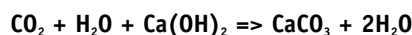


28

## LE STRUTTURE AEREE (FUORI TERRA) IN CLIMA TEMPERATO: CORROSIONE DEI FERRI INDOTTA ALL'ANIDRIDE CARBONICA

L'aria è costituita prevalentemente da ossigeno ed anidride carbonica. La concentrazione media di CO<sub>2</sub> è compresa tra 350 e 380 ppm.

L'interazione più importante della CO<sub>2</sub> con i costituenti della pasta di cemento è quella che coinvolge l'idrossido di calcio proveniente dall'idratazione dei silicati del clinker di cemento Portland:



La reazione detta di **carbonatazione o di neutralizzazione** (in quanto neutralizza l'effetto basico dell'idrossido di calcio) ha come conseguenza da una parte un miglioramento delle prestazioni meccaniche e una diminuzione della permeabilità del calcestruzzo e, dall'altra, un aumento del ritiro della struttura. Tuttavia, il fenomeno più interessante, dal punto di vista della durabilità, connesso con l'ingresso della CO<sub>2</sub> nel calcestruzzo, è legato alla diminuzione del pH della soluzione acquosa presente nei pori capillari della matrice cementizia. In assenza di CO<sub>2</sub>, la fase acquosa nei pori capillari è assimilabile ad una soluzione satura di calce con pH compresi tra 12.7 e 13.5 circa. A seguito della diffusione della CO<sub>2</sub> nella matrice cementizia, e della conseguente neutralizzazione della calce, il pH della fase acquosa si abbassa inizialmente al di sotto di 11.5 e, successivamente, può raggiungere valori intorno a 8.3.



Canale Enel - Lazise

La conseguenza pratica nelle strutture reali di questo abbassamento del pH consiste nel fatto che esso crea le premesse per la corrosione delle barre di armatura purché in prossimità dell'interfaccia acciaio-calcestruzzo ci sia sufficiente ossigeno ed acqua per alimentare il processo.

In assenza di macrodifetti e in assenza di CO<sub>2</sub> l'acciaio d'armatura nelle strutture aeree è caratterizzato da **condizioni di passività** contraddistinte da velocità di corrosione (< 0.1 μm/anno) che dal punto di vista ingegneristico possono ritenersi praticamente nulle. In queste condizioni di passività l'acciaio è ricoperto da un film di ossido protettivo di spessore nanometrico (< 2nm) che si forma rapidamente durante le fasi iniziali di idratazione del cemento. La stabilità del film è temporanea e può essere compromessa nelle strutture aeree proprio dalla riduzione dell'alcalinità della matrice cementizia determinata dall'ingresso dell'anidride carbonica la cui velocità di penetrazione diminuisce all'aumentare della resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo, grazie alla riduzione del volume e della dimensione dei pori capillari conseguente alla diminuzione del rapporto acqua/cemento. A parità di resistenza meccanica a compressione il processo di carbonatazione procede con maggiore velocità nelle strutture esposte ad umidità relativa moderata (come avviene negli ambienti interni) e più lentamente nelle strutture all'esterno direttamente esposte all'azione dell'acqua piovana per l'arresto momentaneo che il processo di diffusione della CO<sub>2</sub> subisce durante i periodi di pioggia quando i pori capillari della matrice cementizia si saturano di acqua.

La velocità di avanzamento del fronte di carbonatazione, inoltre, è fortemente dipendente nelle strutture reali anche dal processo di maturazione a cui le stesse sono sottoposte subito dopo il getto del conglomerato. La stagionatura umida, infatti, garantendo un maggior grado di idratazione delle strutture proprio nelle zone "cortecciali" direttamente interessate dal processo di diffusione ed una conseguente riduzione della porosità, consente di diminuire a parità di tutte le altre condizioni la velocità di diffusione della CO<sub>2</sub> rispetto a quella di un ele-

mento in calcestruzzo che viene invece lasciato all'aria senza alcuna protezione umida.

È evidente l'importanza pratica di quanto sopraesposto. Allo scopo, nell'ipotesi di realizzare, ad esempio, una pensilina in calcestruzzo il fronte di carbonatazione dopo 30 anni di esposizione varia grandemente in funzione sia della qualità ( $R_{ck}$ ) del conglomerato che del tempo di maturazione umida della struttura.

Come si può notare, si può conseguire una decisiva riduzione del fronte di avanzamento della  $CO_2$  prolungando opportunamente la durata della maturazione umida delle strutture.

*Spessore di calcestruzzo carbonatato in una struttura esposta all'esterno non protetta dalla pioggia per 30 anni in funzione alla  $R_{ck}$  e della durata della maturazione umida (1,7 o 28 giorni).*

$R_{ck}$	1 giorno x (mm)	1 giorno $K_{CO_2}$ (mm/anno <sup>1/2</sup> )	7 giorni x (mm)	7 giorni $K_{CO_2}$ (mm/anno <sup>1/2</sup> )	28 giorni x (mm)	28 giorni $K_{CO_2}$ (mm/anno <sup>1/2</sup> )
20	33.6	6.14	19.8	3.61	14.8	2.70
30	20.3	3.71	12.7	2.32	10.2	1.86
40	7.9	1.44	5.6	1.03	4.8	0.88

Quando il fronte di carbonatazione raggiunge le armature il film di passività diventa instabile e può essere parzialmente distrutto; in questa situazione ed in presenza di acqua ed ossigeno il ferro d'armatura può corrodersi con velocità ingegneristicamente significative e tali da determinare una drastica riduzione della vita di servizio delle strutture.

La **corrosione è un processo di tipo elettrochimico** che necessita perché si manifesti che esistano le seguenti condizioni:

**A) presenza di una zona anodica** ove avviene il processo di ossidazione del metallo ( $Fe = Fe^{2+} + 2e^-$ ) con conseguente produzione di elettroni e di acidità ( $Fe^{2+} + 2H_2O = Fe(OH)_2 + 2H^+$ );

**B) presenza di una zona catodica** dove in presenza di acqua si ha il processo di riduzione dell'ossigeno che consuma gli elettroni messi a disposizione nella zona anodica dal processo di ossidazione del metallo ( $O_2 + 2H_2O + 4e^- = 4OH^-$ );

**C e D)** perché i processi anodici e catodici possano manifestarsi è necessario che ci sia una **circolazione della corrente tra il sito anodico e quello catodico**. Questa circolazione di corrente avviene sia attraverso la barra di armatura (C), ove gli elettroni prodotti dalla reazione anodica vengono resi disponibili nella zona catodica, che attraverso il calcestruzzo (D) ove la circolazione di corrente per la chiusura del circuito è affidata prevalentemente agli ioni disciolti nella fase acquosa dei pori capillari.

In una struttura aerea in assenza di  $CO_2$  il processo è controllato dalla passività delle armature cui corrisponde una velocità di corrosione di qualche decimo di micron all'anno (si parla di **controllo cinetico di passività**). Allo stesso modo, la velocità di corrosione risulta non significativa in una struttura idraulica permanentemente immersa o interrata in quanto, a causa dell'elevato grado di saturazione dei pori capillari, il processo di diffusione della  $CO_2$  e dell'ossigeno vengono fortemente rallentati. In un calcestruzzo asciutto non esposto alla pioggia o ad atmosfere sature di umidità la resistività elettrica può risultare maggiore di 60  $\Omega m$  e, conseguentemente, ridurre drasticamente la circolazione di corrente. Il processo di corrosione in queste situazioni è a **controllo di tipo ohmico** e la densità di corrente di corrosione, sebbene superiore a quella che individua le condizioni di passività, è all'incirca di 1 mA/m<sup>2</sup> e, quindi, ingegneristicamente non significativa.

Perché il processo di corrosione diventi apprezzabile, quindi, è necessario che il film di passività diventi instabile o venga distrutto dall'abbassamento di alcalinità prodotto dalla



Gruppo Cementirosi S.p.A.

carbonatazione, in modo che si possa produrre un processo anodico di dissoluzione del metallo con apprezzabile velocità, ma nel contempo debbono sussistere condizioni che favoriscono l'apporto di ossigeno nelle regioni catodiche e l'intero processo di corrosione venga favorito dalla circolazione di corrente dai siti catodici a quelli anodici da un calcestruzzo che, grazie all'elevato grado di saturazione, sia caratterizzato da basse resistività elettriche. Nelle strutture reali queste condizioni sussistono soltanto in quegli elementi strutturali direttamente esposti all'azione dell'acqua piovana o interessati dal ruscellamento dell'acqua per errori nel suo smaltimento (dove quindi la resistività elettrica del calcestruzzo è bassa) e che sono realizzati con calcestruzzi scadenti, di elevata porosità o che presentano difetti per errori di compattazione o fessure e, quindi, laddove il fronte di avanzamento della carbonatazione può raggiungere le armature.

### **Prescrizioni di capitolato per opere durevoli esposte al rischio di corrosione promossa dalla CO<sub>2</sub>.**

Per prevenire la corrosione dei ferri promossa dall'anidride carbonica occorre adottare provvedimenti commisurati al grado di aggressione dell'ambiente in cui la struttura è situata. Relativamente a questo aspetto la norma EN 206-1 suddivide gli ambienti in cui esiste il rischio di corrosione in quattro sub-classi.

*Le sottoclassi di esposizione per le strutture esposte al rischio di corrosione promossa dalla CO<sub>2</sub>.*

CLASSE DI ESPOSIZIONE	DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA E DELL'AMBIENTE
XC1	Strutture in ambienti interni asciutti con U.R.<70%
XC2	Strutture idrauliche o di fondazione permanentemente bagnate
XC3	Strutture esterne protette dalla pioggia
XC4	Strutture esterne esposte alla pioggia e parti di strutture idrauliche che alternano periodi di immersione e di emersione

Per ognuna delle quattro sub-classi potranno essere adottati ai fini della prevenzione del degrado i requisiti compositivi (rapporto a/c massimo e dosaggio di cemento minimo), prestazionali (resistenza caratteristica minima) e di progetto (spessore nominale del copriferro) riportati nella Tabella che segue in accordo alle norme nazionali ed europee vigenti.

*Requisiti compositivi, prestazionali e di progetto per le classi di esposizione XC in accordo alla norma UNI 11104 e EN-1992 (tra parentesi quadrata quelli in accordo alla norma europea EN 206-1).*

CLASSE DI ESPOSIZIONE	RAPPORTO a/c max	CLASSE DI RESISTENZA MIN	DOSAGGIO DI CEMENTO MIN (Kg/m <sup>3</sup> )	COPRIFERRO NOMINALE* (mm)
XC1	0.60 [0.65]	C25/30 [C20/25]	300 [260]	25/35
XC2	0.60 [0.60]	C25/30 [C25/30]	300 [280]	35/45
XC3	0.55 [0.55]	C28/35 [C30/37]	320 [280]	35/45
XC4	0.50 [0.50]	C32/40 [C30/37]	340 [300]	40/50

\* Per elementi strutturali in classe S4 e tolleranza pari a 10 mm.