

MATERIALI.

Analisi delle cause di degrado del calcestruzzo e delle opere in calcestruzzo armato

LA DURABILITÀ DIPENDE ANCHE DA FATTORI AMBIENTALI CHE NON POSSONO ESSERE TRASCURATI

Con il termine durabilità (*durevolezza*) si intende la capacità di un materiale di durare nel tempo, di resistere cioè ai differenti fattori che ne possono promuovere il degrado, mantenendo inalterate le sue caratteristiche prestazionali.

I costi economici associati a una mancanza di durabilità di un'opera in calcestruzzo possono essere rilevanti e ricadono essenzialmente sul proprietario, cui spetta l'onere degli interventi di conservazione di una struttura degradata qualora voglia mantenerla in servizio. Il committente è quindi il principale beneficiario della corretta realizzazione di un manufatto durevole, i cui maggiori costi in fase di realizzazione sono comunque nettamente inferiori a quelli diretti di restauro e alle perdite economiche indirette connesse alla mancata utilizzazione dell'opera.

Le parti interessate alla produzione di un CLS durevole non si limitano tuttavia alla sola committenza. Il progettista ha infatti la responsabilità diretta della progettazione corretta dell'opera, che non si limita alle caratteristiche meccaniche conseguite dai materiali nella struttura, ma deve anche possedere requisiti di durabilità in relazione all'ambiente cui è esposta nella sua vita in servizio.

Queste responsabilità - richiamate in modo specifico dalla UNI 9858 e dalle successive UNI EN 206/1 e UNI 11104 - impongono il rispetto dalle Linee guida emanate dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici per la prescrizione di un calcestruzzo durevole.

Altre parti interessate sono il direttore dei lavori e l'impresa cui spetta l'onere della realizzazione dell'opera secondo le specifiche del progetto per quanto attiene la scelta dei materiali, il mix design e le fasi critiche di miscelazione, posa e stagionatura del calcestruzzo in opera. Se viene impiegato calcestruzzo preconfezionato, alcune responsabilità sono del produttore del calcestruzzo che deve garantire non solo i valori di Rck prescritti, ma anche i requisiti minimi indicati nelle Linee guida per le varie classi di esposizione ambientale.

Degrado del calcestruzzo

Le cause del degrado possono essere interne al manufatto o riconducibili ad interazioni con l'ambiente esterno. Le cause interne dipendono essenzialmente da:

- una cattiva progettazione del manufatto,
- non corretta posa in opera
- inadeguati processi di *curing*.

Le cause esterne possono essere di carattere meccanico, fisico o chimico. Cause meccaniche sono ad esempio:

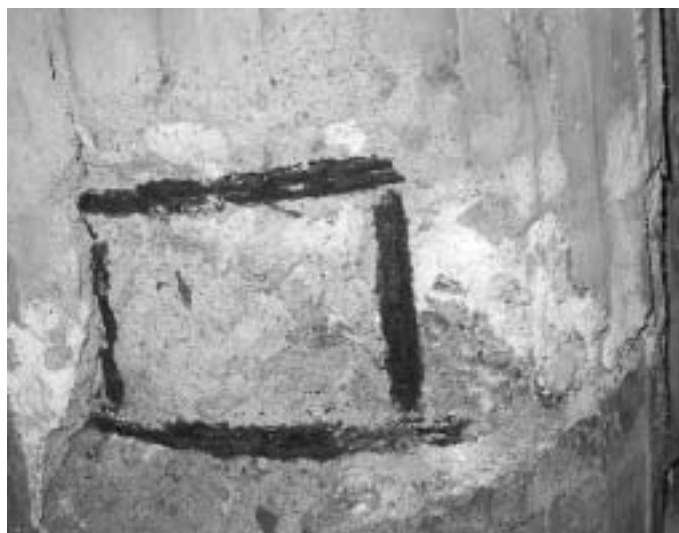
- lesioni indotte da sollecitazioni meccaniche in ser-

L'AUTORE.

Il professor **Luigi Massidda** è ordinario di Scienza e Tecnologia dei Materiali presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cagliari.

telefono: 070.6755.080

e-mail: massidda@dicm.unica.it



CARBONATAZIONE CON ESPULSIONE DEL COPRIFERRO PER CORROSIONE DELLE BARRE DI ARMATURA ALLA BASE DI UN PILASTRO IN CEMENTO ARMATO IN INTERNO.

vizio (*assestamenti, sovraccarichi, carichi ciclici*);

- microfessurazione indotta da variazioni termo-igrometriche (*dilatazione, ritiro*);
- formazione di ghiaccio nella matrice cementizia e negli inerti (*gelività*).

Le reazioni di idratazione delle paste cementizie innalzano la temperatura del calcestruzzo che tenderà ad aumentare il proprio volume (specie nel nocciolo della struttura). La differenza tra la temperatura registrata all'interno delle strutture e la temperatura esterna provoca stress termici quando tale differenza supera i 20-25 °C. Per superiori valori di ΔT , il calcestruzzo, contrastato nella sua tendenza a espandersi da vincoli interni (*armatura*), e da vincoli esterni (come ad esempio una platea di fondazione già *matura* e l'elemento strutturale appena gettato con il quale va a contatto), subisce sollecitazioni meccaniche non trascurabili, in grado cioè di generare lesioni visibili al momento della rimozione dei casseri o dopo pochi giorni di maturazione, quando la superficie si mette in equilibrio con l'ambiente esterno.

Le sollecitazioni meccaniche sono direttamente proporzionali alla deformazione relativa ε ($\Delta l/l_0$) che dipende a sua volta dal coefficiente di dilatazione α del materiale e dal valore di ΔT secondo la legge:

$$\varepsilon = \alpha \Delta T$$

Tenendo conto della legge di Hooke: $\sigma = E\varepsilon$, lo stress indotto dalla dilatazione termica sarà:

$$\sigma = E\alpha \Delta T$$

I valori di σ risultanti sono spesso tali da superare la resistenza a trazione del materiale e provocare lesioni anche macroscopiche.

Le fessure da ritiro (plastico e igrometrico) sono entrambe associate alla variazione dimensionale del manufatto associata alla perdita d'acqua per evaporazione. Il *ritiro plastico* si manifesta principalmente a poche ore dal getto e, soprattutto, in strutture dove il rapporto superficie/volume è alto e dove maggiore sarà la probabilità di evaporazione dell'acqua. Il ritiro plastico è, quindi, causato da una eccessiva perdita superficiale di acqua. Per contrastare il ritiro plastico è assolutamente indispensabile tenere bagnate le strutture per almeno 3 giorni dal momento del getto.

Il *ritiro igrometrico* (o *idraulico*), si manifesta lentamente nel tempo nel manufatto indurito ed è causato da una lenta perdita di acqua nel calcestruzzo. Perché questo fenomeno si verifichi è sufficiente che l'umidità relativa dell'ambiente in cui si trova il manufatto scenda al di sotto del 95%. Tutte le strutture non sommerse sono quindi poten-



zialmente interessate dal fenomeno.

Per contrastare il ritiro è opportuno ridurre il rapporto a/c, aumentare il rapporto aggregato/cemento e, in particolare, bagnare costantemente l'opera soprattutto nei primi giorni di stagionatura.

Il degrado per gelività (cicli di gelo e disgelo) è legato al fatto che l'acqua, nel passaggio dallo stato liquido a quello solido, aumenta il proprio volume di circa il 9% e congelando esercita forti pressioni disgiungenti entro la matrice dei materiali porosi. L'acqua può provenire dalla superficie o essere presente nella struttura del CLS, soprattutto in manufatti confezionati con alto rapporto a/c. Se i cicli di gelo e disgelo si ripetono, ne risulta un marcato deterioramento, che si evidenzia in genere uno sbriciolamento del calcestruzzo in superficie.

L'approccio di Everett consente di valutare la pressione di cristallizzazione ΔP che si sviluppa all'interno di matrici porose caratterizzate da una distribuzione porosimetrica monodimensionale (o assai prossima ad essa) con raggio caratteristico r . La tensione superficiale è rappresentata da γ .

Il degrado dovuto al congelamento è maggiore nei materiali aventi un diametro di pori dell'ordine di grandezza compresa nell'intervallo (1-3 μm): tale diametro viene definito *diametro critico*. I pori di dimensioni molto più piccole (< 0,1 μm) sono in effetti poco accessibili all'acqua e quelli di diametro molto grande, se interconnessi, facilitano un più rapido drenaggio, riducendo la possibilità che insorgano tensioni dannose.

Come contrastare la gelività. La presenza di una rete di macrovuoti con opportuna spaziatura (100-300 μm) "sovrapposta" ad una rete di pori di minore dimensione (0,1-10 μm) apporta notevoli benefici sulla resistenza al gelo, in quanto consente che le sovrappressioni siano opportunamente accomodate dalla matrice. Nella tecnologia del calcestruzzo il miglioramento della durabilità alla azione del gelo

IN ENTRAMBE LE IMMAGINI
L'EX OSPEDALE MARINO
SULLA SPIAGGIA DEL POETTO
A CAGLIARI:
CORROSIONE DELLE STRUTTURE
IN CALCESTRUZZO ARMATO
PER EFFETTO DELL'AEROSOL MARINO.



della microstruttura porosa è ottenuto attraverso l'uso di *additivi aeranti* che producono vuoti in misura di circa il 5% del volume del manufatto.

Affinché tale approccio sia realmente efficace le bolle devono distribuirsi nel volume della matrice secondo una spaziatura ottimale: il raggio di influenza di una bolla sferica deve cioè sovrapporsi a quello delle bolle contigue.

Fattori ambientali di degrado

Le strutture in CLS e CLS armato sono a contatto con diversi agenti chimici presenti nell'ambiente con cui sono a contatto, che possono risultare aggressivi nei loro confronti:

- nell'aria: CO_2 , SO_2 , NO_x
- nell'acqua e nel terreno: Cl^- , SO_4^{--} , NH_4^+ , CO_2 , e acidi di differente natura;
- nell'acqua di mare: Cl^- , SO_4^{--} , Mg^{++}

I meccanismi attraverso cui gli agenti aggressivi veicolati dall'acqua possono penetrare all'interno dei manufatti cementizi sono diversi e possono - a seconda delle condizioni - essere attivi isolatamente o anche simultaneamente. Fra essi i più importanti sono la permeabilità, la diffusività e la capillarità.

Permeabilità. La profondità di penetrazione dei differenti agenti aggressivi dipende essenzialmente dalla permeabilità del conglomerato. Questa proprietà è in stretta relazione con la microstruttura porosa del cemento indurito, a sua volta legata in modo critico al rapporto a/c utilizzato, al grado di idratazione e alle condizioni di maturazione. Un calcestruzzo confezionato con basso rapporto a/c, se correttamente maturato, consente di avere valori di permeabilità piuttosto bassi, dell'ordine di 10^{-13} m/s, che tuttavia possono aumentare anche di 4 ordini di grandezza se lasciato essiccare dopo il getto.

Il flusso di un liquido entro un solido poroso contenente pori di piccola dimensione come quelli esistenti in una matrice cementizia può essere in prima approssimazione

considerato laminare e obbedire quindi alla *legge di Darcy*:

$$dq/dt = K \frac{\Delta H A}{L \mu}$$

dove:

dq/dt è la velocità di flusso nella direzione di permeazione, K il coefficiente di permeabilità (m/s), ΔH è il gradiente di pressione nella direzione del flusso, A l'area della sezione interessata μ il coefficiente di viscosità i cui valori dipendono dalla temperatura e in pori piccoli, dalla loro dimensione

Diffusività. Il meccanismo di trasporto di atomi, molecole, ioni entro il CLS dipende dalla differenza di concentrazione delle varie specie nella fase liquida a contatto è governato dalle leggi di Fick.

La prima legge, che si riferisce allo stato stazionario è la seguente:

$$P = -D \frac{dc}{dx}$$

dove:

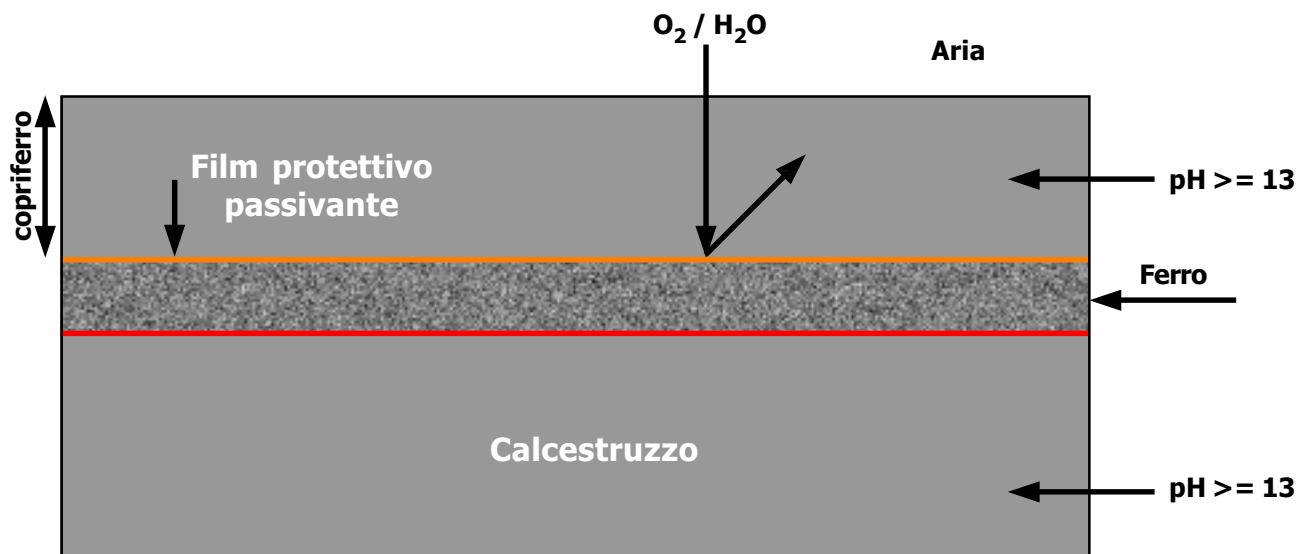
P è il flusso nella direzione x ,
 D la diffusività (m^2/s),
 dc/dx è il gradiente concentrazione.

Capillarità. Una superficie di calcestruzzo indurita se non è satura d'acqua può assorbire acqua dall'ambiente a contatto anche senza che ci sia un vero e proprio battente liquido attraverso fenomeni di capillarità. Il processo dipende dalla radice quadrata del tempo e da una costante del materiale secondo la semplice legge

$$x = S\sqrt{t}$$

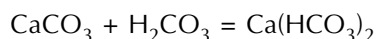
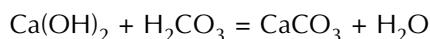
dove:

S = sorptivity ($\text{m/s}^{0,5}$) il cui valore è strettamente legato alla porosità del calcestruzzo e quindi alla sua qualità,
 t = tempo.

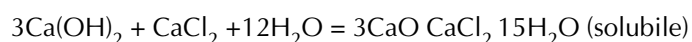


Dilavamento (attacco acido). Consiste in una azione chimico-fisica per cui la pasta cementizia può essere privata dei prodotti solubili in acqua. La presenza di acidi di qualsiasi natura rende l'azione dilavante particolarmente pericolosa. Anche le acque molto pure come quelle derivanti dallo scioglimento dei ghiacci, ricche di CO₂ e povere di sali, possono essere pericolose. In questo caso si forma acido carbonico (H₂CO₃) e il pH scende sotto 6.

Inizialmente si ha carbonatazione della calce libera che viene poi solubilizzata come bicarbonato:



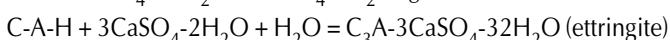
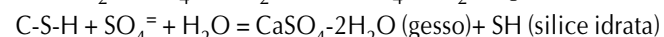
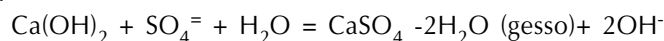
Il cloruro di calcio abbondantemente utilizzato come agente disgelante nelle strade e autostrade può contribuire al dilavamento secondo la reazione che produce un ossicloruro di calcio piuttosto solubile:



Tutti gli acidi inorganici forti come HCl, HNO₃ e H₂SO₄ distruggono rapidamente i manufatti cementizi in quanto agiscono attaccando la fase idrosilicatica C-S-H.

I sali di magnesio, presenti in abbondanza nell'acqua di mare, agiscono sostituendosi allo ione calcio non solo del Ca(OH)₂, ma anche degli idrosilicati, formando composti incoerenti e privi di proprietà leganti.

Attacco solfatico. Consiste nella reazione fra lo ione solfato SO₄⁼ e gli alluminati, la calce libera e gli idrosilicati presenti nella matrice cementizia indurita. Le reazioni sono:

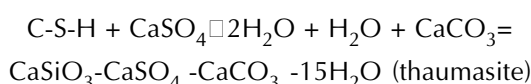


La reazione di formazione dell'ettringite avviene con forte aumento di volume che, se si manifesta quando il calcestruzzo è indurito, provoca rigonfiamenti, delaminazione e disgregazione dei manufatti. Come è noto infatti, il gesso è sempre presente nel cemento in quanto è aggiunto nella fase di macinazione del clinker come regolatore della pre-

sa degli alluminati, altrimenti troppo rapida. In queste condizioni però la formazione dell'ettringite è immediata (EEF - *Early Ettringite Formation*) e avviene nella fase in cui l'impasto è ancora plastico e quindi in grado di deformarsi liberamente.

Quando lo ione solfato proviene dall'esterno, venendo veicolato dall'acqua e dai terreni entro i pori capillari della matrice cementizia indurita, la formazione dell'ettringite è più lenta (DEF - *Delayed Ettringite Formation*) e le tensioni provocate distruggono la superficie dei manufatti a contatto con l'agente aggressivo.

Attacco solfatico in climi freddi. In presenza di particolari condizioni climatiche (*bassa temperatura < 5 °C ed elevata umidità relativa > 95%*) ed in presenza di CaCO₃ l'attacco solfatico può dar luogo a formazione di thaumasite secondo la reazione:



Questa reazione è ancora più pericolosa di quella che dà luogo alla formazione dell'ettringite, in quanto l'attacco avviene nei confronti degli idrosilicati C-S-H da cui essenzialmente dipendono le caratteristiche meccaniche e di adesione delle paste cementizie. L'effetto che si produce è particolarmente grave e si manifesta come un vero e proprio spappolamento dei manufatti.

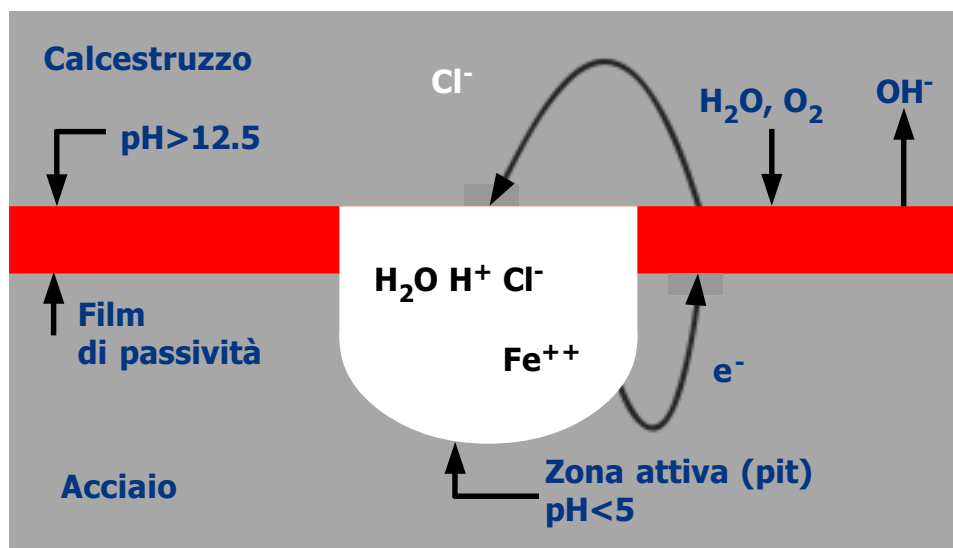
Reazione alcali-aggregato. Questo tipo di attacco noto come ASR (*Alkali-Silica-Reaction*) riguarda gli aggregati che contengono una particolare forma di silice che reagisce con gli alcali (ioni Na⁺ e K⁺) presenti nel cemento (come componenti dalle frazioni argillose della carica) o anche provenienti dall'esterno in particolare per l'utilizzo di NaCl in funzione di agente disgelante.

Na₂O e K₂O si idratano formando NaOH e KOH in grado di combinarsi con la SiO₂ amorfa o poco cristallina (es. opale). La reazione produce silicati di sodio o di potassio poco cristallizzati che attraverso processi osmotici acquisiscono acqua con notevoli effetti espansivi.

L'effetto si manifesta sulla superficie dei getti a di-

A SINISTRA: LA FORMAZIONE DEL FILM PASSIVO

A DESTRA: LA DISTRUZIONE DEL FILM PASSIVANTE DA PARTE DEI CLORURI.



stanza di anni e si presenta con microfessurazioni da cui emergono prodotti in forma gelatinosa biancastra o i caratteristici sollevamenti di piccoli conici di calcestruzzo (*pop out*). In Italia questo tipo di attacco non è frequente sia per l'impiego di aggregati di buona qualità, sia per il largo utilizzo di cementi di miscela di tipo pozzolanico o d'altoforno che contrastano efficacemente la ASR.

Degrado del calcestruzzo armato

I fenomeni di degrado finora descritti riguardano in modo esclusivo il calcestruzzo. Quando, come peraltro avviene generalmente, sono presenti barre di acciaio di rinforzo, si possono verificare altre forme di degrado dovute alla corrosione del metallo. Esse si manifestano essenzialmente per il fatto che i prodotti della corrosione del ferro - ossidi e idrossidi di differente formula chimica genericamente definiti *ruggine* - occupano un volume più grande del metallo non corrosivo. Si generano così pesanti azioni espansive in grado di fessurare il calcestruzzo (copriferro) a contatto con il metallo e consentire in questo modo un più agevole accesso dell'acqua e dei diversi agenti aggressivi. L'acciaio non più protetto si corroderà con maggiore velocità, riducendo la sezione delle barre che in taluni casi può pregiudicare la stabilità statica dell'intera struttura.

Passivazione del ferro nel CLS. I processi corrosivi dei metalli sono di carattere essenzialmente elettrochimico: si formano cioè delle vere e proprie pile in cui una parte del metallo funge da anodo e quindi manda ioni in soluzione corrodendosi, un'altra funge da catodo ed è protetta. Come in tutte le pile, perché il sistema funzioni è tuttavia necessaria la presenza simultanea di tutti i componenti: anodo, catodo, conduttore metallico e conduttore di seconda specie. Quest'ultimo componente è costituito nel CLS armato dalla presenza di una soluzione acquosa più o meno ricca di ioni. La termodinamica del processo è inoltre dipendente in modo critico dal pH dell'ambiente. In ambiente fortemente basico, infatti, si creano le condizioni perché il processo conduca alla formazione di un ossido di piccolo spessore e fortemente aderente al metallo che esercita nei suoi

confronti un ruolo protettivo (passivazione del ferro).

I valori di pH di una pasta di cemento indurita possono variare da circa 12,5 (soluzione satura di calce) a 13,5 (se nel cemento sono presenti sostanze alcaline), per cui in condizioni normali sussistono le condizioni perché si formi il film di ossido passivante. Questa condizione può essere tuttavia alterata da due tipi di attacco in grado di distruggere l'ossido protettivo e innescare la corrosione: carbonatazione e attacco da cloruri.

Attacco della CO₂ (carbonatazione). La CO₂ è presente in atmosfera in tenori compresi fra 0,04% e 0,2% in relazione al suo grado di inquinamento. A contatto con il CLS reagisce (*neutralizzandoli*) con i componenti alcalini solubili presenti in soluzione entro i pori e con l'idrossido di calcio cristallino della matrice indurita:



Il pH della soluzione acquosa si riduce fortemente scendendo da oltre 13 fin quasi alla neutralità (pH = 7). Si raggiungono così valori ben al di sotto della soglia minima di 11,5 che assicura le condizioni di passività dei ferri di rinforzo in assenza di cloruri.

La carbonatazione inizia dalla superficie esterna, penetrando progressivamente all'interno del manufatto secondo la legge:

$$s = K \cdot t^{1/n}$$

dove s = spessore dello strato carbonatato, t = tempo.

La carbonatazione diminuisce quindi nel tempo più o meno velocemente a seconda dei valori di n e K.

n dipende dalla porosità (compattezza della matrice): in calcestruzzi porosi vale circa 2, in quelli compatti i valori salgono fino a che la velocità del processo è praticamente annullata; K dipende dalle condizioni ambientali, in particolare dall'umidità relativa.

Il trasporto della CO₂ avviene facilmente entro i pori riempiti d'aria, mentre la diffusione entro quelli saturi d'acqua procede con una velocità 10⁴ volte inferiore. La reazione di carbonatazione può però avvenire solo in presenza

d'acqua per cui si ha un preciso intervallo di pericolosità che è compreso fra 50 e 80%.

Attacco da cloruri. La presenza di ioni cloruro nel CLS può avere differente origine, sia durante il confezionamento del CLS (acqua di impasto, aggregati non lavati, additivi) sia - in esercizio - dall'ambiente esterno (acque di mare o salmastre, aerosol marino, sali disgelanti).

I cloruri agiscono perforandolo il film di ossido protettivo: la zona sottostante scoperta funge da anodo rispetto alle zone circostanti catodiche e si corrode. Il passaggio della corrente di corrosione fa aumentare l'aggressività nella zona anodica, poiché la velocità di corrosione cresce con l'aumentare del rapporto Cl^-/OH^- e l'idrolisi dei cloruri complessi instabili che si formano in conseguenza dell'attacco può abbassare il pH a valori < 5 .

La morfologia è quella - assai pericolosa - tipica delle corrosioni localizzate (*pitting corrosion*).

I tenori limite di cloruri dipendono dal tipo di cemento e dalle caratteristiche dell'ambiente. Secondo la UNI 9858 per il cemento armato normale non si dovrebbe superare il limite di 0,4% rispetto al peso del cemento impiegato, mentre per il precompresso il limite è naturalmente più severo e si riduce a 0,1%.

Tali valori limite possono tuttavia essere superati se il calcestruzzo opera in ambiente asciutto, o anche se l'opera è costantemente sommersa. Nel primo caso infatti la cella di corrosione non può funzionare per l'assenza del conduttore di seconda specie (la soluzione acquosa più o meno ricca di sali); nel secondo caso è difficile la penetrazione dell'ossigeno la cui presenza a contatto del ferro è indispensabile perché avvengano le reazioni di riduzione catodica.

Criteri per la prevenzione del degrado.

L'insieme dei criteri che dovrebbero guidare gli *addetti ai lavori* nella realizzazione di un'opera in calcestruzzo durevole sono gli stessi che devono essere rispettati perché il materiale possa essere definito un *buon CLS*. Naturalmente, poiché come si è visto la pericolosità dell'attacco dipende dall'aggressività dell'ambiente, l'attenzione e il rispetto dei criteri generali di qualità del manufatto devono crescere con l'aumento della severità della classe di esposizione.

Le già citate Linee guida sul Calcestruzzo Strutturale e la UNI 11104 individuano quattro parametri essenziali da cui dipende la durabilità:

- valore minimo della resistenza caratteristica R_{ck}
- rapporto a/c minimo
- contenuto di cemento minimo
- minimo spessore del copriferro (35 o 45 mm).

Ad essi si devono aggiungere, in caso di ambiente gelivo, le precauzioni da adottare in tal caso e cioè: particolare attenzione nella scelta degli aggregati che non devono naturalmente essere gelivi, e l'impiego di particolari additivi aeranti.

Il requisiti minimi relativi ai suddetti parametri diventano naturalmente più severi per le classi di esposizione più pericolose, ma il loro rispetto può consentire una vita utile in servizio delle strutture non inferiore ai 50 anni.

LUIGI MASSIDDA



EFFETTO COMBINATO DELLA CRISTALLIZZAZIONE SALINA E DELLA CORROSIONE DELL'ARMATURA SU UN MANUFATTO DI CALCESTRUZZO.

QUI SOTTO: FESSURE DA RITIRO IGROMETRICO SU UN MURO DI CALCESTRUZZO.

