂ aggressiva	>100	forte	5c
SO ₄ ²⁻ (solfato)	250-500	debole	5a
SO ₄ ²⁻ (solfato)	500-1000	moderato	5b
SO ₄ ²⁻ (solfato)	1000-6000**	forte	5c
Mg ²⁺ (magnesio)	1000-2000	debole	5a
Mg ²⁺ (magnesio)	2000-3000	moderato	5b
Mg ²⁺ (magnesio)	>3000	forte	5c
NH ₄ ⁺ (ammonio)	20-50	debole	5a
NH ₄ ⁺ (ammonio)	50-100	moderato	5b
NH ₄ ⁺ (ammonio)	>100	forte	5c
Cl ⁻ (cloruri)	500-1000	debole	5a
Cl ⁻ (cloruri)	1000-5000	moderato	5b
Cl ⁻ (cloruri)	>5000	forte	5c

* per pH < 4 prevedere un rivestimento protettivo anti-acido.
** per tenori di SO₄²⁻ > 6000 mg/l prevedere un rivestimento protettivo.

aggressivo (CO₂, SO₂, ecc.) anche dall'U.R. dell'aria: la presenza di umidità è essenziale per il decorso dell'aggressione. Ne consegue che a parità di concentrazione di un determinato composto aggressivo, la classe di esposizione ambientale aumenta (per esempio da 5a a 5b fino a 5c) all'aumentare della percentuale di U.R. nell'aria.

TABELLA 11

GRADO DI AGGRESSIONE E CLASSE DI ESPOSIZIONE PER AMBIENTI SOLIDI (TERRENI)

Composto	Concentrazione (mg/m ³)	Grado di aggressione (ISO 9690)	Classe di esposizione (ENV 206)
SO ₄ ²⁻ (solfato)	250-500	debole	5a
SO ₄ ²⁻ (solfato)	500-1000	moderato	5b
SO ₄ ²⁻ (solfato)	1000-6000*	forte	5c
Cl ⁻ (cloruro)	500-1000	debole	5a
Cl ⁻ (cloruro)	1000-5000	moderato	5b
Cl ⁻ (cloruro)	>5000	forte	5c

*Per tenori di SO₄²⁻ > 6000 prevedere un rivestimento protettivo.

TABELLA 12

CLASSIFICAZIONE DEI CEMENTI RESISTENTI AI SOLFATI SECONDO UNI 9156

Tipo di cemento*	Resistenza chimica ai solfati		
	Moderata	Alta	Altissima
Portland	C ₃ A < 8%	C ₃ A < 5% 2C ₃ A + C ₄ AF < 25% oppure C ₄ AF + C ₂ F < 25%	C ₃ A = 0 C ₄ AF < 20% oppure C ₄ AF + C ₂ F < 20%
Pozzolanic	nessun limite	C ₃ A < 6%	C ₃ A < 3,5%
D'altoforno	loppe > 36%	> 70%	loppe > 70% C ₃ A < 2%

* Ciascun tipo di cemento può essere a sua volta di classe "325", "425" o "525".

Per le opere in calcestruzzo esposte all'azione di acque chimicamente aggressive (Tabella 10) o di terreni chimicamente aggressivi (Tabella 11) occorre segnalare che, nel caso di attacco solfatico, oltre al limite nel rapporto a/c e nel dosaggio di cemento è necessario anche impiegare cementi resistenti ai solfati se la concentrazione del solfato è maggiore di 500 mg/l nell'acqua o di 3000 mg/Kg nel terreno (Tabella 2). La definizione di cementi resistenti ai solfati (Tabella 2) è rinviata alle norme nazionali vigenti presso ogni singolo paese; in Italia la UNI 9156 classifica la resistenza chimica ai solfati dei cementi in

TABELLA 13

RESISTENZA CARATTERISTICA MINIMA (R_{ckd}*) RICHIESTA PER LA DURABILITÀ DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO ESPOSTE ALLA CLASSE AMBIENTALE 5a**

Struttura in calcestruzzo	R _{ckd} (MPa) con cemento:							copriferro minimo (mm)
	325Pt	325Pz	325Af	425Pt	425Pz	425Af	525Pt	
normale	33	31	31	40	40	40	50	—
armato	33	31	31	40	40	40	50	25
precompresso	33	31	31	40	40	40	50	35

* I valori di R_{ckd} sono stati calcolati con il controllo di tipo A. Se il controllo è di tipo B, il valore di R_{ckd} deve essere diminuito (rispetto ai valori in Tabella) di 3,5 MPa se si assume uno scarto quadratico medio di 5 MPa.

** Se l'ambiente è esposto a cicli di gelo-disgelo consultare la Tabella 5.

TABELLA 14

RESISTENZA CARATTERISTICA MINIMA (R_{ckd}*) RICHIESTA PER LA DURABILITÀ DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO ESPOSTE ALLA CLASSE AMBIENTALE 5b**

Struttura in calcestruzzo	R _{ckd} (MPa) con cemento:							copriferro minimo (mm)
	325Pt	325Pz	325Af	425Pt	425Pz	425Af	525Pt	
normale	39	35	35	48	48	48	59	—
armato	39	35	35	48	48	48	59	30
precompresso	39	35	35	48	48	48	59	40

* I valori di R_{ckd} sono stati calcolati con il controllo di tipo A. Se il controllo è di tipo B, il valore di R_{ckd} deve essere diminuito (rispetto ai valori in Tabella) di 3,5 MPa se si assume uno scarto quadratico medio di 5 MPa.

** Nel caso di ambienti aggressivi per solfati occorre prevedere l'impiego di cementi resistenti ai solfati (Tabella 12). Se l'ambiente è esposto a cicli di gelo-disgelo consultare la Tabella 8 per i valori di R_{ckd}.

moderata, alta e altissima come è illustrato in Tabella 12.

Una volta definita la classe di esposizione di un ambiente chimicamente aggressivo in base alle Tabelle 9, 10 e 11 è possibile individuare il limite compositivo, in termini di rapporto a/c massimo e di dosaggio di cemento minimo (Tabella 2), e quindi tramutare questo nel limite prestazionale, in termini di R_{ckd} minima con l'ausilio della Fig. 1. I valori di R_{ckd} minima, unitamente ai limiti per lo spessore minimo di copriferro, sono riportati nelle Tabelle 13, 14 e 15 rispettivamente per le classi di esposizione ambientale 5a, 5b e 5c.

TABELLA 15

RESISTENZA CARATTERISTICA MINIMA (R_{ckd}*) RICHIESTA PER LA DURABILITÀ DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO ESPOSTE ALLA CLASSE AMBIENTALE 5c**

Struttura in calcestruzzo	R _{ckd} (MPa) con cemento:							copriferro minimo (mm)
	325Pt	325Pz	325Af	425Pt	425Pz	425Af	525Pt	
normale	44	40	40	53	53	53	70	—
armato	44	40	40	53	53	53	70	40
precompresso	44	40	40	53	53	53	70	50

* I valori di R_{ckd} sono stati calcolati con il controllo di tipo A. Se il controllo è di tipo B, il valore di R_{ckd} deve essere diminuito (rispetto ai valori in Tabella) di 3,5 MPa se si assume uno scarto quadratico medio di 5 MPa.

** Nel caso di ambienti aggressivi per solfati occorre prevedere l'impiego di cementi resistenti ai solfati (Tabella 12).

TABELLA 16

RESISTENZA CARATTERISTICA MINIMA (R_{ckd}*) RICHIESTA PER LA DURABILITÀ DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO ESPOSTE ALLA CLASSE AMBIENTALE 5c CON GELO**

Struttura in calcestruzzo	R _{ckd} (MPa) con cemento:							copriferro minimo (mm)
	325Pt	325Pz	325Af	425Pt	425Pz	425Af	525Pt	
normale	35	32	32	42	42	42	56	—
armato	35	32	32	42	42	42	56	30
precompresso	35	32	32	42	42	42	56	40

* I valori di R_{ckd} sono stati calcolati con il controllo di tipo A. Se il controllo è di tipo B, il valore di R_{ckd} deve essere diminuito (rispetto ai valori in Tabella) di 3,5 MPa se si assume uno scarto quadratico medio di 5 MPa.

** Nel caso di ambienti aggressivi per solfati occorre prevedere l'impiego di cementi resistenti ai solfati (Tabella 12).

Val la pena di segnalare che qualora, in aggiunta alle aggressioni chimiche, esistessero anche le condizioni climatiche per la formazione di ghiaccio nel calcestruzzo, occorrerebbe prevedere l'inglobamento di aria (4-6% in volume) oltre agli aggregati non gelivi. In queste circostanze i limiti prestazionali in termini di R_{ckd} per la classe di esposizione 5a passerebbero da quelli riportati in Tabella 13 a quelli indicati in Tabella 5 per la classe ambientale 2b (pari rapporto massimo a/c = 0,55 più aria).

Costi pure per la classe di esposizione 5b in ambienti con ge-

lo, i limiti prestazionali della Tabella 14 diventerebbero quelli della Tabella 8 per la classe ambientale 4b (pari rapporto massimo a/c = 0,50 più aria). Infine, per la classe di esposizione 5c in ambienti con gelo i limiti prestazionali, in termini di R_{ckd}, passerebbero da quelli riportati in Tabella 15 a quelli indicati in Tabella 16 (massimo rapporto a/c = 0,45 più aria).

7. POSA IN OPERA E COMPATTAZIONE DEL CALCESTRUZZO

Il fatto di aver scelto un'adeguata composizione e/o prestazione del calcestruzzo in relazione alla classe ambientale (paragrafi 2-6) non necessariamente implica che il calcestruzzo messo in opera sia realmente durevole. Infatti, se il calcestruzzo prodotto presenta nello stato fresco una consistenza inadeguata (troppo asciutta), si rischia che la messa in opera diventi difficoltosa e la struttura finale risulti difettosa (vespai, nidi di ghiaia, ecc.) per carenza di compattazione.

La inadeguatezza della consistenza, cioè la scarsa lavorabilità del calcestruzzo è funzione del tipo di struttura da realizzare e della tecnica esecutiva di messa in opera (in particolare del sistema di compattazione disponibile o prescelto sul cantiere).

E' difficile stabilire in assoluto dei criteri per definire la lavorabilità ottimale. Per esempio, nel caso di strutture dal contorno geometrico complicato, di ridotto spessore e fortemente armate, è difficile mettere in opera calcestruzzi di consistenza plastica a meno che non si disponga di sistemi di compattazione molto efficaci quali quelli disponibili solo presso impianti di prefabbricazione; lo stesso tipo di struttura realizzato nei cantieri, dove i sistemi di compattazione sono molto meno efficaci, richiede necessariamente un calcestruzzo a consistenza fluida o superfluida. D'altra parte, la messa in opera, per esempio, di una pavimentazione mediante vibrofinitrice richiede un calcestruzzo di consistenza da terra umida per disporre di un materiale che, appena vibrato e prima ancora di far presa, si autostenga anche in assenza di casseri.

Tuttavia, salvo casi di tecniche esecutive particolari, quale quella ora menzionata, la consistenza del calcestruzzo fresco da programmare sui cantieri dovrebbe variare da fluida a superfluida per semplificare al massimo la posa in opera indipendentemente dalla qualità della manodopera e della cura della direzione dei lavori. Se ciò non avviene, come spesso si verifica, al calcestruzzo viene riaggiunta una quantità indiscriminata di acqua con buona pace della durabilità per l'aumento imprecisato nel rapporto a/c.

Quando il calcestruzzo è prodotto da un confezionatore, la richiesta di aggiungere ulteriore acqua da parte dell'impresa è solitamente soddisfatta previa firma sulla bolla di consegna per lo scarico di responsabilità nei confronti del produttore di calcestruzzo. Se questa pratica ha lo scopo di definire le responsabilità legali tra produttore di calcestruzzo ed impresa in caso di contestazioni, essa non giova certo alla durabilità del-

l'opera e quindi agli interessi del committente. Da questo punto di vista, è assolutamente necessario che il progettista, accanto alle altre prestazioni (R_{okd} , impermeabilità, ecc.), prescriva in capitolato un calcestruzzo di lavorabilità sufficientemente elevata da rendere inutile, da parte del personale di cantiere, qualsiasi richiesta di ulteriore aggiunta di acqua oltre quella già programmata ed effettuata in centrale di betonaggio.

La definizione della consistenza del calcestruzzo è prevista tanto dalla UNI 9858 quanto dalla ENV 206 (Tabella 17) ed essa deve sempre accompagnare la definizione della classe di resistenza richiesta per un calcestruzzo durevole in relazione alla classe di esposizione ambientale.

TABELLA 17

CLASSIFICAZIONE DELLA CONSISTENZA
SECONDO UNI 9858 ED ENV 206

Classe di Consistenza	Slump (mm)	Denominazione Corrente
S1	10-40	umida
S2	50-90	plastica
S3	100-150	semifluida
S4	160-200	fluida
S5*	>210	superfluida

* La classe di consistenza S5 manca nella ENV 206 dove la classe S4 comprende i calcestruzzi con uno slump maggiore di 160 mm.

TABELLA 18

RICHIESTA D'ACQUA* IN FUNZIONE DELLA CLASSE
DI CONSISTENZA E DEL TIPO DI AGGREGATO
(FRANTUMATO O NATURALE)

Dimensione massima (mm) dell'aggregato	Richiesta d'acqua (Kg/m ³) per la classe di consistenza									
	S1		S2		S3		S4		S5	
	F	N	F	N	F	N	F	N	F	N
8	200	180	215	195	235	215	255	235	260	240
16	185	165	200	180	220	200	230	210	235	215
32	160	140	175	155	195	175	210	190	215	195
50	155	135	170	150	190	170	200	180	205	185

* In presenza di additivi aeranti (0,01-0,03%) o fluidificanti (0,2-0,3%) la richiesta d'acqua diminuisce rispettivamente del 5 o 7% circa. In presenza di additivi superfluidificanti (0,8-1,2%) o iperfluidificanti (1,5-2,5%) la richiesta d'acqua diminuisce del 20 o 30 % circa rispettivamente: con dosaggi inferiori la riduzione è proporzionalmente minore.

** Frantumato.
*** Naturale.

Val la pena precisare che la lavorabilità ha un costo: l'aumento di lavorabilità di un calcestruzzo - senza ovviamente penalizzare le altre prestazioni che dipendono dal rapporto a/c , come durabilità, resistenza meccanica, ecc. - può essere effettuato in due modi:

— aumentare la quantità di acqua, ma aumentare anche il dosaggio di cemento in modo da mantenere costante il rapporto a/c ;

— aggiungere un additivo fluidificante o superfluidificante.

In entrambi i casi l'incremento di costo, dovuto al maggior dosaggio di cemento o all'impiego di additivi, comporta una modifica del prezzo del calcestruzzo se si varia la classe di consistenza da S1 a S5. Nella Tabella 18 sono riportate le richieste di acqua per ottenere una certa classe di consistenza in funzione dell'aggregato disponibile.

Val la pena di precisare che l'incremento di costo, legato ad un aumento della classe di consistenza, si riferisce ad 1 m³ di calcestruzzo alla bocca dell'autobetoniera: in realtà il costo del conglomerato in opera, per effetto della maggiore lavorabilità del calcestruzzo, si traduce in una riduzione del costo di posa in opera ed in una maggiore affidabilità del materiale (maggiore compatibilità e minori vespaï interni) dal punto di vista della durabilità della struttura in servizio.

8. STAGIONATURA E PROTEZIONE DEL CALCESTRUZZO

Il calcestruzzo, ancorché ben progettato nella sua composizione in relazione alle prestazioni richieste ed alla classe di esposizione ambientale, ed ancorché ben messo in opera sul cantiere attraverso un sistema di compattazione adeguato alla sua lavorabilità, richiede un minimo di stagionatura iniziale per assicurare che la struttura reale sia effettivamente durevole.

Subito dopo il getto, soprattutto in condizioni climatiche avverse (calde, asciutte e ventilate), l'acqua di impatto può in parte evaporare. Questo processo, se avviene troppo precocemente in relazione al grado di indurimento del calcestruzzo, può avere delle conseguenze molto gravi soprattutto sullo strato corticale che, nel caso delle strutture armate, ha l'importante funzione di proteggere i ferri (copriferro).

L'evaporazione precoce dell'acqua dal calcestruzzo verso l'ambiente provoca, in aggiunta ai fenomeni fessurativi provocati dal ritiro plastico ed igrometrico (paragrafi 2.2.1 e 2.2.2 del riferimento [2]), un arresto del processo di idratazione del cemento.

Se ciò avviene, se cioè il grado di idratazione del cemento (α) non cresce al trascorrere del tempo, il calcestruzzo rimane poroso e permeabile nonostante l'eventuale basso rapporto a/c adottato.

Un calcestruzzo poroso e fessurato non è ovviamente un cal-

cestruzzo capace di assicurare l'impermeabilità necessaria alla durabilità di un'opera esposta agli ambienti aggressivi.

Il problema si pone in termini più drammatici per quelle strutture (pavimentazioni, solette, ecc.) non cassetate e quindi esposte all'evaporazione precoce dell'acqua subito dopo il getto. D'altra parte, il problema si riduce significativamente per le strutture cassetate nelle quali la rimozione dei casseri avviene dopo che il calcestruzzo ha raggiunto un sufficiente grado di indurimento e di impermeabilità da ridurre al minimo il rischio dell'evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo. Poiché, però, il recupero dei casseri comporta un'economia nel corso della costruzione, molto spesso il disarmo delle casseforme avviene precocemente con grave pregiudizio per la durabilità delle strutture soprattutto se armate.

Per quanto il problema della corretta stagionatura abbia giocato un ruolo importantissimo nel pregiudicare la durabilità delle strutture in calcestruzzo (si pensi soltanto alle frequenti contestazioni nel settore delle pavimentazioni), difficilmente è stato recepito in sede di capitolato precisando tempi e metodi di stagionatura adeguati al calcestruzzo impiegato, al tipo di struttura, ed alle prevedibili condizioni ambientali durante i primi giorni del getto.

Va subito precisato che si può fare fronte alla esigenza del rapido recupero delle casseforme applicando, subito dopo la scasseratura, un sistema alternativo per proteggere le strutture ed impedire l'evaporazione dell'acqua. Il problema è di individuare qual'è il tempo minimo richiesto per la protezione del calcestruzzo (t_p) in aggiunta al disarmo (t_d) dei casseri.

La somma dei due tempi individua il tempo di stagionatura (t_s):

$$t_s = t_p + t_d \quad (3)$$

Nel caso di strutture non cassetate, come le pavimentazioni, il tempo t_d per il disarmo è nullo ed il tempo di stagionatura (t_s) coincide con quello della protezione (t_p) da applicare subito dopo il getto.

È evidente che il tempo di stagionatura del calcestruzzo durante i primi giorni del getto è funzione dei seguenti parametri:

- grado di indurimento o sviluppo della resistenza meccanica: più rapidamente il calcestruzzo indurisce (e si impermeabilizza) minore è la durata della protezione richiesta;
- temperatura ambientale al momento del getto: più bassa è la temperatura, più lento è lo sviluppo di resistenza meccanica e più lungo deve essere il tempo di stagionatura;
- condizioni igrometriche di vento e di evaporazione al sole: più asciutto e ventilato è l'ambiente, più lungo deve essere il tempo di stagionatura.

Il problema è stato affrontato dalle norme UNI 9858 ed ENV 206 definendo innanzitutto lo sviluppo di resistenza meccanica

(rapido, medio, lento) in base alla classe di cemento ed al rapporto a/c (Tabella 19), e prescrivendo un tempo di stagionatura minimo in funzione dello sviluppo di resistenza, della temperatura e delle condizioni ambientali al momento del getto (Tabella 20): questi tempi di stagionatura minima si applicano alle classi di esposizione 1, 2 e 5a previste in Tabella 1. Nel caso in cui il calcestruzzo è soggetto a condizioni ambientali gravose (classi di esposizione 3, 4a, 4b, 5b, e 5c) i tempi di stagionatura riportati in Tabella 20 debbono di regola essere sensibilmente aumentati.

TABELLA 19

SVILUPPO DI RESISTENZA MECCANICA		
Sviluppo di resistenza	Rapporto a/c	Classe di resistenza del cemento
rapido	< 0,5	42,5R
medio	0,5-0,6 < 0,5	42,5R 32,5R
lento	negli altri casi	

* La classe di cemento è riferita alla normativa europea UNI-ENV 197/1 [14].

TABELLA 20

DURATA MINIMA DELLA STAGIONATURA IN GIORNI (t_s)
IN FUNZIONE DELLO SVILUPPO DI RESISTENZA (TABELLA 19)
E DELLE CONDIZIONI AMBIENTALI DURANTE
LA STAGIONATURA

Condizioni ambientali durante la stagionatura	Sviluppo di resistenza								
	rapido			medio			lento		
	5°C	10°C	15°C	5°C	10°C	15°C	5°C	10°C	15°C
I) ombra, U.R. > 80%	2	2	1	3	3	2	3	3	2
II) insolazione o vento medi U.R. > 50%	4	3	2	6	4	3	8	5	4
III) insolazione o vento forti U.R. < 50%	4	3	2	8	6	5	10	8	5

Se, per esempio, viene messo in opera un calcestruzzo per pilastri armati con rapporto a/c di 0,55 impiegando un cemento di classe 42,5, si ricava dalla Tabella 19 che lo sviluppo di resistenza è medio. Se, per esempio, le condizioni ambientali durante e dopo il getto sono così quantificabili:

— Temperatura > 15°C;

— U.R. < 50%;

— Vento = media velocità;

— Esposizione al sole = diretta ed intensa;

— Condizione di esposizione ambientale durante la stagionatura = III, si ricava dalla Tabella 20 che sono necessari almeno 5 giorni di stagionatura del calcestruzzo.

Se si prevede di scasserare i pilastri dopo soli due giorni, è necessario proteggere il calcestruzzo per altri 3 giorni dopo il disarmo delle casseforme. Se, invece dei pilastri, con lo stesso calcestruzzo e nelle stesse condizioni si dovesse realizzare una pavimentazione, è necessario proteggere la superficie subito dopo la sua finitura, per un tempo non inferiore a 5 giorni.

Per quanto concerne la modalità di protezione la norma UNI 9858 e la ENV 206 prevedono, oltre alla conservazione del calcestruzzo nei casseri, di adottare uno dei seguenti metodi:

— coprire le superfici del getto con teli di plastica impermeabili o con sacchi di tela umidi;

— nebulizzare acqua sulla superficie;

— applicare un prodotto stagionante per formare una membrana antievaporante.

9. ESEMPI DI PRESCRIZIONI DI CAPITOLATO

A titolo di esempio, verranno ora mostrate due prescrizioni di capitolato riguardanti il calcestruzzo, nei suoi aspetti produttivi ed applicativi, in conformità alle norme UNI 9858 [3] ed ENV 206 [4] oltre che alle direttive dell'Eurocodice N. 2 [6].

Esempio N. 1: si tratta di una pavimentazione in c.a. per la quale, dai calcoli statici, è stata progettata una classe di resistenza (R_{ck}) pari a 25 MPa con controllo di tipo A. L'opera è situata all'esterno, quindi esposta alle piogge, in un ambiente non sottoposto sostanzialmente a cicli di gelo-disgelo. L'ambiente, pertanto, ricade nella classe di esposizione 2a (Tabella 1), per la quale è previsto, ai fini della durabilità, un rapporto a/c massimo di 0,60 (Tabella 2), cui corrisponde una R_{ckd} minima di 29 MPa se si impiega cemento Portland ordinario (Tabella 4).

Per quanto concerne l'altro ingrediente del calcestruzzo, è bene prevedere l'impiego di un aggregato conforme alla UNI 8520 con particolare riferimento al contenuto di solfati ed alla non-reattività con gli alcali (parte 11^a e 22^a); inoltre, poichè il

copriferro di questa struttura nella classe di esposizione 2a deve essere uguale o superiore a 20 mm (Tabella 2) la dimensione massima dell'aggregato - che non deve superare 1,3 volte lo spessore del copriferro [3, 4] - dovrà essere di 25 mm.

Le specifiche del calcestruzzo dovranno, inoltre, includere:

— adeguata lavorabilità al momento del getto (per esempio classe di consistenza fluida S4);

— adeguata stagionatura dopo la finitura della pavimentazione: assumendo, per esempio, che il calcestruzzo verrà gettato in estate ($T > 15^\circ\text{C}$) in condizioni ambientali non favorevoli (clima asciutto e ventilato) è necessario prescrivere una protezione del calcestruzzo per almeno 5 giorni mediante acqua nebulizzata o applicazione di membrana antievaporante (agente stagionante).

Tenendo conto di tutti i suddetti elementi, le prescrizioni di capitolato, atte ad assicurare la durabilità dell'opera, potrebbero essere così riassunte:

— Cemento: Portland ordinario (oppure CEM I-32,5 secondo UNI-ENV 197/1).

— Aggregato:

a) conforme alla UNI 8520 con particolare riferimento alla parte 11^a (per i solfati) ed alla parte 22^a (per la reazione alcali-aggregato).

b) dimensione massima: 25 mm.

— Calcestruzzo fresco: classe di consistenza S4 ($slump = 16-20$ cm).

— Calcestruzzo indurito: classe di resistenza 29 MPa (corrispondente al rapporto a/c massimo di 0,60 ed al dosaggio minimo di 280 Kg/m³ per garantire la durabilità).

— Copriferro minimo: 20 mm.

— Stagionatura: protezione per almeno 5 giorni della superficie della pavimentazione secondo UNI 9858 mediante applicazione di agente stagionante conforme alla UNI 8656 oppure nebulizzazione di acqua atta ad assicurare un ambiente con U.R. > 95%.

Queste prescrizioni prestazionali o applicative, più facilmente controllabili che non le prescrizioni di carattere compositivo, consentiranno al produttore del calcestruzzo di scegliere la composizione più adatta per soddisfare queste ultime. Rimane il fatto, però, che dal punto di vista del controllo delle prescrizioni è preferibile far riferimento a proprietà misurabili facilmente e senza contestazioni (per esempio la classe di resistenza del calcestruzzo), che non a parametri di più difficile controllo e valutazione come per esempio il rapporto a/c .

Esempio N. 2: si tratta della stessa opera descritta nell'esempio precedente con l'unica variante che la pavimentazione è situata in climi freddi e che in esercizio si prevede l'applicazione di sali disgelanti nella stagione invernale per la rimozione del ghiaccio.

L'opera è quindi esposta all'ambiente con classe di esposizione 3 (Tabella 1), per la quale è previsto un rapporto a/c massimo di 0,50 (Tabella 2) e alla quale corrisponde una R_{ckd} minima di 28 MPa nel caso si opti per l'impiego di un cemento d'altoforno di classe 325 (Tabella 6) particolarmente resistente all'azione distruttiva dei sali disgelanti a base di NaCl o di CaCl₂ (paragrafi 2.2.4.2.1 e 2.2.4.2.2 del riferimento [1]).

Occorre tener conto, inoltre, che per questo calcestruzzo è previsto l'inglobamento di un volume minimo di aria (4-6%) perché possa resistere ai cicli di gelo-disgelo (Tabella 2) e pertanto il calcestruzzo, ancorchè meno resistente meccanicamente di quello dell'esempio precedente (28 contro 29 MPa), è in realtà meno permeabile, e quindi più durevole per il suo minore rapporto a/c (0,50 contro 0,60).

Poichè per la classe di esposizione 3 è previsto un copriferro minimo di 40 mm, la dimensione massima dell'aggregato (non superiore a 1,3 volte il copriferro) potrà essere fissata fino ad un massimo di 52 mm (nel caso specifico si opererà per 32 mm).

Le prescrizioni di capitolato, nella ipotesi di esecuzione del getto nelle stesse condizioni dell'esempio N. 1, potranno quindi essere così riassunte:

— Cemento: d'altoforno "325" (oppure CEM III/B - 32,5 secondo UNI-ENV 197/1);

— Aggregato:

a) conforme alla norma UNI 8520 con particolare riferimento alla parte 20^a (per la gelività), alla parte 11^a (per i solfati) ed alla parte 22^a (per la reazione alcali-aggregato);

b) dimensione massima: 32 mm;

— Calcestruzzo fresco:

a) classe di consistenza S4 ($slump = 16-20$ cm);

b) volume di aria minimo = 4%

— Calcestruzzo indurito:

a) classe di resistenza 28 MPa (corrispondente al rapporto a/c massimo di 0,50 ed al dosaggio minimo di 300 Kg/m³ in presenza di aria inglobata);

b) impermeabile secondo DIN 1048 oppure ISO 7031;

— Copriferro minimo: 40 mm;

— Stagionatura: protezione per almeno 5 giorni della superficie della pavimentazione secondo UNI 9858 mediante applicazione di agente stagionante conforme alla UNI 8656 oppure nebulizzazione continua di acqua atta ad assicurare un ambiente con U.R. > 95%.

BIBLIOGRAFIA

- [1] COLLEPARDI M.: L'Industria Italiana del Cemento, 671, 707, 1992.
- [2] Coppola L.: L'Industria Italiana del Cemento, 675, 199, 1993.
- [3] UNI 9858 - Calcestruzzo. Prestazioni, produzione, posa in opera e criteri di conformità, 1991.
- [4] ENV 206 - Concrete. Performance, production, placing and compliance criteria, 1991.
- [5] Supplemento ordinario N°65 della Gazzetta Ufficiale del 18 Marzo 1992.
- [6] Eurocodice N° 2: Progettazione delle strutture cementizie. Regole generali e regole per gli edifici. (UNI-ENV 1992-1-1).
- [7] COLLEPARDI M., L. COPPOLA: L'Industria Italiana del Cemento, 665, 271, 1992.
- [8] CHATTERJI S.: Cement and Concrete Research, 8, 647, 1978.
- [9] MONOSI S., I. ALVERA, M. COLLEPARDI: Il Cemento, 2, 97, 1989.

- [10] COLLEPARDI M., L. COPPOLA, S. MONOSI: Degrado del calcestruzzo provocato dal cloruro di calcio, Atti del Congresso "Omaggio Scientifico a Renato Turriziani" pg. 197-204, Roma 1992.
- [11] COLLEPARDI M., L. COPPOLA: Materiali innovativi per calcestruzzi speciali, pg. 4.42, Ed. Enco, Spresiano 1991.
- [12] COLLEPARDI M., L. COPPOLA: Materiali innovativi per calcestruzzi speciali, pg. 3.34, Ed. Enco, Spresiano 1991.
- [13] "Nuove norme sui requisiti di accettazione e modalità di prova dei cementi", Gazzetta Ufficiale, N° 180 del 17 luglio 1968.
- [14] UNI-ENV 197/1 - Cemento. Composizione specificazioni e criteri di conformità. Cementi comuni, 1993.
- [15] COLLEPARDI M., L. COPPOLA: Materiali innovativi per calcestruzzi speciali, pg. 3.16, Ed. Enco, Spresiano 1991.
- [16] ISO-TC 71, Draft Proposal DP 9690: Classification of environmental exposure condition for concrete and reinforced concrete structures.