

Strutture idrauliche in cemento armato

Esempio di prescrizioni per il calcestruzzo di un serbatoio di contenimento di acqua potabile

Marco Iuorio, Ingegnere dei Materiali

La realizzazione di strutture idrauliche in calcestruzzo è particolarmente delicata e merita sempre attenzioni particolari trattandosi, spesso, di opere strategiche che richiedono investimenti importanti, sia in termini di costi di realizzazione, considerando le volumetrie medie in gioco, che in termini di costi di manutenzione a causa dell'azione di degrado promossa dall'acqua e/o dai fluidi con i quali le strutture sono a contatto.

Nella progettazione e realizzazione di tali strutture è quindi importante considerare tutte le soluzioni più efficaci per la mitigazione del rischio di degrado al fine di assicurare la maggiore sostenibilità economica possibile dell'opera durante l'intero ciclo di vita.

Il conseguimento di tale obiettivo in una struttura idraulica passa attraverso un mix di soluzioni atte, da un lato, a mitigare l'azione di degrado promosso dagli agenti aggressivi garantendone quindi la durabilità e, dall'altro, a preservare la funzionalità dell'opera assicurando quelle caratteristiche tipiche di queste strutture come l'impermeabilità o l'atossicità dei prodotti impiegati come richiesto, ad esempio, nella realizzazione degli acquedotti. Infatti, in questo caso potrà essere previsto che gli additivi, le aggiunte, ecc. utilizzati per i calcestruzzi che dovranno entrare in contatto con acqua destinata al consumo umano, dovranno essere conformi alle prescrizioni del D.M. n. 174 del 06.04.2004 e del D.Lgs. n. 31 del 02.02.2001.

Focalizzando quindi l'attenzione sui materiali impiegati, sulla loro progettazione e prescrizione e la relativa messa in opera, si cercherà di proporre una disamina delle problematiche connesse, delle azioni in gioco e delle attenzioni minime da adottare.

DURABILITÀ E FENOMENI DI DEGRADO

Iniziando quindi dagli aspetti relativi alla durabilità vanno analizzati bene i **fenomeni di degrado** che possono innescarsi nella matrice di calcestruzzo e sulle barre d'armatura.

I fenomeni corrosivi che coinvolgono le strutture idrauliche sono da ascrivere sia a **reazioni chimiche** che a **processi elettrochimici** legati all'interazione con i fluidi aggressivi a contatto con la matrice cementizia e con le barre d'armatura.

A seconda della destinazione d'uso della struttura e dell'ambiente in cui si trova, le sostanze che possono corrodere il materiale sono *anidride carbonica*, *acqua* e sostanze disciolte in essa come *ioni cloruri* e *sostanze chimiche aggressive*.

In fase di progettazione bisognerà quindi considerare se la struttura è permanentemente a contatto con i fluidi o lo è a cicli alterni e con quale tipologia di sostanze: acqua, reflui, sostanze chimiche industriali ecc..

Le modalità di interazione, nonché la dinamica/cinetica di corrosione dipendono dai meccanismi di penetrazione dei fluidi aggressivi, siano essi di permeazione (penetrazione dovuta al gradiente di pressione all'interfaccia fluido-calcestruzzo), diffusione (penetrazione dovuta ad un gradiente di concentrazione delle sostanze disciolte nella massa fluida e nell'acqua contenuta nelle porosità della matrice cementizia), o suzione capillare, e dalla loro coazione.

L'ESEMPIO DI UN SERBATOIO PER IL CONTENIMENTO DI ACQUA POTABILE

Per semplicità si ragionerà su un ipotetico *serbatoio chiuso per il contenimento di acqua potabile*, focalizzando l'attenzione sul processo di prescrizione e messa in opera dei materiali e, successivamente, si evidenzieranno alcune variazioni necessarie in caso di strutture analoghe in diverse condizioni di esercizio.

Nota quindi la destinazione d'uso e ipotizzando un vita nominale di 50 anni, è chiaro che le problematiche di durabilità sono legate a quanto accade all'interfaccia calcestruzzo/acqua e quindi, da un lato, alla capacità di quest'ultima di permeare la matrice cementizia e, dall'altro, alla diffusione di eventuali sostanze ioniche in essa disciolte. Considerando che, nella maggior parte dei casi, un serbatoio non risulta pieno a tutt'altezza si distingueranno due diverse condizioni, la prima all'interfaccia aria/calcestruzzo e la seconda all'interfaccia acqua/calcestruzzo, con diverse dinamiche nei due casi.

All'interfaccia aria/calcestruzzo si innescherà un processo di diffusione di CO₂ con conseguente innesco di fenomeni di carbonatazione ma, nel caso in cui l'acqua, a monte del serbatoio, abbia subito un processo di potabilizzazione, sarà anche ricca in cloro che tenderà a disciogliersi in forma ionica. All'interno del serbatoio, lo stesso cloro tenderà a passare in forma gassosa e di conseguenza, il gradiente di concentrazione dei cloruri innescherà una diffusione anche di questi ultimi nel calcestruzzo.

All'interfaccia acqua/calcestruzzo si innescheranno sia un processo di diffusione dei cloruri nel calcestruzzo, dovuti sempre al gradiente di concentrazione tra l'acqua contenuta nelle porosità della matrice e quella contenuta nel serbatoio, sia un processo di permeazione dell'acqua all'interno delle porosità a seguito delle diverse pressioni in gioco.

Quindi in entrambi i casi si registreranno le condizioni che potrebbero innescare un *fenomeno di pitting* delle armature nel momento in cui i cloruri, giunti a contatto con lo strato passivante ne causino la locale distruzione, causando l'innesco di una serie di reazioni elettrochimiche che porteranno inevitabilmente al progressivo danneggiamento delle barre d'armatura. Ma affinché ciò avvenga, come noto, è necessaria la contemporanea presenza di ossigeno e di sufficienti concentrazioni di cloruro, quindi essendo la diffusività dell'ossigeno nelle zone permanentemente immerse ingegneristicamente non significativa, le condizioni più critiche si risconteranno nelle zone non immerse dove, tra l'altro, si innescherà anche un fenomeno di carbonatazione dovuto alla diffusione della CO₂ nel calcestruzzo.

Ciò evidenzia che, a differenza di quanto si possa pensare istintivamente, le zone che più necessitano di attenzione sono quelle non immerse: in molti serbatoi i principali fenomeni di degrado sono stati registrati all'intradosso delle coperture e nelle zone di variazione del livello dell'acqua dove, i fenomeni di corrosione divengono ancora più critici perché aggravati dall'alternanza di cicli di asciutto/bagnato e quindi di coazione di fenomeni di suzione capillare e diffusione.

Le prescrizioni

Da quanto detto discende che **in fase di prescrizione** il calcestruzzo dovrà garantire una bassa permeabilità, per preservare la funzionalità dell'opera stessa, e una bassa diffusività agli agenti aggressivi.

Entrambi i requisiti sarà possibile raggiungerli **riducendo il rapporto a/c** del calcestruzzo. Infatti, da un lato, la resistenza all'ambiente di esercizio può essere garantita, in accordo alla UNI 11104:2004 con le prescrizioni minime delle classi di esposizione XC4 e XD2 e di conseguenza con la richiesta di un rapporto $a/c \leq 0,5$ e una classe di resistenza C(32/40), dall'altro anche l'impermeabilità del calcestruzzo potrà essere raggiunta con gli stessi parametri. Infatti se si considera come accettabile una profondità di penetrazione massima dell'acqua nel calcestruzzo minore di 20mm (misurato nelle condizioni previste dalla EN 12390-8), da letteratura è noto che questo equivale ad un coefficiente di permeabilità $K \leq 5 \cdot 10^{-13}$ m/s (essendo correlato alla permeabilità della porosità capillare della matrice), ottenibile con rapporti $a/c \leq 0,55$.

In aggiunta alle prescrizioni che riconducono alle classi di esposizione e relativi rapporti a/c, per incrementare la durabilità del materiale potranno essere adottate delle **prescrizioni particolari** atte a ridurre ulteriormente la potenziale diffusione dei cloruri nonché il coefficiente di permeabilità della matrice cementizia. In particolare può risultare opportuno prevedere, come ormai già fanno alcune committenze, *l'impiego di cementi pozzolanici (CEM IV) o con loppa d'altoforno (CEM III)*, oppure *l'impiego di aggiunte di tipo II come il fumo di silice*. Per quanto riguarda i cementi la scelta deriva dal fatto che come evidenziato in letteratura, questi prodotti, in particolare il CEM III, sono in grado di ridurre, a parità di rapporto a/c, la diffusività dei cloruri nella matrice e quindi rallentare il raggiungimento della concentrazione critica per l'innescò del pitting delle armature. L'utilità dell'impiego di fumo di silice può ascriversi a sua volta sia per un comportamento analogo dei CEM III e CEM IV nel ridurre la diffusività dei cloruri, sia nella capacità di ridurre la porosità capillare e la dimensione dei pori del calcestruzzo (refinement) riducendo, in questo modo, sia il rischio di carbonatazione sia il coefficiente di permeabilità della matrice, garantendo inoltre un impasto più coeso e, quindi, resistenze alla segregazione e al bleeding in fase di getto.

Inoltre la prescrizione d'impiego di cementi pozzolanici o fumo di silice risulterà utile anche nel caso di serbatoi di grandi dimensioni o per grandi vasche di potabilizzazione, qualora fossero previste la realizzazione di strutture massive con la conseguente necessità di ridurre l'innescò di gradienti termici nel getto di calcestruzzo riducendo così al minimo il rischio di fessurazione potenzialmente pericoloso per l'impermeabilità dell'opera.

Affinché le prescrizioni sul calcestruzzo sopra esposte risultino efficaci è inoltre necessario richiedere un calcestruzzo con bassa tendenza alla segregazione e al bleeding (ad esempio prevedendo l'impiego di fumo di silice come aggiunta di tipo II) e, possibilmente con un *D_{max} dell'aggregato tale da garantire una buona interfaccia pasta/aggregato in modo da ridurre la porosità soprattutto nella zona del copriferro che dovrà avere uno spessore minimo di 35 mm in accordo a quanto previsto dagli EC2 per la classe di esposizione XD2*.

Oltre ai materiali andranno previste alcune **prescrizioni restrittive anche per la posa in opera** degli stessi, onde evitare fenomeni di segregazione e/o di bleeding in fase esecutiva nonché l'innescò di quadri fessurativi che potrebbero rappresentare vie preferenziali per la permeazione dell'acqua. Quindi *particolare cura dovrà essere posta sia alla fase di compattazione* al fine di

evitare la formazione di nidi di ghiaia con conseguente incremento della permeabilità di diversi ordini di grandezza, *sia alla fase di maturazione umida, che dovrà durare almeno 7 giorni*, al fine di scongiurare l'innesco delle fessure nel calcestruzzo.

Le prescrizioni sopra indicate serviranno a garantire la bassa permeabilità del calcestruzzo ma, per garantire la tenuta idraulica della struttura, bisognerà prevedere **adeguate soluzioni anche per le riprese di getto**, nelle zone di congiungimento dei diversi elementi della struttura, attraverso l'impiego di giunti water-stop o, in alternativa, l'impiego di resine espandenti da iniettare mediante tubi microforati predisposti sulle superfici di ripresa prima dell'esecuzione dei getti.

Per analogia le considerazioni sopra riportate potranno essere adottate per tutte quelle strutture idrauliche contenenti acqua e soluzioni clorate come piscine, vasche di trattamento ittico, ecc...

STRUTTURE IN PRESENZA DI AGENTI AGGRESSIVI

Nel caso in cui la destinazione d'uso della struttura dovesse prevedere, invece, la presenza di fluidi aggressivi ricchi in solfati, ammonio o altre sostanze aggressive, ad esempio gli elementi costituenti gli impianti per acque reflue o gli impianti di trattamento chimico, al fine di definire le corrette prescrizioni **dovrà essere condotta un'analisi chimica dei fluidi** per comprenderne la costituzione per poter definire in modo corretto le prescrizioni per il calcestruzzo e per gli eventuali trattamenti protettivi da adottare (es. sistemi a base epossidica).

In generale si può dire che per la determinazione della corretta classe di esposizione ambientale e del rapporto a/c si dovrà fare riferimento alle *classi XA* in base alle evidenze estrapolate dalle analisi condotte e che l'ottenimento dell'impermeabilità per un calcestruzzo a contatto con acque reflue non potrà prescindere da un rapporto acqua/cemento inferiore a 0,50 e una resistenza non inferiore a C(32/40) corrispondenti a un coefficiente di permeabilità (K) del materiale inferiore a $1 \cdot 10^{-13}$ m/s e una profondità media della penetrazione di acqua (UNI-EN 12390-8) pari a 10 mm.