

LA DURABILITA' DEL CALCESTRUZZO IN ACCORDO ALLE LINEE GUIDA DEL MINISTERO LL. PP.

L. Coppola, M. Collepari
Enco, Engineering Concrete
Spresiano (TV)

LA DURABILITA' DEL CALCESTRUZZO IN ACCORDO ALLE LINEE GUIDA DEL MINISTERO LL. PP.

CONVEGNO SAIE 1998
LINEE GUIDA DEL MINISTERO LL. PP.
SUL CALCESTRUZZO STRUTTURALE
Bologna, 16 Ottobre 1998

LUIGI COPPOLA
MARIO COLLEPARDI

Enco, Engineering Concrete
Spresiano TV

INTRODUZIONE : NUOVI CRITERI SULLA DURABILITA' DEL CALCESTRUZZO

Rispetto alla norma UNI 9858 - ENV 206, la bozza della nuova norma europea EN 206 cui si ispirano le *Linee Guida del Ministero dei LL.PP. sul calcestruzzo strutturale* (Dicembre 1996), presenta alcune significative differenze per quanto attiene l'approccio alla durabilità delle opere in c.a. e c.a.p.

In particolare, la nuova norma EN 206 prevede 6 classi di esposizione ambientale (XO, XC, XD, XS, XF ed XA), per ciascuna delle quali, ad eccezione della XO, esistono più sottoclassi (Tabella 1). Come si può notare il numero totale delle sottoclassi (18) è raddoppiato rispetto a quelle

Tabella 1 - Classi di esposizione secondo la EN 206.

CLASSE	POTENZIALE DEGRADO	TIPO DI STRUTTURA	NUMERO DI SOTTOCLASSI
XO	Nessun rischio di corrosione (interni di edifici con U.R. molto bassa)	Non armata e armata	1
XC	Corrosione delle armature promossa dalla carbonatazione	Armata	4
XD	Corrosione delle armature promossa dai cloruri esclusi quelli presenti in acqua di mare	Armata	3
XS	Corrosione delle armature promossa dai cloruri dell'acqua di mare	Armata	3
XF	Degrado del calcestruzzo per cicli di gelo-disgelo	Non armata e armata	4
XA	Attacco chimico del calcestruzzo (incluso quello promosso dall'acqua di mare)	Non armata e armata	3

previste nella norma UNI 9858 - ENV 206 (1, 2a, 2b, 3, 4a, 4b, 5a, 5b, 5c).

La classe di esposizione XO riguarda gli ambienti (interni di edifici molto asciutti) nei quali non esiste alcun rischio di degrado nelle strutture in calcestruzzo indipendentemente dalla loro composizione.

Per tutte le altre classi di esposizione, la norma EN 206 prevede alcuni vincoli compositivi o prestazionali; un calcestruzzo che debba essere durabile in questi ambienti deve avere:

- un valore massimo del rapporto a/c ;
- un valore minimo della R_{ck} ;
- un valore minimo del volume di aria inglobata (dove c'è il rischio di gelo);
- un valore minimo nel contenuto di cemento (per aggregati con diametro massimo compreso tra 8 e 32 mm).

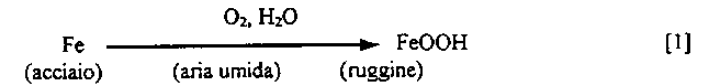
Nelle Tabelle 2-6 sono riportati i suddetti vincoli per ciascuna delle classi di esposizione. Queste Tabelle sono state ottenute riorganizzando in maniera più razionale (cioè compattando insieme la definizione delle classi di esposizione con i vincoli compositivi e prestazionali sopra riportati) i valori originali riportati nella EN 205.

Tabella 2 - Classe di esposizione XC.
Corrosione delle armature promossa dalla carbonatazione.

CLASSE	DESCRIZIONE DELL'AMBIENTE	ESEMPI DI STRUTTURE CHE SI TROVANO NELLA CLASSE DI ESPOSIZIONE	MASSIMO A/C	VALORE MINIMO DI R_{ck} *	DOSAGGIO MINIMO DI CEMENTO (Kg/m ³)
XC1	Asciutto	• Interni di edifici con U.R. molto bassa	0.65	25	260
XC2	Bagnato raramente asciutto	• Strutture idrauliche • Fondazioni e strutture interrato	0.60	30	280
XC3	Moderatamente umido	• Interni di edifici con umidità relativa moderata/alta • Strutture esterne protette dal contatto diretto con la pioggia	0.55	37	280
XC4	Ciclicamente asciutto e bagnato	• Strutture esterne esposte all'acqua piovana	0.50	37	300

* Valore in N/mm² misurato su provini cubici di calcestruzzo confezionati con cementi di classe 32.5.

La Tabella 2 si riferisce alle sottoclassi di esposizione XC1, XC2, XC3 ed XC4 tutte riguardanti la corrosione delle armature metalliche promossa dalla carbonatazione per effetto dell'esposizione all'aria umida (O₂, H₂O, CO₂). Le condizioni più aggressive (XC4) si verificano nelle strutture esposte ciclicamente all'asciutto (ingresso nel calcestruzzo di aria secca contenente O₂ e CO₂) ed alla pioggia (ingresso di H₂O) che sono gli ingredienti per neutralizzare la calce del conglomerato (CO₂) e per alimentare l'ossidazione del ferro (O₂, H₂O):



Pertanto, per far fronte alle condizioni aggressive della XC4 occorre adottare, secondo le Linee Guida, un rapporto a/c non superiore a 0.50 cui corrisponde una R_{ck} di almeno 37 N/mm² se si adotta il cemento di minor classe (32.5). Ovviamente, si otterrebbero valori maggiori di R_{ck} , con un rapporto a/c di 0.50, se si adottassero cementi di maggior classe (per esempio 42.5, ecc.).

Le condizioni meno aggressive (XC1) si verificano per strutture esposte all'aria in ambienti asciutti (interni di edifici): la pressoché totale assenza di H₂O nell'ambiente rallenta fortemente il processo di corrosione [1], e pertanto, il rapporto a/c richiesto nel calcestruzzo per proteggere i ferri di armatura può essere relativamente elevato (0.65).

Le condizioni intermedie di aggressione per la corrosione dei ferri si verificano: in ambienti permanentemente bagnati (XC2) per la difficoltà dell'aria (e quindi dell'O₂ e della CO₂) a permeare i pori del calcestruzzo sempre saturi di acqua; ed in ambienti moderatamente umidi (XC3) per la carenza di H₂O nell'ambiente. I rapporti a/c richiesti in queste condizioni (0.60 e 0.55 rispettivamente) sono intermedi tra quelli richiesti per le condizioni più aggressive (0.50) e per quelle meno severe (0.65).

La Tabella 3 si riferisce alle sottoclassi di esposizione D1, D2 e D3 riguardanti la corrosione delle armature provocata dalla presenza di cloruri (esclusi quelli presenti in acqua di mare). Si tratta di categorie ambientali molto particolari che includono per esempio: strutture industriali esposte permanentemente all'acqua ed a spruzzi di salamoia a base di NaCl (XD1), piscine natatorie sottoposte a clorazione dell'acqua (XD2), pavimenti in calcestruzzo di parcheggi coperti esposti indirettamente ai sali disgelanti (NaCl, CaCl₂) per trascinarsi dall'esterno di acqua salata da parte degli autoveicoli nei periodi invernali (XD3). Questa ultima condizione (penetrazione di acqua e cloruro nei periodi invernali alternata a penetrazione di aria e umidità nei periodi caldi) è la più severa, e richiede pertanto un rapporto a/c molto basso (0.45) cui corrisponde una R_{ck} particolarmente elevata (45 N/mm²) anche associata al cemento di minor classe di resistenza (32.5).

Val la pena di segnalare che i cloruri ai quali si riferisce la classe di esposizione XD (Tabella 3) includono anche quelli impiegati come sali disgelanti (NaCl e CaCl₂) ai quali le strutture in calcestruzzo possono essere saltuariamente esposte nonostante sia assente l'azione ciclica del gelo-disgelo (per esempio: pavimenti di parcheggi coperti). Invece, le strutture sottoposte all'azione dei sali disgelanti ed ai cicli di gelo-disgelo rientrano nella classe di esposizione XF che verrà esaminata più avanti (Tabella 5).

La Tabella 4 riguarda le opere marittime suddivise in quelle esposte all'aerosol marino (XS1), quelle sommerse in acqua di mare (XS2), e quelle semi-immesse o esposte saltuariamente agli spruzzi di acqua marina (XS3). Questa ultima sottoclasse di esposizione è la più aggressiva per la penetrazione del cloruro presente nell'acqua, che promuove la corrosione localizzata dei ferri (*pitting corrosion*), alternata alla penetrazione dell'aria umida che alimenta la corrosione secondo lo schema del processo [1].

Nella Tabella 5 sono mostrate le classi di esposizione riguardanti l'attacco del calcestruzzo provocato dalla formazione di ghiaccio aggravato eventualmente dalla presenza dei sali disgelanti.

La situazione meno aggressiva (XF1) riguarda le strutture verticali che, pur esposte alla pioggia, sono lambite dall'acqua senza esserne saturate: in queste condizioni è sufficiente adottare un rapporto a/c non superiore a 0.55 senza impiegare additivi aeranti per inglobare le bolle d'aria.

Tabella 3 - Classe di esposizione XD.
Corrosione delle armature promossa dai cloruri esclusi quelli presenti in acqua di mare.

CLASSE	DESCRIZIONE DELL'AMBIENTE	ESEMPI DI STRUTTURE CHE SI TROVANO NELLA CLASSE DI ESPOSIZIONE	MASSIMO A/C	VALORE MINIMO DI R_{ct}^*	DOSAGGIO MINIMO DI CEMENTO (Kg/m ³)
XD1	Moderatamente umido	• Strutture esposte agli spruzzi contenenti cloruri	0.55	37	300
XD2	Bagnato raramente asciutto	• Piscine natatorie • Strutture esposte ad acque industriali contenenti Cl ⁻	0.55	37	300
XD3	Ciclicamente asciutto e bagnato	• Pavimentazioni per parcheggi coperti	0.45	45	320

* Valore in N/mm² misurato su provini cubici di calcestruzzo confezionati con cementi di classe 32.5.

Tabella 4 - Classe di esposizione XS.
Corrosione delle armature promossa dal cloruro presente nell'acqua di mare.

CLASSE	DESCRIZIONE DELL'AMBIENTE	ESEMPI DI STRUTTURE CHE SI TROVANO NELLA CLASSE DI ESPOSIZIONE	MASSIMO A/C	VALORE MINIMO DI R_{ct}^*	DOSAGGIO MINIMO DI CEMENTO (Kg/m ³)
XS1	Strutture esposte all'aerosol marino ma non a diretto contatto con l'acqua di mare	• Strutture sul litorale o in prossimità della costa	0.50	37	300
XS2	Strutture sommerse in acqua di mare	• Parti di strutture marine	0.45	45	320
XS3	Zona di marea, degli spruzzi e delle onde	• Parti di strutture marine	0.45	45	340

* Valore in N/mm² misurato su provini cubici di calcestruzzo confezionati con cementi di classe 32.5.

La situazione più aggressiva (XF4) riguarda le superfici facilmente saturabili dall'acqua piovana (generalmente pavimenti, solette, ecc.) ed esposte ai sali disgelanti per rimuovere il ghiaccio: in questo caso si richiede un basso rapporto a/c (0.45) cui corrisponde una R_{ct} non molto elevata (37 N/mm² con cemento di classe 32.5) per la presenza di aria inglobata (almeno 4%) necessaria per la

resistenza del calcestruzzo al ghiaccio, ma notoriamente penalizzante per la resistenza meccanica (circa 20% in meno).

Le situazioni aggressivamente intermedie riguardano strutture verticali difficilmente saturabili dall'acqua piovana e solo indirettamente coinvolte dagli spruzzi di acqua contaminata da sali disgelanti (XF2) e le strutture orizzontali facilmente saturabili dall'acqua piovana, ma non esposte a salatura nei periodi invernali (XF3). In quest'ultimo caso si richiede un rapporto a/c non superiore a 0.50 ed un volume di aria di almeno 4%: la R_{ct} minima, corrispondente a questi parametri compositivi, è fissata a 37 N/mm² (sempre in presenza del cemento di minor classe 32.5); tuttavia, questo valore sembra eccessivo (o frutto di un errore di trascrizione) se si considera che in altre classi di esposizione (XC4 in Tabella 2, XS1 in Tabella 4) ad un rapporto a/c massimo di 0.50 corrisponde sempre una R_{ct} minima di 37 N/mm², ma in assenza di aria.

L'anomalia del valore minimo della R_{ct} (37 N/mm²) per la sottoclasse di esposizione XF3 è confermata dal confronto con la successiva sottoclasse di esposizione XF4 dove appare lo stesso valore di R_{ct} (37 N/mm²) a parità di aria inglobata (4%) ma con un rapporto a/c minore (0.45 invece di 0.50).

Nella Tabella 6 (che riguarda le sotto-classi di esposizione A1, A2 ed A3) sono riassunte le condizioni di attacco chimico nei confronti del calcestruzzo derivanti dal terreno (solfati e acidità) oppure da acque industriali o naturali ma comunque aggressive per la presenza di solfato, acidità, anidride carbonica, ammonio o magnesio. A seconda del livello di concentrazione degli agenti aggressivi e della eventuale combinazione di questi, viene individuata la sottoclasse di esposizione ed i relativi limiti compositivi e prestazionali del calcestruzzo.

Tabella 5 - Classe di esposizione XF.
Attacco del calcestruzzo promosso dai cicli di gelo-disgelo.

CLASSE	DESCRIZIONE DELL'AMBIENTE	ESEMPI DI STRUTTURE CHE SI TROVANO NELLA CLASSE DI ESPOSIZIONE	MASSIMO A/C	MINIMO CONTENUTO DI ARIA (% in vol.)	VALORE MINIMO DI R_{ct}^*	DOSAGGIO MINIMO DI CEMENTO (Kg/m ³)
XF1	Moderata saturazione con acqua in assenza di sali disgelanti	• Superfici verticali esposte alla pioggia e al gelo	0.55	-	37	300
XF2	Moderata saturazione con acqua in presenza di sali disgelanti	• Superfici verticali di strutture stradali esposte al gelo e agli spruzzi contenenti sali disgelanti	0.55	4	30	300
XF3	Elevata saturazione con acqua in assenza di sali disgelanti	• Superfici orizzontali esposte alla pioggia e al gelo	0.50	4	37 (?)	320
XF4	Elevata saturazione con acqua in presenza di sali disgelanti	• Superfici orizzontali e strutture verticali stradali esposte direttamente ai sali disgelanti	0.45	4	37	340

* Valore in N/mm² misurato su provini cubici di calcestruzzo confezionati con cementi di classe 32.5.

Tabella 6 - Classe di esposizione XA.
Attacco chimico del calcestruzzo.

CLASSE	DESCRIZIONE DELL'AMBIENTE*							MASSIMO A/C	VALORE MINIMO DI R_{ck} ****	DOSAGGIO MINIMO DI CEMENTO
	TERRENO		ACQUA							
	Acidità (Bauman Gully)**	SO ₄ ²⁻ (mg/kg***)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	PH	CO ₂ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)			
XA1	> 20°	≥2000 ≤3000	≥200 ≤600	≤5.5 ≥5.5	≥15 ≤40	≥15 ≤30	≥300 ≤1000	0.55	37	300
XA2	-	>3000 ≤12000	>600 ≤3000	>5.0 ≤4.5	>40 ≥100	>30 ≤60	>1000 ≤3000	0.50	37	320
XA3	-	>12000 ≤24000	>3000 ≤8000	>4.5 ≤4.0	>100	>60 ≤100	>3000	0.45	45	360

* Quando due o più agenti aggressivi conducono alla stessa classe di esposizione l'ambiente deve essere classificato nella classe con il grado di aggressione maggiore.

** L'acidità del terreno viene valutata con il metodo DIN 4030-2.

*** Terreni rocciosi o argillosi con una permeabilità inferiore a 10⁻⁵ m/s debbono essere classificati nella classe con un grado di aggressione immediatamente più basso.

**** Valore in N/mm² misurato su provini cubici di calcestruzzo confezionati con cementi di classe 32.5.

DIFFICOLTA' DI INTERPRETAZIONE DEI CRITERI PER LA DURABILITA' DELLE OPERE IN C.A. SECONDO LA NORMA EN 206

Esistono oggettive difficoltà di interpretazione dei nuovi criteri sulla durabilità del calcestruzzo così come essi sono presentati nella nuova norma EN 206 (Tabelle 2-6). Valgano per tutti alcuni semplici esempi sulla stessa struttura (per esempio: muro in c.a.).

- a) Si consideri, per prima, un muro in c.a. che sia esposto all'aria in una zona geografica dal clima temperato (escluso il gelo nei periodi invernali ed esposizione al sole ed alla pioggia). Quale è la classe di esposizione (ed i conseguenti vincoli compositivi-prestazionali) da adottare? Si dovrebbe selezionare la classe di esposizione XC4 (Tabella 2) e si dovrebbe adottare un rapporto a/c non superiore a 0.50 (quindi una R_{ck} non inferiore a 37 N/mm²) per proteggere le armature metalliche dalla corrosione promossa dalla carbonatazione atmosferica.
- b) Si consideri, ora, la stessa struttura (muro in c.a.) nelle stesse condizioni di esposizione all'aria umida con questa unica variante ed aggravante: un clima rigido nella stagione invernale, con cicli di gelo-disgelo in aggiunta all'esposizione sole-pioggia negli altri periodi. In questo secondo caso, la consultazione della Tabella 5 porterebbe ad individuare la classe di esposizione XF1 (superfici verticali esposte alla pioggia e al gelo) con la conseguente adozione di un rapporto a/c non superiore a 0.55 ed una R_{ck} di almeno 37 N/mm². A parte la "stranezza" di prescrivere lo stesso valore minimo di R_{ck} pur con rapporti a/c diversi (0.50 in classe di esposizione XC4 dell'esempio precedente e 0.55 in classe di esposizione XF1), come è possibile che il rapporto a/c massimo sia più elevato (0.55 contro 0.50) nella condizione di esposizione più severa (XF1 contro XC4)?

Per ovviare a questa "anomalia" della norma EN 206, la struttura in esame (muro in c.a.) può essere considerata esposta a due classi di esposizione:

- XC4 (carbonatazione) ⇒ a/c ≤ 0.50
 - XF1 (struttura verticale esposta al gelo) ⇒ a/c ≤ 0.55
- ⇒ a/c ≤ 0.50

Pertanto con questo criterio si può rimuovere l'anomalia di un muro in c.a. che in ambienti rigidi (XF1) dovrebbe essere costruito con un calcestruzzo caratterizzato da un rapporto a/c (0.55) superiore a quello del conglomerato destinato alla stessa struttura in climi moderati (XC4) caratterizzato da un rapporto a/c più restrittivo (0.50).

- c) Si consideri, infine, un muro di sostegno in c.a., nelle stesse condizioni climatiche (sole-pioggia) dell'esempio a) sul lato esposto all'aria, ed a contatto con un terreno solfatico (SO₄²⁻=2000-3000 mg/kg) sul lato opposto. Per effetto di questa situazione ambientale (potenziale attacco solfatico del calcestruzzo) occorre prendere in considerazione la classe di esposizione XA1 ed adottare, quindi, un rapporto a/c non superiore a 0.55 (Tabella 6). Occorre, tuttavia, aggiungere che, sempre dal lato terreno - al di là del contenuto in solfato - è in agguato, secondo la norma EN 206, il rischio di carbonatazione e di corrosione dei ferri di armatura (classe di esposizione XC2) e si dovrebbe adottare un rapporto a/c non superiore a 0.60 (Tabella 2). D'altra parte, nel lato esposto all'aria, occorre prendere in considerazione la classe di esposizione XC4 (corrosione dei ferri per carbonatazione) ed adottare conseguentemente un rapporto a/c non superiore a 0.50 (Tabella 2). Quale, tra i tre suddetti valori nel rapporto a/c (0.55; 0.60 o 0.50), deve essere adottato?

Poiché ovviamente il muro di sostegno dovrà essere costruito con un solo calcestruzzo, viene selezionato il rapporto a/c più restrittivo, cioè il più basso (0.50), in modo da soddisfare tutti e tre i vincoli imposti dalla durabilità:

- lato aria (carbonatazione): XC4 ⇒ a/c ≤ 0.50
 - lato terra (attacco solfatico): XA1 ⇒ a/c ≤ 0.55
 - lato terra (carbonatazione): XC2 ⇒ a/c ≤ 0.60
- ⇒ a/c ≤ 0.50

Per rispondere ai quesiti sollevati nell'esame degli esempi b) e c) si rimanda al capitolo che segue.

COME FACILITARE L'ADOZIONE DEI CRITERI PER LA DURABILITA' DELLE OPERE IN C.A. SECONDO LA NORMA EN 206

Il software EASY & QUICK - LG si basa innanzitutto sulla classificazione delle possibili tipologie e sotto-tipologie di costruzioni (interni per edifici, strutture fuoriterza, strutture interrato, strutture per opere marittime, idrauliche, ecc.).

Dopo aver scelto la specifica struttura interessata (per esempio: muro di sostegno in c.a. a parziale contatto con terreno) tra tutte le possibili tipologie e sotto-tipologie strutturali disponibili nel programma, la struttura prescelta viene confrontata con tutte le possibili classi e sotto-classi di esposizione previste nelle *Linee Guida* (Tabelle 1-6). Attraverso questo confronto vengono selezionati tutti i possibili vincoli compositivi e prestazionali derivanti dalle varie classi e sotto-classi di esposizione.

La scelta della tipologia strutturale ed il confronto di questa con le varie classi di esposizione avvengono attraverso una serie di domande poste dal programma. A queste l'utente deve rispondere selezionando una delle risposte disponibili nel programma stesso. Al termine di questo processo, durante il quale l'utente è assistito da una serie di "aiuti", il programma attribuisce automaticamente alla struttura interessata tutte le possibili classi di esposizione e seleziona il limite più cogente (cioè il più basso) tra i valori consentiti per il rapporto a/c . Per esempio, nel caso c sopra riportato nel precedente capitolo (muro di sostegno in c.a. a parziale contatto di terreno con tenore in solfato di 2000-3000 mg/kg) il programma assegna non una ma tre classi di esposizione alla struttura: XC4 per la parte esposta all'aria, e quindi alla carbonatazione; XA1 per la parte a contatto del terreno solfatico; ma anche XC2 sempre per il terreno che, al di là del contenuto in solfato, si trova in un ambiente quasi permanentemente umido (Tabella 2).

Poiché, ovviamente, il muro dovrà essere costruito con un solo calcestruzzo, il programma seleziona il rapporto a/c più cogente, cioè il più basso (0.50), in modo da soddisfare tutti e tre i vincoli imposti dalla durabilità:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{lato aria (carbonatazione):} & \text{XC4} \Rightarrow a/c \leq 0.50 \\ \text{lato terra (attacco solfatico):} & \text{XA1} \Rightarrow a/c \leq 0.55 \\ \text{lato terra (carbonatazione):} & \text{XC2} \Rightarrow a/c \leq 0.60 \end{array} \right\} \Rightarrow (a/c)_1 = 0.50$$

Il valore del rapporto acqua/cemento sopra prescelto (0.50) sulla base delle considerazioni circa la durabilità del calcestruzzo in relazione alle aggressioni ambientali (XC4, XA1, XC2) verrà denominato $(a/c)_1$.

Con lo stesso criterio, il caso b del precedente capitolo (muro in c.a. esposto ai cicli di gelo-disgelo) può essere affrontato considerando la struttura esposta a due classi di esposizione:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{XC4 (carbonatazione)} & \Rightarrow a/c \leq 0.50 \\ \text{XF1 (superficie verticale esposta al gelo)} & \Rightarrow a/c \leq 0.60 \end{array} \right\} \Rightarrow (a/c)_1 = 0.50$$

Pertanto, con questo criterio si può rimuovere l'anomalia di un muro in c.a. che in ambienti rigidi (XF1) dovrebbe essere costruito con un calcestruzzo caratterizzato da un rapporto a/c (0.55) superiore a quello del conglomerato destinato alla stessa struttura in climi moderati (XC4) caratterizzato da un rapporto a/c più restrittivo (0.50).

Oltre al rapporto $(a/c)_1$ determinato da considerazioni di durabilità, altri rapporti acqua/cemento verranno imposti al calcestruzzo in base ad altre considerazioni aggiuntive, una delle quali - basata sulla resistenza caratteristica ai fini strutturali, R_{ck} - è sicuramente sempre presente nei dati di progetto: il rapporto acqua/cemento che deve essere adottato per la R_{ck} verrà denominato $(a/c)_2$ per distinguerlo da quello, $(a/c)_1$, determinato dalle esigenze della durabilità.

Altri valori del rapporto acqua/cemento - indicati con $(a/c)_3$, $(a/c)_4$ ed $(a/c)_5$ - potranno eventualmente essere imposti per altre particolari esigenze discusse nel prossimo capitolo.

LA SCELTA DEL RAPPORTO A/C

Il programma tiene conto dei vari requisiti che il calcestruzzo deve soddisfare. Questi possono includere:

- *requisiti prestazionali fondamentali* (come resistenza caratteristica - R_{ck} - e durabilità), che debbono essere sempre presenti in qualsiasi opera da realizzare;
- *requisiti prestazionali particolari*, che possono essere richiesti solo in determinate strutture: per esempio, la resistenza a flessione in una pavimentazione, l'impermeabilità in una diga o galleria, la resistenza meccanica a tempi brevi laddove si richieda un certo valore in coincidenza di una determinata operazione esecutiva (scasseratura o taglio dei ferri pretesi, ecc.).

Il punto chiave su cui si basa il software è incentrato sul fatto che tutti i suddetti requisiti prestazionali (fondamentali o particolari) del calcestruzzo indurito dipendono fondamentalmente, anche se non esclusivamente, dal rapporto acqua/cemento (a/c). Si possono individuare, per ogni requisito prestazionale, i corrispondenti valori minimi di a/c capaci di garantire il raggiungimento di ciascun obiettivo prestazionale:

- $(a/c)_1$ per soddisfare la durabilità in ambienti aggressivi normali;
- $(a/c)_2$ per soddisfare la R_{ck} ;
- $(a/c)_3$ per soddisfare l'impermeabilità in opere idrauliche;
- $(a/c)_4$ per soddisfare la resistenza a flessione o a trazione diretta;
- $(a/c)_5$ per soddisfare la resistenza alle brevi stagionature (scassero o tesatura dei ferri).

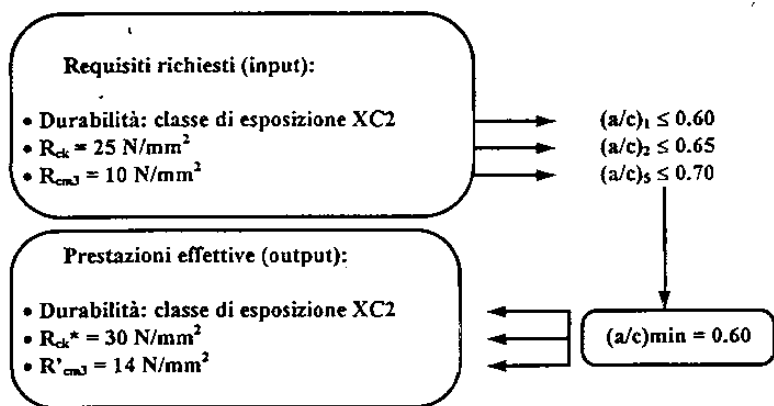
Pertanto, se si intende progettare un calcestruzzo dotato simultaneamente di più predeterminati requisiti, è necessario scegliere quel particolare valore del rapporto a/c capace di soddisfare tutti i requisiti richiesti (*input*).

Questo particolare valore del rapporto acqua/cemento, che è il minore fra tutti quelli derivanti dai vari *input*, verrà indicato con il simbolo $(a/c)_{min}$. Una volta individuato il valore di $(a/c)_{min}$, ne conseguono le effettive prestazioni del calcestruzzo (*output*) che non necessariamente coincidono con i requisiti richiesti inizialmente, ad eccezione di quel requisito che, per essere il più difficile da soddisfare, ha determinato il rapporto acqua/cemento prescelto $(a/c)_{min}$.

Si supponga, per esempio, che i requisiti richiesti per il calcestruzzo indurito di una struttura armata siano:

- R_{ck} di 25 N/mm²;
- resistenza a compressione a 3 giorni (R_{cm3}) di 10 N/mm²;
- durabilità in un ambiente permanentemente bagnato (classe di esposizione XC2).

Per soddisfare questi tre requisiti si richiedono i seguenti rapporti a/c :



Come si può vedere, a parte la classe di esposizione (XC2), che come requisito più cogente ha determinato il rapporto $(a/c)_{min}$ prescelto (0.60), le prestazioni meccaniche effettive (R_{ck}^* ed R'_{cm3}), che derivano proprio da questo rapporto acqua/cemento, risultano superiori ai requisiti meccanici richiesti sulla base del calcolo strutturale (R_{ck}) e dell'esigenza esecutiva (R_{cm3}).

Per R_{ck}^* si intende la resistenza caratteristica derivante dal minor rapporto a/c che non necessariamente coincide con la R_{ck} desunta dal semplice calcolo strutturale. Nell'esempio sopra illustrato la R_{ck}^* (30 N/mm²) corrisponde al rapporto $(a/c)_1 = 0.60$ determinato dalle esigenze di durabilità (classe di esposizione XC2) mentre per la R_{ck} basata solo sul calcolo strutturale sarebbe stato sufficiente adottare il rapporto $(a/c)_2$ di 0.65. Analogamente, l'effettiva resistenza meccanica a 3 giorni ($R'_{cm3} = 14$ N/mm²) risulta più alta di quella prevista dalle programmate esigenze di scasseratura ($R_{cm3} = 10$ N/mm²) per la quale sarebbe stato sufficiente un rapporto $(a/c)_3$ di 0.70 contro quello effettivamente adottato di 0.60.

Nelle prescrizioni tecniche di capitolato dovranno apparire il valore di R_{ck}^* (30 N/mm²) ed eventualmente di R'_{cm3} (14 N/mm²) come prestazioni meccaniche effettive, in quanto questi valori, e solo questi, garantiscono che sia soddisfatto anche il requisito di durabilità (classe di esposizione XC2 $\Rightarrow a/c = 0.60$). Ciò deriva dal fatto che mentre è sempre possibile controllare (ed eventualmente contestare) il rispetto della prestazione meccanica (e quindi indirettamente del rapporto a/c) attraverso il prelievo e la rottura dei provini, non è altrettanto facile (anzi è quasi praticamente impossibile) verificare in un calcestruzzo ormai indurito quale sia stato il dosaggio di cemento (c), il quantitativo di acqua di impasto (a) e quindi il rapporto a/c effettivamente impiegato per garantire il livello di durabilità richiesto (classe di esposizione).

I REQUISITI PRESTAZIONALI

I requisiti prestazionali includono: la classe di resistenza (resistenza caratteristica) e la classe di esposizione (durabilità) come requisiti fondamentali che debbono essere sempre presenti in un'opera in calcestruzzo, e altri requisiti particolari (resistenza meccanica a tempi intermedi, resistenza

meccanica a flessione o a trazione, impermeabilità, ecc.) che possono essere richiesti in opere particolari.

Sia la resistenza caratteristica che la durabilità dipendono significativamente - anche se non esclusivamente - dal valore del rapporto acqua/cemento: più questo valore è basso, maggiore è la compattezza del calcestruzzo e più aumenta la resistenza meccanica come anche la durabilità. Pertanto, queste due grandezze procedono di pari passo: non si può aumentare l'una senza aumentare anche l'altra. Non si può, per esempio, impiegare un calcestruzzo con resistenza meccanica medio-bassa, ancorché accettabile dal punto di vista strutturale (per esempio $R_{ck} = 25$ N/mm²), e pretendere che sia anche durevole in un ambiente aggressivo come il mare. In sostanza, una volta che il progettista ha fissato, sulla base dei suoi calcoli strutturali, la resistenza caratteristica di cui ha bisogno, deve verificarne la congruenza con la durabilità. In pratica, il rapporto acqua/cemento prescelto deve essere in grado di soddisfare sia la resistenza caratteristica richiesta sulla base del calcolo strutturale, sia la durabilità delle strutture in relazione all'ambiente dove l'opera è destinata a sorgere.

REQUISITI PRESTAZIONALI:

- | | | |
|---|--|--------------|
| <ul style="list-style-type: none"> RESISTENZA CARATTERISTICA (R_{ck}) a 28 gg DURABILITÀ (CLASSE DI ESPOSIZIONE) | | fondamentali |
| <ul style="list-style-type: none"> RESISTENZA MECCANICA A FLESSIONE a 28 gg RESISTENZA MECCANICA A TRAZIONE a 28 gg IMPERMEABILITÀ a 28 gg RESISTENZA MECCANICA A COMPRESSIONE A TEMPI INTERMEDI (1, 3, 7 gg) | | particolari |

NORME E RACCOMANDAZIONI TECNICHE

Le norme e le raccomandazioni tecniche sono l'insieme dei vincoli sotto forma di leggi, decreti, raccomandazioni e direttive che a livello nazionale e/o europeo stabiliscono i requisiti minimi o i livelli massimi entro i quali occorre operare sulla scelta dei materiali, nella loro miscelazione, oltre che nella definizione delle prestazioni del conglomerato (resistenza meccanica, permeabilità, durabilità, ecc.).

NORME TECNICHE:

- LEGGE 1086 (1971)
- LINEE GUIDA DEL MINISTERO LL.PP. SUL CALCESTRUZZO STRUTTURALE (Dicembre 1996)
- BOZZA DI NORMA EUROPEA EN 206
- ISO DIS 7031
- ISO 9690 (1987)
- NORMA UNI - ENV 197/1 (1993)

VINCOLI PROGETTUALI ED ESECUTIVI

I vincoli progettuali ed esecutivi rappresentano quelle limitazioni operative derivanti dal progetto dell'opera e dalla sua esecuzione.

Un tipico esempio di vincolo progettuale è il copriferro stabilito dal progettista in una struttura armata: è evidente che la massima pezzatura dell'aggregato disponibile o prescelto dovrà essere compatibile con lo spessore del copriferro; così pure la sezione minima delle strutture e la distanza tra i ferri condizionano la massima dimensione dell'aggregato.

Un tipico esempio di vincolo esecutivo è rappresentato dall'esigenza di dover raggiungere in tempi brevi, e magari in condizioni climatiche sfavorevoli (freddo), un'elevata resistenza meccanica alle brevi stagionature per consentire un rapido disarmo dei getti o il taglio dei ferri in una struttura precompressa. In queste condizioni la resistenza meccanica allo scasso (per esempio a 3 giorni ed a 5°C) può diventare un parametro più vincolante che non la resistenza caratteristica (che per definizione è misurata a 20°C dopo 28 giorni) o la durabilità.

VINCOLI PROGETTUALI & ESECUTIVI

- COPRIFERRO - INTERFERRO - SEZIONE MINIMA
- LA VORABILITÀ (CLASSE DI CONSISTENZA)
- TIPO & CLASSE DI CEMENTO
- TIPO & PEZZATURA MASSIMA DEGLI AGGREGATI
- TEMPERATURA DI STAGIONATURA

PRESCRIZIONI TECNICHE DI CAPITOLATO

Le prescrizioni tecniche di capitolato includono una serie di requisiti fisico-meccanici sul calcestruzzo (resistenza meccanica, impermeabilità, lavorabilità) che possono essere valutati secondo procedure ben codificate da norme tecniche. Parimenti, tali prescrizioni includono le caratteristiche merceologiche delle materie prime stabilite anch'esse da norme tecniche ben codificate (tipo di cemento, di aggregati, di additivi).

Val la pena di ricordare che la classe di resistenza $C(x/y)$ che deve apparire nel capitolato non necessariamente coincide con la resistenza caratteristica (R_{ck}) introdotta come *input* e derivante da pure considerazioni di calcolo strutturale. Il valore di $C(x/y)$ tiene anche conto di eventuali altri requisiti (resistenza meccanica allo scasso, resistenza meccanica a flessione o a trazione, impermeabilità, durabilità) per soddisfare i quali si rende necessario adottare un rapporto a/c più basso di quello che corrisponde alla R_{ck} .

* Il simbolo C sta ad indicare la classe di resistenza; x ed y sono due numeri che corrispondono alla classe di resistenza del calcestruzzo: x se si riferisce alla resistenza misurata su provini cilindrici, y a quella determinata su provini cubici; viene anche assunto che x corrisponde all'80% di y .

PRESCRIZIONI TECNICHE DI CAPITOLATO:**ESEMPIO**

- | | |
|-------------------------------------|---|
| • CLASSE DI RESISTENZA | C 25/30; $f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$ (cilindri)
$R_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$ (cubi) |
| • CLASSE DI CONSISTENZA | S4 (slump = 160-200 mm) |
| • TIPO & CLASSE DI CEMENTO | CEM I 32.5 R |
| • IMPERMEABILITÀ (ISO DIS 7031) | Si |
| • AGGREGATI (tipo/diametro massimo) | Frantumati / $D_{max} = 32 \text{ mm}$ |

RESISTENZA CARATTERISTICA E TIPO DI CONTROLLO

La resistenza caratteristica (R_{ck}) è calcolata penalizzando la resistenza meccanica media a 28 giorni (R_{cm28}) di un certo valore $k \cdot \delta$, con $k = 1.4$. Esistono due tipi di controllo (A e B). Con il controllo di tipo A , la penalizzazione $k \cdot \delta$ è fissa ed assunta forfettariamente eguale a 3.5 N/mm^2 per provini cubici (2.8 N/mm^2 per provini cilindrici pari all'80% di 3.5 N/mm^2). Con il controllo di tipo B , più severo, la penalizzazione è funzione dello scarto quadratico medio (δ) che può variare, di solito, tra 2 e 10 N/mm^2 a seconda del grado di controllo esercitato nella produzione del calcestruzzo. A parità di R_{ck} richiesta (per esempio: 30 N/mm^2), la R_{cm28} può cambiare a seconda del controllo (A e B) prescelto. In particolare, assumendo per il controllo di tipo B un valore di δ pari a 5 N/mm^2 , ne consegue che occorre una R_{cm28} di 37 N/mm^2 che è maggiore della R_{cm28} prevista per il controllo di tipo A (33.5 N/mm^2).

RESISTENZA CARATTERISTICA:**CONTROLLO DI TIPO A:**

$$R_{ck} = R_{cm28} - 3.5 \text{ N/mm}^2$$

CONTROLLO DI TIPO B:

$$R_{ck} = R_{cm28} - 1.4 \delta$$

δ variabile da 2 a 10 N/mm^2 ; valore medio = 5 N/mm^2 .

RESISTENZA CARATTERISTICA E CLASSE DI RESISTENZA

La resistenza caratteristica può essere valutata mediante rottura a compressione di provini cubici (R_{ck}) o cilindrici (f_{ck}). Per effetto della diversa geometria del provino, il valore di f_{ck} risulta mediamente pari all'80% del valore di R_{ck} .

La classe di resistenza è individuata dalla lettera C seguita dal numero che esprime la f_{ck} e quindi, dopo una barra, dal numero che esprime la R_{ck} . Per esempio, la classe di resistenza C 25/30 individua un calcestruzzo con resistenza caratteristica di 25 N/mm² su cilindro (f_{ck}) e di 30 N/mm² su cubo (R_{ck}).

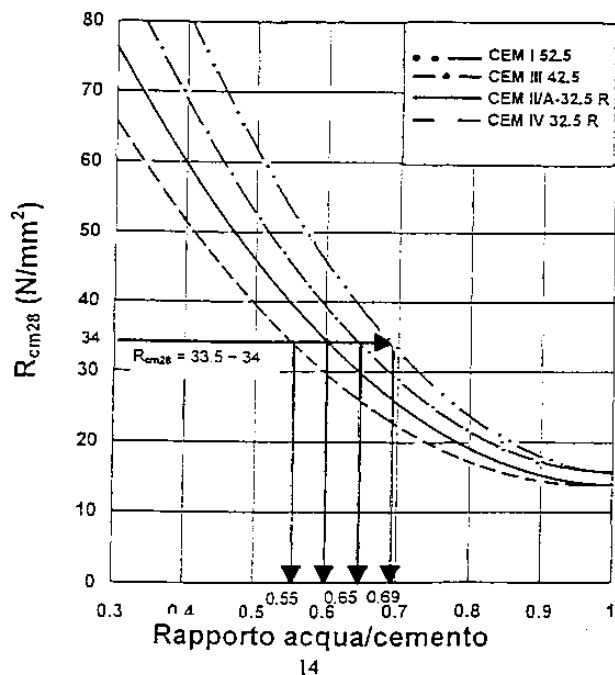
RESISTENZA CARATTERISTICA E CLASSE DI RESISTENZA:

Classe di resistenza	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
f_{ck}^*	12	16	20	25	30	35	40	45	50
R_{ck}^{**}	15	20	25	30	37	45	50	55	60

* f_{ck} si riferisce alla resistenza caratteristica misurata su cilindri.
 ** R_{ck} si riferisce alla resistenza caratteristica misurata su cubi.

RESISTENZA MECCANICA

La resistenza meccanica, ed in particolare quella a compressione a 28 giorni (R_{cm28}) dal cui valore si calcola dal R_{ck} , dipende dal rapporto a/c : più è basso il valore di a/c , maggiore è la resistenza meccanica. Tuttavia, la relazione tra R_{cm28} ed a/c varia a seconda del tipo e classe di cemento impiegato. Nella Figura sono riportate le correlazioni R_{cm28} - a/c per alcuni dei 150 cementi europei definiti dalla norma ENV 197-1.



RESISTENZA CARATTERISTICA TIPO DI CONTROLLO E RAPPORTO ACQUA/CEMENTO

La differenza nel valore di R_{cm28} derivante, per una stessa R_{ck} (esempio: 30 N/mm²), dal diverso tipo di controllo (A e B) si ripercuote in un diverso rapporto a/c : per esempio 0.60 con controllo di tipo A e 0.55 con controllo di tipo B se si impiega un cemento CEM I 32.5.

RESISTENZA CARATTERISTICA:

CONTROLLO DI TIPO A:

CONTROLLO DI TIPO B:

Esempio: $\delta = 7$

$$R_{ck} = 30 = R_{cm28} - 3.5$$

$$R_{ck} = 30 = R_{cm28} - 1.4 \cdot 5$$

$$R_{cm28} = 33.5 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow 34$$

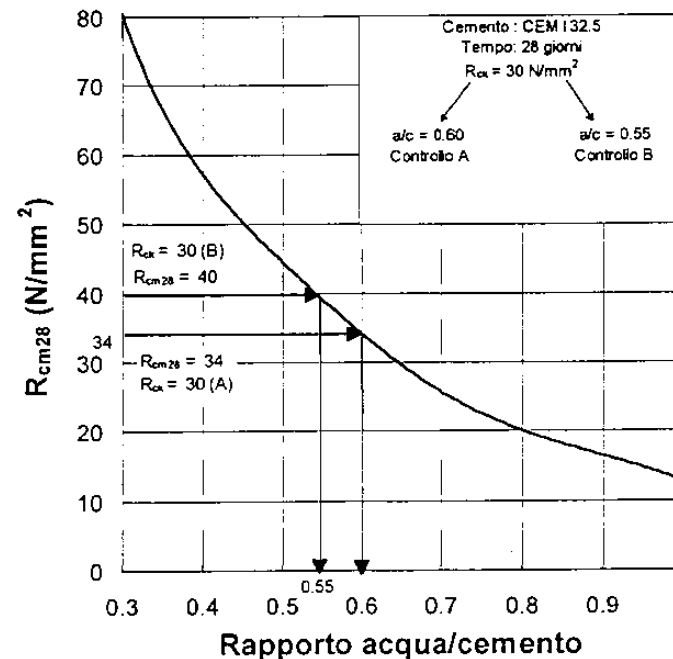
$$R_{cm28} = 30 + 10 = 40 \text{ N/mm}^2$$

↓

↓

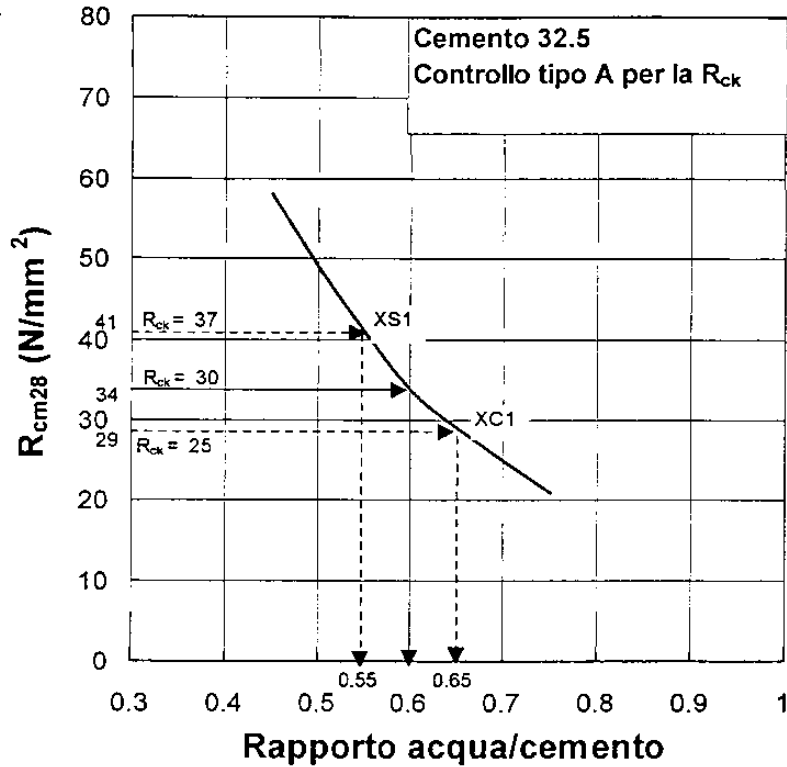
$a/c = 0.60$ con CEM I 32.5

$a/c = 0.55$ con CEM I 32.5



COMPATIBILITA' TRA CLASSE DI RESISTENZA E CLASSE DI ESPOSIZIONE

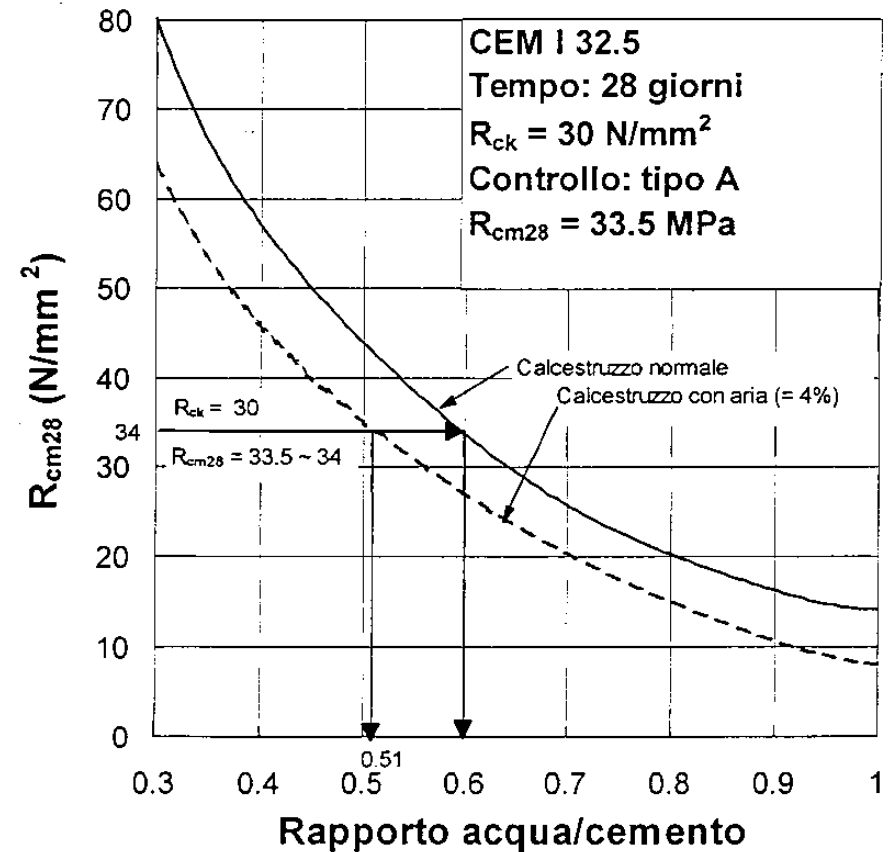
Poiché sia la resistenza meccanica che la durabilità dipendono dal rapporto a/c , occorre verificare che la R_{ck} prescelta dal progettista sulla base del calcolo strutturale sia compatibile con la durabilità dell'opera.



- Un calcestruzzo per una struttura in c.a. con R_{ck} di 30 N/mm² ($\Rightarrow a/c = 0.60$) è compatibile con una classe di esposizione XCI ($\Rightarrow a/c \leq 0.65$): interni di edifici. In questo caso la R_{ck} di 30 N/mm² è accettabile anche per la durabilità dell'opera.
- Lo stesso calcestruzzo (cioè con R_{ck} di 30 N/mm² ed $a/c = 0.60$) non è compatibile con una classe di esposizione XS1 ($\Rightarrow a/c \leq 0.55$): costruzione marina in prossimità della costa. In questo caso, occorre adottare un rapporto a/c non superiore a 0.55 (per ragioni di durabilità) e quindi una R_{ck} almeno di 37 N/mm².

RESISTENZA MECCANICA E RESISTENZA AL GHIACCIO

Nelle opere esposte ai cicli di gelo-disgelo (classi di esposizione XF2, XF3, XF4) è necessario inglobare nel calcestruzzo un determinato volume di aria ($\geq 4\%$) che, in forma di microbolle disperse nella matrice cementizia, allenta le tensioni dirompenti che insorgono per la trasformazione dell'acqua liquida nel ghiaccio più voluminoso. L'aria inglobata attraverso l'impiego di additivi aeranti, se da una parte allevia le tensioni locali provocate dalla formazione del ghiaccio, dall'altra determina una diversa correlazione tra la resistenza meccanica ed il rapporto a/c : a parità di a/c si registra una minore resistenza meccanica nel calcestruzzo aerato. Pertanto, se nonostante la presenza di aria non si intende rinunciare ad una predeterminata resistenza meccanica (per es.: $R_{cm28} = 33.5$ N/mm²; $R_{ck} = 30$ N/mm² con controllo di tipo A) è necessario adottare un rapporto a/c leggermente più basso (per es.: 0.51 invece di 0.60) per garantire sia la resistenza meccanica prevista sia la durabilità della struttura esposta al ghiaccio.



RESISTENZA MECCANICA A FLESSIONE, RAPPORTO A/C E TIPO DI AGGREGATO

Anche la resistenza meccanica a flessione (R_f) a 28 giorni al pari di quella a compressione (R_{cm28}) dipende dal rapporto a/c .

Tuttavia, R_f dipende anche dal tipo di aggregato: a pari rapporto acqua/cemento, R_f è maggiore con aggregati frantumati che non con quelli naturali.

Tra R_{cm28} ed R_f esistono le seguenti correlazioni:

$$R_f = 0.8 (R_{cm28})^{1/2} \text{ (per aggregati frantumati)}$$

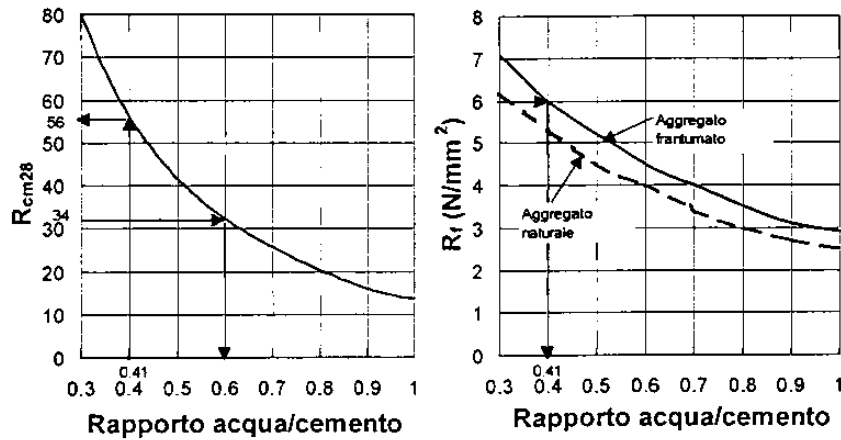
$$R_f = 0.7 (R_{cm28})^{1/2} \text{ (per aggregati naturali)}$$

Se con un dato cemento (CEM I 32.5), si richiede $R_{cm28} = 34 \text{ N/mm}^2$ per $R_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$ (controllo tipo A) e nel contempo si richiede $R_f = 6 \text{ N/mm}^2$ (con aggregati per esempio frantumati) il rapporto acqua/cemento (a/c) richiesto per soddisfare i suddetti requisiti sono:

$$R_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow (a/c)_2 \leq 0.60$$

$$R_{f28} = 6 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow (a/c)_4 \leq 0.41$$

Pertanto deve essere prescelto un rapporto $a/c = 0.41$ che comporta automaticamente una R_{ck} di 52 N/mm^2 ($R_{cm28} = 56 \text{ N/mm}^2$) maggiore di quella prevista inizialmente (30 N/mm^2).



RESISTENZA CARATTERISTICA E RESISTENZA ALLO SCASSERO

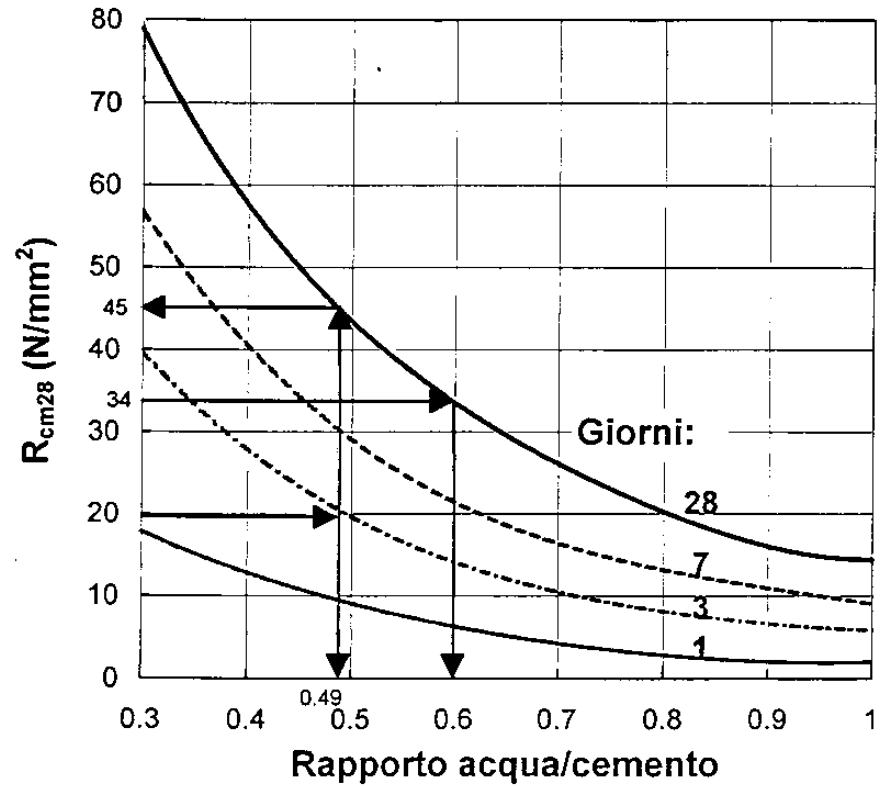
Se per esigenze esecutive (scasseratura, tesatura dei ferri, ecc.) è richiesta, oltre ad una determinata R_{ck} , anche una resistenza meccanica a stragionature brevi (1,3,7 gg), occorre valutare quale dei due *input* è più cogente in termini di rapporto a/c . Se per esempio sono richieste contemporaneamente $R_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$ (controllo tipo A) ed una resistenza a compressione media a 3

giorni (R_{cm3}), pari a 20 N/mm^2 , il rapporto a/c richiesto per soddisfare questi requisiti sono

$$(a/c)_2 = 0.60 \text{ per soddisfare } R_{ck}$$

$$(a/c)_5 = 0.49 \text{ per soddisfare } R_{cm3}$$

Poiché il rapporto a/c minore è quello determinato da R_{cm3} , $(a/c)_5 = 0.49$, ne consegue che la R_{ck} effettiva risulterà maggiore di quella richiesta inizialmente ($R_{ck} = 41 \text{ N/mm}^2$).



RESISTENZA MECCANICA E TEMPERATURA

La temperatura di stagionatura condiziona moltissimo le resistenze meccaniche alle brevi stagionature (1,3,7 gg) e molto meno quelle alle lunghe stagionature (> 28 gg).

Nella Tabella che segue, posti eguali a 100 i valori di resistenza meccanica ottenuti a 17 - 23°C, sono riportati comparativamente i valori ottenibili a temperature più alte o più basse alle diverse stagionature. Si può vedere, per esempio, che a 3 giorni con temperatura di 5-9°C la resistenza meccanica è appena il 25% di quella corrispondente a 17 - 23°C.

T (°C)	R _c (%)				
	t (giorni)				
	1	3	7	28	90
31-37	140	115	100	95	90
24.30	125	110	100	95	95
17-23	100	100	100	100	100
10-16	35	60	80	100	120
5-9	15	25	50	90	110
0.4*	0	10	30	40	50

* l'impasto è stato realizzato con gli ingredienti alla temperatura di 2°C.

CLASSE DI CONSISTENZA

La classe di consistenza indicata con il simbolo *S* seguito da un numero 1 a 5 individua l'intervallo di lavorabilità misurata attraverso l'abbassamento al cono di Abrams (*slump*). La classe di consistenza deve essere scelta dal progettista in funzione delle difficoltà di esecuzione dell'opera (sezione minima della struttura, densità di armatura, sistemi di compattazione disponibili, qualità della manodopera, tecniche di esecuzione, organizzazione del cantiere).

La lavorabilità del calcestruzzo deve essere obbligatoriamente prescritta in capitolato dal progettista per non lasciare all'arbitrio dell'ultimo operatore la scelta della modifica della lavorabilità con dannose riaggiunte di acqua effettuate sul cantiere.

CLASSE DI CONSISTENZA	SLUMP (mm)	DENOMINAZIONE CORRENTE
S1	10-40	TERRA UMIDA
S2	50-90	PLASTICA
S3	100-150	SEMIFLUIDA
S4	160-200	FLUIDA
S5	> 210	SUPERFLUIDA

DIAMETRO MASSIMO DELL'AGGREGATO

Per le strutture in calcestruzzo deve essere prescritto in capitolato il valore massimo per la pezzatura dell'aggregato (D_{max}). Il valore limite per D_{max} deve essere stabilito in base alla dimensione minima (*S*) della struttura da realizzare:

$$D_{max} \leq S/4$$

Per le strutture armate esistono due limiti aggiuntivi determinati dal copriferro (*cf*):

$$D_{max} \leq 1.3 \text{ cf}$$

e all'interferro (*d*):

$$D_{max} \leq d - 5 \text{ (in mm).}$$

Esempio: in una soletta la sezione minima è di 24 cm, il copriferro (*cf*) è di 20 mm, e la distanza (*d*) tra i ferri nella zona più armata è di 50 mm. Il diametro massimo dell'aggregato deve soddisfare tre vincoli:

$$D_{max} \leq 240/4 = 80 \text{ mm}$$

$$D_{max} \leq 1.3 \cdot 20 = 26 \text{ mm}$$

$$D_{max} \leq 50 - 5 = 45 \text{ mm}$$

Un aggregato con D_{max} di 25 mm soddisfa i tre vincoli, ma un aggregato leggermente più piccolo ($D_{max} = 20$ mm) è preferibile. In assenza di prescrizioni in capitolato sul valore del D_{max} (che è strettamente correlato con i dati progettuali della struttura), il produttore di calcestruzzo potrebbe fornire un conglomerato con D_{max} di 32 mm con rischi di vespai sul facciavista (la pezzatura più grossa non passerebbe tra cassero e ferri di armatura).