

ID023

DURABILITA' DEL CEMENTO ARMATO E LE CLASSI DI ESPOSIZIONE AMBIENTALE**DURABILITY OF REINFORCED CEMENT AND ENVIRONMENTAL EXPOSURE CLASSES****Flavia Fascia¹, Emanuele La Mantia²***1: Università degli studi di Napoli Federico II**e-mail: flavia.fascia@unina.it**2: Università Telematica Pegaso**e-mail: emanuele.lamantia@unipegaso.it***Keywords:** calcestruzzo, durabilità**ABSTRACT**

Le cause di aggressione dovute all'ambiente possono essere formalmente suddivise in *chimiche, fisiche, meccaniche e biologiche* (tabella 4.1). In realtà, difficilmente in un processo di degradazione esiste un solo fenomeno aggressivo, spesso sono più cause che concorrono al deterioramento del materiale; tuttavia però esiste sempre quella che può essere definita la causa fondamentale che innesca il processo degradante.

Per garantire la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato ordinario o precompresso, esposte all'azione dell'ambiente, si devono adottare i provvedimenti atti a limitare gli effetti di degrado indotti dall'attacco chimico, fisico e derivante dalla corrosione delle armature e dai cicli di gelo e disgelo, in relazione alla norma europea UNI-EN 206-1. In accordo con la norma UNI-EN 206-1 e con quella italiana UNI 11104 il livello di rischio per una determinata opera dipende dall'ambiente cui la stessa è esposta.

The causes of aggression due to the environment can be formally divided into chemical, physical, mechanical and biological (table 4.1). In reality, in a degradation process there is hardly a single aggressive phenomenon, often there are several causes that contribute to the deterioration of the material; however, there is always what can be defined as the fundamental cause that triggers the degrading process.

To ensure the durability of ordinary or pre-stressed reinforced concrete structures exposed to the action of the environment, measures must be taken to limit the effects of degradation induced by chemical and physical attack and resulting from the corrosion of the reinforcements and cycles of freeze and thaw, in relation to the European standard UNI-EN 206-1. In accordance with the UNI-EN 206-1 standard and the Italian UNI 11104 standard, the level of risk for a given work depends on the environment to which it is exposed.

1. Introduzione

Il Comitato Intereuropeo del Calcestruzzo (CEB) e la Federazione Internazionale del Precompresso (FIP) così definiscono la durabilità:

"Attitudine di un'opera a sopportare agenti aggressivi di diversa natura mantenendo inalterate le caratteristiche meccaniche e funzionali".

Per garantire la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato, ordinario o precompresso, esposte all'azione dell'ambiente, si devono adottare provvedimenti idonei a limitare gli effetti di degrado indotti dall'attacco chimico, fisico e derivante dalla corrosione delle armature e dai cicli di gelo e disgelo.

Secondo le norme UNI-EN 206-1 e UNI 11104, il livello di rischio per una determinata opera dipende dall'ambiente cui la stessa è esposta. Da questo punto di vista le norme suddividono gli ambienti in base alla tipologia del degrado atteso per il calcestruzzo e le armature individuando sei classi di esposizione ambientale XO, XC, XD, XS, XF ed XA, per ciascuna delle quali, a meno della classe XO, esistono più sottoclassi (Tab. 1).

Tabella 1 - Classi di esposizione secondo la UNI-EN 206

Classe di esposizione	Ambiente	Tipo di struttura coinvolta	Numero di sottoclassi
XO	Nessun rischio di corrosione (interni con U.R. 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

Per ognuna delle classi di esposizione ambientale, ad eccezione della XO, la normativa impone il rispetto di alcuni requisiti minimi.

Per quanto attiene all'Italia questi requisiti minimi vengono definiti nel Prospetto 4 della norma UNI 11104.

Accanto ai valori desunti dalla norma UNI 11104-2004 sono riportati, nelle tabelle che seguono, anche gli spessori minimi di copriferro per ogni classe di esposizione desunti dall'Eurocodice 2; tali spessori sono riferiti per costruzioni con vita nominale di 50_{anni} corrispondente ad una classe strutturale S4 (previsto dall'Eurocodice 2), ovviamente all'aumentare o al diminuire della classe aumentano o diminuiscono gli spessori del copriferro per il cemento ordinario o precompresso.

I requisiti minimi per il rispetto della durabilità delle strutture sono espressi in termini di:

- Rapporto A/C massimo da non superare
- Classe di resistenza caratteristica a compressione minima
- Dosaggio minimo di cemento
- Volume minimo di aria inglobata e aggregati non gelivi (solo per la classe XF)

Sarà compito del progettista, prima di progettare una struttura in c.a., individuare tutte le possibili classi di esposizione ambientale in cui l'opera ricade e, tra tutti i requisiti previsti per ciascuna classe, scegliere quelli più stringenti.

Occorre precisare che il dosaggio minimo di cemento, mostrato nelle tabelle delle norme UNI-EN 206-1 ed UNI-EN 11104, è indicativo per calcestruzzi con aggregati con D_{max} non superiori a 25 mm. Invece per calcestruzzi destinati a getti massivi (dighe, fondazioni, etc.) occorre tener conto che i dosaggi di cemento indicati nelle tabelle delle norme risultano eccessivi e possono provocare pericolose fessurazioni indotte dai gradienti termici che si generano tra nucleo e periferia della struttura, e da ritiro igrometrico.

Per evitare quindi, le fessure da ritiro igrometrico nel copriferro è necessario maturare la superficie del calcestruzzo per un tempo tanto più lungo quanto più essiccante è l'ambiente dove sorge l'opera; in alternativa si potrà adottare un additivo antiritiro.

2. CLASSE DI ESPOSIZIONE XO

La classe di esposizione XO si riferisce a condizioni di esposizione per le quali non esiste nessun rischio di corrosione delle armature metalliche né di attacco chimico sui calcestruzzi armati, ordinari o precompressi. Nella suddetta classe rientrano, inoltre, le strutture realizzate in ambiente molto secco e, quindi, in generale le strutture interne di edifici con umidità relativa <45%.

3. CLASSE DI ESPOSIZIONE XC: CARBONATAZIONE

La classe di esposizione XC è relativa alle condizioni di rischio di corrosione delle armature indotta dalla carbonatazione del calcestruzzo.

La normativa europea UNI EN 206-1, in accordo con la UNI E 11104, per tener conto del processo di corrosione promosso dall'ingresso della CO₂, prevede per la classe di esposizione ambientale XC quattro sottoclassi dalla 1 alla 4 per ognuna delle quali vengono stabiliti i requisiti minimi da rispettare (Tab. 2).

Tabella 2 - Classe di esposizione XC secondo UNI 11104-2004 e in parentesi quadra la UNI EN 206-1

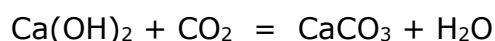
Classe di esposizione	Ambiente	Esempi di strutture che si trovano nella classe XC	Max A/C	Min Classe di resistenza	C minimo (kg/m³)	Spessore copriferr o * (mm) c.a c.a.p.	
XC1	Asciutto	Interni di edifici con U.R. bassa;	0,60 [0,65]	C 25/30 [C 20/25]	300 [260]	15	25
XC2	Bagnato raramente asciutto	Strutture idrauliche; Fondazioni e strutture interrate;	0,60 [0,60]	C 25/30 [C 25/30]	300 [280]	25	35
XC3	Moderatamente umido	Interni di edifici con U.R. moderata; Strutture esterne protette dalla pioggia;	0,55 [0,55]	C 28/35 [C 30/37]	320 [280]	25	35
XC4	Ciclicament e asciutto bagnato	Strutture esterne esposte all'acqua piovana	0,50 [0,50]	C 32/40 [C 30/37]	340 [300]	30	40
*L'Eurocodice 2 stabilisce lo spessore dei copriferr i nelle opere in c.a. e c.a.p. in relazione alle classi di esposizione definite dalla norma UNI-EN 206							

Le condizioni meno aggressive XC1 si verificano per strutture esposte all'aria in ambienti asciutti; la pressoché assenza di H₂O nell'ambiente rallenta fortemente il

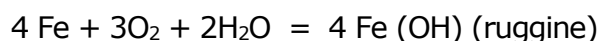
processo di ossidazione del ferro e pertanto il rapporto A/C può essere più elevato rispetto al quello della classe XC4. Altrettanto avviene in ambienti permanentemente bagnati XC2 per la difficoltà dell'aria a permeare attraverso i pori del calcestruzzo sempre saturi d'acqua. Le condizioni intermedie di aggressione per la corrosione dei ferri XC3 si verificano per parti di strutture esterne riparate dalla pioggia o parti interne all'edificio con contenuto di umidità alta. Le condizioni più aggressive corrispondono alla classe XC4 in quanto 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 i componenti principali per neutralizzare la calce del conglomerato (CO₂) e per alimentare il processo di ossidazione del ferro (O₂ e CO₂).

La carbonatazione

L'aria ed in particolare l'anidride carbonica, l'ossigeno e l'umidità in essa contenuti può provocare la corrosione delle armature metalliche a seguito di un fenomeno denominato carbonatazione. In realtà, il ruolo dell'anidride carbonica (CO₂) è quello di un complice, mentre i veri killer nei confronti dei ferri sono l'ossigeno e l'umidità contenuti nell'aria. Durante la presa e l'indurimento del calcestruzzo, i silicati del cemento C2S e C3S reagendo con l'acqua formano un silicato di calcio idrato (C-S-H) e l'idrossido di calcio Ca(OH)₂. L'idrossido di calcio abbassa l'acidità del calcestruzzo fino a valori del pH >13. La basicità del composto favorisce la passivazione delle armature metalliche, ovvero la formazione di una pellicola di ossido di ferro, Fe₂O₃, che viene a ricoprire l'armatura metallica. La pellicola, impermeabile e compatta, isola la massa dell'armatura dal contatto con l'ossigeno e con acqua, impedendo l'ossidazione dell'armatura. Quando però la zona di calcestruzzo che protegge i ferri (copriferro) è completamente penetrata dall'anidride carbonica la situazione cambia radicalmente. Infatti, l'anidride carbonica annulla la basicità a seguito del processo di carbonatazione che consiste nella trasformazione della calce in carbonato di calcio:



A seguito della neutralizzazione della calce, il pH scende a valori di circa 9 ed il ferro, già a pH < 11, perde la sua passività (depassivazione). In sostanza, il film di ossido di ferro, inizialmente protettivo, diventa poroso e quindi non è più in grado di bloccare l'accesso dell'ossigeno e dell'umidità al substrato metallico. Il processo può essere schematizzato con la relazione:



Generalmente la corrosione dei ferri d'armatura presenta sostanzialmente due fenomeni degradanti: il primo, più pericoloso, riguarda la diminuzione di sezione del ferro metallico; il secondo comporta un distacco del copriferro a causa del rigonfiamento del ferro sottostante che accompagna la trasformazione del metallo in ruggine. In queste condizioni a seguito della trasformazione del ferro in ruggine il copriferro viene espulso.

4. CLASSE DI ESPOSIZIONE XD: CLORURI DI ORIGINE NON MARINA

In questa classe di esposizione XD è inclusa la corrosione delle armature metalliche per il calcestruzzo esposto ad un ambiente contenente cloruri non di origine marina. La norma europea EN 206-1 e la UNI 11104 nazionale prevedono, per questa classe di esposizione, tre sottoclassi per ognuna delle quali vengono stabiliti i requisiti minimi da rispettare (Tab. 3).

Tabella 3 - Classe di esposizione XD secondo UNI 11104-2004 e in parentesi quadra la UNI EN 206-1

Classe di esposizione	Ambiente	Esempi di strutture che si trovano nella classe XD	Max A/C	Min Classe di resistenza	C minimo (kg/m³)	Spessore di copriferro * (mm) c.a c.a.p.	
XD1	Moderatamente umido	Strutture raramente a diretto contatto con spruzzi d'acqua;	0,55 [0,55]	C 28/35 [C 30/37]	320 [300]	45	55
XD2	Bagnato raramente asciutto	Piscine natatorie; Vasche di trattamento di acque industriali contenenti cloruri; Parti di ponte;	0,50 [0,55]	C 32/40 [C 30/37]	340 [300]	45	55
XD3	Cicicamemente asciutto bagnato	Pavimenti esterni esposti occasionalmente ad acque salate; Pavimenti e solai di parcheggi coperti;	0,45 [0,45]	C 35/45 [C 35/45]	360 [320]	45	55
*L'Eurocodice 2 stabilisce lo spessore dei copriferri nelle opere in c.a. e c.a.p. in relazione alle classi di esposizione definite dalla norma UNI-EN 206							

Per le strutture esposte alla classe di esposizione XD1 il processo di corrosione è lento e di minore entità per il limite nell'apporto di umidità: si tratta, infatti, di strutture interne protette dalla pioggia ed esposte saltuariamente a qualche spruzzo di acqua contenenti cloruri (per esempio pavimenti di edifici industriali nei quali si eseguono lavorazioni con acqua salata che occasionalmente può bagnare i pavimenti stessi). In queste condizioni è assicurata la diffusione pressoché continua dell'ossigeno attraverso i pori del copriferro nei lunghi periodi durante i quali le strutture sono asciutte, ma viene a mancare l'apporto di umidità

(necessario anch'esso al processo corrosivo dei ferri di armature) se non per periodi molto brevi e limitati.

Nel caso di strutture permanentemente (o quasi) immerse in acqua salata, come avviene per le strutture esposte alla classe di esposizione *XD2*, il rischio di corrosione è inferiore in quanto avviene a mancare l'apporto di ossigeno se non nei rari eventuali periodi asciutti durante i quali l'aria può penetrare nel calcestruzzo secco.

Tra le strutture potenzialmente esposte ad alto rischio di corrosione promossa da cloruri di provenienza non marina val la pena di segnalare le pavimentazioni ed i solai dei parcheggi coperti in classe di esposizione *XD3*. Queste strutture sono innanzitutto esposte a cicli giornalieri e stagionali di umido-asciutto. Infatti, queste strutture sono umide nei periodi piovosi o nevosi, per il trascinarsi di acqua o di neve da parte degli autoveicoli provenienti dall'esterno, e si asciugano nei periodi caldi e non piovosi; inoltre sono esposte all'azione dei cloruri provenienti dai sali disgelanti trascinati anch'essi dagli autoveicoli provenienti dalle strade sottoposte a salatura nei periodi invernali.

L'azione combinata di umidità, di aria e di sale costituisce, infatti, una condizione particolarmente favorevole alla corrosione dei ferri d'armatura soprattutto nei parcheggi coperti situati in zone di alta montagna, dove più frequente è la salatura delle strade nei periodi invernali.

5. CLASSE DI ESPOSIZIONE XS: CLORURI DI ORIGINE MARINA

Anche per la classe di esposizione *XS* sono previste tre sotto-classi a seconda della particolare posizione della struttura. Nella tabella 4 sono illustrate le misure adottate dalle norme UNI-EN 206 e UNI 11104 per prevenire il degrado del materiale ed in particolare la corrosione dei ferri in relazione all'esposizione marina.

In linea teorica può essere corretto prevedere tre classi di esposizione, in relazione ad un diverso livello di aggressione ambientale, e corrispondentemente tre diverse composizioni di calcestruzzo.

Tuttavia, dal punto di vista pratico è difficile prevedere due o tre classi di esposizione, e quindi due o tre diversi calcestruzzi, quando questi appartengono ad un'unica struttura semi-immersa.

Coerentemente con la tabella 4, si dovrebbe impiegare un calcestruzzo per la parte permanentemente immersa in acqua di mare (*XS2*), un altro calcestruzzo per la parte esposta alle maree ed ai moti ondosi (*XS3*), ed eventualmente un terzo calcestruzzo per la parte di struttura perennemente fuori d'acqua ma esposta all'aerosol marino (*XS1*). Sarà il progettista, in relazione all'influenza percentuale di ciascuna classe di esposizione (*XS1 - XS2 - XS3*) a decidere quale prescrizione rispettare.

Tabella 4 - Classe di esposizione XS secondo UNI 11104-2004 e in parentesi quadra la UNI EN 206-1

Classe di esposizione	Ambiente	Esempi di strutture che si trovano nella classe XS	Max A/C	Min Classe di resistenza	C minimo (kg/m³)	Spessore copriferraccio * (mm) c.a c.a.p.	
XS1	Moderatamente umido	Strutture in prossimità delle coste esposte al trascinarsi eolic dell'acqua (aerosol);	0,50 [0,50]	C 32/40 [C 30/37]	340 [300]	45	55
XS2	Bagnato	Strutture permanentemente e completamente sotto acqua di mare;	0,45 [0,45]	C 35/45 [C 35/45]	360 [320]	45	55
XS3	Ciclicamente asciutto bagnato	Strutture esposte discontinuamente all'acqua marina (alta-bassa marea)	0,45 [0,45]	C 35/45 [C 35/45]	360 [340]	45	55
*L'Eurocodice 2 stabilisce lo spessore dei copriferracci nelle opere in c.a. e c.a.p. in relazione alle classi di esposizione definite dalla norma UNI-EN 206							

6. CLASSE DI ESPOSIZIONE XF: GELO-DISGELO E SALI DISGELANTI

Per la classe di esposizione *XF*, che riguarda strutture in calcestruzzo esposte all'azione dei sali disgelanti e/o ai cicli di gelo-disgelo, la UNI-EN 206-1 e la UNI 11104 prevedono quattro sottoclassi in funzione del grado di saturazione (maggiore nelle strutture orizzontali rispetto a quelle verticali) e della eventuale presenza di sali disgelanti e suggeriscono i corrispondenti provvedimenti da adottare per prevenire il degrado delle strutture (Tab. 5)

Esaminando la tabella 5 si possono fare delle considerazioni critiche per le strutture esposte ai cicli di gelo-disgelo ed ai sali disgelanti. Innanzi tutto la norma è piuttosto complessa in quanto prevede ben tre categorie di calcestruzzo per un'unica opera esposta alle varie classi *XF*. Per esempio, un ponte in alta montagna richiede ben tre diversi calcestruzzi (*XF1*, *XF2-XF3* ed *XF4*) a seconda che si tratti di strutture orizzontali o verticali, ed a seconda che siano esposte ai sali direttamente, indirettamente (solo spruzzi di acqua salati sollevati dai veicoli in movimento), o per nulla.

Tabella 5 - Classe di esposizione XF secondo UNI 11104-2004 e in parentesi
quadra la UNI EN 206-1

Classe di esposizione	Ambiente	Esempi di strutture che si trovano nella classe XF	Min. volume di aria (%)	Max A/C	Min Classe di resistenza	C minimo kg/m³	Spessore copriferro* (mm) c.a c.a.p.	
XF1	Moderata saturazione e con acqua in assenza di sali disgelanti	Superfici verticali esposte alla pioggia ed al gelo;	--	0,50 [0,55]	C 32/40 [C 30/37]	320 [300]	30	40
XF2	Moderata saturazione e con acqua in presenza di sali disgelanti	Superfici verticali di strutture stradali esposte a gelo e spruzzi contenenti sali disgelanti;	3 [4]	0,50 [0,55]	C 25/30 [C 25/30]	340 [300]	45	55
XF3	Elevata saturazione e con acqua in assenza di sali disgelanti	Superfici orizzontali esposte alla pioggia ed al gelo;	3 [4]	0,50 [0,50]	C 25/30 [C 30/37]	340 [320]	30	40
XF4	Elevata saturazione e con acqua in presenza di sali disgelanti	Superfici orizzontali e strutture verticali stradali esposte direttamente ai Sali disgelanti;	3 [4]	0,45 [0,45]	C 28/35 [C 30/37]	360 [340]	45	55

*L'Eurocodice 2 stabilisce lo spessore dei copriferri nelle opere in c.a. e c.a.p. in relazione alle classi di esposizione definite dalla norma UNI-EN 206

La distinzione tra le strutture verticali e quelle orizzontali (quest'ultime più esposte al rischio di saturazione con acqua) è teoricamente accettabile in termini

probabilistici, perché le seconde sono più vulnerabili delle prime per la formazione di ghiaccio a seguito di un abbassamento di temperatura sotto 0°C.

Nel caso delle pavimentazioni soggette a degrado da gelo-disgelo ed in presenza di sali disgelanti, sarà necessario utilizzare degli accorgimenti ulteriori in quanto il volume d'aria inglobato negli strati corticali, per effetto delle normali operazioni di fratazzatura, risulta essere inferiore rispetto a quello previsto e quindi rende la superficie più vulnerabile al degrado provocato dalle oscillazioni di temperatura intorno allo zero e all'azione dei sali disgelanti.

La soluzione del problema, dei cicli di gelo-disgelo è rappresentata dall'impiego nel confezionamento del conglomerato di additivi aeranti capaci, attraverso una stabilizzazione dell'aria presente nell'impasto, di garantire nella matrice cementizia la formazione di un sistema di microbolle, omogeneamente disperso, in cui la pressione dell'acqua sospinta dalla formazione del ghiaccio nei pori capillari possa scaricarsi prima di attingere valori superiori alla resistenza del materiale.

Per effetto dell'inglobamento d'aria (3-4%) la resistenza a compressione di un impasto resistente ai cicli di gelo-disgelo (XF2-XF3 ed XF4) subisce un abbattimento della prestazione meccanica di circa il 15-20% rispetto a quella di un calcestruzzo di pari rapporto A/C ma senza aerante.

7. CLASSE DI ESPOSIZIONE XA: TERRENI E ACQUE CHIMICAMENTE AGGRESSIVE

Questa classe di esposizione include sia i terreni aggressivi per il loro contenuto di solfato, sia le acque (industriali e non) aggressive per la presenza di solfato, acidità, ammoniaca, magnesio ed anidride carbonica.

Terreni chimicamente aggressivi

Nella norma UNI-EN 206, come anche nella norma UNI 11104-2004, gli ambienti chimicamente aggressivi sono due: solido e liquido, che corrispondono di fatto rispettivamente al terreno ed all'acqua.

L'aggressione chimica derivante dai terreni riguarda le strutture a contatto del suolo o di rocce, quali fondazioni, muri di sostegno, gallerie, tubazioni sotterranee, etc.

La Tabella 6 si riferisce alle definizioni delle condizioni aggressive dei terreni ed alle corrispondenti misure preventive da adottare per il calcestruzzo in termini di dosaggio minimo di cemento, di massimo rapporto A/C, e di minima R_{ck} .

Tabella 6 - Classe di esposizione XA secondo UNI 11104-2004 e in parentesi quadra la UNI EN 206-1

Classe di esposizione	Descrizione dell'ambiente TERRENO		Max A/C	Min Classe di resistenza	C minimo (kg/m ³)	Spessore di copriferro * (mm) c.a c.a.p.	
	Acidità (Bauman-Gully)	SO ₄ ⁼ (mg/kg)					
XA1	>200	≥2000 ≤3000	0,55 [0,55]	C 28/35 [C 30/37]	320 [300]	25	35
XA2	----	>3000 ≤12000	0,50 [0,50]	C 32/40 [C 30/37]	340 [320]	25	35
XA3	----	>12000 ≤24000	0,45 [0,45]	C 35/45 [C 35/45]	360 [360]	25	35

*L'Eurocodice 2 stabilisce lo spessore dei copriferri nelle opere in c.a. e c.a.p. in relazione alle classi di esposizione definite dalla norma UNI-EN 206

Nelle norme (UNI-EN 206 e 11104-2004) sopra riportate, per poter scegliere il tipo di calcestruzzo da adottare a contatto di un terreno occorre:

- Rilevarne l'acidità;
- Misurarne la permeabilità;
- Determinare il contenuto di solfato;

A seconda dei tre valori ottenuti, si individua la classe di aggressione chimica del terreno (XA1, XA2, XA3) e conseguentemente il tipo di calcestruzzo da adottare. 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. Infatti se l'acidità del terreno è trascurabile (>200 gradi Bauman-Gully) e contemporaneamente il terreno contiene un tenore di SO₄⁼ compreso tra 2000 e 3000 mg/kg, la classe di esposizione passa da XA1 ad XA2 per la coesistenza delle due aggressioni. D'altra parte, con un terreno poco permeabile (<10⁻⁵m/s), si attenua il rischio di attacco solfatico e conseguentemente si riduce di un livello la classe di aggressione chimica XA.

Acque chimicamente aggressive

In questo paragrafo vengono analizzate le situazioni di attacco dei calcestruzzi strutturali da parte di acque chimicamente aggressive per la presenza di uno o più composti, come previsto dalle norme UNI-EN 206 e 11104-2004 (Tab. 7).

Tabella 7 - Classe di esposizione XA secondo UNI 11104-2004 e in parentesi quadra la UNI EN 206-1

Classe di esposizione	Descrizione dell'ambiente ACQUA					Max A/C	Min Classe di resistenza	C minimo (kg/m ³)	Spessore copriferr o * (mm) c.a. c.a.p.	
	SO ₄ ⁼ (mg/l)	pH	CO ₂ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)					
XA1	≥200 ≤600	≤6,5 ≥5,5	≥15 ≤40	≥15 ≤30	≥300 ≤1000	0,55 [0,55]	C 28/35 [C 30/37]	320 [300]	25	35
XA2	>600 ≤3000	<5,5 ≥4,5	>40 ≤100	>30 ≤60	>1000 ≤3000	0,50 [0,50]	C 32/40 [C 30/37]	340 [320]	25	35
XA3	>3000 ≤6000	<4,5 ≥4,0	>100	>60 ≤100	>3000	0,45 [0,45]	C 35/45 [C 35/45]	360 [360]	25	35

*L'Eurocodice 2 stabilisce lo spessore dei copriferr o nelle opere in c.a. e c.a.p. in relazione alle classi di esposizione definite dalla norma UNI-EN 206

L'attacco aggressivo dei prodotti chimici (SO₄⁼, NH₄⁺, Mg⁺⁺) può provocare:

- *Decalcificazione* del CSH che si esplica con un aumento della porosità e soprattutto con la perdita di resistenza meccanica; quest'effetto decalcificante è provocato soprattutto dall'ammonio (NH₄⁺) e dal magnesio (Mg⁺⁺);
- *Espansione differenziale e fessurazione* provocato dallo ione SO₄⁼ ;

A seconda che la concentrazione cada in uno degli intervalli riportati nella Tabella 7, si debbono adottare le misure preventive in termini di massimo rapporto acqua cemento, di minima R_{ck} e di dosaggio minimo di cemento.

Degrado del calcestruzzo per azione dei cloruri

Il cloruro è stato per lungo tempo considerato un agente aggressivo solo dei ferri d'armatura. Più recentemente si è scoperto che esso può danneggiare più o meno gravemente anche il calcestruzzo.

L'azione corrosiva del cloruro sui ferri d'armatura non dipende dal particolare tipo di sale; quella aggressiva nei confronti del calcestruzzo, invece, è significativamente diversa a seconda che il sale sia costituito da cloruro di sodio (NaCl) o di calcio (CaCl₂).

8. CONCLUSIONI

Da tutto quanto sopra esposto si comprende che non è più possibile pensare ad una ricetta del calcestruzzo valida per tutte le strutture in c.a. Le norme impongono di progettare strutture in cemento armato che abbiano una vita nominale di 50 anni, per opere ordinarie, di 100 anni per opere sensibili (scuole, ponti, strade, ospedali, ecc.). Il progettista dovrà studiare il mix design del calcestruzzo tenendo ben presente le azioni aggressive che potranno portare al degrado precoce della struttura in relazione all'esposizione ambientale.

Bibliografia

- Iovino R., Fascia F, *La struttura in cemento armato per l'architettura*, Aracne 2008.
- Collepari M., *Il nuovo Calcestruzzo*, Ed. quarta, Tintoretto 2006.
- Collepari M., Ogoumah Olagot J.J., Simonelli F., Troli R.; *Il Calcestruzzo Vulnerabile*, Tintoretto 2005.
- Collepari M., Collepari S., Troli R.; *Mix Design del Calcestruzzo*, Tintoretto 2008.

Flavia Fascia, Emanuele La Mantia