

# La corrosione delle armature nel calcestruzzo e la sua prevenzione

Luca Bertolini

Politecnico di Milano

Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica “G. Natta”

luca.bertolini@polimi.it

In passato era opinione comune che le strutture in calcestruzzo armato fossero intrinsecamente durevoli e, anche se costruite senza particolare cura ed esposte ad ambienti aggressivi, fossero sostanzialmente immuni da degrado. A partire dagli anni '80, di fronte all'aumentare dei casi di degrado, ai rischi per la sicurezza e agli alti costi di manutenzione, la prospettiva è cambiata e si è compresa l'importanza di prevenire il degrado del calcestruzzo e, soprattutto, la corrosione delle armature. In questa nota si analizzano le principali cause di corrosione delle armature e si accennano i diversi approcci alla prevenzione.

## 1 CORROSIONE DELLE ARMATURE

Le armature di acciaio nel calcestruzzo sono protette dalla corrosione grazie alle condizioni di passività che si sviluppano a contatto con la soluzione alcalina contenuta nei pori della pasta cementizia. La corrosione delle armature può, però, essere indotta dalla carbonatazione del calcestruzzo o dalla penetrazione di cloruri.

L'anidride carbonica presente nell'atmosfera può reagire con i composti alcalini presenti nella soluzione dei pori del calcestruzzo (NaOH, KOH), ma anche nella matrice cementizia sotto forma di  $\text{Ca(OH)}_2$  (portlandite) e di silico-alluminati idrati. La carbonatazione porta il pH della soluzione dei pori a valori prossimi alla neutralità, per cui l'acciaio nel calcestruzzo carbonatato non è più passivo.

La Figura 1 mostra gli effetti della corrosione, in funzione del tempo, su un elemento strutturale soggetto a *carbonatazione*. In una prima fase l'armatura è passiva e non si corrode. La carbonatazione, però, a partire dalla superficie del calcestruzzo, penetra nel copriferro. La corrosione si innesca quando il fronte di carbonatazione raggiunge la superficie dell'armatura.

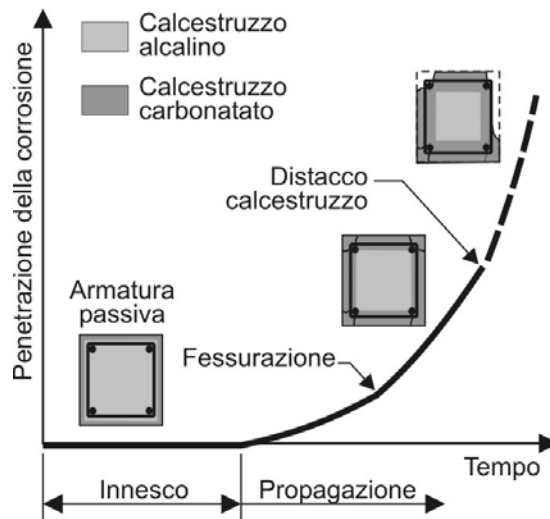


Figura 1. Evoluzione nel tempo del degrado di una struttura in calcestruzzo armato dovuto a corrosione da carbonatazione.

L'innesco della corrosione, anche se di per sé non influisce sulla funzionalità o sulla stabilità dell'elemento strutturale, è un momento critico nella vita della struttura. Infatti, l'acciaio depassivato diviene suscettibile alla corrosione, con una velocità che dipende dalle condizioni di esposizione ambientale. Nel tempo i prodotti di corrosione potranno causare la fessurazione e il distacco del copriferro, compromettendo così le prestazioni della struttura. I prodotti di corrosione, infatti, in funzione degli ossidi che si formano, occupano un volume da 2 a 6 volte superiore rispetto a quello del ferro da cui provengono. Al procedere di questi fenomeni, l'entità del degrado può raggiungere condizioni tali da compromettere la stabilità della struttura.

La vita di servizio di una struttura può quindi essere definita come la somma di un tempo di innesco e di un tempo propagazione. Il tempo di innesco può essere definito come il tempo necessario affinché la profondità di carbonatazione eguagli lo spessore di copriferro.

Il periodo di propagazione inizia quando l'armatura è depassivata e termina nel momento in cui viene raggiunto un determinato stato limite oltre il quale le conseguenze della corrosione non possono più essere tollerate (quali la fessurazione del copriferro o il suo distacco, con conseguente rischio di caduta di frammenti di calcestruzzo). Questa distinzione tra periodo di innesco e di propagazione è utile nel progetto degli elementi strutturali in calcestruzzo armato, in quanto si devono considerare processi e fattori differenti nel descrivere l'avanzamento delle due fasi.

La fase di innesco della corrosione è determinata dalla velocità di penetrazione della carbonatazione e dallo spessore del copriferro. La velocità di penetrazione della carbonatazione dipende sia da fattori ambientali sia da fattori legati al calcestruzzo. Il contenuto di umidità del calcestruzzo riveste il ruolo più importante tra i fattori ambientali. La velocità di carbonatazione è trascurabile sia in calcestruzzo saturo d'acqua sia in calcestruzzo secco; nel primo caso è impedita la diffusione dell'anidride carbonica attraverso i pori saturi d'acqua, mentre nel secondo caso l'anidride carbonica non può reagire con i costituenti alcalini del calcestruzzo a causa dell'assenza di umidità. I valori più

elevati si raggiungono per valori intermedi di umidità. Tuttavia, anche in questo intervallo di umidità che corrisponde ai valori spesso riscontrati in molti ambienti, se il calcestruzzo viene periodicamente bagnato, ad esempio perché è esposto alla pioggia, la velocità di carbonatazione si riduce. Ad esempio, nel caso di una parete esterna di un edificio, la velocità di penetrazione è maggiore in una zona schermata dalla pioggia rispetto ad una zona non riparata. Per lo stesso motivo, la velocità di penetrazione della carbonatazione in una parete in calcestruzzo armato è in genere maggiore all'interno rispetto all'esterno.

La permeabilità del calcestruzzo ha un ruolo importante in relazione alla penetrazione della carbonatazione. Una bassa porosità capillare della pasta cementizia, garantita soprattutto attraverso un rapporto acqua/cemento sufficientemente basso, permette di ridurre la diffusione dell'anidride carbonica.

Quando il fronte di carbonatazione raggiunge l'armatura, e quindi l'acciaio è depassivato, la velocità di corrosione è determinata dalla disponibilità di ossigeno e di acqua alla superficie dell'acciaio. Nella maggior parte dei casi la velocità di corrosione è governata dal contenuto di umidità del calcestruzzo. Nel calcestruzzo secco la velocità di corrosione è trascurabile; viceversa, all'aumentare dell'umidità aumenta la velocità di corrosione delle armature. L'evoluzione nel tempo della velocità di corrosione delle armature è quindi strettamente legata alle variazioni locali di umidità del calcestruzzo alla profondità delle armature.

La presenza di *cloruri* nella soluzione dei pori del calcestruzzo può indurre un attacco corrosivo localizzato (pitting) sulle armature. L'attacco ha luogo quando la concentrazione di ioni cloruro nella soluzione dei pori a contatto con la superficie dell'acciaio raggiunge un valore di soglia sufficiente per rompere il film di passività (contenuto critico di cloruri). Il rischio di corrosione da cloruri è associato alla penetrazione dei cloruri attraverso il copriferro. La corrosione per pitting si innesca quando la penetrazione dei cloruri è tale da portare al raggiungimento del tenore critico alla superficie delle armature e, quindi, alla profondità pari allo spessore del copriferro. Il periodo di innesco della corrosione dipende quindi dalla velocità di penetrazione dei cloruri, dal contenuto critico e dallo spessore di copriferro. Nella pratica, tuttavia, la valutazione del tempo di innesco è un'operazione complessa, a causa di un gran numero di variabili che influenzano sia la cinetica di penetrazione dei cloruri sia il contenuto critico.

La penetrazione dei cloruri dipende innanzitutto dalla microstruttura del calcestruzzo. La riduzione della porosità capillare del calcestruzzo prodotta dalla diminuzione del rapporto acqua/cemento e da una adeguata stagionatura del calcestruzzo porta ad una diminuzione della velocità di ingresso dei cloruri. Di particolare interesse è anche l'aggiunta al cemento portland di elevate percentuali di pozzolane o di loppa d'altoforno che possono ridurre drasticamente la velocità di penetrazione dei cloruri.

L'attacco corrosivo prodotto dai cloruri è di tipo localizzato (Figura 2). Quando si innesca la corrosione per pitting si crea un ambiente molto aggressivo all'interno dell'attacco localizzato, mentre il film passivo viene rafforzato sulla superficie esterna. La velocità di penetrazione degli attacchi localizzati può raggiungere valori molto elevati (fino a 1 mm/anno in calcestruzzo umido e con elevato contenuto di cloruri) così che in un tempo relativamente breve si può produrre una riduzione inaccettabile della sezione resistente dell'armatura.



Figura 2. Attacco localizzato per pitting su una barra d'armatura rimossa da un calcestruzzo contaminato con cloruri.

Le conseguenze della corrosione, in questo caso, sono legate non solo alla riduzione della sezione resistente dell'armatura, ma anche alla perdita di duttilità prodotta dall'attacco localizzato (che può, ad esempio, avere conseguenze gravi sul comportamento sismico delle strutture). Si possono quindi avere conseguenze strutturali ancor prima che gli effetti della corrosione si manifestino sulla superficie del calcestruzzo. Quando il contenuto di cloruri è elevato, tuttavia, l'attacco corrosivo tende ad estendersi ad una porzione maggiore della superficie dell'armatura; i prodotti di corrosione possono allora, come per la corrosione indotta dalla carbonatazione, determinare la fessurazione del copriferro.

Anche se è possibile, attraverso l'individuazione di uno o più stati limite (riduzione di sezione o duttilità, fessurazione) valutare il tempo di propagazione della corrosione, in genere questo periodo viene trascurato. Questa scelta conservativa è conseguenza sia dell'elevata velocità di penetrazione dell'attacco localizzato sia della difficoltà di prevedere i suoi effetti sul comportamento strutturale.

## 2 APPROCCI ALLA PREVENZIONE

Nel progetto delle strutture in calcestruzzo armato e precompresso devono essere considerati gli effetti a lungo termine dell'esposizione ambientale, così da evitare che la struttura subisca danni rilevanti nell'arco della vita di servizio richiesta. A tale scopo è necessario definire un opportuno stato limite che individui la fine della vita di servizio della struttura (ad esempio, questo può coincidere con la fessurazione o il distacco del copriferro nel caso della corrosione da carbonatazione). La Figura 3 mostra i fattori che concorrono a determinare la vita di servizio di un elemento strutturale; questi comprendono:

- i carichi applicati alla struttura, legati non solo alle azioni meccaniche, ma anche alle azioni ambientali (carbonatazione, cloruri, temperatura, umidità, ecc.);
- le proprietà del calcestruzzo: composizione (rapporto acqua/cemento, tipo di cemento, additivi), lavorabilità, compattazione, stagionatura, fessurazione, ecc.;

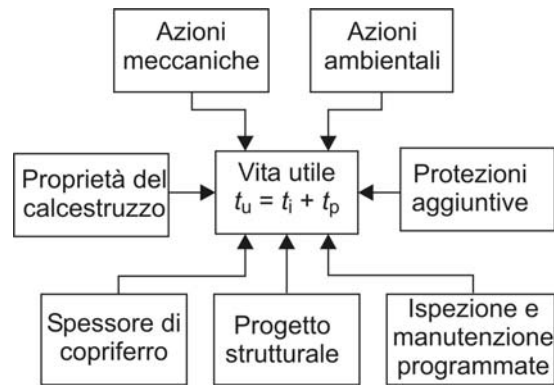


Figura 3. Fattori che determinano la vita di servizio di un elemento strutturale in calcestruzzo armato in relazione alla corrosione delle armature.

- lo spessore di copriferro;
- il progetto strutturale e i dettagli costruttivi;
- l'impiego di eventuali protezioni aggiuntive;
- l'adozione di un programma di ispezione e di manutenzione programmata.

La maggior parte di questi fattori è sotto il controllo del progettista e, quindi, in sede di progetto è possibile scegliere una opportuna combinazione di questi fattori per garantire la vita di servizio richiesta. La Tabella 1 descrive brevemente il ruolo di ciascuno di questi fattori.

L'esigenza di strumenti per il progetto della durabilità è stata colta anche dalle normative europee fin dal 1990 quando è stata emessa la norma provvisoria ENV 206, ora sostituita dalla UNI EN 206-1. In prima istanza si chiede al progettista di individuare le condizioni di esposizione ambientale della struttura e la causa di degrado attesa. Sono previste le seguenti classi: 1) nessun rischio di corrosione o di attacco; 2) corrosione da carbonatazione; 3) corrosione causata da cloruri non provenienti dall'acqua di mare; 4) corrosione causata da cloruri provenienti dall'acqua di mare; 5) attacco da gelo-disgelo; 6) attacco chimico.

Ogni classe si suddivide in sottogruppi che individuano le diverse condizioni di esposizione nell'ambito di ciascun tipo di attacco. La norma richiede la prescrizione di vincoli sul rapporto acqua/cemento, sul contenuto di cemento e sullo spessore di copriferro tenendo conto, oltre che delle condizioni d'esposizione ambientale, anche della vita di servizio richiesta alla struttura. La decisione è, ovviamente, rimandata al progettista che conosce l'opera e i fenomeni di degrado che può subire.

Per aiutare la definizione dei requisiti di durabilità, in allegato alla norma, viene riportata la Tabella 2 che mostra dei valori di riferimento validi per garantire, nei diversi ambienti, una vita di servizio "tradizionalmente attesa" (dell'ordine di 50 anni). Questi valori sono riferiti all'impiego di un cemento portland (CEM I, conforme alla norma UNI EN 197-1). Le prescrizioni non si esauriscono con i vincoli concernenti la composizione del calcestruzzo, ma devono essere completate con vincoli relativi allo spessore di copriferro, che sono previsti dall'Eurocodice 2. Il quadro normativo europeo si completa con la norma UNI ENV 13670-1 che contiene le raccomandazioni per

l'esecuzione delle strutture in calcestruzzo; questa prevede, in particolare, un tempo minimo di stagionatura del calcestruzzo pari al tempo necessario per raggiungere una resistenza pari alla metà di quella prevista a 28 giorni (in pratica, questo significa, nella maggior parte dei casi, una stagionatura di almeno 5-7 giorni).

Tra i requisiti di durabilità, oltre che il rapporto acqua/cemento, la norma suggerisce di prescrivere anche una resistenza a compressione minima (in Tabella 2 sono indicati valori minimi di resistenza caratteristica su cubo validi per calcestruzzi confezionati con cementi della classe 32.5; valori più elevati sono attesi nel caso si impieghino cementi di classe 42.5 o 52.5). In sostanza si richiede di convertire i requisiti di durabilità in termini di richieste di resistenza meccanica. In questo modo si ottiene un doppio beneficio: innanzitutto si rende esplicita la necessità di un calcestruzzo poco poroso, e quindi con una minima resistenza (ancorché non necessaria per esigenze strutturali), quando la struttura opera in un ambiente aggressivo; in secondo luogo, si agevola il controllo di qualità; infatti, la verifica a posteriori del rapporto acqua/cemento con cui è stato confezionato un calcestruzzo è difficilissima, molto più semplice è la verifica della resistenza a compressione (peraltro già obbligatoria).

Tabella 1. Principali fattori di progetto che determinano la vita utile di una struttura in calcestruzzo armato in relazione al degrado prodotto dalla corrosione.

Proprietà del calcestruzzo	Acqua/cemento ( $a/c$ )	È il fattore chiave nel determinare la porosità capillare della pasta cementizia e quindi la resistenza alla penetrazione delle specie aggressive.
	Stagionatura	Una stagionatura non adeguata previene l'idratazione del cemento e porta a una porosità elevata, soprattutto nel copriferro. I cementi di miscela sono maggiormente sensibili agli effetti di una cattiva stagionatura rispetto al cemento portland.
	Tipo di cemento e aggiunte	Le aggiunte pozzolaniche o di loppa d'altoforno possono migliorare nettamente la resistenza alla penetrazione degli ioni aggressivi (in particolare $Cl^-$ e $SO_4^{2-}$ ). I cementi di miscela hanno inoltre effetti benefici in relazione all'attacco solfatico e alla reazione alcali-aggregati e sono caratterizzati da un basso calore di idratazione.
	Contenuto di cemento	L'aumento del contenuto di cemento, per un dato rapporto $a/c$ , consente l'impiego di una maggiore quantità di acqua nell'impasto e quindi una maggiore lavorabilità. Tuttavia, un aumento del dosaggio di cemento può favorire la fessurazione dovuta al calore di idratazione o al ritiro igrometrico.
	Additivi	I superfluidificanti sono indispensabili per ottenere un calcestruzzo fresco lavorabile, nel caso in cui si richieda un basso $a/c$ per garantire la resistenza a compressione oppure i requisiti di durabilità. Nel caso di strutture soggette a gelo-disgelo è necessario impiegare additivi aeranti.
	Consistenza	La lavorabilità del calcestruzzo dovrebbe essere specificata nella fase di progetto per evitare il rischio di cattiva compattazione oppure di riaggiunta d'acqua in cantiere.
	Resistenza	La resistenza a compressione, oltre ad essere richiesta per ragioni strutturali, è correlata alle esigenze di durabilità. Una volta scelto il tipo di cemento, le prescrizioni sul massimo rapporto $a/c$ possono anche essere espresse in termini di minima classe di resistenza (Tabella 2).
	Posa in opera del calcestruzzo	La durabilità di una struttura può essere garantita solo se il calcestruzzo viene correttamente miscelato, trasportato e vibrato. A tale scopo sono richiesti appropriati controlli durante la costruzione.

Continua Tabella 1

Calcestruzzi speciali	L'impiego di alcuni calcestruzzi speciali può avere positivi risvolti sulla durabilità. I calcestruzzi ad alte prestazioni (HPC) hanno un rapporto acqua/legante molto basso e possono essere impervi alle specie aggressive. I calcestruzzi autocompattanti (SCC), grazie alla loro elevata fluidità e coesione, non richiedono vibrazione e possono consentire di migliorare l'omogeneità del calcestruzzo.	
Concezione strutturale e particolari costruttivi	La durabilità di una struttura può essere migliorata se il progetto è volto a favorire l'ispezione e la manutenzione, prevenire la stagnazione o percolazione di acque aggressive, limitare la fessurazione, evitare inutili geometrie complesse o una geometria delle armature che ostacoli la vibrazione, ecc.	
Spessore di copriferro	In teoria un aumento dello spessore di copriferro consente di aumentare il tempo d'innescò della corrosione; tuttavia, elevati spessori di copriferro (ad esempio > 50-60 mm), possono favorire la fessurazione e, in definitiva, portare ad una bassa protezione delle armature. Inoltre durante la fase di costruzione è essenziale limitare la variabilità dello spessore di copriferro, impiegando adeguati distanziatori.	
Protezioni aggiuntive	Armature in acciaio inossidabile	Gli acciai inossidabili rimangono passivi in calcestruzzo carbonatato. In calcestruzzo contaminato da cloruri hanno un tenore critico di cloruri molto elevato; in funzione della loro composizione, può essere anche maggiore di 5% in massa rispetto al cemento. Nella maggior parte delle condizioni di esposizione, gli acciai inossidabili possono essere utilizzati in combinazione con l'acciaio al carbonio senza il rischio di accoppiamento galvanico.
	Armature zincate	Le armature zincate hanno una velocità di corrosione bassa in calcestruzzo carbonatato e quindi possono aumentare il tempo di propagazione della corrosione. In calcestruzzo contaminato da cloruri, il tenore critico per le armature zincate è attorno a 1-1.5% in massa rispetto al cemento.
	Armature rivestite con epossidiche	Il rivestimento epossidico può proteggere le armature dai cloruri che penetrano attraverso il copriferro. Tuttavia sono state sollevate forti critiche riguardo alla sua efficacia in ambienti marini nei climi caldi.
	Prevenzione catodica	In nuove strutture soggette alla penetrazione di cloruri, il tenore critico di cloruri può essere aumentato di un ordine di grandezza attraverso l'applicazione di una piccola corrente catodica alle armature (1-2 mA/m <sup>2</sup> ). Questa tecnica richiede l'applicazione di un anodo sulla superficie del calcestruzzo e di un sistema di monitoraggio. Il metodo è stato applicato anche a strutture in calcestruzzo armato precompresso.
	Inibitori di corrosione	Alla miscela del calcestruzzo possono essere aggiunti degli inibitori di corrosione per aumentare la resistenza alla corrosione delle armature. Alcuni inibitori di corrosione, come il nitrito di calcio, possono aumentare il tenore critico in un calcestruzzo ben confezionato. La loro efficacia, tuttavia, dipende dal tipo di sostanza attiva, dalla sua concentrazione nel calcestruzzo e dal rischio di dilavamento.
Trattamento superficiale del calcestruzzo	I rivestimenti organici o a base cementizia possono proteggere la superficie del calcestruzzo e ostacolare l'ingresso delle specie aggressive. I trattamenti idrorepellenti riducono l'assorbimento capillare, consentendo tuttavia l'evaporazione dell'acqua e il trasporto dei gas. È necessaria la periodica riapplicazione del trattamento.	
Ispezione e manutenzione programmate	Una regolare ispezione della struttura può aiutare a mantenere costante nel tempo il livello di affidabilità. Le procedure di ispezione possono essere definite fin dalla fase di progetto. In alcuni casi si può persino prevedere un sistema di monitoraggio che, grazie all'impiego di sonde immerse nel calcestruzzo, può rilevare eventi legati alla corrosione delle armature (ad esempio il momento di innescò della corrosione). Anche la manutenzione può essere programmata in anticipo, ad esempio prevenendo la sostituzione periodica di elementi non critici della struttura.	

Tabella 2. Suggerimenti per la scelta dei requisiti per la composizione e le proprietà del calcestruzzo in relazione alle classi di esposizione in base alla norma UNI EN 206-1. I valori sono riferiti all'impiego di un cemento tipo CEM I; la resistenza a compressione ( $R_{ck}$ ) è relativa a un cemento di classe 32,5. Tra parentesi sono riportati i valori previsti dalla UNI 11104 (per qualsiasi cemento conforme a UNI EN 197-1).

Classe di esposizione		Descrizione	Massimo rapporto $a/c$	Minima $R_{ck}$ (MPa)	Minimo dosaggio di cemento ( $\text{kg/m}^3$ )
Nessun rischio	X0	Molto secco	-	15 (15)	-
Corrosione da carbonatazione	XC1	Secco o saturo	0,65 (0,60)	25 (30)	260 (300)
	XC2	Umido, raramente secco	0,60 (0,60)	30 (30)	280 (300)
	XC3	Moderatamente umido	0,55 (0,55)	37 (37)	280 (320)
	XC4	Cicli di bagnamento e asciugamento	0,50 (0,50)	37 (37)	300 (340)
Corrosione da cloruri da acqua di mare	XS1	Moderatamente umido	0,50 (0,50)	37 (40)	300 (340)
	XS2	Umido, raramente secco	0,45 (0,45)	45 (45)	320 (360)
	XS3	Cicli di bagnamento e asciugamento	0,45 (0,45)	45 (45)	340 (360)
Corrosione da cloruri da altre fonti	XD1	Esposizione alla salsedine ma non in contatto diretto con l'acqua marina	0,55 (0,55)	37 (35)	300 (320)
	XD2	Sommersa	0,55 (0,50)	37 (40)	300 (340)
	XD3	Maree, onde, spruzzi	0,45 (0,45)	45 (45)	320 (360)

La norma UNI 11104 riporta le istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1 in Italia. Questa norma modifica alcuni dei valori massimi di rapporto acqua/cemento e introduce nuove classi di resistenza, come illustrato dai dati tra parentesi in Tabella 2, oltre a prevedere un (poco comprensibile) aumento del contenuto minimo di cemento (si ricorda che la resistenza del calcestruzzo alla penetrazione degli agenti aggressivi dipende essenzialmente dal rapporto acqua/cemento e dal tipo di cemento, mentre un aumento del dosaggio di cemento, di per sè, può avere conseguenze negative, ad esempio favorendo la fessurazione dovuta al calore di idratazione o al ritiro igrometrico oppure la reazione alcali aggregati). Inoltre la UNI 11104 prevede che i valori da essa riportati siano validi per qualsiasi cemento previsto dalla UNI EN 197-1; quindi equipara le prestazioni in termini di durabilità del cemento portland e dei cementi di miscela. Questa posizione è fortemente discutibile, soprattutto, nel caso dei cementi al calcare (CEM II/A-L e CEM II/B-L), purtroppo molto diffusi nel nostro paese, nei quali la sostituzione del clinker con calcare macinato, se anche può garantire comunque i requisiti di resistenza meccanica, ha effetti negativi sulla durabilità. Inoltre, l'equiparazione di tutti i cementi non consente di valorizzare le potenzialità dei cementi con aggiunte pozzolaniche (CEM IV) e di loppa d'altoforno (CEM III) in relazione alla resistenza alla penetrazione dei cloruri.

La maggior parte dei ricercatori concordano che i valori raccomandati da queste normative sono adeguati per garantire una vita di servizio superiore a 50 anni per strutture soggette a corrosione da carbonatazione (classi di esposizione da XC1 a XC4). D'altro canto, diversi autori hanno mostrato che per elementi strutturali soggetti a penetrazione di cloruri, le prescrizioni non sono sempre adeguate. Da un lato prevedono un approccio



medio e semplificato che non consente di considerare le situazioni più critiche (come, ad esempio, i giunti dove si concentra l'azione aggressiva dei cloruri). Dall'altro lato queste raccomandazioni, nelle condizioni di esposizione più aggressive, come nella zona degli spruzzi per strutture marine (classe di esposizione XS3), anche se prevedono spessori di copriferro di 50 mm, non sono sufficienti per evitare l'innescò della corrosione per 50 anni, almeno nel caso in cui il calcestruzzo sia confezionato con cemento portland o portland al calcare.

In alternativa all'approccio prescrittivo delle norme europee si può ricorrere ad approcci prestazionali, basati su un vero e proprio progetto della durabilità. Questi approcci prevedono di modellare gli effetti delle azioni ambientali sulla struttura e individuare i tempi entro cui questi effetti determineranno il raggiungimento di determinati stati limite, ai quali il progettista associa il raggiungimento del termine della vita utile della struttura. A tale scopo è necessario un modello che descriva l'evoluzione nel tempo del degrado. Nella letteratura scientifica sono stati proposti molti modelli più o meno empirici o rigorosi; tuttavia, per tenere conto dell'elevato numero di fattori che influenzano sulla vita di servizio di una struttura e della loro variabilità, è necessario affrontare il problema in termini probabilistici.

A partire dalla fine del secolo scorso sono stati proposti approcci di questo tipo, analoghi a quelli usati nella progettazione strutturale, per affrontare il degrado dovuto alla corrosione delle armature. In particolare, codici di calcolo di tipo probabilistico o semiprobabilistico sono stati proposti inizialmente da un progetto europeo chiamato Dura-Crete e successivamente dalla Federazione Internazionale del Calcestruzzo (FIB) che ha pubblicato nel febbraio 2006 il "Model code for service life design". Per definire gli stati limite, che indicano il confine tra la condizione desiderata e quella avversa, si considerano come carichi che agiscono sulla struttura i fattori ambientali (ad esempio, la penetrazione dei cloruri), mentre le proprietà dei materiali (ad esempio la resistenza alla penetrazione dei cloruri o la quantità di cloruri necessaria per innescare la corrosione) sono considerate come resistenze. Nei modelli semiprobabilistici la natura stocastica delle variabili introdotte nei modelli è tenuta in considerazione valutando i valori medi o caratteristici; nei modelli probabilistici si considerano le distribuzioni di probabilità di ciascuna variabile. Ad esempio, per una struttura soggetta a corrosione da cloruri l'innescò della corrosione avviene quando le armature si depassivano, cioè quando alla profondità delle armature  $x$  si raggiunge una concentrazione di cloruri  $C(x,t)$  pari alla concentrazione critica  $C_{cr}$ . Questa condizione è espressa dall'annullamento della funzione allo stato limite  $g(t)$ , definita come la differenza tra la variabile di resistenza (in questo caso il contenuto critico di cloruri per l'innescò della corrosione) e la variabile di carico (il contenuto di cloruri alla profondità della armatura):  $g(t) = C_{cr} - C(x,t) = 0$ .

L'approccio prestazionale consentirebbe anche di tenere in considerazione il ruolo delle protezioni aggiuntive e di quantificare i loro benefici in termini di riduzione del tempo di innescò o del tempo di propagazione della corrosione. Questo tipo di approccio consentirebbe, quindi, di confrontare alternative progettuali diverse e di ottimizzare la soluzione progettuale in relazione al costo del ciclo di vita di una struttura. In questo ambito è di particolare interesse il codice proposto di recente dalla Federazione Internazionale del Calcestruzzo. Al momento, però, questo codice non è ancora pronto per un impiego diffuso nel campo della progettazione civile.

È opportuno richiamare la necessità che le scelte progettuali devono essere confermate da adeguati controlli di qualità in sede di esecuzione delle opere. Ad esempio, i bene-

fici di un basso spessore di copriferro o dell'impiego di un cemento di miscela possono essere conseguiti solo se il calcestruzzo viene adeguatamente vibrato e stagionato. È importante rilevare che gli effetti di una cattiva stagionatura influiscono negativamente proprio sul copriferro, quindi sulla parte della struttura che è destinata a proteggere le armature. Analogamente, una carenza di controlli sul rispetto dello spessore di copriferro può avere drastici effetti sul tempo di innesco della corrosione. Il progettista deve formulare adeguate prescrizioni per le proprietà del calcestruzzo e per i particolari costruttivi; deve inoltre prevedere opportuni controlli in cantiere.

### 3 CALCESTRUZZO ARMATO PRECOMPRESSO

La corrosione può avere conseguenze molto gravi sulle armature di precompressione. Nel caso delle strutture pre-tese la corrosione può essere dovuta alla penetrazione della carbonatazione o dei cloruri nel copriferro, mentre nelle strutture post-tese la corrosione deriva, in genere, da una inefficace iniezione delle guaine con materiali cementizi o con altri materiali protettivi (cere, grassi, ecc.). Gli elevati carichi applicati alle armature da precompressione e la bassa tenacità alla frattura che caratterizza gli acciai ad alto snervamento, rendono più pericolose le conseguenze degli attacchi corrosivi su queste armature rispetto alle normali armature lente. Soprattutto gli attacchi localizzati possono determinare condizioni sufficienti per la propagazione critica, con conseguente rottura fragile. La protezione degli acciai da precompressione richiede, quindi, un'attenzione ancora maggiore rispetto alle normali armature.

In aggiunta ai normali effetti della corrosione, le armature da precompressione possono essere soggette ad infragilimento da idrogeno. In realtà, questo tipo di corrosione avviene solo in conseguenza di altri attacchi corrosivi e, quindi, i cedimenti degli acciai da precompressione si verificano soltanto se sono presenti difetti al momento della loro messa in opera oppure se non sono adeguatamente protetti durante il trasporto e la posa in opera oppure in esercizio. Sono quindi, in genere, da imputare ad errori di progetto o a negligenze in fase di costruzione o manutenzione delle strutture.

La rottura causata da infragilimento da idrogeno avviene in tre stadi: l'innesco delle cricche, la loro propagazione (subcritica) e, infine, la rottura di schianto (in seguito alla propagazione instabile della cricca). La rottura degli acciai ad alto snervamento dovuta a corrosione sotto sforzo per infragilimento da idrogeno si presenta quindi fragile e parte dalla superficie dell'acciaio, in corrispondenza della cricca da corrosione sotto sforzo. Le dimensioni del difetto che innesca la frattura fragile dipendono dalla tenacità alla frattura del materiale ( $K_{IC}$ ) e dalla sollecitazione applicata. In genere, accanto alla cricca che ha dato innesco alla frattura fragile si osservano altre cricche di dimensioni minori. L'aspetto microscopico delle zone interessate dalla cricca da corrosione sotto sforzo e quella della frattura instabile sono notevolmente diversi. Per la corrosione sotto sforzo le cricche sono intercristalline, per la frattura instabile transcristalline (clivaggio). Per fili metallici trafilati, la cricca da corrosione sotto sforzo inizialmente procede perpendicolarmente ai grani della struttura, fortemente deformati nel senso della lunghezza ed è transcristallina, poi però procede per un tratto longitudinalmente. La presenza di idrogeno atomico è un prerequisito essenziale affinché si possa sviluppare l'infragilimento da idrogeno su un acciaio suscettibile. Nella maggior parte dei casi l'idrogeno è prodotto dalla reazione catodica che ha luogo sulla superficie dell'acciaio. Lo sviluppo di i-

idrogeno può aver luogo quando si innesca la corrosione, soprattutto a causa dei cloruri. Va comunque osservato come la suscettibilità di un acciaio vari con la sua resistenza meccanica e con la sua microstruttura. Gli acciai temprati e rinvenuti, utilizzati in passato in alcuni paesi, sono oggi stati abbandonati e quindi i rischi di infragilimento da idrogeno sulle strutture nuove dovrebbero essere modesti; tuttavia possono restare dei problemi nelle strutture esistenti.

La prevenzione dalla corrosione delle armature di precompressione si basa sugli stessi principi visti per le normali armature lente. La prevenzione della carbonatazione e della penetrazione dei cloruri è il modo migliore per prevenire anche la corrosione degli acciai ad alta resistenza (compreso l'infragilimento da idrogeno). Nel caso delle strutture in calcestruzzo armato post-teso è di fondamentale importanza il riempimento delle guaine che ospitano le armature con materiali protettivi (grassi, cere, boiaccia cementizia); anche le teste di precompressione devono essere protette dalla corrosione (questi sono spesso i punti più critici, dove facilmente percola l'acqua contaminata da cloruri). Il controllo dell'effettivo riempimento delle guaine è molto difficile; per questo motivo sono state sviluppate tecnologie che prevedono l'utilizzo di guaine in materiale plastico che garantiscono il completo isolamento dei cavi e delle loro teste (e quindi la tenuta contro l'ingresso dell'acqua). Recentemente sono stati sviluppati dei sistemi che garantiscono il completo isolamento elettrico dell'armatura e consentono, con semplici misure di resistenza elettrica, di verificare l'efficacia di tale isolamento (nel momento in cui la guaina non dovesse garantire l'isolamento si misurerebbe una marcata diminuzione della resistenza tra i cavi di precompressione e le armature esterne).

## BIBLIOGRAFIA

Queste note sono estratte dal testo:

L. Bertolini, *Materiali da costruzione – Volume II: Degrado, prevenzione, diagnosi, restauro*, CittàStudi Edizioni, Torino, 2006.

Per ulteriori approfondimenti, si consigliano i seguenti testi..

P. Pedferri, L. Bertolini, *La durabilità del calcestruzzo armato*, McGraw-Hill, Milano, 2000.

L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, R. Polder, *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*, Wiley-VCH, Weinheim, 2004.

P. Pedferri, *La corrosione delle armature nel calcestruzzo*, AICAP, 2007.