

CORROSIONE DA CARBONATAZIONE: FENOMENO DI DEGRADO E PREVENZIONE

Federica Lollini

Politecnico di Milano

Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica “Giulio Natta”

federica.lollini@polimi.it

Riassunto

Questa nota riguarda la corrosione delle armature delle strutture in calcestruzzo armato indotta dalla carbonatazione. Inizialmente si descrive il meccanismo di penetrazione della carbonatazione nel calcestruzzo, che porta all'innesco della corrosione, e i principali fattori che influenzano la velocità di ingresso. Successivamente si illustrano i parametri che influenzano la velocità di corrosione una volta che si è innescata. Infine si descrivono le strategie per prevenire questa forma di degrado e garantire la vita di servizio richiesta.

Parole chiave

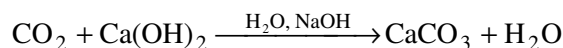
Calcestruzzo, durabilità, carbonatazione, periodo d'innesco, propagazione, prevenzione.

Introduzione

La causa di degrado più frequente delle opere in calcestruzzo armato è senza dubbio la corrosione delle armature. Inizialmente, in un calcestruzzo privo di cloruri, le barre di armatura in acciaio non si corrodono, perché la soluzione liquida contenuta nei pori del calcestruzzo ha un pH in genere compreso tra 13 e 14 che permette la formazione di un film di ossido protettivo sulle armature (passività). Purtroppo questa protezione può, nel tempo, venire meno e una delle cause che più frequentemente portano alla distruzione del film di passività è la carbonatazione del calcestruzzo.

La carbonatazione avviene per reazione dell'anidride carbonica presente nell'atmosfera con i costituenti alcalini del calcestruzzo, presenti nella soluzione dei pori (principalmente NaOH e KOH) e nei prodotti di idratazione della matrice cementizia (portlandite, Ca(OH)_2 , e silico-alluminati idrati).

La reazione di carbonatazione, che ha luogo in soluzione acquosa, si può sintetizzare come:



Come conseguenza si ha un abbassamento del pH del calcestruzzo, da valori in genere superiori a 13 a valori prossimi alla neutralità. In queste condizioni il film di passività si rompe e, in presenza di acqua e ossigeno, le armature possono corrodersi.

Ulteriore conseguenza della carbonatazione è il rilascio nella soluzione dei pori dei cloruri, eventualmente presenti, legati ai prodotti di idratazione del cemento; questo provoca un aumento dell'aggressività dell'ambiente in cui si trovano le armature.

Si definisce periodo di innesco della corrosione il tempo necessario affinché si produca la perdita delle condizioni di protezione sulle armature. Una volta che vengono meno le condizioni di passività, segue un periodo di propagazione che può portare a fessurazioni e successivi distacchi del

copriferro (Figura 1). La corrosione può avere diverse conseguenze che possono comportare il raggiungimento di uno stato limite, ovvero una condizione di degrado non più accettabile, soprattutto legata alla sicurezza, e di conseguenza la fine della vita di servizio della struttura.

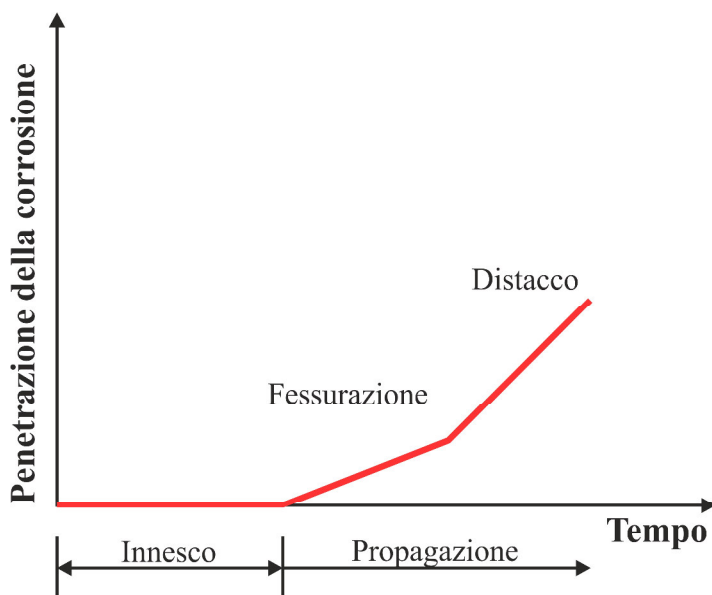


Figura 1 – Periodo di innesco e propagazione della corrosione in una struttura in calcestruzzo armato soggetta a degrado causato da corrosione da carbonatazione (diagramma di Tuutti).

Questa nota descrive il fenomeno della corrosione indotta dalla carbonatazione e si esaminano i fattori da cui dipende la penetrazione della carbonatazione e la velocità di corrosione. Successivamente si descrive l'approccio da normativa per prevenire questa forma di degrado e garantire la vita di servizio richiesta.

Innesco della corrosione da carbonatazione

La Figura 2 mostra l'evoluzione nel tempo della penetrazione della carbonatazione. Inizialmente le armature sono passive, in quanto inglobate in calcestruzzo alcalino, e nessun fenomeno corrosivo è in atto (Figura 2a); tuttavia la carbonatazione inizia a penetrare all'interno del calcestruzzo, a partire dagli strati più superficiali (Figura 2b). Il periodo di innesco, t_i , termina quando il fronte di carbonatazione raggiunge la profondità delle armature, ovvero quando lo spessore di carbonatazione eguaglia lo spessore di copriferro (Figura 2c). Anche se di per se stesso questo fenomeno non influenza la funzionalità o la stabilità della struttura, l'innesco della corrosione è un momento critico nella vita di una struttura. Infatti, le barre depassivate diventano suscettibili alla corrosione.

La durata del periodo di innesco è governata dallo spessore del copriferro e dai tutti i fattori che regolano la velocità di penetrazione della carbonatazione nel calcestruzzo: minore è lo spessore di copriferro e maggiore è la velocità di penetrazione, minore sarà la durata del periodo di innesco.

La reazione di carbonatazione inizia sulla superficie esterna e la sua velocità di penetrazione diminuisce nel tempo mano a mano che avanza in profondità.

La profondità di carbonatazione può essere ragionevolmente descritta da una legge proporzionale alla radice quadrata del tempo (andamento parabolico):

$$s = K \cdot \sqrt{t}$$

dove s è lo spessore (in mm) di calcestruzzo carbonatato, t è il tempo (in anni) e K è il coefficiente di carbonatazione (in $\text{mm/anni}^{0.5}$).

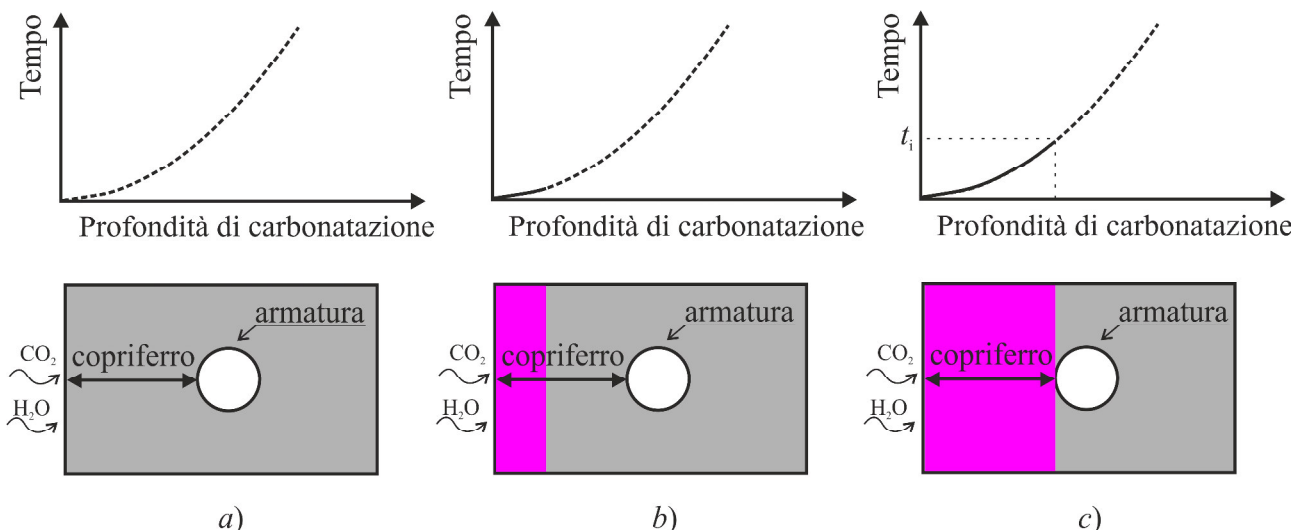


Figura 2 – Evoluzione nel tempo della profondità della carbonatazione di una struttura in calcestruzzo armato. Le zone in rosa indicano il calcestruzzo carbonatato, quelle in grigio il calcestruzzo alcalino.

Il coefficiente di carbonatazione, che esprime la velocità di penetrazione della carbonatazione, dipende da fattori ambientali e dalle proprietà del calcestruzzo.

Per quanto riguarda i fattori ambientali, l'umidità del calcestruzzo ha un ruolo predominante. Essa regola infatti sia lo svolgimento della reazione stessa sia la penetrazione dell'anidride carbonica nel calcestruzzo. La velocità di carbonatazione è trascurabile sia in calcestruzzo asciutto (in equilibrio con un ambiente con umidità relativa inferiore al 40%), sia in calcestruzzo saturo. In calcestruzzo asciutto la reazione dell'anidride carbonica con i componenti alcalini del calcestruzzo è inibita a causa della mancanza d'acqua. In calcestruzzo saturo, invece, i pori sono saturi d'acqua e la diffusione dell'anidride carbonica è fortemente ostacolata. La velocità di carbonatazione è maggiore nell'intervallo di umidità compreso tra 60 e 80% come, ad esempio, all'interno di un edificio o nelle zone all'esterno, ma schermate dalla pioggia. La velocità di carbonatazione è inferiore se la struttura è soggetta a cicli di asciutto e bagnato. In questo caso il coefficiente di carbonatazione dipende dal tempo di bagnato, così come dalla frequenza e dalla durata dei cicli di asciutto-bagnato. Il calcestruzzo, infatti, assorbe l'acqua molto più rapidamente rispetto a quanto la cede e pertanto, una volta che è bagnato tende ad asciugarsi molto lentamente. Di conseguenza la velocità di penetrazione della carbonatazione è ridotta in caso di frequenti anche se brevi periodi di bagnato, rispetto a periodi di bagnato meno frequenti, ma più lunghi. Risulta, quindi, evidente come la carbonatazione penetra con velocità diversa nelle parti della struttura esposte a condizioni microclimatiche differenti. Nelle zone poste all'esterno e non schermate dalla pioggia, e quindi soggette a cicli di asciutto-bagnato, la carbonatazione avanza più lentamente rispetto a quanto avviene nelle zone riparate; all'interno dell'edificio la penetrazione della carbonatazione risulta ancora più rapida (Figura 3). Altri fattori ambientali che possono influire sulla velocità di penetrazione della carbonatazione, seppure in maniera meno rilevante, sono la concentrazione dell'anidride carbonica e la temperatura. La velocità di carbonatazione aumenta all'aumentare della concentrazione di anidride carbonica: la carbonatazione penetrerà, quindi, più velocemente in ambiente urbano rispetto ad un ambiente rurale, dove la concentrazione di anidride carbonica può essere anche inferiore di un terzo. Ambienti particolari, dove si possono registrare aumenti della concentrazione di anidride carbonica e quindi dove la velocità di carbonatazione sarà più elevata, sono ad esempio gli interni delle gallerie.

Un aumento della temperatura provoca un aumento della velocità di penetrazione della carbonatazione.

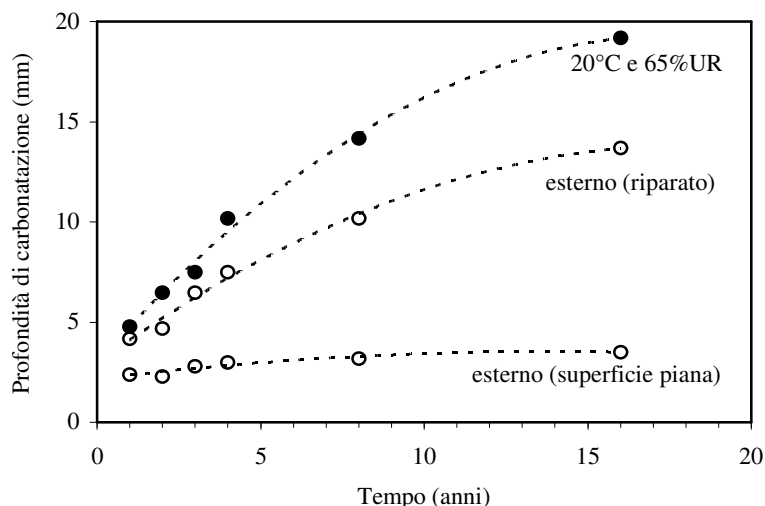


Figura 3 – Avanzamento della carbonatazione del calcestruzzo in funzione delle condizioni di esposizione (20°C e 65%U.R.: esempio di condizioni climatiche riferite all'interno dell'edificio).

Per quanto riguarda le proprietà del calcestruzzo, il fattore che riveste maggiore importanza nel determinare la velocità di carbonatazione è la permeabilità del calcestruzzo e, in particolare, del copriferro. Minore è la permeabilità, minore sarà la velocità con cui l'anidride carbonica penetra nel calcestruzzo. La diffusione dell'anidride carbonica è rallentata da una bassa porosità della pasta cementizia, che può essere garantita diminuendo il rapporto acqua/cemento e fornendo una adeguata stagionatura. La penetrazione della carbonatazione diminuisce al diminuire del rapporto acqua/cemento, tuttavia se il calcestruzzo non è stagionato adeguatamente, i vantaggi legati all'impiego di un basso rapporto acqua/cemento vengono meno (Figura 4). Una cattiva stagionatura, inoltre, influisce maggiormente in maniera negativa sugli strati più esterni e quindi sul copriferro che risulterà più poroso e permeabile alla carbonatazione.

Anche il tipo di cemento può influenzare la velocità di carbonatazione; i cementi di miscela, ottenuti con aggiunte minerali, come i materiali pozzolanici (ad esempio la cenere volante) o la loppa granulata d'altoforno, consumano, durante l'idratazione, la portlandite della pasta cementizia e questo può portare ad un aumento della velocità di carbonatazione rispetto a quanto si verifica con un cemento portland.

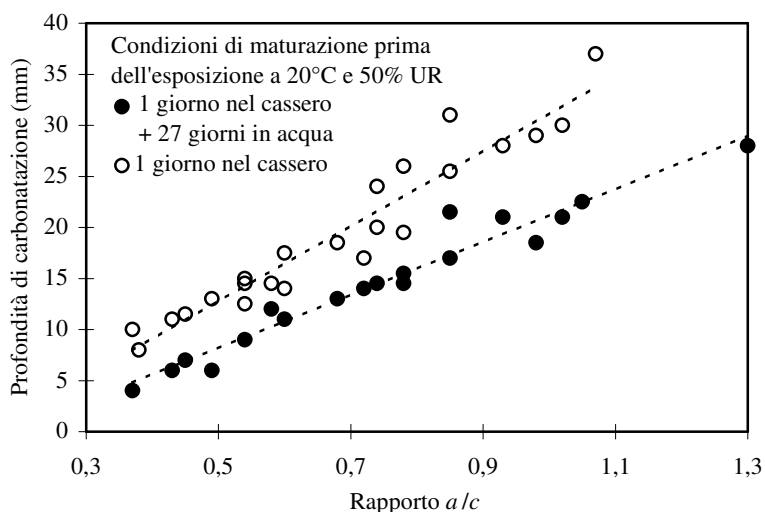


Figura 4 – Influenza del rapporto a/c e della stagionatura sulla profondità di carbonatazione di calcestruzzi di cemento portland, mantenuti per 6 anni a 20°C e 50% UR.

Infine anche una non corretta messa in opera del calcestruzzo, come una compattazione non adeguata e una conseguente segregazione del calcestruzzo, può influire negativamente sulla permeabilità del calcestruzzo e in particolare del copriferro, aumentando la velocità di carbonatazione.

La conoscenza del coefficiente di carbonatazione, unita allo spessore di copriferro consente di valutare il tempo di innesco della corrosione. La Figura 5 mostra, ad esempio, la variazione del tempo di innesco in funzione dello spessore di copriferro e del coefficiente di carbonatazione. A titolo d'esempio sono stati considerati tre valori corrispondenti a un calcestruzzo poco poroso ($K = 5 \text{ mm/anno}^{0.5}$), un calcestruzzo di media porosità ($K = 7 \text{ mm/anno}^{0.5}$) e un calcestruzzo di scarsa qualità ($K = 10 \text{ mm/anno}^{0.5}$). Considerando, ad esempio, uno spessore di copriferro di 30 mm, si osserva come il tempo di innesco aumenta da 9 a 18 e 36 anni, riducendo il coefficiente di carbonatazione da 10 a 7 e a 5 $\text{mm/anno}^{0.5}$. Si osserva come, al fine di aumentare il tempo di innesco, sia possibile aumentare lo spessore di copriferro: un suo aumento infatti consente di incrementare il tempo necessario alle sostanze aggressive per raggiungere le armature (è tuttavia importante sottolineare che lo spessore non può superare certi limiti, soprattutto a causa di problemi legati alla fessurazione).

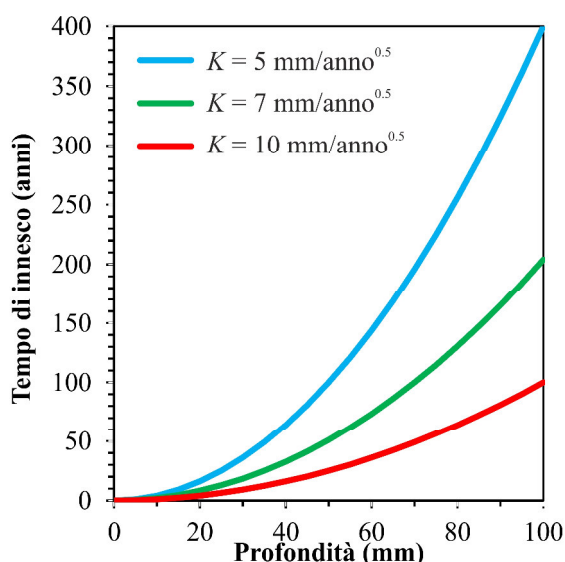


Figura 5 – Tempo di innesco della corrosione in funzione dello spessore di copriferro e del coefficiente di carbonatazione, K .

Propagazione della corrosione da carbonatazione

La Figura 6 mostra le conseguenze della corrosione una volta che la carbonatazione ha raggiunto le armature e il film di passività è stato distrutto, se sono presenti acqua e ossigeno sulla superficie dell'armatura. Gli ossidi prodotti alla superficie dell'armatura (Figura 6a), occupando un volume maggiore rispetto al ferro da cui sono prodotti, possono produrre sforzi di trazione nello spessore di copriferro, che possono portare a fessurazione (Figura 6b), distacchi in aree localizzate (Figura 6c) o delaminazione. Possono anche provocare una riduzione di aderenza tra armatura e calcestruzzo.

La durata del periodo di propagazione è principalmente governata dalla velocità di corrosione delle armature e dai fattori da cui essa dipende; minore è la velocità di corrosione maggiore sarà la durata del tempo di propagazione.

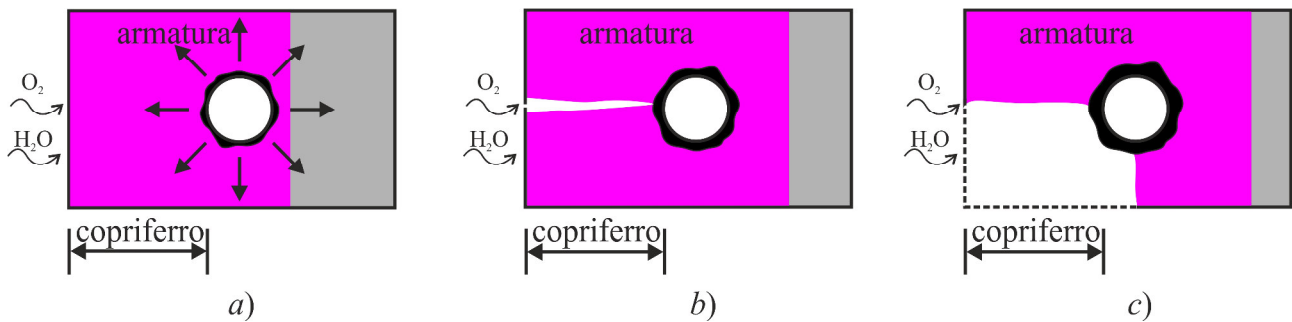


Figura 6 – Evoluzione nel tempo delle conseguenze della propagazione della corrosione.

La velocità di corrosione dipende dalla disponibilità a livello delle armature di ossigeno e di acqua. A meno che il calcestruzzo non sia permanentemente saturo d'acqua, a livello delle armature è sempre presente un quantitativo di ossigeno sufficiente per permettere la corrosione, pertanto la velocità di corrosione è essenzialmente determinata dalla umidità del calcestruzzo. La velocità di corrosione nel calcestruzzo carbonatato è, infatti, direttamente correlata alla resistività elettrica e diminuisce all'aumentare di essa (Figura 7). La resistività elettrica oltre a dipendere dall'umidità, è influenzata, in misura minore, dalle caratteristiche del calcestruzzo (tipo di cemento, rapporto acqua/cemento, stagionatura ...).

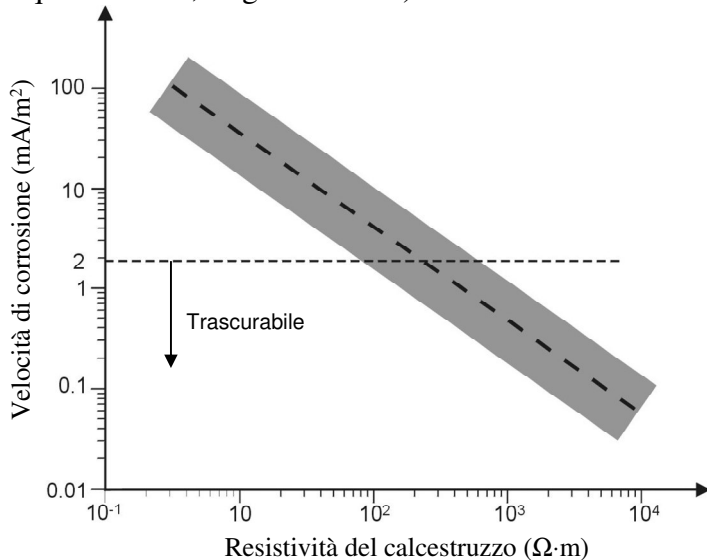


Figura 7 – Relazione schematica tra velocità di corrosione in calcestruzzo carbonatato e resistività del calcestruzzo.

In calcestruzzo asciutto, come gli interni di edifici, la resistività elettrica è elevata e la velocità di corrosione è trascurabile (inferiore a 1-2 $\mu\text{m}/\text{anno}$, cioè circa 1-2 mA/m^2). Al crescere dell'umidità del calcestruzzo la resistività diminuisce e aumenta la velocità di corrosione e i valori più alti di corrosione si raggiungono in prossimità della saturazione del calcestruzzo. In pratica, per calcestruzzi di buona qualità e in assenza di cloruri, la propagazione della corrosione è trascurabile per valori di umidità relativa inferiori a 80%. Appare evidente che l'evoluzione nel tempo della corrosione sia, quindi, strettamente dipendente dai cambiamenti locali dell'umidità del calcestruzzo alla profondità delle armature.

La velocità di corrosione è, anche influenzata, dalla presenza di cloruri nel calcestruzzo carbonatato, anche in un tenore inferiore a quello necessario per creare l'innesco. I cloruri, infatti, portano a una diminuzione della resistività del calcestruzzo, in parte dovuta all'igroscopicità dei sali. In presenza di cloruri si ha una diminuzione dei valori di umidità relativa al di sotto dei quali il fenomeno diviene trascurabile e si possono avere velocità di corrosione non trascurabili anche per valori di umidità relativa inferiori a 60%.

Vita di servizio di una struttura soggetta a corrosione da carbonatazione

Sulla base di quanto riportato nei paragrafi precedenti, si deduce che la vita di servizio di una struttura in calcestruzzo armato soggetta a corrosione da carbonatazione sia fortemente dipendente dalle macro e micro condizioni di esposizione ambientale.

Infatti in elementi in calcestruzzo posti in ambienti interni (Figura 8a), o riparati dalla pioggia (Figura 8b), la reazione di carbonatazione è favorita dalle condizioni di bassa umidità, e quindi la carbonatazione può raggiungere rapidamente le armature e il tempo di innesco può essere relativamente breve. Tuttavia, la limitata disponibilità di acqua (a meno che il calcestruzzo non si bagni per qualche ragione), rende di fatto trascurabile la velocità di corrosione e, quindi, il tempo di propagazione risulta essere relativamente lungo.

Invece, nel caso di elementi in calcestruzzo esposti all'esterno in zone non riparate dalla pioggia, l'umidità presente nel calcestruzzo rallenta la penetrazione della carbonatazione ritardando l'innesco; tuttavia una volta che la carbonatazione ha raggiunto le armature la corrosione può propagare velocemente portando alla fessurazione e al distacco del copriferro (Figura 8c).

Le condizioni che portano ad avere una elevata velocità di propagazione della corrosione sono quelle che comportano una lenta penetrazione della carbonatazione, quindi un lungo periodo d'innesco, e viceversa. Pertanto, le condizioni peggiori si riscontrano negli elementi esposti alla pioggia (soggetti a cicli di asciutto/bagnato) e nelle parti basse delle strutture.

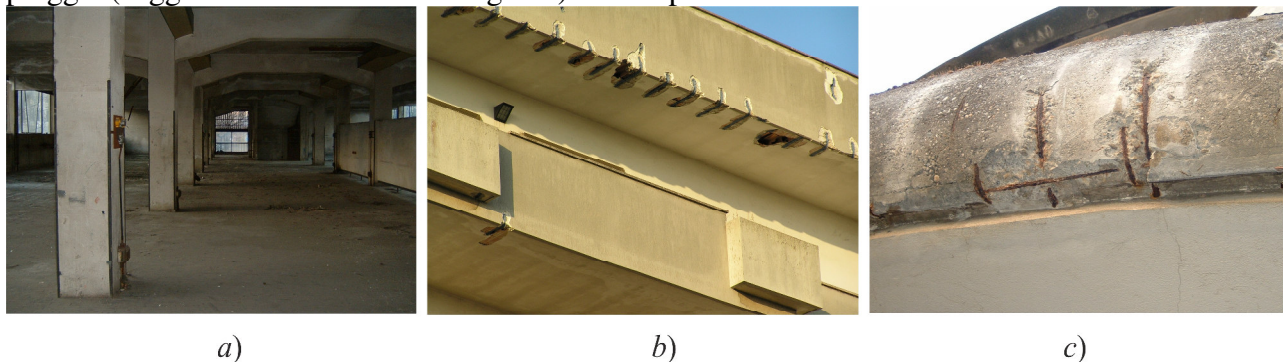


Figura 8 – Esempi di conseguenze della corrosione da carbonatazione: pilastro interno (a); intradosso di un cornicione (b); trave a vista esposta a asciutto/bagnato (c).

Norme per il progetto della durabilità

Il progettista di una struttura in calcestruzzo armato e precompresso ha anche la responsabilità di effettuare le scelte adatte per garantirne le prestazioni definite in sede di progetto per tutta la vita di servizio. A tale riguardo, un valido aiuto ai progettisti è fornito dalla normativa europea, in particolare dalla UNI EN 206, che riguarda le proprietà del calcestruzzo, dalla UNI EN 1992-1 (Eurocodice 2), che si riferisce al progetto delle strutture in calcestruzzo, e dalla UNI EN 13670, che si occupa dell'esecuzione delle strutture. Queste norme sono anche richiamate dalle Norme Tecniche sulle Costruzioni.

La norma UNI EN 206 prevede la classificazione degli ambienti di esposizione in base al tipo di degrado atteso. Per quanto riguarda la corrosione delle armature sono previste quattro classi: 1) nessun rischio di corrosione o di attacco (X0); 2) corrosione da carbonatazione (XC); 3) corrosione causata da cloruri non provenienti dall'acqua di mare (XD); 4) corrosione causata da cloruri provenienti dall'acqua di mare (XS). Ognuna di queste classi è suddivisa in sottoclassi che individuano differenti condizioni di esposizione; in Tabella 1 è riportata una breve descrizione delle diverse classi di esposizione ambientale.

Per la corrosione da carbonatazione, la norma EN 206 prevede quattro classi di esposizione ambientale caratterizzate da diversa aggressività, crescente dalla classe XC1 alla XC4 (Tabella 1).

Tabella 1 – Classificazione dell'esposizione ambientale in riferimento alla corrosione delle armature, secondo la norma UNI EN 206.

Classe di esposizione		Descrizione dell'ambiente	Esempi
1 - <i>Nessun rischio di corrosione o di attacco</i>	<i>X0</i>	Molto secco	Calcestruzzo all'interno di edifici con umidità dell'aria molto bassa.
2 - <i>Corrosione da carbonatazione</i>	<i>XC1</i>	Secco o saturo	Interno di edifici con umidità dell'aria bassa. Calcestruzzo permanentemente immerso.
	<i>XC2</i>	Umido, raramente secco	Parti che trattengono l'acqua. Fondazioni.
	<i>XC3</i>	Moderatamente umido	Interno di edifici con umidità dell'aria moderata o elevata. Esterni riparati dalla pioggia.
	<i>XC4</i>	Cicli di bagnamento e asciugamento	Superfici a contatto con acqua, non rientranti nella classe di esposizione XC2.
3 - <i>Corrosione causata da cloruri non provenienti dall'acqua di mare</i>	<i>XD1</i>	Moderatamente umido	Superfici di calcestruzzo esposte direttamente a spruzzi contenenti cloruri
	<i>XD2</i>	Umido, raramente secco	Piscine. Calcestruzzo esposto ad acque industriali contenenti cloruri.
	<i>XD3</i>	Cicli di bagnamento e asciugamento	Parti di ponti. Pavimentazioni. Solette di garage.
4 - <i>Corrosione causata da cloruri provenienti dall'acqua di mare</i>	<i>XS1</i>	Esposizione alla salsedine ma non in contatto diretto con l'acqua marina	Strutture vicine o sulla costa.
	<i>XS2</i>	Sommersa	Parti di strutture marine.
	<i>XS3</i>	Maree, onde, spruzzi	Parti di strutture marine.

La classe XC1 unisce due condizioni di bassa aggressività caratterizzate da presenza di calcestruzzo secco e calcestruzzo saturo. Nel primo caso è favorita la penetrazione della carbonatazione, ma la velocità di corrosione è molto bassa (rendendo molto lungo il tempo di propagazione); nel secondo caso, invece, la penetrazione della carbonatazione è ostacolata e il tempo di innesco della corrosione è elevato. La classe XC2 riguarda le condizioni in cui il calcestruzzo rimane quasi sempre umido, ma non saturo d'acqua; anche in questo caso la penetrazione della carbonatazione è rallentata. Questa condizione si può riscontrare, ad esempio, nelle strutture di fondazione. La classe XC3 è relativa a strutture che operano in ambienti umidi, ma non bagnati dall'acqua (ad esempio, opere esposte all'esterno ma riparate dalla pioggia); la carbonatazione in queste condizioni penetra più rapidamente rispetto a quelle previste nella classe XC2, e la velocità di corrosione delle armature dipenderà dall'umidità del calcestruzzo. La classe XC4, infine, si riferisce ai casi in cui il calcestruzzo è soggetto a cicli di asciutto e bagnato; l'alternarsi di queste diverse condizioni favorisce l'ingresso della carbonatazione (nel periodo asciutto) e la propagazione della corrosione (durante il periodo bagnato). Questa, quindi, rappresenta la condizione ambientale più aggressiva.

In base alla classe di esposizione, la norma fornisce delle prescrizioni sul calcestruzzo in relazione alla durabilità, in particolare sul massimo rapporto acqua/cemento (a/c), sul minimo dosaggio di cemento e sulla classe di resistenza minima del calcestruzzo. Indicando la resistenza a compressione minima del calcestruzzo, di fatto, la norma converte i requisiti di durabilità, indicati attraverso il massimo rapporto a/c , in requisiti di resistenza meccanica. In questo modo, oltre a sottolineare come in caso di ambiente aggressivo sia necessario un calcestruzzo poco poroso e quindi debba essere garantita una minima resistenza (che può essere superiore a quella necessaria per esigenze strutturali), si semplificano i controlli attraverso la verifica della resistenza, peraltro già obbligatoria (la verifica a posteriori del rapporto a/c utilizzato è molto complessa).

I valori limite riportati nella norma per la composizione e le proprietà del calcestruzzo sono riferiti a una vita di servizio attesa della struttura di 50 anni e all'impiego di un cemento tipo CEM I (cemento portland; in riferimento alla UNI EN 197-1) con classe di resistenza 32.5.

Classe di esposizione	Max. <i>a/c</i>	Min. classe resistenza (MPa)	Min. cemento (kg/m ³)	Min. spessore copriferro (mm)		
				c.a.	c.a.p.	
<i>Corrosione da</i>	<i>XC1</i>	0.65	C20/25	260	15	25
<i>Carbonatazione</i>	<i>XC2</i>	0.60	C25/30	280	25	35
	<i>XC3</i>	0.55	C30/37	280	25	35
	<i>XC4</i>	0.50	C30/37	300	30	40

Tabella 2 – Indicazioni riportate nella UNI EN 206 per le prescrizioni del calcestruzzo e nell'Eurocodice 2 per lo spessore del copriferro, per la classe strutturale S4, in caso di corrosione da carbonatazione e per una vita di servizio attesa di 50 anni (valori riferiti all'impiego di un cemento di tipo CEM I con classe di resistenza 32.5).

La UNI EN 1992-1, l'Eurocodice 2, fornisce invece i vincoli relativi allo spessore di copriferro in riferimento alle classi di esposizione ambientale riportate nella EN 206 e alla classe strutturale (sono definite sei classi strutturali in funzione della vita di servizio, della classe di resistenza del calcestruzzo, della forma dell'elemento strutturale e del controllo di produzione; viene espressamente indicato che la classe strutturale raccomandata è la S4, riferita ad una vita utile di progetto di 50 anni).

La Tabella 2 riporta, in base alla classe di esposizione, i valori di riferimento sulla composizione del calcestruzzo e sullo spessore minimo di copriferro (proposti nell'Eurocodice 2). Per strutture in calcestruzzo armato che operano nelle condizioni relative alla classe XC1, la meno aggressiva, viene prescritto un valore massimo del rapporto *a/c* pari a 0.65 e uno spessore di copriferro minimo di 15 mm. Al crescere dell'aggressività dell'ambiente i valori massimi di rapporto acqua/cemento diminuiscono (e aumentano i valori minimi di resistenza), mentre aumentano i valori minimi dello spessore del copriferro. Nel caso di esposizione nella classe più aggressiva, la XC4, il massimo rapporto *a/c* è pari a 0.5 e il minimo copriferro è pari a 30 mm.

Infine, oltre alle prescrizioni da formulare in sede di progetto, è necessario formulare anche delle prescrizioni sull'esecuzione delle strutture e per questo è possibile fare riferimento alla UNI EN 13670. Questa norma contiene diverse utili linee guida (riguardo la compattazione del calcestruzzo, la verifica del copriferro ...), in particolare fornisce indicazioni sulla stagionatura del calcestruzzo. Nella norma sono definite quattro classi di stagionatura relative a diversi tempi di stagionatura, riferiti alla percentuale di resistenza superficiale raggiunta rispetto a quella a compressione caratteristica a 28 giorni. La scelta della classe di stagionatura dipende dalla classe di esposizione, dalla composizione del calcestruzzo e dallo spessore del copriferro.

Bibliografia

- L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli, R. Polder, "Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair", 2nd edition, Wiley VCH, Weinheim, 2013.
- L. Bertolini, "Materiali da costruzione - Volume II: degrado, prevenzione, diagnosi, restauro", Seconda edizione, CittàStudi edizioni, Novara, 2012.