



CALCESTRUZZO ARMATO E PRECOMPRESSO CEDIMENTI STRUTTURALI E

di **Pietro Pedefèri**
Dipartimento di Chimica,
Materiali e Ingegneria
Chimica "Giulio Natta",
Politecnico di Milano
pietro.pedefèri@polimi.it

La corrosione delle armature è stata spesso causa o concausa di cedimenti strutturali in opere in calcestruzzo armato (c.a.) e precompresso (c.a.p.). Nella quasi totalità dei casi il fenomeno è stato reso possibile dalla cattiva qualità del materiale cementizio, da copriferri inadeguati o addirittura localmente mancanti, da dettagli costruttivi fantasiosi, da mancanza di manutenzione e quindi, in definitiva, da errori o da negligenze commessi in sede di progetto, di costruzione o di gestione della struttura oppure nel confezionamento, messa in opera o maturazione del calcestruzzo. Situazioni di questo tipo si riscontrano soprattutto negli edifici sorti nel periodo che va dal 1950 al 1975 quando nessuno si poneva il problema della durabilità delle opere che si andavano costruendo e non era raro l'impiego di calcestruzzi inadeguati "non solo in assoluto ma soprattutto in relazione alla consuetudine - allora assai diffusa - di identificare nelle ridotte dimensioni delle sezioni dei pilastri una ragione di economia per il costruttore ed una prova di abilità del progettista." [1]

Purtroppo non mancano gravi situazioni corrosionistiche anche su opere terminate dopo il 1975. Ad esempio nel porto industriale di Manfredonia, collaudato nel 1979, la corrosione sta interessando pesantemente non solo l'armatura più esterna, ma ha già portato a rottura diverse barre da pre-

compressione (figura 1); oppure nelle palazzine a Molfetta, consegnate ai proprietari nella seconda metà degli anni novanta (sic!), gli attacchi di corrosione sono ormai di entità tale da richiederne lo sgombero (in parte già avvenuto).

Va detto che anche le costruzioni in c.a. e c.a.p. perfettamente progettate e costruite non sono eterne come in genere si riteneva fino agli anni '70: la loro vita è limitata proprio dalla corrosione delle armature. Peraltro, se l'ambiente non contiene cloruri non ci sono difficoltà a realizzare strutture con vite di servizio fino 75-100 anni e forse anche più, almeno in climi temperati. Nel caso invece di presenza di questi ioni, come succede alle strutture marine o ai ponti su cui si utilizzano sali antigelo, si è in grado di evitare attacchi corrosivi nelle parte più sollecitate solo per trenta o al più quarant'anni. Per assicurare vite di servizio più lunghe è necessario ricorrere a speciali protezioni aggiuntive (armature resistenti a corrosione, prevenzione catodica, rivestimenti, inibitori e altro ancora).

Per inquadrare il problema dei cedimenti strutturali provocati dalla corrosione è necessario premettere alcune considerazioni generali sui fenomeni corrosivi nel calcestruzzo in relazione ai quali, negli ultimi vent'anni, è stato raggiunto un buon livello di comprensione. (Per approfondimenti vedi [2].)

LA CORROSIONE NELLE OPERE IN C.A. E IN C.A.P.

In soluzioni alcaline con $\text{pH} > 11,5$ e in assenza di cloruri, il ferro si ricopre di un sottilissimo film protettivo di ossido di qualche nanometro di spessore. In queste condizioni, che sono dette di passività, il processo corrosivo non avviene. Nei confronti delle armature il calcestruzzo si comporta come una soluzione alcalina perché il liquido presente nei suoi pori capillari è costituito da una soluzione di NaOH e di KOH con pH in generale compreso tra 13 e 13,5 (i valori più elevati quando il cemento utilizzato è quello Portland, quelli più bassi con i cementi di miscela) e quindi le protegge perfettamente. Purtroppo, nel tempo, il calcestruzzo può perdere questa sua caratteristica e il film protettivo viene distrutto. Questo succede anzitutto a causa della carbonatazione, cioè della reazione di neutralizzazione della soluzione presente nei pori capillari del calcestruzzo ad opera dell'anidride carbonica atmosferica; e, in secondo luogo, in seguito alla penetrazione dei cloruri, in genere provenienti da sali disgelanti o dall'acqua di mare. La conseguente distruzione del film protettivo, che nel primo caso avviene su tutta la superficie delle armature raggiunta dalla carbonatazione mentre nel secondo si produce solo localmente, è dunque la precondizione perché la corrosione possa avvenire. Perché poi si produca effettivamente è

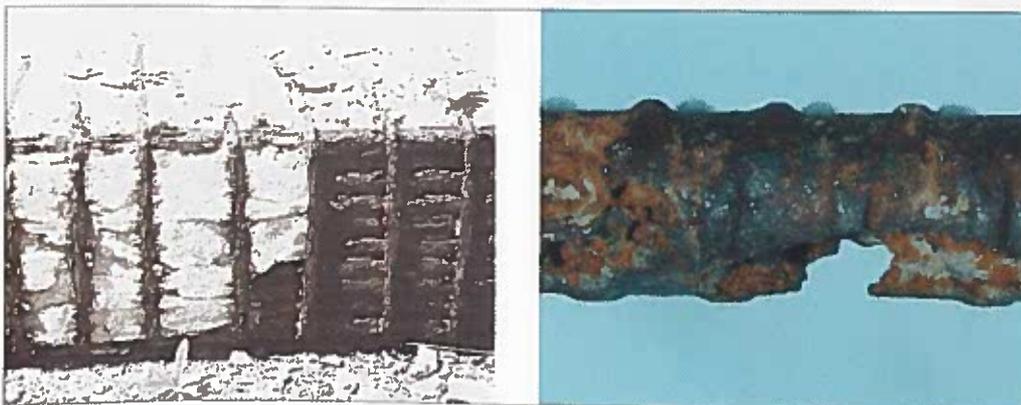
necessaria anche la presenza di acqua e di ossigeno.

Nella vita delle strutture in calcestruzzo armato si possono quindi individuare due fasi nettamente distinte: una prima di innesco della corrosione, in cui si producono i fenomeni che portano alla distruzione del film protettivo; e una seconda di propagazione dell'attacco che inizia nel momento in cui il film viene distrutto e termina una volta che la corrosione ha portato a danni non più accettabili. Il tempo di innesco dipende soprattutto dalle caratteristiche del calcestruzzo e dallo spessore di copriferro; il periodo di propagazione dalla velocità di corrosione a sua volta legata all'umidità del calcestruzzo e alla presenza o meno di cloruri.

La carbonatazione La penetrazione della carbonatazione segue una legge parabolica del tipo: $s = kv\sqrt{t}$ dove: s è lo spessore dello strato carbonatato, t il tempo. k è un coefficiente che dipende dalle caratteristiche del calcestruzzo e da fattori ambientali. k diminuisce riducendo il rapporto a/c e garantendo una costipazione e una stagionatura ad umido sufficientemente lunga; e, per quanto riguarda l'esposizione, assume i valori più alti per umidità relative (U.R.) comprese fra 50% e 70%, mentre tende a zero per U.R. sia molto basse ($< 40\%$) che molto alte ($> 90\%$). Una volta che il copriferro si è carbonatato, se nel calce-

1. Porto di Manfredonia: corrosione generalizzata dell'armatura lenta e rottura da corrosione di barre di una trave precompressa.
2. Tipico attacco da carbonatazione.
3. Tipico attacco da cloruri.

CORROSIONE DELLE ARMATURE



struzzo non sono presenti cloruri, la corrosione si produce con velocità non trascurabili solo in zone interessate dalla pioggia e per U.R. superiori all'80% (figura 2). Per U.R. comprese tra 80% e 90% la velocità rimane comunque modesta cioè solo di qualche $\mu\text{m}/\text{anno}$; invece quando l'U.R. supera il 90-95%, passa a qualche decina di $\mu\text{m}/\text{anno}$. Questo significa che all'interno di edifici o nelle zone schermate dalla pioggia il calcestruzzo carbonatato non dà luogo a problemi di corrosione delle armature (salvo ovviamente in condizioni particolari per cui si umidifica ad esempio per perdite d'acqua o per risalite capillari). Siccome nelle condizioni in cui la velocità di carbonatazione del calcestruzzo è elevata, la velocità di corrosione delle armature è trascurabile e viceversa, se l'umidità nel calcestruzzo rimane costante (alta o bassa che sia) la corrosione non si produce.

Sono quindi critiche le condizioni di esposizione caratterizzate da condizioni di bagnamento o umidità variabili per cui risulta favorita, seppur in tempi diversi, sia la carbonatazione del calcestruzzo, sia l'attacco corrosivo dell'acciaio. Se nel calcestruzzo carbonatato sono presenti cloruri, anche in tenori molto inferiori a quelli necessari per innescare la corrosione nel calcestruzzo alcalino, le cose cambiano. In questo caso la corrosione procede anche per U.R. comprese tra 50 e l'80% e quindi anche all'interno di edifici.

La corrosione da cloruri I cloruri possono provocare la corrosione delle armature quando la loro concentrazione supera una certa soglia. In pratica il rischio di corrosione è basso per un contenuto di cloruri alla superficie delle armature $< 0,4\%$ (in massa rispetto al contenuto di cemento) ed elevato per tenori superiori a 1%. Nella maggioranza dei casi i cloruri provengono dall'esterno. Il periodo di innesco della corrosione - dato dal tempo necessario perché i cloruri diffondano attraverso il copriferro e si accumulino alla superficie delle armature fino a raggiungere il valore critico - è regolato dalla seconda legge di Fick e dipende quindi dalla concentrazione superficiale dei cloruri, dalle caratteristiche del cls e dallo spessore di copriferro. L'attacco dei cloruri è localizzato e penetrante (figura 3) e, potendo raggiungere velocità anche di parecchie centinaia di $\mu\text{m}/\text{anno}$, è in grado di portare in pochi anni a riduzioni inaccettabili della sezione delle armature. Per contrastarlo si deve quindi agire soprattutto sul tempo di innesco, utilizzando cls di bassa porosità e permeabilità ai cloruri (caratterizzati quindi da basso rapporto a/c e dall'impiego di cementi d'alto forno o comunque di miscela) e spessori di copriferro sufficientemente elevati. Va osservato che nel caso di strutture completamente immerse in acqua, anche se la corrosione si innesca, il ridotto apporto di ossigeno alle armature mantiene la velocità di corrosione su valori molto bassi. Per questo motivo problemi di corrosione non si manifestano nelle parti immerse delle opere marine in c.a..

4. Tipica rottura di tiranti per infragilimento da idrogeno. 5. Cedimento di una trave di ponte per SCC dei tiranti in Germania (1995).



4



5

L'infragilimento da idrogeno I metalli sotto specifiche condizioni metallurgiche, ambientali e di carico possono essere soggetti a fenomeni corrosivi che provocano cricche nel materiale, noti con il nome di corrosione sotto sforzo (Stress Corrosion Cracking, SCC). In alcune condizioni le cricche penetrano nel materiale perché la loro punta si ossida a causa della reazione anodica del processo di corrosione; in altri casi perché l'idrogeno atomico prodotto dalla reazione catodica li infragilisce (da qui il nome di infragilimento da idrogeno) e ne provoca la rottura. Questa seconda variante è quella che porta al cosiddetto cedimento da idrogeno (o HIC: Hydrogen Induced Cracking) degli acciai ferritici ad alta resistenza.