

giornate
aicap 2014

27° Convegno Nazionale
BERGAMO, 22 - 24 Maggio

STRUTTURE NEL TESSUTO URBANO

PROGETTO E REALIZZAZIONE DEL NUOVO E DI INTERVENTI SULL'ESISTENTE



ATTI

aicap

associazione italiana calcestruzzo armato e precompresso

DURABILITA' DELLE STRUTTURE IN C.A. E C.A.P. SECONDO LE NORMATIVE ITALIANA ED EUROPEA

Mario Collepari¹, Valeria Corinaldesi², Saveria Monosi², Alessandro Nardinocchi²

¹ ENCO Srl, Ponzano Veneto

² Dipartimento di Scienza dei Materiali e della Terra, Università Politecnica delle Marche, Ancona

SOMMARIO

La durabilità delle strutture in C.A. e C.A.P. dipende fortemente dalla vulnerabilità corrosiva delle armature metalliche in ambienti genericamente all'aria aggressivi per la presenza della CO₂ (classe di esposizione XC4) o esposti ai cloruri come nelle strutture marine esposte in classe XS3. Le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) propongono di far riferimento alla norma nazionale UNI 11104 (derivata da quella Europa EN 206) per la composizione e la Rck del calcestruzzo ed all'Eurocodice 2 per quanto riguarda lo spessore di copriferro che, a seconda del suo valore, dovrebbe garantire una durabilità di 50 o 100 anni. In questo articolo sono esaminati criticamente alcuni aspetti di queste norme e si è trovato che le opere marittime non risultano essere durabili per 50 o 100 anni in base alla composizione adottata secondo le NTC ed in particolare al rapporto acqua/cemento raccomandato (0,45) che risulta essere inadeguato per essere troppo alto ed al conseguente valore di Rck (45 MPa) che risulta essere inadeguato per essere troppo basso.

DURABILITY OF REINFORCED OR PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURES ACCORDING TO THE ITALIAN AND EUROPEAN NORMS

SUMMARY

The durability of reinforced and prestressed concrete structures strongly depends on the corrosion of the metallic reinforcements in concrete structures exposed to aggressive air for the presence of CO₂ (exposure class XC4) or exposed to chloride ions as in maritime works in exposure class XS3. The NTC suggest to refer to the Italian Norm UNI 11104 (derived from the European Norm EN 206) for the concrete composition and its Rck as well as to the Eurocode 2 for the thickness of the concrete cover which, depending on its value, should guarantee a durability period of 50 or 100 years.

In the present paper some specific aspects of these norms have been critically assessed. In particular, we have found that the maritime work are not durable for 50 or 100 years on the basis of the composition adopted according to the NTC. The recommended water/cement ratio (0,45) appears to be inadequate because is too high whereas the corresponding value of Rck (45 MPa) appears to be inadequate because is too low.

1. INTRODUZIONE

La durabilità delle strutture in C.A. e C.A.P. è garantita anche negli ambienti aggressivi se il calcestruzzo possiede una porosità discontinua che impedisce la migrazione degli agenti aggressivi attraverso il copriferro fino ad arrivare ai ferri di armatura. Le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) propongono che si può fare riferimento alla norma nazionale UNI 11104, in ottemperanza a quella europea EN 206, nel richiedere un elevato dosaggio di cemento (c), un basso rapporto a/c e conseguentemente un'elevata Rck per rallentare la velocità di penetrazione degli agenti aggressivi. Inoltre, l'Eurocodice 2 impone l'adozione di uno spessore di copriferro (c_f) relativamente alto per allungare il tempo trascorso perché gli agenti aggressivi arrivino alle armature metalliche. I valori limiti di c, a/c, Rck e c_f sono scelti in funzione della classe di esposizione. In questo articolo, sono presentati e discussi criticamente questi parametri in due classi di esposizioni tipiche come la XC4 (esposizione all'aria umida) e la XS3 (esposizione discontinua all'acqua di mare) dove può avvenire la corrosione dei ferri di armatura.

2. STRUTTURE ARMATE IN CLASSE DI ESPOSIZIONE XC4

La Figura 1 mostra un edificio in C.A. esposto all'aria umida (classe di esposizione XC4) dove, dopo solo 3 anni,

sono apparsi ovunque ferri di armatura a vista per l'adozione di un mediocre calcestruzzo (per l'elevato rapporto a/c) e di un basso spessore di copriferro [1]. Si tratta chiaramente di un caso limite di struttura in C.A. con inadeguata durabilità dell'opera per una vita utile di servizio di almeno 50 anni. Il fenomeno responsabile del degrado è la carbonatazione dovuta all'ingresso della CO₂ in un calcestruzzo poroso per l'elevato rapporto a/c adottato e la conseguente neutralizzazione della calce di idrolisi che avrebbe dovuto assicurare la passivazione dei ferri di armatura.



Figura 1 - Corrosione promossa da carbonatazione in classe di esposizione XC4

Nella Tabella 1 sono mostrati i valori dei parametri richiesti dalla UNI 11104 per il calcestruzzo ed il valore minimo del c_f secondo l'Eurocodice 2 per una struttura che si comporti durabilmente in classe di esposizione XC4.

Tabella 1 - Classe di esposizione XC4: requisiti per una durabilità di 50 anni; per una durabilità di 100 anni si deve aumentare lo spessore di c_f di almeno 10 mm

Massimo a/c	Rck minima	Dosaggio di c minimo	Spessore di c_f per C.A.	Spessore di c_f per C.A.P.
0,50	40 MPa	340 kg/m ³	30 mm	40 mm

Il valore di $Rck \geq 40$ MPa garantisce la compattezza e la bassa porosità richiesta per i provini del calcestruzzo che deve essere messo in opera al fine di garantire la durabilità della struttura. Il valore di Rck pari a 40 MPa deve garantire che il fronte della carbonatazione non superi lo spessore di copriferro di 30 mm dopo 50 anni di esposizione all'aria umida: questa condizione è supportata dai risultati di una ricerca di Nakamura che ha misurato la carbonatazione fino a 50 anni in funzione della resistenza a compressione f_{c28} misurata su provini cilindrici a 28 giorni [2]. Questi risultati indicano che nei provini con una resistenza f_{c28} di 40 MPa la penetrazione della CO_2 è arrivata a meno di 25 mm; pertanto, una resistenza cubica caratteristica Rck di 40 MPa è più che sufficiente per assicurare uno spessore di carbonatazione non superiore a 30 mm in 50 anni.

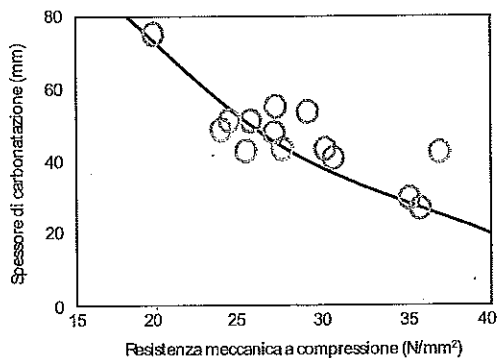


Figura 2 - Determinazione dello spessore di carbonatazione dopo 50 anni in funzione della resistenza meccanica a 28 giorni su provini cilindrici

Secondo le NTC, oltre alla Rck è necessario che per il calcestruzzo dentro la struttura -il quale inevitabilmente è meno compatto dei provini- deve essere soddisfatta la seguente condizione:

$$Rck_{strutt} \geq 0,85 \cdot Rck \quad (1)$$

Questa condizione è tanto più facilmente raggiungibile quanto maggiore è la classe di consistenza del calcestruzzo fresco che -salvo impedimenti- dovrebbe attestarsi su valori di S4/S5 per consentire un grado di compattazione (g_c) di almeno 0,97 [1]:

$$g_c = M_{vs} / M_{vp} \geq 0,97 \quad (2)$$

dove M_{vs} ed M_{vp} sono rispettivamente le masse volumiche del calcestruzzo della struttura e del provino compattato a rifiuto. Il significato delle due equazioni sopra riportate è il seguente: per ogni centesimo di grado di compattazione in meno si registra un 5% di diminuzione della Rck_{strutt} rispetto alla Rck . Il raggiungimento della condizione (2) -a differenza della condizione (1) che può essere accertata solo dopo 28 giorni- è verificabile già dopo 1 giorno dal getto misurando la massa volumica del provino e quella della carota estratta dalla struttura: questo consente, già dopo 1 giorno dal getto, di

aumentare la lavorabilità del calcestruzzo fresco e/o di migliorarne la compattazione dentro la struttura qualora si registri un valore di g_c minore di 0,97. Per quanto il grado di compattazione non sia previsto dalle NTC, nulla impedisce che nelle prescrizioni di capitolato sia specificato un valore di almeno 0,97 per il valore di g_c .

Tra i requisiti presenti nella norma nazionale UNI 11104, come anche in quella europea EN 206, appare un dosaggio minimo di cemento che nel caso specifico della classe di esposizione XC4 è 340 kg/m³ (Tabella 1). In realtà il dosaggio minimo di cemento non dovrebbe essere incluso tra i requisiti che garantiscono la durabilità poiché in talune circostanze esso potrebbe rivelarsi non solo ininfluente ma perfino dannoso. Si supponga, per esempio, di dover impiegare un quantitativo di acqua di impasto pari a 200 kg/m³ in dipendenza di un aggregato alluvionale con diametro massimo di 32 mm ed una classe di consistenza superfluida S5. Se il rapporto a/c non deve superare 0,50 (Tabella 1) ne consegue che il dosaggio di cemento non deve scendere al di sotto di 400 kg/m³:

$$a/c = 200/c \leq 0,50 \rightarrow c \geq 400 \text{ kg/m}^3 \quad (3)$$

Questo dosaggio di cemento, relativamente elevato soprattutto se si tratta di una struttura massiva, può essere fonte di fessurazioni di origine termica ed igrometrica con grave pregiudizio per la durabilità della struttura armata. Occorre allora ridurre il dosaggio di cemento mantenendo costante il rapporto a/c e questo può essere facilmente realizzato con l'impiego di additivi superfluidificanti capaci di ridurre l'acqua di impasto (a) a parità di lavorabilità (classe di consistenza S5) e di rapporto a/c (0,50). Se per esempio si riduce l'acqua di impasto (a) del 25% il suo valore diminuisce da 200 a 150 kg/m³ e conseguentemente il valore di c non deve scendere al di sotto di 300 kg/m³:

$$a/c = 150/c \leq 0,50 \rightarrow c \geq 300 \text{ kg/m}^3 \quad (4)$$

Un dosaggio di cemento di 300 kg/m³ capace di rispettare le condizioni di $a/c \leq 0,50$ e di $Rck \geq 40$ MPa sarebbe in teoria in disaccordo con la specifica della UNI 11104 (che prevede un dosaggio minimo di 340 kg/m³) ancorché sia in grado di garantire la durabilità delle strutture. Anzi -a parità di a/c, di Rck e di lavorabilità- un calcestruzzo con un dosaggio di cemento inferiore è in grado di garantire meglio la durabilità della struttura per il minor rischio di fessurazione di origine termica ed igrometrica: da questo punto di vista sarebbe opportuno specificare l'impiego di un additivo anti-ritiro (SRA, Shrinkage Reducing Admixture) per abbattere ulteriormente il rischio di fessurazioni attraverso le quali migrerebbero facilmente gli agenti aggressivi (CO_2 , O_2 , H_2O) per de-passivare i ferri di armatura e favorirne la corrosione.

Tenuto conto delle osservazioni critiche sopra riportate una prescrizione di capitolato per la durabilità di 50 anni di una struttura armata in classe di esposizione XC4 potrebbe essere più correttamente così riscritta:

$a/c \leq 0,50$ $Rck \geq 40$ MPa $Rck_{strutt} \geq 0,85 \cdot 40 \geq 34$ MPa
 g_c a 1 giorno dal getto $\geq 0,97$ classe di consistenza: S5
 c_f per strutture in C.A. ≥ 30 mm; c_f per strutture in C.A.P. ≥ 40 mm
 impiego di additivo superfluidificante per mantenere c al di sotto di 300 kg/m³
 impiego di additivo SRA per contenere il ritiro igrometrico
 applicazione di membrana anti-evaporante sulla superficie appena scasserata.

3. STRUTTURE ARMATE IN CLASSE DI ESPOSIZIONE XS3

Nella Tabella 2 sono mostrati i valori dei parametri richiesti dalla UNI 11104 per il calcestruzzo ed il valore minimo del c_f secondo l'Eurocodice per una struttura che si comporti in modo durabile in classe di esposizione XS3.

Tabella 2 - Classe di esposizione XS3: requisiti per una durabilità di 50 anni; per una durabilità di 100 anni si deve aumentare lo spessore di c_f di almeno 10 mm

Massimo a/c	Rck minima	Dosaggio di c minimo	Spessore di c_f per C.A.	Spessore di c_f per C.A.P.
0,45	45 MPa	360 kg/m ³	45 mm	55 mm

Nonostante la maggiore compattezza del calcestruzzo rispetto a quello raccomandato per la classe di esposizione in classe XC4 ($a/c \leq 0,45$ contro 0,50; $Rck \geq 45$ MPa contro 40 MPa), e nonostante uno spessore di copriferro maggiore di 15 mm, la diffusione del cloruro rischia di procedere così velocemente da superare un copriferro di 45 mm in soli 4 anni. La Figura 3 mostra la diffusione del cloruro in calcestruzzi con un rapporto a/c di 0,55 oppure 0,44 oppure 0,32 [3]. Sulle tre curve oltre ai rapporti a/c sono indicati i coefficienti di diffusione (D) dedotti dalla seconda legge di Fick che regola la penetrazione del cloruro dentro il calcestruzzo [4]. La soluzione della seconda legge di Fick porta alla seguente equazione (5):

$$x = 4 \cdot (D \cdot t)^{1/2} \quad (5)$$

dove x è lo spessore di calcestruzzo in mm penetrato dal cloruro al tempo t espresso in secondi. Nel calcestruzzo con a/c di 0,44, e quindi conforme al requisito della Tabella 2, il valore di D dedotto dalla Figura 3 è $1 \cdot 10^{-6}$ mm²/s. Inserendo nella (5) il valore del copriferro richiesto per una struttura durabile in C.A. ($x = 45$ mm) il valore di t diventa $1,3 \cdot 10^6$ secondi pari a circa 4 anni. Pertanto il copriferro di 45 mm di una struttura in C.A. in permanente contatto con ioni cloruro sarà completamente penetrato in soli 4 anni se si adotta un rapporto a/c di 0,45.

Nella Figura 3 è riportato il valore di D pari a $7,5 \cdot 10^{-8}$ mm²/s per un calcestruzzo con rapporto a/c di 0,32: in questo caso il valore di t calcolato per un copriferro di 45 mm secondo la [5] è $16,9 \cdot 10^8$ secondi pari a 54 anni e quindi in grado di garantire la durabilità delle strutture in C.A. e C.A.P. per almeno 50 anni.

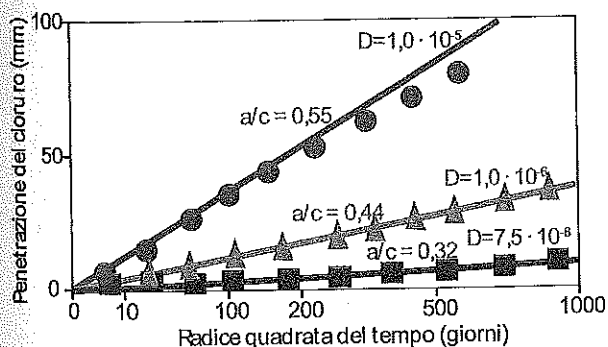


Figura 3 - Penetrazione del cloruro in calcestruzzi confezionati con diversi rapporti a/c. Sulle curve sono mostrati i valori di a/c e dei coefficienti di diffusione (D) in mm²/sec.

Questi risultati indicano la inadeguatezza dei requisiti presenti nella UNI 11104 per l'eccessivo valore del rapporto a/c massimo (0,45) raccomandato nelle classi di esposizione ai cloruri. Attualmente, con l'avvento degli additivi superfluidificanti policarbossilici è possibile confezionare calcestruzzi a consistenza superfluida S5 anche con rapporti a/c compresi tra 0,30 e 0,35 e quindi di garantire effettivamente la durabilità delle strutture armate esposte all'azione dei cloruri. La Rck di questi calcestruzzi è compresa nell'intervallo di 65-75 MPa prevista dalle NTC per calcestruzzi prestazionali per i quali non è richiesta alcuna

autorizzazione da parte del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Un altro aspetto importante che riguarda i calcestruzzi esposti ai cloruri in classe di esposizione XS3, XF4, XD4 è il tipo di cemento adottato. Da oltre 40 anni [4] la letteratura sull'argomento riporta che i cementi con pozzolana e/o loppa d'altoforno si comportano molto meglio del cemento Portland nel rallentare la diffusione del cloruro attraverso il calcestruzzo. Pertanto nelle NTC o nella UNI 11104 dovrebbe essere presente una raccomandazione ad impiegare CEM III, oppure CEM IV oppure CEM V nei calcestruzzi esposti alla penetrazione del cloruro. Nella Tabella 3 sono mostrati i valori dei coefficienti di diffusione (D) in funzione del tipo di cemento (CEM I, CEM III, CEM IV) e del grado di compattazione: quest'ultimo condiziona ovviamente la compattezza del calcestruzzo e quindi anche la penetrazione del cloruro.

Tabella 3 - Coefficienti di diffusione del cloruro (D) a 25°C in calcestruzzi confezionati con un rapporto a/c di 0,5

Cemento tipo	Grado di compattazione	D (mm ² /anno)
CEM I	1,00	50
CEM I	0,95	100
CEM III	1,00	30
CEM III	0,95	60
CEM IV	1,00	30
CEM IV	0,95	60

Per concludere l'esame critico dei calcestruzzi esposti ai cloruri occorre ricordare che, anche in questo caso, l'adozione di un dosaggio minimo di cemento è inutile; esso dovrebbe essere calcolato attraverso il rapporto a/c adottato (per esempio 0,33) e la richiesta d'acqua più bassa possibile grazie all'impiego di aggregati con maggior diametro massimo possibile (per esempio 32 mm) con un dosaggio "generoso" di additivo superfluidificante (per esempio 2% sul cemento) per ridurre l'acqua di impasto (a) in classe di consistenza S4 a circa 135 kg/m³. Con questo valore di a e con un rapporto a/c di 0,33 il dosaggio di cemento richiesto diventa 410 kg/m³ decisamente maggiore del dosaggio minimo di 360 kg/m³ previsto in Tabella 2. Per questo motivo diventa ancor più imperativo adottare un cemento d'altoforno, pozzolanico o composito dove la minore percentuale di clinker Portland riduce sensibilmente il rischio di fessurazione indotta da gradienti termici provocati dall'eccessivo calore di idratazione. Per lo stesso motivo è necessario impiegare un additivo SRA per ridurre il rischio di fessurazione indotta dal ritiro igrometrico provocato dall'elevato dosaggio di cemento.

4. CONCLUSIONI

L'esame critico delle raccomandazioni delle NTC, in ottemperanza alla norma UNI 11104 e all'Eurocodice 2 per la durabilità delle strutture armate nelle classi di esposizione XC4 e XS3, consente di trarre le seguenti conclusioni.

1. Il rapporto a/c massimo (0,50) e la Rck minima (40 MPa) per le strutture armate in classe di esposizione XC4 sono più che sufficienti a garantire una penetrazione della CO₂ inferiore al copriferro minimo di 30 mm in 50 anni di servizio; questa conclusione è confermata dalle ricerche sperimentali di Nakamura [2] che ha trovato che con una resistenza meccanica cilindrica a 28 giorni (f_{c28}) di 40 MPa la penetrazione della CO₂ non supera lo spessore di 25 mm dopo 50 anni di esposizione all'aria umida.
2. Al contrario, il rapporto a/c massimo (0,45) e la Rck minima (45 MPa) per le strutture esposte ai cloruri (in classe di esposizione XS3) non sono sufficienti a garantire una durabilità di 50 anni poiché lo spessore di copriferro minimo (45 mm) viene penetrato dai cloruri in circa 4

anni. Per rendere durabili queste strutture occorre ridurre il rapporto a/c a valori molto più bassi di 0,30-0,35 corrispondenti a valori di R_{ck} di 65-75 MPa oggi facilmente conseguibili con l'impiego di superfluidificanti polycarbosilici.

3. L'impiego di CEM III, CEM IV o CEM V rallenta significativamente la diffusione dei cloruri ma non esiste alcuna raccomandazione circa l'impiego di questi cementi nelle NTC e nella norma UNI 11104. L'impiego di questi cementi è favorevole anche per la riduzione del calore di idratazione e quindi dei gradienti termici che possono provocare aggravare il rischio di fessurazione delle strutture in calcestruzzo.
4. Il dosaggio minimo di cemento che appare indicato nella norma UNI 11104 è pleonastico e talvolta pericoloso quando risulta eccessivo: esso deve essere calcolato con un semplice processo di mix design mantenendo più bassa possibile la richiesta d'acqua (a) e risalendo al dosaggio di cemento attraverso il rapporto a/c adottato: $c = a/(a/c)$. In questo modo si riduce anche il rischio di fessurazione indotto dal ritiro igrometrico per abbassare il quale sarebbe opportuno raccomandare l'impiego di additivi SRA.

5. Da ultimo, ma non ultimo per importanza, si dovrebbe raccomandare di realizzare strutture ben costipate con un grado di compattazione non inferiore a 0,97 per consentire, già alle prime stagionature senza attendere 28 giorni, di accertare se la resistenza caratteristica della struttura ($R_{ck,struct}$) è almeno pari all'85% della R_{ck} dei provini.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. COLLEPARDI, S. COLLEPARDI E R. TROLI – (2009), *Il Nuovo Calcestruzzo*, Editore Tintoretto, Villorba, pp.104-106.
- [2] H. NAKAMURA – (2007), Correlazione tra resistenza meccanica e carbonatazione a lungo termine, *Enco Journal N. 37*, pp. 19-21.
- [3] M. COLLEPARDI, S. COLLEPARDI E R. TROLI – (2009), *Il Nuovo Calcestruzzo*, Editore Tintoretto, Villorba, pp.166-169.
- [4] M. COLLEPARDI, A. MARCIALIS E R. TURRIZIANI – (1970), La cinetica di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo, *Il Cemento*, pp. 157-164