

DAL PROGETTO AL CANTIERE

Modalità di prescrizione e controllo del calcestruzzo di qualità (2ª parte)

L. Coppola *, R. Troli *, M. Collepari *

1. INTRODUZIONE

L *mix-design* è un metodo per ottimizzare la composizione del calcestruzzo – in termini di dosaggio degli ingredienti (cemento, acqua, aggregati, additivi e aggiunte) per m³ di impasto – sulla base dei requisiti prestazionali del calcestruzzo indurito. Questi ultimi possono essere distinti in:

- **requisiti essenziali**, quali la resistenza caratteristica R_{ck} e la durabilità, che debbono essere presi in considerazione per il calcestruzzo destinato a qualsiasi tipo di struttura in accordo con quanto stabilito dalla norma nazionale UNI 9858 e dalla pre-norma europea ENV 206 (1,2);
- **requisiti addizionali**, che possono essere richiesti per particolari strutture, quali le resistenze a flessione e a trazione, la resistenza a compressione a brevi stagionature (1,3 o 7 giorni), l'impermeabilità.

La procedura di *mix design* si basa sul fatto che sia i requisiti essenziali che quelli addizionali del calcestruzzo dipendono sostanzialmente dalla porosità della matrice cementizia, quindi dal rapporto acqua/cemento dell'impasto. Ad ognuna delle prestazioni sopramenzionate corrisponde, infatti, un rapporto acqua/cemento massimo (a/c) da non superare per poter conseguire la prestazione stessa:

- (a/c)₀ per conseguire la resistenza caratteristica richiesta (R_{ck});
- (a/c)₁ per rendere il calcestruzzo durevole alle azioni aggressive dell'ambiente in cui è situata la struttura;
- (a/c)₂ per resistere alle azioni aggressive promosse da sostanze chimiche naturali e artificiali;
- (a/c)₃ per confezionare un calcestruzzo impermeabile;
- (a/c)₄ per conseguire la resistenza a flessione (R_f) oppure a trazione (R_t) richieste;
- (a/c)₅ per raggiungere la resistenza a compressione desiderata a brevi stagionature (1, 3 o 7 giorni).

Per confezionare un conglomerato cementizio che possieda due o più dei requisiti



sopramenzionati è necessario adottare il rapporto-acqua/cemento più basso: (a/c)_{min}. Supponiamo ad esempio che per il conglomerato vengano richieste le seguenti prestazioni:

- $R_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2 \rightarrow (a/c)_0 \leq 0.65$
- Resistenza a compressione a 3 giorni dal getto
 $R_{cm3} = 10 \text{ N/mm}^2 \rightarrow (a/c)_5 \leq 0.70$
- Durabilità nella classe di esposizione 2a $\rightarrow (a/c)_1 \leq 0.60$

Come si può notare il rapporto acqua/cemento più basso, 0.60, è quello determinato dalla durabilità per la classe di esposizione 2a. Pertanto, la resistenza caratteristica (R_{ck}^*) che avrà effettivamente il calcestruzzo sarà maggiore del valore (25 N/mm²) desunto da sole considerazioni di carattere statico-strutturale.

$$(a/c)_{\min} = 0.60 \rightarrow \begin{cases} \text{classe di esposizione 2a} \\ R_{ck}^* = 30 \text{ N/mm}^2 \\ R_{cm3} = 14 \text{ N/mm}^2 \end{cases}$$

Il valore $R_{ck}^* = 30 \text{ N/mm}^2$ può diventare una prescrizione di capitolato facilmente controllabile, capace di garantire che il rapporto (a/c)_{min} = 0.60, corri-

spondente al livello di durabilità richiesto per la classe di esposizione 2a, venga effettivamente impiegato per il confezionamento dell'impasto. In altre parole è molto più facile controllare il valore della resistenza caratteristica R_{ck}^* che non quello del rapporto acqua/cemento minimo.

Il presente lavoro ha come obiettivo quello di illustrare le possibilità di impiego di un sistema esperto per le strutture di calcestruzzo dell'ingegneria infrastrutturale. Sono esaminate, in particolare, due tipologie di opere: la prima, tipica dell'ingegneria idraulico-sanitaria, riguarda un impianto di depurazione di acqua urbane e coinvolge strutture esposte all'aria, a contatto con acqua e con acque contenenti sostanze chimicamente aggressive; la seconda opera riguarda un ponte autostradale segmentato nei suoi elementi essenziali: fondazioni, pile e impalcato.

Per entrambe queste strutture i calcoli del *mix-design* per elaborare le prestazioni del calcestruzzo e le conseguenti prescrizioni di capitolato sono basati sulle raccomandazioni contenute nella norma UNI 9858 (1) e nella pre-norma ENV 206 (2) per il calcestruzzo e nella norma

* ENCO, Spresiano (TV)

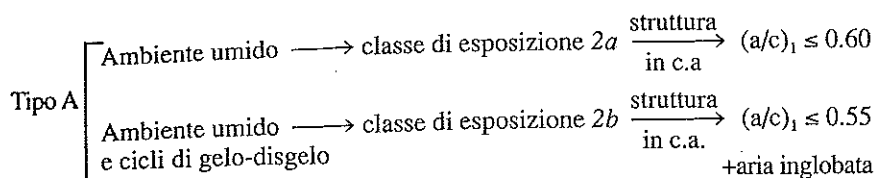


Fig. 1 - Classificazione secondo UNI 9858 - ENV 206 degli ambienti tipo A

ENV 197 Parte 1^a per i cementi (3). Per brevità, tuttavia, verranno prese in conto le sole prestazioni del calcestruzzo in servizio (resistenza, durabilità, impermeabilità) trascurando gli aspetti legati all'esecuzione delle opere (lavorabilità, diametro massimo dell'aggregato).

Nessuno dei calcestruzzi proposti quindi verrà analizzato sulla base delle richieste di consistenza al getto, del tempo di trasporto dalla centrale di betonaggio al cantiere, della temperatura ambientale, delle dimensioni e del tipo di aggregato disponibili, dell'eventuale impiego di additivi ecc.

Tuttavia, in vista delle difficoltà esecutive dei getti, in entrambi gli esempi di seguito illustrati dovrà essere specificata per il calcestruzzo preconfezionato una classe di consistenza almeno fluida (S4) o superfluida (S5). Con questa ulteriore prescrizione, da riportare nel capitolato, si scoraggia infatti la tentazione di aggiungere arbitrariamente acqua alla miscela sul cantiere e di vanificare di conseguenza lo sforzo compiuto per progettare la miscela, come già illustrato nella 1^a parte di questo articolo (4).

2. Il sistema esperto

È stato elaborato un sistema esperto (CMD: *Computerized Mix Design*) che consente di definire il valore di $(a/c)_{min}$ desunto sulla base dei requisiti essenziali e addizionali richiesti per il calcestruzzo. Il sistema esperto CMD consente di individuare la R_{ck} cui corrisponde il livello di durabilità richiesto dalla norma UNI 9858 o dalla pre-norma ENV 206 in funzione della classe di esposizione ambientale prevista per la struttura. Presumibilmente alla fine del 1997 la pre-norma provvisoria ENV 206 verrà sostituita dalla norma EN 206, la quale introdurrà una serie di modifiche sostanziali relativamente alle classi di esposizione ambientale previste per le strutture e ai corrispondenti rapporti acqua/cemento. Tuttavia, il principio di base su cui è impostato il sistema esperto non verrà modificato con l'introduzione della norma definitiva EN 206, eccezion fatta per i valori dei rapporti acqua/cemento massimi necessari per garantire la durabilità del conglomerato cementizio.

Un sistema esperto più completo di quello descritto (CMD-RMC: *Computerized Mix Design for Ready Mix Concrete*), in grado di tener conto di tutti i parametri che influenzano le proprietà del calcestruzzo fresco e di calcolare conseguentemente il dosaggio di tutti gli ingredienti del conglomerato, non viene in questa sede illustrato (5,6) perché in questa memoria vengono prese in specifica considerazione solo quelle proprietà del conglomerato che ricadono sotto la responsabilità diretta del Progettista. Fatta eccezione quindi per il tipo e la classe di cemento, nessuna menzione verrà fatta per gli altri ingredienti che costituiscono il calcestruzzo.

3. Impianto di depurazione: classi di esposizione delle strutture di calcestruzzo

In accordo con la UNI 9858 e con la ENV 206, la classe di esposizione rappresenta il grado d'aggressione dell'ambiente in cui una determinata struttura in calcestruzzo è situata. Le classi di esposizione, il degrado temuto ed i rispettivi rapporti acqua/cemento massimi - $(a/c)_m$ - da adottare per garantire la durabilità delle strutture in calcestruzzo sono stati già presentati nella prima parte del lavoro (4).

Relativamente al progetto del conglomerato cementizio, le strutture di calcestruzzo di un impianto di depurazione possono essere distinte in tre categorie:

A) quelle che, non essendo in contatto con acqua liquida, possono essere classificate nella classe di esposizione 2a (ambiente umido) oppure nella classe di esposizione 2b (ambiente umido con gelo);

B) quelle che sono in contatto con acqua liquida non aggressiva e pertanto

Tabella 1 - Ambienti chimici aggressivi (solidi, liquidi, gassosi) e relativi rapporti a/c massimi secondo UNI 9858 e ENV 206

AMBIENTE	LIVELLO DI AGGRESSIONE	CLASSE DI ESPOSIZIONE	RAPPORTO A/C MASSIMO
Terreno	Debole	5a	0.55
	Moderato	5b	0.50
	Forte	5c	0.45
Acqua	Debole	5a	0.55
	Moderato	5b	0.50
	Forte	5c	0.45
Gassoso (aria)	Debole	5a	0.55
	Moderato	5b	0.50
	Forte	5c	0.45

Tabella 2 - Classe di esposizione 5: sostanze chimiche aggressive in forma liquida

SOSTANZA AGGRESSIVA	CONCENTRAZIONE	CLASSE DI ESPOSIZIONE	TIPO DI CEMENTO e/o RIVESTIMENTO PROTETTIVO
Solfato	250-500 mg/l	5a	Cemento resistente ai solfati Cemento resistente ai solfati Cemento + rivestimento impermeabile
	501-1000 mg/l	5b	
	1001-6000 mg/l	5c	
	> 6000 mg/l	5c	
Acidi	pH = 6.5-5	5a	Rivestimento resistente agli acidi
	pH = 4.9-4	5b	
	pH = <4	5c	
Anidride Carbonica	15-40 mg/l	5a	
	41-100 mg/l	5b	
	> 100 mg/l	5c	
Magnesio	1000-2000 mg/l	5a	
	2001-3000 mg/l	5b	
	> 3000 mg/l	5c	
Ammonio	20-50 mg/l	5a	
	51-100 mg/l	5b	
	> 100 mg/l	5c	
Cloruro	500-1000 mg/l	5a	
	1001-5000 mg/l	5b	
	> 5000 mg/l	5c	

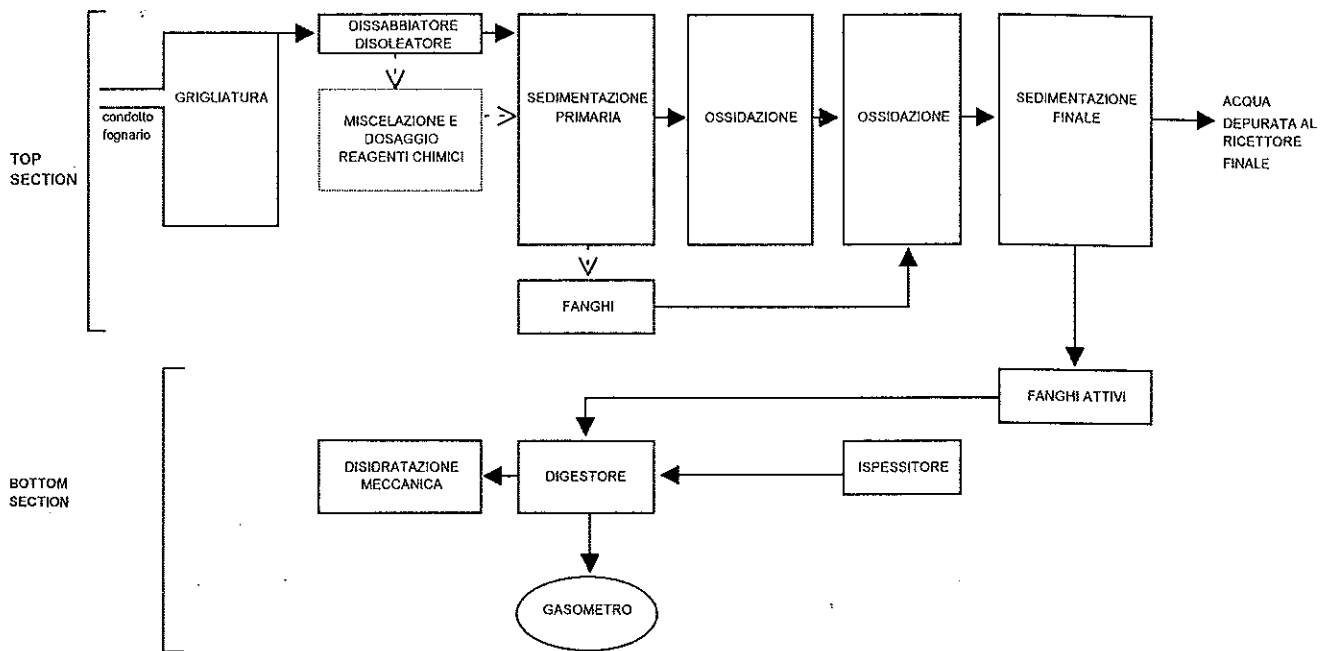


Fig. 2 – Diagramma di flusso del trattamento acque negli impianti di depurazione.

richiedono di essere realizzate con un calcestruzzo impermeabile;
 C) quelle che, essendo in contatto con agenti aggressivi chimici liquidi (acque contenenti solfati, ammonio) vanno classificate in una delle classi di esposizione 5a, 5b o 5c, sulla base del tipo e della concentrazione dell'agente aggressivo a contatto con il calcestruzzo.

Per tutte le strutture, senza alcuna eccezione, deve essere individuata la classe di esposizione ambientale: per esempio, gli elementi strutturali esposti all'ambiente esterno umido (tipo A), le cui fondazioni poggiano su un terreno non aggressivo possono appartenere alla classe di esposizione 2a oppure, se situati in un'area caratterizzata da un clima rigido, nella classe di esposizione 2b. A queste classi di esposizione corrispondono rapporti acqua/cemento ben definiti (Fig. 1).

Le strutture di calcestruzzo esposte ad aggressioni chimiche possono essere classificate in base al tipo di sostanza aggressiva: solida, liquida oppure gassosa. La Tabella 1 riporta, per queste peculiari classi di esposizione (5a, 5b, 5c), i corrispondenti rapporti acqua/cemento

Fase del processo	pH	NH ₄ ⁺ mg/l	Mg ⁺² mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ⁼ mg/l	CO ₂ aggressiva mg/l
Top Section (fig. 2)	7.0-7.5	10-20	10-20	50-100	20-80	tracce
Bottom Section (fig. 2)	6.6-7.4	300-700	20-40	50-100	20-80	100-300

Tabella 3 – Composizione chimica dell'acqua negli impianti di depurazione

massimi – (a/c)₂ – necessari per garantire la durabilità delle strutture.

Fatta eccezione per le strutture di calcestruzzo in contatto con terreni ricchi di solfato, gli elementi strutturali di un impianto di depurazione sono esposti all'azione aggressiva delle sostanze chimiche presenti nell'acqua. La Tabella 2 riporta una lista non esaustiva degli aggressivi chimici in forma liquida, la concentrazione con cui essi sono presenti nell'acqua, la corrispondente classe di esposizione ambientale, il tipo di cemento e di protezione superficiale eventualmente raccomandati dalla prenorma ENV 206 per la durabilità del calcestruzzo.

La Fig. 2 riporta un tipico diagramma di flusso relativo al trattamento delle acque in un'impianto di depurazione, segmentato nelle varie fasi del processo, dall'ingresso delle acque provenienti dal canale fognario fino alla disidratazione meccanica.

Nello schema a blocchi di Fig. 2 vengono ovviamente evidenziate le sole strutture di calcestruzzo appartenenti alle categorie B e C; gli elementi strutturali non a contatto con l'acqua liquida, quali ad esempio le fondazioni e gli elementi strutturali degli edifici adibiti ad attività collaterali, non vengono invece evidenziati nello schema.

Nella Tabella 3 vengono riportate le concentrazioni delle sostanze aggressive presenti nelle acque dell'impianto di depurazione, desunte sulla base delle informazioni acquisite da impianti già funzionanti. Come si può notare la concentrazione di anidride carbonica (100-300 mg/l) e dei sali d'ammonio (300-700 mg/l) delle strutture situate nella «Bottom Section» di Fig. 2 si posiziona nell'intervallo che determina un livello di aggressione «forte» che corrisponde alla classe di esposizione 5c di Tabella 2. Esiste, quindi, un grave rischio per la durabilità del calcestruzzo delle strutture «fanghi attivi», «ispessitore», «dige-

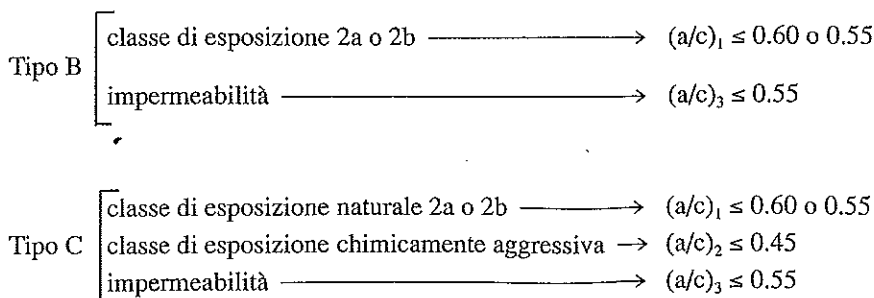


Fig. 3 – Classificazione secondo UNI 9858 – ENV 206 degli ambienti tipo B e C

store» e «disidratazione meccanica» riportate nella «Bottom Section» di Fig. 2 (7).

Per queste strutture (tipo C) occorre tener conto, ai fini della durabilità, dei rapporti acqua/cemento desunti dalle classi di esposizione dell'ambiente naturale (a/c), e chimicamente aggressivo (a/c)₂, oltre che dell'impermeabilità (a/c)₃ (fig. 3).

Tutte le altre strutture coinvolte nelle fasi del processo di depurazione, quali ad esempio quelle della «grigliatura», della «sedimentazione primaria» ecc, non sono esposte ad alcuna aggressione di origine chimica, giacchè la concentrazione delle sostanze pericolose per il calcestruzzo o per l'armatura è ben al di

sotto di quella che definisce il «livello di aggressione debole» corrispondente alla classe di esposizione 5a di Tabella 2. Pertanto il calcestruzzo destinato a queste strutture (tipo B) deve soddisfare i soli requisiti richiesti per la classe di esposizione ambientale (a/c)₁ e per l'impermeabilità (a/c)₃ (fig. 3).

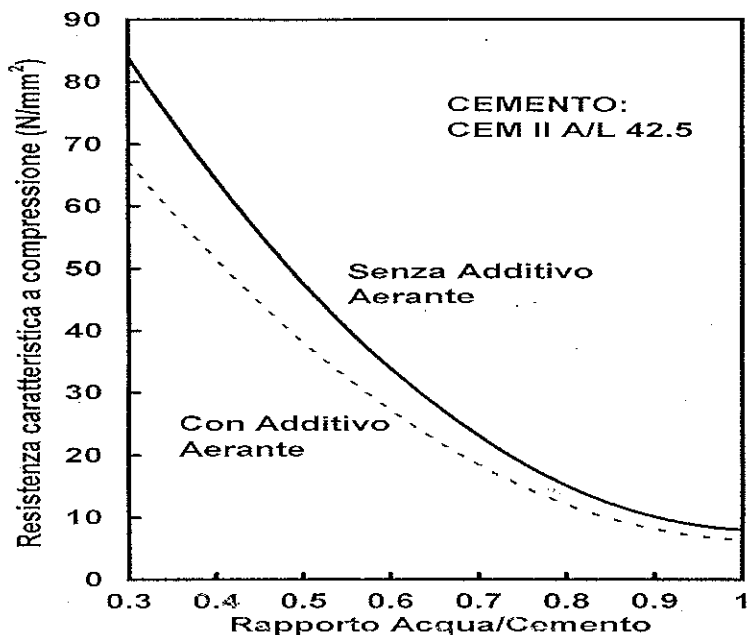


Fig. 4 - Resistenza a compressione (provini cubici, controllo tipo B: $\delta = 4 \text{ N/mm}^2$) in funzione del rapporto a/c per calcestruzzi confezionati con CEM II/A-L 42.5 con e senza additivo aerante.

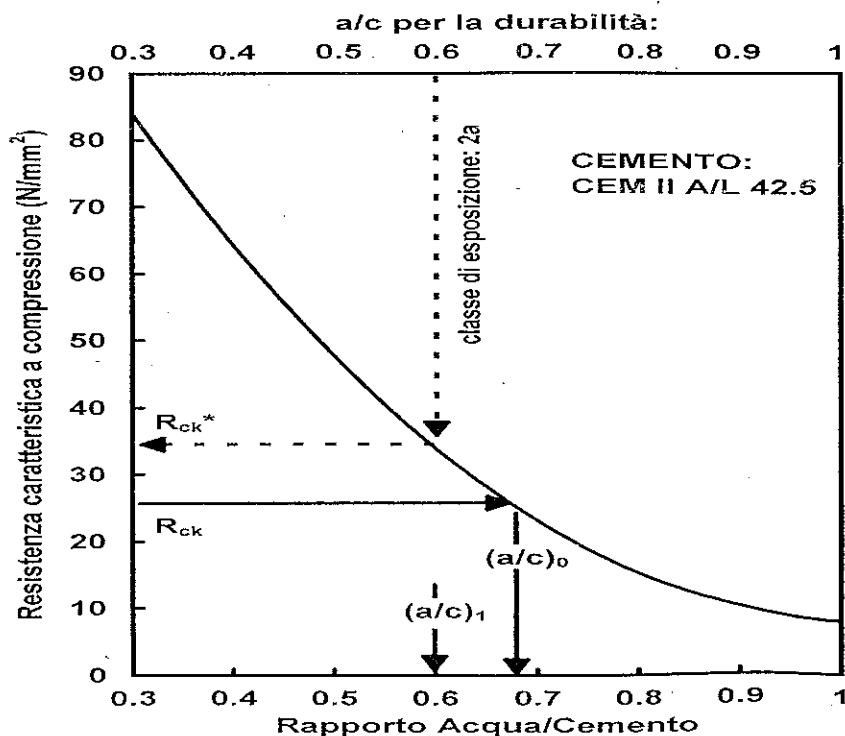


Fig. 5 - Rapporti a/c desunti dai requisiti di resistenza e durabilità e corrispondente R_{ck}^* per i calcestruzzi delle strutture di tipo A.

3.1 Depuratore: resistenza caratteristica dei calcestruzzi desunta da considerazioni di carattere strutturale

La resistenza caratteristica R_{ck} per i tre tipi di struttura sopramenzionati viene usualmente definita dal progettista strutturale sulla base dei carichi, statici o dinamici, agenti sulle strutture. Il progettista ha individuato:

A) $R_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$ per il calcestruzzo destinato alla realizzazione di fondazioni, paratie, muri di sostegno e in generale per tutti gli elementi strutturali che non sono in contatto con l'acqua liquida;

B) $R_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$ per il calcestruzzo destinato alla realizzazione delle strutture in contatto con acqua liquida non aggressiva, cioè tutte le strutture coinvolte nelle fasi del processo riportate nella «Top Section» di Fig. 2;

C) $R_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ per il calcestruzzo destinato a strutture armate o precomprese riportate nella «Bottom Section» di Fig. 2 che sono in contatto con acqua liquida aggressiva.

Con l'intento di correlare il valore della resistenza caratteristica desunta da considerazione strutturale con il corrispondente rapporto acqua/cemento, $(a/c)_0$ - quindi di verificare se questo valore sia o meno congruente con i rapporti a/c richiesti per la durabilità e la impermeabilità delle strutture, sono stati presi in considerazione alcuni parametri supplementari, riportati nel seguito:

- la resistenza caratteristica è misurata su provini cubici e si adotta il controllo di accettazione di tipo B previsto dal DM 14/2/92 All. 2, assumendo per lo scarto quadratico medio δ un valore pari a 4 N/mm^2 . Tenendo presente che il fattore di probabilità fissato dalla normativa è pari a 1.48, la resistenza a compressione media a 28 giorni R_{c28} è correlata alla R_{ck} attraverso la seguente equazione:

$$R_{c28} = R_{ck} + 1.48 \delta$$

- il cemento impiegato, selezionato tra quelli localmente disponibili, è un cemento Portland al calcare di classe 42.5 (CEM II/A-L 42.5 secondo la norma UNI-ENV 197 Parte 1^a).

Sulla base di quanto assunto è stata riportata su grafico la variazione della resistenza caratteristica in funzione del rapporto acqua/cemento, calcolata dal programma CMD i cui algoritmi sono basati su una serie di indagini sperimentali.

tali condotte su calcestruzzi confezionati con e senza additivo aerante (classi di esposizione 2b e 2a rispettivamente). La curva $R_{ck} - a/c$ riportata in Fig. 4 si riferisce al cemento CEM II/A-L 42.5. Oltre alla curva di Fig. 4 il programma permette l'elaborazione e la gestione di 300 curve $R_{ck} - a/c$, una per ogni cemento (150 tipi) disponibile sul territorio della Comunità europea, in assenza o in presenza dell'additivo aerante.

Siccome si ipotizza che nell'area in cui sorgono le strutture dell'impianto di depurazione siano trascurabili i cicli di gelo-disgelo durante il periodo invernale non occorre impiegare, nel confezionamento del calcestruzzo, additivi aeranti. Pertanto verrà utilizzata per il calcestruzzo dell'impianto di depurazione la sola curva a tratto continuo di Fig. 4, relativa ad impasti non additivati con aeranti.

3.2 Depuratore: prescrizioni di capitolato per i calcestruzzi

Combinando opportunamente tutti i dati derivanti da considerazioni di carattere strutturale, di durabilità e di impermeabilità per i tre tipi di struttura (A,B,C) che costituiscono l'impianto di depurazione è possibile mediante il sistema esperto citato elaborare automaticamente le prescrizioni di capitolato per il conglomerato cementizio.

Strutture di tipo A: calcestruzzi per opere in c.a. non a contatto con acqua liquida.

La Fig. 5 mette in evidenza come il rapporto acqua/cemento - $(a/c)_0$ - desunto da considerazioni di carattere strutturale ($R_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$) pari a 0.67 sia maggiore del rapporto acqua/cemento - $(a/c)_1$ - dettato dalla durabilità (0.60 per la classe di esposizione 2a). Se si vogliono garantire entrambi i requisiti richiesti per la struttura è necessario pertanto prescrivere una resistenza caratteristica, determinata da ragioni di durabilità, (R_{ck}^*) maggiore (33 N/mm^2) di quella richiesta dal progettista strutturale (25 N/mm^2).

$$R_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2 \longrightarrow (a/c)_0 \leq 0.67$$

$$\text{Cl. di esposizione 2a} \longrightarrow (a/c)_1 \leq 0.60$$

$$\downarrow$$

$$(a/c)_{\min} = 0.60 \longrightarrow R_{ck}^* = 33 \text{ N/mm}^2$$

La resistenza caratteristica R_{ck}^* desunta sulla base della durabilità ($R_{ck}^* = 33 \text{ N/mm}^2$) può essere vantaggiosamente impiegata per controllare se il rapporto acqua/cemento effettivamente adottato è conforme con quello (0.60) richiesto per ragioni di durabilità.

In altre parole, la prescrizione della R_{ck}^* , quindi la misura della resistenza meccanica a compressione, è uno strumento indiretto, ma efficace, per il controllo della durabilità del calcestruzzo.

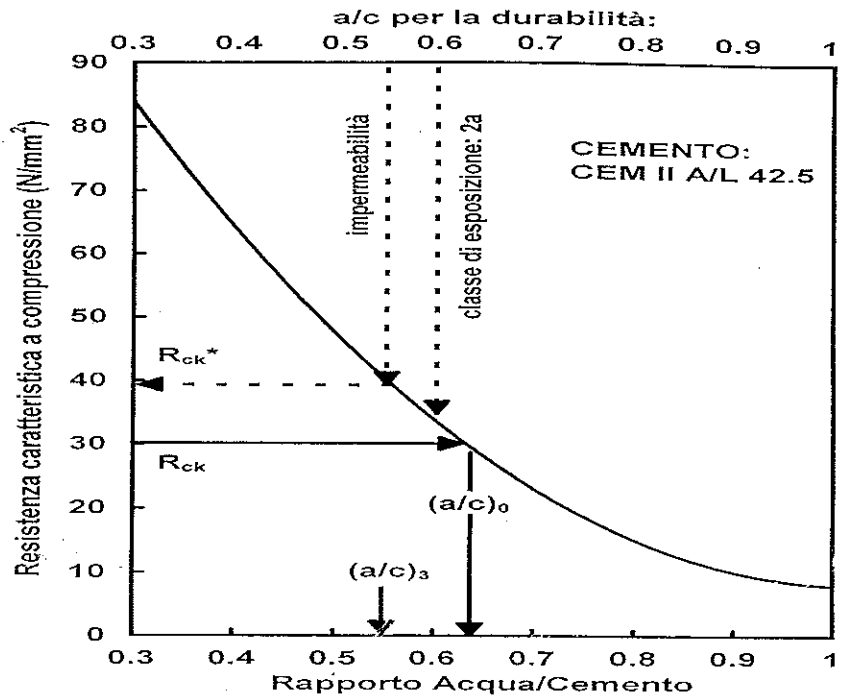


Fig. 6 - Rapporti a/c desunti da considerazioni di carattere strutturale, di durabilità e di impermeabilità e R_{ck}^* corrispondenti per calcestruzzi delle strutture di tipo B

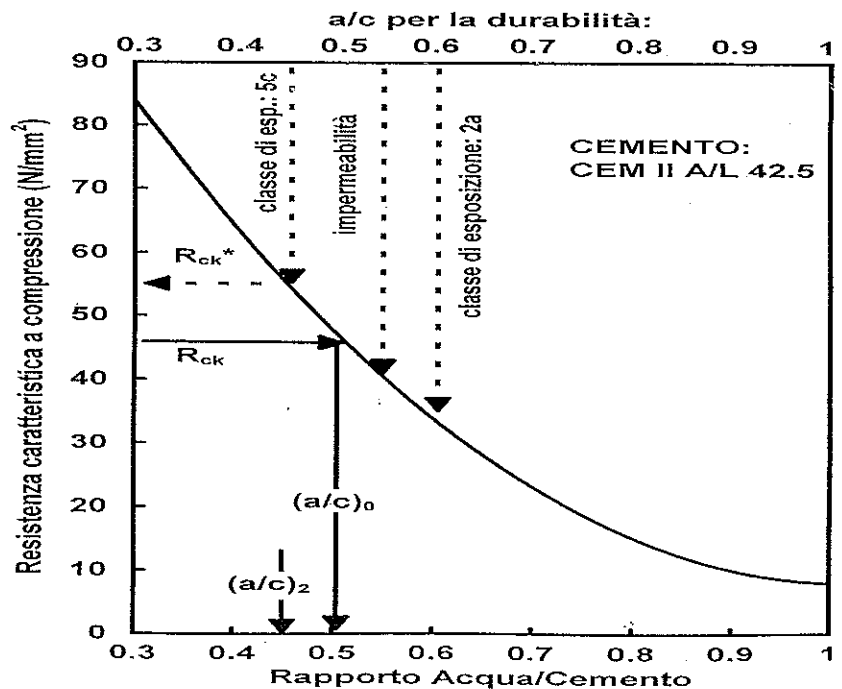


Fig. 7 - Rapporti a/c desunti da considerazioni di durabilità alle acque aggressive, di impermeabilità, di resistenza meccanica per i calcestruzzi delle strutture di tipo C

La prescrizione del rapporto acqua/cemento, al contrario, non può essere di fatto controllata in quanto tale rapporto non può essere determinato con sufficiente precisione né sul calcestruzzo fresco, né sul calcestruzzo indurito, a seguito dell'avvento dei nuovi cementi di miscela previsti dalla norma UNI-ENV 197 parte 1ª.

Strutture di tipo B: calcestruzzi per opere in c.a. a contatto con acqua liquida.

La Fig. 6 mostra come il rapporto acqua/cemento - $(a/c)_3$ - che deve essere adottato per garantire l'impermeabilità della struttura (0.55) risulti minore sia di quello, $(a/c)_1$, richiesto per ragioni di durabilità (classe di esposizione 2a: 0.60) che del rapporto acqua/cemento,

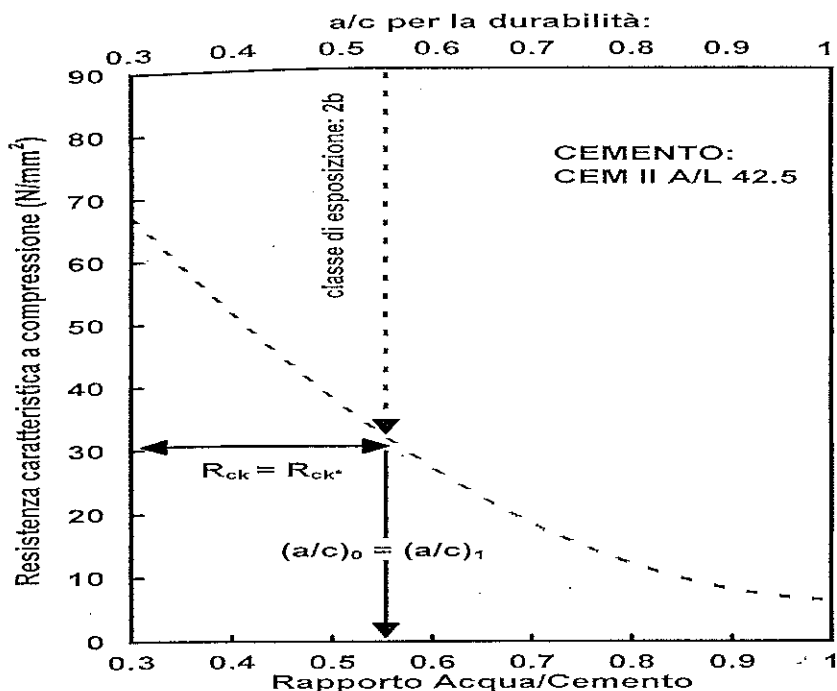


Fig. 8 - Rapporto a/c minimo e resistenza caratteristica per il calcestruzzo delle pile di un ponte in ambiente umido e cicli di gelo-disgelo.

$(a/c)_0$, desunto da considerazioni di carattere strutturale ($R_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow (a/c)_0 = 0.62$). Ne consegue che la resistenza caratteristica da prescrivere R_{ck}^* risulta maggiore (39 N/mm^2) di quella che consegue da requisiti di carattere esclusivamente statico, se si vuole garantire che la struttura risulti impermeabile all'acqua. Infatti:

$$\begin{aligned}
 R_{ck} &= 30 \text{ N/mm}^2 \longrightarrow (a/c)_0 \leq 0.62 \\
 \text{Cl. di esposizione 2a} &\longrightarrow (a/c)_1 \leq 0.60 \\
 \text{Impermeabilità} &\longrightarrow (a/c)_3 \leq 0.55 \\
 \downarrow & \\
 (a/c)_{\min} &= 0.55 \longrightarrow R_{ck}^* = 39 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Anche per le strutture di tipo B la resistenza caratteristica $R_{ck}^* = 39 \text{ N/mm}^2$, corrispondente al rapporto $(a/c)_{\min} = 0.55$, può essere utilizzata come prescrizione di capitolato e come criterio di facile controllo per verificare se il calcestruzzo prodotto è o meno impermeabile all'acqua.

Strutture di tipo C: calcestruzzo per opere in c.a.p. a contatto con acque aggressive

La Fig. 7 mostra come il dato più vincolante per queste strutture è quello derivante dall'esposizione all'acqua contenente anidride carbonica aggressiva e sali d'ammonio (Tabella 3). Il massimo rapporto acqua/cemento - $(a/c)_2$ - per garantire la durabilità nei confronti delle acque aggressive infatti è pari a 0.45 e risulta minore sia di quello - $(a/c)_3$ - necessario a garantire l'impermeabilità della struttura che di quello -

$(a/c)_0$ - corrispondente alla resistenza $R_{ck} = 45 \text{ N/mm}^2$ desunta da considerazioni di carattere statico. Pertanto si ha:

$$\begin{aligned}
 R_{ck} &= 45 \text{ N/mm}^2 \longrightarrow (a/c)_0 \leq 0.50 \\
 \text{Cl. di esposizione 2a} &\longrightarrow (a/c)_1 \leq 0.60 \\
 \text{Cl. di esposizione 5c} &\longrightarrow (a/c)_2 \leq 0.45 \\
 \text{Impermeabilità} &\longrightarrow (a/c)_3 \leq 0.55 \\
 \downarrow & \\
 (a/c)_{\min} &= 0.45 \longrightarrow R_{ck}^* = 54 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

4. Classe di esposizione delle strutture di calcestruzzo per un ponte autostradale in alta montagna

Le strutture di calcestruzzo per un ponte autostradale in alta montagna possono essere suddivise in tre categorie:

A) strutture di fondazione non a contatto con sostanze aggressive e che pertanto appartengono alla classe di esposizione 2a (ambiente umido). Essendo queste strutture interrate si può escludere che possano essere interessate da cicli di gelo-disgelo.

B) pile di calcestruzzo armato esposto all'ambiente umido e alle azioni distruttive dovute ai cicli di gelo-disgelo, ma non in contatto con sali disgelanti a base di cloruro;

C) strutture in cemento armato e cemento armato precompresso della soletta e delle travi longitudinali esposte all'ambiente umido e ai cicli di gelo-disgelo, oltre che all'azione aggressiva promossa dai sali disgelanti a base di cloruro utilizzati per rimuovere o prevenire la formazione di ghiaccio sulla sede stradale.

4.1 Ponte autostradale: resistenza caratteristica dei calcestruzzi desunta da considerazioni di carattere strutturale

La resistenza caratteristica R_{ck} per le tre categorie di strutture, derivante da sole considerazioni di carattere statico, risulta:

- A) $R_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$ per le strutture di fondazione;
- B) $R_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$ per le pile;
- C) $R_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ per le travi longitudinali e la soletta dell'impalcato.

La determinazione della resistenza caratteristica - misurata su provini cubici - si basa sull'impiego di un controllo di accettazione di tipo B adottando per lo scarto quadratico medio un valore pari a 4 N/mm^2 .

Per il confezionamento del calcestruzzo è stato prescelto il cemento CEM II/A-L 42.5.

Fatta eccezione per le strutture di fondazione non esposte ai cicli di gelo-disgelo, i restanti elementi strutturali sono esposti all'azione del ghiaccio: pertanto nel seguito per le strutture di fondazione di tipo A si farà riferimento alla curva a tratto continuo di Fig. 4, che esprime la correlazione $R_c - a/c$ per calcestruzzi non aerati, per le strutture di tipo B e C, invece, la correlazione $R_c - a/c$ è espressa attraverso la curva tratteggiata di Fig. 4 relativa a calcestruzzi confezionati con additivo aerante.

4.2 Ponte autostradale: prescrizioni di capitolato per i calcestruzzi

Combinando opportunamente i requisiti di carattere strutturale e quelli dettati dalla durabilità possono essere elaborate, mediante il sistema esperto precedentemente citato, le corrette prescrizioni di capitolato per i calcestruzzi destinati ai tre tipi di elementi strutturali (A, B, C).

Strutture di tipo A: calcestruzzi delle strutture di fondazione.

Per queste strutture valgono le considerazioni già espresse precedentemente per le strutture di tipo A dell'impianto di depurazione non a contatto con acqua (paragrafo 3.2).

Come anticipato (Fig. 5) l'esigenza di avere una struttura durevole in classe di esposizione 2a - $(a/c)_1 \leq 0.60$ - risulta più cogente che la resistenza caratteristica richiesta ai fini statici ($R_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow (a/c)_0 = 0.67$).

Pertanto per le prescrizioni di capitolato occorre definire una resistenza caratteristica $R_{ck}^* = 33 \text{ N/mm}^2$, maggiore di quella richiesta ai fini statici ($R_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$) e corrispondente al valore del rapporto $a/c = 0.60$ imposto dalla durabilità.

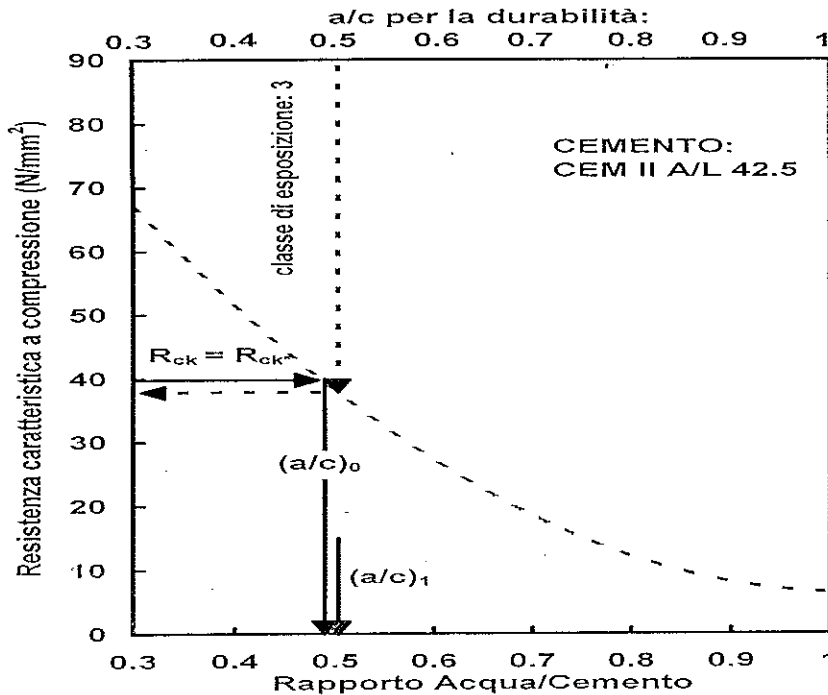


Fig. 9 - Rapporti a/c desunti dalla durabilità e dalle prestazioni meccaniche per il calcestruzzo d'impalcato di un ponte in ambiente umido e cicli di gelo-disgelo.

Strutture di tipo B: calcestruzzo delle pile

La Fig. 8 evidenzia come per queste strutture si verifichi una situazione singolare: le esigenze di carattere statico-strutturale ($R_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$) impongono l'adozione per il calcestruzzo di un rapporto acqua/cemento 0.55, coincidente con quello necessario a garantire la durabilità in classe di esposizione 2b. In sostanza, quindi si verifica una sostanziale coincidenza tra R_{ck} e R_{ck}^* . Per la prescrizione di capitolato sarà quindi sufficiente imporre per la resistenza caratteristica il valore 30 N/mm^2 e l'impiego di un quantitativo di aria, inglobata nel calcestruzzo mediante additivo aerante, congruente con i valori imposti dalla UNI 9858.

Strutture di tipo C: calcestruzzi delle travi precomprese e della soletta di impalcato.

La Fig. 9 mostra che il requisito di resistenza a compressione richiesto per il calcestruzzo dal Progettista strutturale ($R_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow (a/c)_0 = 0.47$) è più cogente di quello imposto dalla durabilità in classe di esposizione 3: $(a/c)_1 \leq 0.50$. Pertanto, anche per le strutture di tipo C nella prescrizione di capitolato sarà sufficiente inserire il valore $R_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ per garantire entrambi i requisiti richiesti per l'opera: sicurezza strutturale e durabilità.

Relativamente a quest'ultimo aspetto è anche necessario - se si vuole evitare il degrado dovuto di cicli di gelo-disgelo - assicurare un sufficiente quantitativo di aria inglobata nel calcestruzzo mediante l'impiego di additivi aeranti

$$\begin{aligned}
 R_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2 &\longrightarrow (a/c)_0 \leq 0.47 \\
 \text{Cl. di esposizione 3} &\longrightarrow (a/c)_1 \leq 0.50 \\
 &\quad + \text{aria} \\
 (a/c)_{\min} \leq 0.47 &\longrightarrow R_{ck}^* = 40 \text{ N/mm}^2 \\
 &\quad + \text{aria}
 \end{aligned}$$

5. Conclusioni

In accordo con quanto riportato nelle normative nazionali ed europee, il rapporto acqua/cemento del calcestruzzo deve essere selezionato oltre che sulla base della resistenza meccanica, anche sulla base dei requisiti fisici e di durabilità richiesti per l'opera cui il conglomerato è destinato.

Sono stati esaminati i requisiti di resistenza, di impermeabilità e di durabilità per le strutture di due opere infrastrutturali, correlando i suddetti parametri con il rapporto acqua/cemento corrispondente. È stato inoltre individuato il valore di tale rapporto in grado di soddisfare sia i requisiti essenziali che quelli accessori richiesti per l'opera.

Poiché il rapporto acqua/cemento, sebbene di valido ausilio per il produttore di calcestruzzo, risulta di difficile determinazione sia sull'impasto fresco che sul calcestruzzo indurito, affinché il Progettista e/o il Direttore dei Lavori possano controllare se il valore del rapporto a/c richiesto per la durabilità o per esigenze di carattere strutturale venga effettivamente rispettato si è trasformato il rapporto a/c nel corrispondente valore di R_{ck} mediante l'uso di uno specifico programma di calcolo.

- [1] UNI 9858, «Calcestruzzo. Prestazioni, produzione, posa in opera e criteri di conformità».
- [2] ENV 206, European Prestandard, «Concrete. Performance, production, placing and compliance criteria».
- [3] ENV 197/1, European Standard, «Cement. Composition, specification and conformity criteria. Part 1: Common Cements».
- [4] M. Collepardi, L. Coppola, R. Troli «Modalità di prescrizione e controllo del calcestruzzo di qualità (1ª parte)», In *Concreto*, maggio-giugno 1995, pp. 11-19.
- [5] L. Coppola, M. Collepardi «Computerized Mix Design for Ready Mixed Concrete», Atti «ERMCO '95, 11th European RMC Congress», Istanbul, Turchia, 21-23 giugno 1995, pp. 194-204.
- [6] L. Coppola, M. Collepardi «Prescrizioni del calcestruzzo per le opere architettoniche e dell'ingegneria infrastrutturale. Parte I: il ruolo e la responsabilità del progettista», *L'Edilizia*, marzo-aprile, 1995, pp. 44-51.
- [7] W. Rechenberg, H.M. Sylla «Dia Wirkung Von Ammonium auf Beton», *Beton*, (G), gennaio, 1993, pp. 26-31.

