Regione Emilia-Romagna

AGENZIA PER LA SICUREZZA TERRITORIALE E LA PROTEZIONE CIVILE
REGIONE EMILIA-ROMAGNA

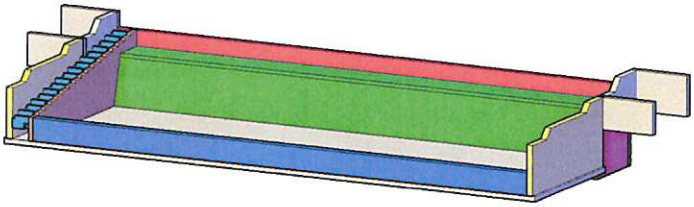
SETTORE SICUREZZA TERRITORIALE E PROTEZIONE CIVILE DISTRETTO RENO
Viale della Fiera n. 8 - 40122- Bologna (BO) - tel 051.5274530 fax 051.5274315

Finanziamento: **Fondo sviluppo e Coesione 2021/2027, art. 1 comma 178 lettera b) L 178/2020**

Oggetto: **Lavori di manutenzione straordinaria su opere di contenimento degli eventi di piena per la messa in sicurezza dei territori e finalizzati al miglioramento dell'assetto idraulico - bacino Sillaro**

Importo: **€ 1.000.000,00**

CUP: **F27H21002050001**



PIANO DELLA MANUTENZIONE

PROGETTO DEFINITIVO - REV.1

Bologna, 27 maggio 2022

Ing. Claudia Manuelli

Ing. Michele Bettini

Gom. Stefano Capitani

Visto: IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO
Ing. Davide Parmeggiani
(firmato digitalmente)

SCALA	ELABORATO N°
---	11/19

0. PREMESSA – QUADRO NORMATIVO NAZIONALE E DURABILITÀ

Il "**D.M. 17.01.2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni**", aggiornamento del precedente D.M. 14.01.2018, che al paragrafo "2.1 – Principi fondamentali", dà la seguente definizione di "**durabilità"**:

"durabilità: ***capacità della costruzione di mantenere, nell'arco della vita nominale di progetto, i livelli prestazionali per i quali è stata progettata, tenuto conto delle caratteristiche ambientali in cui si trova e del livello previsto di manutenzione".***

In queste poche righe vengono racchiuse tutte le variabili a cui è legata e cioè: dal progetto in relazione all'ambiente di servizio della struttura, dalla qualità dei materiali utilizzati, dalla conseguente posa in opera (compresa la maturazione dei getti, per le opere in c.a.), dai controlli in fase di esecuzione, dall'ambiente in cui è inserita la struttura, dal monitoraggio con conseguente continua e costante manutenzione. Trascurando una di queste variabili, sarà compromessa la possibilità di garantire la "durabilità" di una struttura, a patto che non si intervenga con importanti e costosi interventi di ripristino. Infatti, a supporto di tale deduzione concorre sempre il D.M. 17.01.2018, dove al paragrafo "2.1 – Principi fondamentali", vengono citati anche i materiali da utilizzare e cioè: *"(…) I materiali ed i prodotti, per poter essere utilizzati nelle opere previste dalle presenti norme, devono essere sottoposti a procedure e prove sperimentali di accettazione. Le prove e le procedure di accettazione sono definite nelle parti specifiche delle presenti norme riguardanti i materiali. (…)"* e al paragrafo "2.2.4. DURABILITÀ", viene "esploso" il concetto di "durabilità" e vengono spiegate le azioni da svolgere, partendo dal progetto, passando per la realizzazione ed i controlli in corso d'opera, fino alla manutenzione affinché venga garantito il "requisito di durabilità", cioè viene esplicitato quanto segue:

"Un adeguato livello di durabilità può essere garantito progettando la costruzione, e la specifica manutenzione, in modo tale che il degrado della struttura, che si dovesse verificare durante la sua vita nominale di progetto, non riduca le prestazioni della costruzione al di sotto del livello previsto.

Tale requisito può essere soddisfatto attraverso l'adozione di appropriati provvedimenti stabiliti tenendo conto delle previste condizioni ambientali e di manutenzione ed in base alle peculiarità del singolo progetto, tra cui:

a) scelta opportuna dei materiali;

b) dimensionamento opportuno delle strutture;

c) scelta opportuna dei dettagli costruttivi;

d) adozione di tipologie costruttive e strutturali che consentano, ove possibile, l'ispezionabilità delle parti strutturali;

e) pianificazione di misure di protezione e manutenzione; oppure, quando queste non siano previste o possibili, progettazione rivolta a garantire che il deterioramento della costruzione o dei materiali che la compongono non ne causi il collasso;

f) impiego di prodotti e componenti chiaramente identificati in termini di caratteristiche meccanico-fisico-chimiche, indispensabili alla valutazione della sicurezza, e dotati di idonea qualificazione, così come specificato al Capitolo 11;

g) applicazione di sostanze o ricoprimenti protettivi dei materiali, soprattutto nei punti non più visibili o difficilmente ispezionabili ad opera completata;

h) adozione di sistemi di controllo, passivi o attivi, adatti alle azioni e ai fenomeni ai quali l'opera può essere sottoposta.

Le condizioni ambientali devono essere identificate in fase di progetto in modo da valutarne la rilevanza nei confronti della durabilità", quindi, viene riportato un vero e proprio elenco delle variabili da pensare, prescrivere, pretendere, realizzare, controllare, monitorare e fare la manutenzione. Tali concetti, conosciuti a molti, ma trascurati da quasi tutti sia nel campo privato che pubblico.

Come si è ben capito da questa breve introduzione al pari delle fasi di progetto, realizzazione, maturazione e controllo esistono due altre fasi importantissime e strettamente legate: il **monitoraggio (contino e costante) e la manutenzione**.

Infatti, al paragrafo *"***2.4.1. Vita nominale di progetto**", sempre del D.M. 17.01.2018, si ribadisce l'importanza della maturazione e viene riportato quanto segue: *"La vita nominale di progetto V_N di un'opera è convenzionalmente definita come il numero di anni nel quale è previsto che l'opera, purché soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali. (…)", il tutto collegato con il "Capitolo 10* - REDAZIONE DEI PROGETTI STRUTTURALI ESECUTIVI E DELLE RELAZIONI DI CALCOLO*", dove al paragrafo*

*"***10.1. caratteristiche generali", si cita il "Piano di manutenzione dell'opera" come parte integrante del progetto.**

A coronamento di tutto ciò, al "**Capitolo 11 – Materiali**" sempre del D.M. 17.01.2018, al paragrafo "**11.2.11. Durabilità",** viene esplicitato il "percorso che conduce alla durabilità" delle strutture in calcestruzzo armato e che per chiarezza si riporta integralmente:

"Per garantire la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato ordinario o precompresso, esposte all'azione dell'ambiente, si devono adottare i provvedimenti atti a limitare gli effetti di degrado indotti dall'attacco chimico, fisico e quelli derivanti dalla corrosione delle armature e dai cicli di gelo e disgelo.

A tal fine, valutate opportunamente le condizioni ambientali del sito ove sorgerà la costruzione o quelle di impiego, conformemente alle indicazioni della tabella 4.1.III delle presenti norme, in fase di progetto dovranno essere indicate le caratteristiche del calcestruzzo da impiegare in accordo alle Linee Guida sul calcestruzzo strutturale edite dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio

Superiore dei Lavori Pubblici facendo anche, in assenza di analisi specifiche, utile riferimento alle norme UNI EN 206 ed UNI 11104.

Inoltre, devono essere rispettati i valori del copriferro nominale di cui al punto 4.1.6.1.3, nonché le modalità e la durata della maturazione umida in accordo alla UNI EN 13670:2010, alle Linee Guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale ed alle Linee Guida per la valutazione delle caratteristiche del calcestruzzo in opera pubblicate dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Ai fini della valutazione della durabilità, nella formulazione delle prescrizioni sul calcestruzzo, si potranno prescrivere anche prove per la verifica della resistenza alla penetrazione degli agenti aggressivi, quali ad esempio anidride carbonica e cloruri. Si può, inoltre, tener conto del grado di impermeabilità del calcestruzzo, determinando il valore della profondità di penetrazione dell'acqua in pressione. Per la prova di determinazione della profondità della penetrazione dell'acqua in pressione nel calcestruzzo indurito potrà farsi utile riferimento alla norma UNI EN 12390-8."

Come anticipato e come si è potuto constatare, in tale paragrafo, **vengono riportati chiaramente tutti i passaggi da osservare per garantire la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato e sarebbe "cosa buona e giusta" che gli addetti ai lavori avessero tale paragrafo, come guida nelle rispettive fasi, che caratterizzano la struttura, e relative azioni.**

Ritornando al "Capitolo 2" del D.M. 17.01.2018, nei paragrafi di seguito riportati, si può notare che tra le azioni che possono portare al limite una struttura, non esistono solo le azioni statiche o dinamiche ("azioni dirette"), ma anche quelle derivanti dall'ambiente in cui "vive" una struttura ("azioni indirette") e quelle relative al degrado, esogeno o endogeno. Quindi, nello specifico al paragrafo **"2.5.1. Classificazione delle azioni":** *"Si definisce azione ogni causa o insieme di cause capace di indurre stati limite in una struttura."* ; mentre al paragrafo **"2.5.1.1 Classificazione delle azioni in base al modo di esplicarsi":**

a) **dirette:** *forze concentrate, carichi distribuiti, fissi o mobili; b) indirette: spostamenti impressi, variazioni di temperatura e di umidità, ritiro, precompressione, cedimenti di vincoli, ecc.; c) degrado: endogeno: alterazione naturale del materiale di cui è composta l'opera strutturale; esogeno: alterazione delle caratteristiche dei materiali costituenti l'opera strutturale, a seguito di agenti esterni.*

Visto tutto ciò, risulta ovvio ciò sostenuto dal D.M. 17.01.2018 e cioè, che **l**a struttura deve essere progettata così che il degrado nel corso della sua vita nominale, purché si adotti la normale manutenzione, non pregiudichi le sue prestazioni in termini di resistenza, stabilità e funzionalità**.** Inoltre, le misure di protezione contro l'eccessivo degrado, devono essere stabilite con riferimento alle previste condizioni ambientali e deve essere ottenuta attraverso un'opportuna scelta dei dettagli, dei materiali**,** delle dimensioni strutturali, con l'eventuale applicazione di sostanze o ricoprimenti protettivi, nonché con l'adozione di altre misure di protezione attiva o passiva.

Sempre secondo il D.M. 17.01.2018, paragrafo **"4.1.2.2.4.2 Condizioni ambientali",** *"Ai fini della protezione contro la corrosione delle armature metalliche e della protezione contro il degrado del calcestruzzo, le* ***condizioni ambientali possono essere suddivise in ordinarie, aggressive e molto aggressive in relazione*** *a quanto indicato nella Tab. 4.1.III(Tabella 3 del presente documento) con riferimento alle classi di esposizione definite nelle Linee Guida per il calcestruzzo strutturale emesse dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nonché nella UNI EN 206:2016 .*"

A tal proposito, si desidera evidenziare che le classi di esposizione XC1-XC2-XC3-XC4, XD1-XD2-XD3 e XS1-XS2-XS3 riguardano la corrosione delle armature, mentre le classi di esposizione XF1-XF2-XF3-XF4, XA1-XA2- XA3 riguardano il degrado del solo calcestruzzo e non la corrosione delle armature.

CONDIZIONI AMBIENTALI	CLASSE DI ESPOSIZIONE
Ordinarie	X0, XC1, XC2, XC3, XF1
Aggressive	XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3
Molto aggressive	XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4

Tabella 3 - *Tabella 4.1.III D.M. 17.01.2018* **–** *Descrizione delle condizioni ambientali*

Sempre per la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato, anche della "sensibilità" delle armature alla corrosione bisogna tenere conto, poiché si hanno situazioni completamente diverse. A tal proposito il paragrafo *"***4.1.2.2.4.3 Sensibilità delle armature alla corrosione"** tratta l'argomento e specifica quanto segue: "*Le armature si distinguono in due gruppi: armature sensibili; armature poco sensibili.*

Appartengono al primo gruppo gli acciai da precompresso. Appartengono al secondo gruppo gli acciai ordinari.

Per gli acciai zincati e per quelli inossidabili, si può tener conto della loro minor sensibilità alla corrosione sulla base di documenti di comprovata validità."

Inoltre, al paragrafo "**4.1.2.2.4.4 Scelta degli stati limite di fessurazione",** sono indicati i criteri di scelta dello stato limite di fessurazione con riferimento ai "Gruppi di esigenze", i quali dipendono dalle "condizioni ambientali (ordinarie – aggressive – molto aggressive), alla frequenza (frequente – quasi permanente) delle "combinazioni di azioni", dalla "sensibilità delle armature" (sensibili – poco sensibili) e relativo "stato limite". Naturalmente, le armature ai fini della durabilità delle strutture in calcestruzzo armato devono essere protette da uno strato di calcestruzzo: il copriferro, la "qualità" di tale elemento è fondamentale ai fini della durabilità. Infatti, nel D.M. 17.01.2018 al paragrafo **"4.1.6.1.3 Copriferro e interferro",** si tratta proprio di questo e ne descrive i principi fondamentali: *"L'armatura resistente deve essere protetta da un adeguato ricoprimento di calcestruzzo. Gli elementi strutturali devono essere verificati allo stato limite di fessurazione secondo il § 4.1.2.2.4.*

Al fine della protezione delle armature dalla corrosione, lo strato di ricoprimento di calcestruzzo (copriferro) deve essere dimensionato in funzione dell'aggressività dell'ambiente e della sensibilità delle armature alla corrosione, tenendo anche conto delle tolleranze di posa delle armature; a tale scopo si può fare utile riferimento alla UNI EN 1992-1-1.

Per consentire un omogeneo getto del calcestruzzo, il copriferro e l'interferro delle armature devono essere rapportati alla dimensione massima degli inerti impiegati.

Il copriferro e l'interferro delle armature devono essere dimensionati anche con riferimento al necessario sviluppo delle tensioni di aderenza con il calcestruzzo."

Inoltre, per capire cos'è il copriferro, viene in aiuto la definizione data dall'**EC2-UNI EN 1992-1-1** – paragrafo "**4.4.1 Copriferro"**, dove si specifica quanto segue: "Il copriferro nominale deve essere specificato sui disegni. Esso è definito come il copriferro minimo, c_{min} più un margine di progetto per gli scostamenti, Δc_{dev}:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$ ",

dove il c_{min}, deve essere assicurato garantendo: la corretta trasmissione delle forze di aderenza, la protezione dell'acciaio contro la corrosione (durabilità), un'adeguata resistenza al fuoco. Per quanto riguarda gli scostamenti, il valore da adottare in uno Stato, può essere reperito nella sua "Appendice Nazionale". Il valore raccomandato dall'EC2 è 10 mm e tale valore è anche dall'Appendice Nazionale Italiana.

1. LE AZIONI SULLE STRUTTURE, CAUSE DI DEGRADO E CONTROLLI

Le norme di riferimento per le strutture in cls e per le operazioni di manutenzione sono le seguenti:

- Decreto Ministero delle Infrastrutture del 17 gennaio 2018. - Norme Tecniche per le Costruzioni
- CSLLPP - Circolare 21 gennaio 2019, n. 7. – Nuova Circolare delle Norme Tecniche per le Costruzioni
- UNI EN 10080: Acciaio saldabile per cemento armato – generalità
- UNI EN 197-1: Cemento. Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni
- UNI EN 206-1: Calcestruzzo. Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità
- UNI EN 11104: Calcestruzzo: Specificazione, prestazione, produzione e conformità.

Istruzioni complementari per l'applicazione della UNI EN 206-1

- UNI EN 1990 : Eurocodice - Criteri generali di progettazione strutturale
- UNI EN 1991: Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture
- UNI EN 1992: Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo
- UNI EN 1993: Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture in acciaio
- UNI EN 1994: Eurocodice 4 - Progettazione delle strutture composte acciaio - calcestruzzo
- UNI EN 1997: Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica
- UNI EN 1998: Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica
- UNI EN 1536 - "Esecuzione di Lavori Geotecnici Speciali: Pali trivellati"
- UNI EN 1538 - "Esecuzione di Lavori Geotecnici Speciali: Diaframmi"
- UNI EN 14457 - "Esecuzione di Lavori Geotecnici Speciali: Terra rinforzata"
- UNI EN 12715 - "Esecuzione di Lavori Geotecnici Speciali: Iniezioni"

Il controllo periodico in esercizio è **responsabilità del gestore dell'opera**, che deve accertarsi della corretta costruzione a fronte della presenza dei documenti rilasciati dal progettista (progetto esecutivo), dall'impresa esecutrice, dalla DL.

Le ispezioni periodiche sulle opere in cemento armato costituenti le opere d'arte dovrà essere svolta da parte di **tecnici qualificati incaricati dal gestore dell'opera**.

Una prima visita di controllo deve essere fatta **entro un anno dall'entrata in esercizio della struttura**. In tale occasione deve essere stabilito l'intervallo di tempo massimo tra due ispezioni consecutive che in ogni caso non può essere maggiore di dieci anni. Tutti gli interventi dovranno essere annotati su un quaderno nel quale saranno riportate le date, il tipo di ispezione e l'intervento compiuto di **manutenzione ordinaria**.

In tale occasione deve essere stabilito l'intervallo di tempo massimo tra due ispezioni seguenti che in ogni caso **non può essere maggiore di dieci anni**. Tutti gli interventi dovranno essere annotati su un quaderno nel quale saranno riportate le date, il tipo di ispezione e l'intervento compiuto. Le ispezioni periodiche devono essere estese, per quanto possibile, a tutte le parti dell'opera per accertarne lo stato generale di conservazione e disporre, se del caso, i lavori di manutenzione.

I controlli consisteranno in:

- controllo della presenza di imbrattamenti delle superfici delle strutture;

- controllo sulla presenza di eventuali fenomeni di degrado superficiale dei calcestruzzi (perdita del copriferro con evidenza dei ferri di armatura);

- controllo visivo sull'eventuale presenza di dissesti delle strutture (l'apertura di lesioni/fessure visibili e superiori a 1 mm nel corpo d'opera);

Particolare attenzione dovrà porsi nel controllo dello **stato di fessurazione**, anche capillare, delle strutture in cemento armato in relazione al pericolo di aggressione delle armature da parte degli agenti esterni. Andrà analizzata la

tipologia dell'eventuale stato fessurativo, la sua localizzazione ed il relativo evolversi al fine di poter addivenire ad una valutazione dell'efficienza del manufatto in relazione alle caratteristiche strutturali ed ai materiali costituenti le strutture.

Manutenzione straordinaria

La manutenzione straordinaria delle strutture in cls dovrà avvenire in caso di lesioni o anomalie causate da elevato degrado superficiale o legato a danni causati da urti o danneggiamenti legati ad eventi atmosferici o terremoti.

Risorse necessarie:

- tecnici specializzati per le verifiche periodiche, operai specializzati e generici;
- automezzi per il trasporto dei materiali di ripristino; attrezzatura specifica manuale;
- dispositivi di protezione individuale ai sensi del D.Lgs. 80/2008 e s.m. e i., con adeguata cartellonistica di sicurezza cantiere come da Codice della Strada e relativo Regolamento di attuazione e dal DM del 10/07/2002; transenne per delimitazione e protezione area di lavoro.

Anomalie riscontrabili

Imbrattamento delle superfici, degrado superficiale dei calcestruzzi con eventuale evidenza dei ferri di armatura, presenza di fenomeni fessurativi, danni localizzati legati a urti o manomissioni, lesioni diffuse a seguito di terremoti.

Manutenzioni eseguibili direttamente dall'utente con personale specializzato: si considera che l'utente che prende in gestioni tali opere dovrà avere una squadra di operai con mansioni specifiche (ricorrendo anche a fornitori d'opera esterni) per i seguenti lavori di manutenzione straordinaria:

- **ripristino delle strutture in calcestruzzo armato mediante ricostruzione delle parti ammalorate o danneggiate.**

I fenomeni di degrado possono essere ricondotti a due cause principali: "**chimiche ed elettro-chimiche" e "fisiche", che a sua volta vanno divise in esogene ed endogene.** Le "**chimiche ed elettro-chimiche"** implicano, reazioni tra i fluidi aggressivi provenienti dall'ambiente esterno e, rispettivamente, gli ingredienti o i prodotti di idratazione del cemento e le barre di armatura, le "**fisiche"**, determinate dalle variazioni di temperatura del calcestruzzo e/o dell'ambiente esterno, dai gradienti di umidità relativa oppure derivanti dai carichi statici e dinamici agenti sulla struttura, dai carichi impulsivi, da quelli ciclici e dalle azioni abrasive. Inoltre, come già precedentemente citato, sia le cause chimiche che quelle fisiche, possono essere distinte in "**degrado endogeno**", cioè alterazione naturale del materiale di cui è composta la struttura e/o "**degrado esogeno**", cioè l'alterazione delle caratteristiche dei materiali costituenti l'opera strutturale, a seguito di agenti esterni.

Le cause esogene di natura chimica ed elettrochimica che promuovono il degrado dei materiali strutturali sono da ascrivere a reazioni chimiche e a processi elettrochimici che coinvolgono i fluidi aggressivi presenti nell'ambiente e i prodotti di idratazione del cemento e/o le barre di armatura. I fluidi aggressivi più importanti in relazione alle tipologie di degrado sono rappresentati segnatamente dall'ossigeno, dall'anidride carbonica (presenti entrambi in forma gassosa nell'atmosfera), dall'acqua e dalle sostanze in essa disciolte in forma ionica (ad esempio, acido carbonico, solfati, cloruri o sostanze chimiche di provenienza industriale). Tuttavia, perché i processi acquistino rilevanza dal punto di vista ingegneristico non è sufficiente che i fluidi aggressivi lambiscano la superficie esterna della struttura, ma è, invece, necessario che essi la penetrino interessando spessori centimetrici di calcestruzzo. Si intuisce, quindi, che qualsiasi processo di degrado, indipendentemente dalla natura degli aggressivi e dai materiali strutturali coinvolti, dipende

fortemente dalla capacità dei fluidi di penetrare nella matrice cementizia quindi, migliore sarà la qualità del calcestruzzo, la messa in opera, la compattazione, la maturazione minore sarà la possibilità dei fluidi aggressivi di penetrare all'interno della struttura in esame

I meccanismi di penetrazione all'interno del calcestruzzo possono essere ricondotti alla tematica più generale dei processi di trasporto che dipendono non solo dalla porosità totale del materiale, ma anche dalla natura, dalla distribuzione dimensionale dei pori (i macrovuoti, i pori capillari e gli spazi interstratici tra i prodotti di idratazione) e, soprattutto, dal grado di interconnessione che si stabilisce tra gli stessi. Il termine **penetrabilità** riassume queste proprietà del materiale poroso nei confronti dei meccanismi di trasporto dei fluidi al suo interno.

Sono sostanzialmente tre i meccanismi che determinano la penetrazione dei fluidi aggressivi nel calcestruzzo ed ognuno è associato ad una diversa "forza motrice": la **permeazione** è il meccanismo per il quale la penetrazione del fluido aggressivo è determinato da un gradiente di pressione; la **diffusione** in cui l'ingresso nel mezzo poroso è governato da un gradiente di concentrazione; l'**assorbimento** o **suzione capillare** generato dalle forze di adesione superficiale per affinità di un liquido, dell'acqua in particolare, con le superfici di un solido (del calcestruzzo per i nostri scopi).

Naturalmente, nelle strutture reali i processi di trasporto sopramenzionati non intervengono mai singolarmente e l'ingresso dei fluidi aggressivi nella matrice cementizia è generalmente da ascrivere a più processi agenti simultaneamente.

Nelle cause esogene, si intendono quelle forme di degrado legate agli ingredienti per confezionare il calcestruzzo, i quali, già "contaminati" da elementi pericolosi, che possono scatenare il fenomeno dall'interno del conglomerato realizzato. Tipici esempi sono l'utilizzo di acque contaminate, presenza di cloruri, solfati, aggregati reattivi che danno origine alla reazione alcali/aggregato e altre forme di contaminazione pericolose che favoriscono il precoce degrado dell'intera struttura realizzata.

2. APPROCCIO RAGIONATO ALLA DURABILITÀ E AI FENOMENI DI DEGRADO

L'approccio alla durabilità delle strutture in calcestruzzo armato, al fine di evitare il degrado delle stesse, deve essere affrontato con un approccio ragionato "tecnico/ingegneristico" che tenga conto, non solo dei meccanismi di deterioramento del materiale ma, prenda in esame, anche le inevitabili implicazioni di carattere strutturale derivanti dalla tipologia costruttiva, le deviazioni tra modelli teorici e comportamenti reali dei manufatti, gli errori insiti nella difficoltà di realizzazione dei particolari costruttivi, le distorsioni prodotte dalle variazioni termo-igrometriche dell'ambiente.

Relativamente agli aspetti strutturali, ad esempio, nelle strutture reali non si può non tener conto che i calcoli per il dimensionamento degli elementi in calcestruzzo armato prescindono dalla resistenza a trazione del calcestruzzo. Pertanto, le opere reali presentano un quadro micro-fessurativo e/o fessurativo che può modificare il processo di degrado rispetto a quello di un elemento in calcestruzzo supposto perfettamente integro. La iniziale microfessurazione, infatti, può evolvere per effetto degli stati tensionali indotti da movimenti di natura termo-igrometrica (riscaldamento/raffreddamento, ritiro igrometrico) e impediti dai vincoli esercitati dai collegamenti più o meno rigidi esistenti tra i vari elementi strutturali, verso un quadro fessurativo caratterizzato da lesioni di maggiore ampiezza. Eventuali agenti aggressivi presenti nell'ambiente in cui la struttura è situata possono, quindi, penetrare attraverso queste vie preferenziali di accesso anticipando ed esaltando il processo di degrado. In questo contesto, la corrosione promossa dal cloruro o dall'anidride carbonica, ad esempio, determina, per effetto della riduzione della sezione delle barre di armatura, dell'aderenza acciaio-calcestruzzo e della perdita di porzioni di copriferro, una diminuzione complessiva della rigidezza dell'elemento strutturale con inevitabili ripercussioni sullo stato deformativo e sulla funzionalità dell'intera struttura.

In definitiva, quindi, l'approccio ingegneristico al problema della durabilità non può essere ricondotto ad una sola analisi dei meccanismi di degrado dei materiali, ma deve tener conto che nelle strutture reali i processi di degrado studiati in laboratorio con un approccio di "tipo ridotto", cioè analizzando i vari fattori agenti singolarmente, non sono

semplicisticamente estendibili alle strutture reali, dove più fattori agiscono simultaneamente e insieme concorrono a definire il fenomeno nel suo complesso influenzandosi a vicenda. Visto quanto sopra riportato, i meccanismi di degrado del calcestruzzo esposti nel presente documento, debbono intendersi come "uno solo degli elementi" che concorrono al degrado. Le valutazioni che verranno riportate nel seguito debbono essere, sempre, completate con quelle relative al calcolo strutturale, al quadro fessurativo, alle condizioni esistenti sul cantiere al momento della realizzazione delle strutture, alle modalità e tempistiche di maturazione, alle deviazioni inevitabili tra particolari costruttivi realizzati e quelli contenuti negli elaborati progettuali, ai piani di monitoraggio e manutenzione. Infatti, proprio l'approccio ingegneristico dei problemi, dovrebbe essere la traccia del "percorso che conduce alla durabilità", partendo dalla fase di progettazione dando le regole per l'esecuzione e la maturazione dei getti. Sempre il più volte citato D.M. 17.01.2018, al paragrafo **"4.1.7. Esecuzione"**, responsabilizza il progettista anche per le prescrizioni da impartire per la fase esecutiva, e cioè: ***"Tutti i progetti devono contenere la descrizione delle specifiche di esecuzione in funzione della particolarità dell'opera, del clima, della tecnologia costruttiva.***

In particolare il documento progettuale deve contenere la descrizione dettagliata delle cautele da adottare per gli impasti, per la maturazione dei getti, per il disarmo e per la messa in opera degli elementi strutturali. Analoga attenzione dovrà essere posta nella progettazione delle armature per quanto riguarda: la definizione delle posizioni, le tolleranze di esecuzione e le modalità di piegatura. Si potrà a tal fine fare utile riferimento alla norma UNI EN 13670.". Quindi, non si può parlare di durabilità se non si impartiscono anche le "regole per costruire e maturare le strutture".

3. DEFINIZIONE DEGLI AMBIENTI DI ESPOSIZIONE DELLE STRUTTURE

In base alle considerazioni esposte ai precedenti paragrafi, emerge che al fine di garantire la durabilità delle strutture di calcestruzzo armato, esposte al degrado, è necessario adottare dei provvedimenti tanti più stringenti, quanto maggiore è il rischio a cui le stesse sono esposte. Questo approccio è quello adottato dalla norma europea UNI EN 206 e dalla norma UNI 11104, tali provvedimenti, in questo elaborato verrà esplicitata l'individuazione e la spiegazione della forma di degrado e la relativa manutenzione.

Le norme caratterizzano l'ambiente, in cui la struttura sarà in servizio, individuano una serie di classi di esposizione ambientale ed il corrispondente meccanismo di degrado delle strutture, come si può vedere dalla Tabella 2 che segue. La prosecuzione del seguente lavoro sarà incentrata sulla spiegazione dei singoli meccanismi di degrado.

Classe di esposizione	Meccanismi di degrado prevalenti
X0	STRUTTURE NON ARMATE CON RISCHIO DI DEGRADO NULLO
XC	STRUTTURE ARMATE SOGGETTE A CORROSIONE DELLE ARMATURE PROMOSSA DALLA CARBONATAZIONE
XD	STRUTTURE ARMATE SOGGETTE AL RISCHIO DI CORROSIONE INDOTTA DAI CLORURI NON PROVENIENTI DALL'ACQUA DI MARE
XS	STRUTTURE ARMATE IN AMBIENTE MARINO SOGGETTE A CORROSIONE PROMOSSA DAL CLORURI PROVENIENTI DALL'ACQUA DI MARE
XF	STRUTTURE IN CALCESTRUZZO SOGGETTE ALL'AZIONE DEI CICLI DI GELO-DISGELO CON O SENZA DI SALI DISGELANTI
XA	STRUTTURE IN CALCESTRUZZO SOGGETTE ALL'AGGRESSIONE AD OPERA DI SOSTANZE CHIMICHE PRESENTI NEI TERRENI E NELLE ACQUE

Tabella 2 - *Classi di esposizione ambientale in accordo alla UNI EN 206-1 e alla UNI 11104*

3.1 Carbonatazione - Le strutture in classe di esposizione XC

Uno dei costituenti principali dell'aria è l'anidride carbonica. In presenza di umidità la CO_2 è in grado di neutralizzare l'idrossido di calcio presente nella matrice cementizia convertendolo in carbonato di calcio, secondo la reazione che segue:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \Rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

Questa reazione porta ad una riduzione del pH della fase acquosa; pertanto, quando la CO_2 arriva all'interfaccia con l'armatura essa predispone l'acciaio alla corrosione purché in prossimità delle barre ci sia sufficiente ossigeno e acqua per alimentarne il processo elettrochimico.

La sola presenza della CO_2 in prossimità dell'acciaio, infatti, non è sufficiente a promuovere il processo di corrosione che quindi, può manifestarsi solo dopo un certo tempo (d'innesco) che coincide con il momento in cui, in una struttura che alterna situazioni di asciutto-bagnato, la CO_2 raggiunge le armature. In una struttura interrata o permanentemente immersa in acqua, il processo di diffusione della CO_2 è fortemente rallentato dall'elevato grado di saturazione dei pori capillari. Queste strutture, quindi, non sono affette da tali problematiche. In una costruzione protetta dall'azione dell'acqua la carbonatazione avviene con una maggiore velocità rispetto ad una analoga esposta all'azione della pioggia.

Quindi, in condizioni normali, si ha che le armature all'interno del calcestruzzo sono "passive", poiché ricoperte da un ossido protettivo compatto, coerente ed uniforme, favorito dalla alcalinità della pasta cementizia causata dalla presenza di soluzioni di sodio e potassio all'interno della sua porosità.

In tali condizioni il pH della pasta cementizia presenta valori superiori a 13 e lo strato passivante costituisce una sorta di barriera impermeabile sia all'ossigeno che all'acqua, riducendo a livelli trascurabili la velocità di corrosione delle armature.

Con il termine carbonatazione, come accennato precedentemente, si intende il processo mediante il quale l'anidride carbonica penetra attraverso il copriferro e reagisce con l'idrossido di calcio presente nella pasta cementizia idratata, determinando una notevole riduzione della basicità del calcestruzzo sino a valori di pH prossimi a 9.

Come conseguenza, il ferro di armatura, che si trovava precedentemente in uno stato a pH più elevato, perde la sua "passività", già con valori inferiori a 11, riducendo drasticamente la condizione protettiva esercitata sulle armature.

Una volta venuta meno l'impermeabilità della pellicola, i metalli restano direttamente esposti al contatto con l'ambiente che li circonda; con l'apporto di ossigeno e acqua, permeati dalla superficie di un calcestruzzo tendenzialmente poroso, si instaura un processo chimico di ossido-riduzione con l'armatura metallica (catodo) seguito dalla formazione di ruggine, che comporta un aumento di volume pari a circa 7 volte quello iniziale occupato dalla barra.

La ruggine genera delle tensioni interne di compressione sul calcestruzzo e delle tensioni di trazione in superficie, determinando la comparsa di fessure superficiali che corrono parallelamente alle barre di armatura, che aumentano progressivamente e culminano con l'espulsione totale del copriferro negli spigoli ("spalling") o con la sua delaminazione nelle superfici piane e verticali.

In conclusione va comunque evidenziato come l'innesco della corrosione (una volta che il fronte di carbonatazione ha raggiunto l'armatura distruggendone la naturale protezione) richieda la contemporanea presenza di acqua e ossigeno.

Foto 3.1.1 – *Degrado promosso da carbonatazione*

Foto 3.1.2 – *Degrado promosso da carbonatazione*

3.2 Attacco da cloruri - Le strutture in classe di esposizione XD e XS

Le tipologie di strutture in calcestruzzo armato esposte al rischio di attacco da parte dei cloruri, sono varie, in quanto questo ione è presente nei sali disgelanti, nelle salamoie derivanti da alcune lavorazioni industriali e nell'acqua di mare. La corrosione promossa dal cloruro rappresenta una delle principali e più diffuse cause di dissesto delle strutture in calcestruzzo armato. Infatti, l'acciaio d'armatura, in presenza di cloruri subisce una corrosione localizzata che si manifesta sottoforma di crateri di dimensioni variabili tra 1 e 10 mm. La corrosione da cloruro è tanto più intensa quanto maggiore è il tenore di ossigeno che perviene in prossimità delle barre. Sono maggiormente esposte al degrado le strutture aeree, per contro quelle completamente immerse o interrate necessitano di rilevanti concentrazioni di cloruro in prossimità delle barre che difficilmente si raggiungono durante la vita nominale delle strutture. Pertanto, per le strutture completamente immerse o interrate la corrosione da cloruri è ingegneristicamente poco significativa.

Si è già visto che il ferro d'armatura, immerso nel calcestruzzo a pH, prossimi a 13 è difeso da uno strato protettivo, che agisce da neutralizzatore di possibili fenomeni di corrosione elettrolitica. Nel momento in cui il cloro giunge a contatto con lo strato passivante questo viene distrutto, causando l'innesco di una serie di reazioni elettrochimiche che portano inevitabilmente al progressivo danneggiamento delle barre d'armatura. Affinché ciò avvenga, occorre la contemporanea presenza di ossigeno e di sufficienti concentrazioni di cloruro.

La rottura dello strato di protezione provocata dai cloruri ha luogo in forma localizzata; il meccanismo con cui avanza la corrosione, inoltre, tende a stabilizzare la localizzazione dell'attacco, poiché si crea una concentrazione di cloruri e un abbassamento del pH all'interno della zona di corrosione, e a rinforzare il film passivo in quella circostante. Si comprende quindi come la morfologia dell'attacco sia quella tipica della forma di corrosione localizzata con la comparsa di "crateri".

Il fenomeno di corrosione localizzata, precedentemente richiamato, è meglio noto come *pitting* (dall'inglese "pit" = "cratere"), può raggiungere valori di velocità corrosiva piuttosto significativi; in calcestruzzo umido e con elevato contenuto di cloruri in prossimità delle armature, si possono anche raggiungere velocità di penetrazione di 1÷1,5 mm/anno.

In pratica l'attacco corrosivo, una volta innescato, può portare in tempi piuttosto brevi a riduzioni inaccettabili della sezione delle armature o, peggio, al troncamento, anche nelle comuni condizioni di esposizione atmosferica.

Pur essendo il meccanismo di corrosione promosso dai cloruri sia lo stesso, a prescindere dalla loro provenienza, la classificazione delle norme UNI EN 206 e UNI 11104 divide in due classi differenti l'attacco da cloruri: provenienti da acqua di mare (XS) oppure provenienti da altre fonti (XD), come da vasche di processi industriali, piscine, infrastrutture viarie sottoposte ai sali disgelanti.

Il motivo della diversificazione è da ascriversi a due peculiarità dell'ambiente marino. Innanzitutto i cristalli dei sali depositati dall'acqua, nei periodi di alta marea, aumentano di volume nella fase successiva di bassa marea generando tensioni nella pasta cementizia capaci di produrre fessurazioni e delaminazioni; secondariamente esiste l'effetto abrasivo sul calcestruzzo per effetto dei solidi in sospensione agitati dal moto ondoso.

Il maggior degrado che subisce il calcestruzzo si riflette, ovviamente, sulla velocità di penetrazione dei cloruri con attacco precoce delle barre d'armatura.

Il tempo necessario al cloruro per raggiungere in prossimità delle barre una concentrazione critica sufficiente per innescare il processo corrosivo dipende dalla porosità della matrice cementizia e dallo spessore del copriferro: calcestruzzi con rapporti a/c relativamente bassi e spessore sufficientemente elevati del copriferro possiedono una eccellente durabilità nei confronti di questi ioni aggressivi. Inoltre, la penetrazione del cloruro nel calcestruzzo può essere ulteriormente rallentata ricorrendo all'impiego di cementi pozzolanici e d'altoforno i cui prodotti di idratazione sono capaci di adsorbire parzialmente il cloruro allungando il tempo necessario perché in prossimità delle barre si raggiunga la concentrazione critica. Sebbene non esista una sostanziale differenza in termini di effetto corrosivo a seconda della fonte di provenienza del cloruro la normativa distingue la corrosione da cloruri in funzione che essi provengano o meno

dall'acqua di mare.

Foto 3.2.1 – *Degrado da attacco da cloruri provenienti dal mare*

Foto 3.2.2 – *Degrado da attacco da agenti disgelanti e carbonatazione*

3.3 Ciclo gelo disgelo - Le strutture in classe di esposizione XF

Il calcestruzzo, come tutti i materiali da costruzione, subisce delle deformazioni per effetto delle variazioni termiche, che possono avvenire all'ESTERNO della struttura, determinati dall'ambiente in cui la stessa è situata; all'INTERNO del manufatto stesso, derivanti dallo sviluppo di calore generato dalla reazione esotermica di idratazione del cemento.

Le variazioni di temperatura sono, quindi, per una struttura in calcestruzzo, causa di degrado, in quanto a seguito di un aumento della temperatura l'elemento si dilata, mentre si contrae in caso di diminuzione. In una struttura iperstatica, quali sono generalmente gli elementi che costituiscono l'ossatura portante di un'opera, l'impedimento alla libera contrazione provoca la nascita di stati tensionali di trazione che risultano di gran lunga superiore alla resistenza a trazione del calcestruzzo che, pertanto, sarà interessato dalla comparsa di fessurazioni. Il degrado delle strutture in servizio, inoltre, può essere esaltato dalle oscillazioni cicliche della temperatura intorno a 0°C, a seguito dell'incremento della pressione dell'acqua presente nei pori capillari del calcestruzzo capace di provocare tensioni distruttive sia nei confronti della matrice cementizia che degli aggregati. È ben conosciuto che, l'abbassamento di temperatura al di sotto di 0°C, provoca la trasformazione dell'acqua liquida in ghiaccio con un corrispondente incremento di volume pari a circa il 9%.

Se, l'acqua è contenuta in cavità di piccole dimensioni, come avviene nel caso delle matrici cementizie, le forze di attrazione superficiale esercitate dalle pareti dei pori acquistano un'importanza significativa e, pertanto, possono modificare pesantemente le proprietà dell'acqua rispetto a quelle che la stessa possiede quando è contenuta in un recipiente di grosse dimensioni. In particolare, il punto di congelamento dell'acqua liquida, si abbassa all'aumentare delle forze di attrazione superficiale e, quindi, al diminuire della dimensione dei pori. Tali forze di attrazione superficiale, nascono dal fatto che gli atomi o gli ioni situati sulla superficie di un solido si trovano rispetto a quelli interni in una situazione energeticamente più inquieta e tentano di raggiungere un equilibrio più soddisfacente attraendo atomi estranei che si trovano in forma di vapore in prossimità della superficie del solido. Questo fenomeno prende il nome di "adsorbimento" ed è attribuibile, per l'acqua presente nei pori capillari, a legami di tipo solido-vapore (adsorbimento di Wan der Waals).

Quindi, per effetto delle forze di attrazione esercitate dalle pareti dei prodotti di idratazione, l'acqua presente negli spazi interstratici può solidificare per valori della temperatura che nella realtà non vengono mai conseguiti se non in zone del pianeta poco abitate. Nelle strutture in calcestruzzo realizzate in Italia, le temperature generalmente non scendono al di sotto di –15/-20 °C, è la sola acqua presente nelle porosità capillari e nei macrovuoti (prodotti da difetti di posa in opera e compattazione del getto) che può di fatto trasformarsi in ghiaccio, solidificando, mentre quella presente negli spazi interstratici non ghiaccerà mai rimarrà in una condizione di "super raffreddamento". La pressione (o tensione) di vapore in equilibrio con l'acqua super-raffreddata risulta maggiore del corrispondente valore del vapore in equilibrio con il ghiaccio; la differenza che si viene a creare tra vapore in equilibrio con l'acqua super-raffreddata e vapore in equilibrio con il ghiaccio aumenta al diminuire della temperatura e della dimensione delle porosità: minore è la dimensione dei pori, più basso è il punto di congelamento dell'acqua e, conseguentemente, maggiore è la differenza tra la pressione del vapore in equilibrio con il ghiaccio e con l'acqua super-raffreddata. Pertanto, quando inizia a formarsi il ghiaccio all'interno dei pori capillari, per effetto di questa maggiore pressione l'acqua super-raffreddata (termodinamicamente instabile) tende a muoversi verso i pori capillari al fine di ristabilire l'equilibrio. La conseguenza di questa migrazione è una contrazione della matrice cementizia e la nascita di pressioni che possono superare la resistenza della matrice stessa, promuovendone il degrado del calcestruzzo.

In aggiunta alle **pressioni generate dal super-raffreddamento** si deve anche tener conto che, se nei pori capillari il volume di acqua liquida occupa quasi completamente quello del poro, per effetto della formazione dei primi germi di ghiaccio, l'acqua non congelata viene espulsa generando la nascita di una **pressione idraulica** determinata dalla resistenza opposta al flusso di acqua. Inoltre, anche il contenuto di alcali nella fase acquosa dei pori capillari gioca

un ruolo importante, infatti, per una determinata temperatura, una soluzione interstiziale con una bassa concentrazione di ioni alcalini si trasforma in ghiaccio; per contro, una soluzione a maggiore concentrazione di queste sostanze (caratterizzata da una temperatura di congelamento più bassa) può continuare ad esistere in forma liquida in uno stato di super-raffreddamento. La formazione di ghiaccio nei pori, che contengono la soluzione meno concentrata, determina un aumento della concentrazione locale del soluto a seguito della solidificazione dell'acqua pura, ed essi risultano parzialmente pieni di ghiaccio e per la restante parte di una soluzione alcalina molto concentrata. Al fine di ristabilire l'equilibrio termodinamico tra il ghiaccio e la soluzione non solidificata e l'equilibrio di concentrazione tra la soluzione più concentrata, ove si è formato il ghiaccio, e quella diluita, presente nei pori non interessati dal congelamento, la fase acquosa presente in questi ultimi pori tende a migrare verso le porosità contenenti la soluzione più concentrata generando una **pressione osmotica**.

Dalle considerazioni sopraesposte emerge come per una determinata temperatura e velocità di raffreddamento (caratteristiche del clima del luogo ove la struttura è situata) la pressione che insorge nella matrice cementizia a seguito dell'abbassamento della temperatura al di sotto di 0°C dipende strettamente dal grado di saturazione del calcestruzzo e dalla sua porosità (volume totale e distribuzione dimensionale dei pori).

Relativamente al grado di saturazione, è importante sottolineare come sia i risultati sperimentali che l'esperienza desunta dall'esame delle strutture reali evidenzino che, se esso risulta inferiore all'85% (le pressioni che insorgono per effetto dei cicli di gelo-disgelo non sono sufficienti per superare la resistenza del materiale e, conseguentemente, per produrre un degrado ingegneristicamente significativo. In sostanza, ad un grado di saturazione inferiore all'85% corrisponde un volume d'acqua all'interno dei pori non sufficiente a generare alcuna pressione idraulica (il volume di acqua solidificata può essere ospitato nel poro capillare ove avviene il congelamento). E' presumibile, inoltre, che il ridotto volume di ghiaccio formatosi sia non sufficiente a generare pressioni osmotiche significative, né migrazioni pericolose dell'acqua super- raffreddata verso i pori in cui è presente il ghiaccio. Tenendo presente quanto sopra asserito è evidente come nella progettazione delle strutture esposte a climi rigidi è importante adottare tutti gli accorgimenti necessari per evitare che gli elementi in calcestruzzo si imbibiscano di acqua, anche se non è semplice, né sempre possibile impedire che il grado di saturazione effettivo risulti superiore al valore critico sopramenzionato.

Il degrado in climi rigidi è ulteriormente esaltato in presenza di sali disgelanti e si manifesta a seguito di diversi processi (chimici, fisici ed elettrochimici) che si manifestano simultaneamente nelle strutture reali in funzione della tipologia di sale utilizzato. I sali disgelanti più comunemente impiegati per la rimozione del ghiaccio o per prevenirne la formazione nel settore stradale ed autostradale, e nelle pavimentazioni esterne sono costituiti generalmente da cloruro di calcio oppure da miscele di questo sale con cloruro di sodio eventualmente mescolati con pietrisco di frantumazione per aumentare l'aderenza dei pneumatici al fondo stradale. Essi provocano un severo degrado delle strutture in calcestruzzo per effetto del maggior grado di saturazione conseguente allo scioglimento del ghiaccio, cui si sommano effetti di natura termica ed osmotica.

Foto 3.3.1 – *Degrado per cicli gelo/disgelo*

Foto 3.3.2 – *Degrado per cicli gelo/disgelo*

3.4 Attacco chimico - Le strutture in classe di esposizione XA

Gli aggressivi chimici di origine naturale (non derivanti, cioè da processi industriali) che possono promuovere il degrado del calcestruzzo possono essere presenti sia nei terreni che nelle acque. Per questo motivo, il progettista che si accinge a progettare una struttura interrata o idraulica deve richiedere che venga effettuata un'analisi chimica

finalizzata ad accertare l'eventuale presenza di sostanze aggressive per il calcestruzzo sia nell'acqua che nel terreno a contatto, poiché questo tipo di ammaloramento è più diffuso di quanto non si creda e investe le strutture a contatto con acque o terreni contenenti sostanze chimiche in grado di reagire con alcuni componenti presenti nella pasta di cemento idratata.

Sono innumerevoli le sostanze chimiche che possono promuovere i processi di degrado delle strutture in calcestruzzo e, in linea generale, caratterizzano prevalentemente gli ambienti acidi. Il **magnesio (Mg^{++}) e l'ammonio (NH_4^+),** generalmente presenti nei più diffusi fertilizzanti usati in agricoltura, danno luogo ad una reazione con lo ione calcio dei prodotti di idratazione del cemento generando sali solubili di calcio che vengono facilmente rimossi dall'azione delle acque. Il magnesio, in particolare, si sostituisce ai composti che garantiscono la resistenza meccanica generando un silicato idrato responsabile della perdita parziale delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo.

L'**anidride carbonica libera:** (cioè non combinata in forma di carbonati o bicarbonato) presente nelle acque in forma di acido carbonico (H_2CO_3), reagisce inizialmente con la calce della pasta di cemento formando carbonato di calcio il quale, successivamente, può ulteriormente reagire con l'acido carbonico circostante formando il bicarbonato di calcio; quest'ultimo, per la sua elevata solubilità, viene asportato dalla pasta di cemento. Esiste nelle acque una concentrazione (teorica) di CO_2 libera che è in grado di garantire l'equilibrio, evitando la formazione del bicarbonato di calcio. L'anidride carbonica "aggressiva" rappresenta l'eccesso di anidride carbonica libera nelle acque oltre il valore di equilibrio, cui consegue la formazione del bicarbonato che viene facilmente dilavato dall'acqua a contatto con la struttura. In pratica, la matrice cementizia subisce una perdita di massa con conseguente aumento della porosità e riduzione delle prestazioni meccaniche.

Il più diffuso e pericoloso effetto di degrado della classe XA è senza dubbio rappresentato dai **solfati** presenti nei terreni e nelle acque a contatto con le strutture. Il solfato può provenire o dagli scarichi industriali (artificiale) o dalla decomposizione biologica (naturale) di sostanze organiche contenenti zolfo come avviene per le piante o per i concimi. I terreni alluvionali e quelli coerenti, inoltre, possono contenere pirite (solfuro di ferro) che in alcune situazioni può dare origine alla formazione massiccia di gesso ($CaSO_4$).

In ultimo occorre segnalare che gli impianti fognari, le vasche di depurazione e quelle per la raccolta dei liquami sono un ricettacolo di solfati; in questi casi è facile reperire le analisi chimiche effettuate con regolarità dalle Società di gestione, andando immediatamente a individuare la classe di appartenenza.

Gli effetti di degrado causati dall'attacco solfatico si manifestano sotto forma di espansioni o disallineamenti delle strutture, cui consegue la nascita di quadri fessurativi e di espulsioni di parti dell'elemento; in condizioni estreme si giunge alla completa disgregazione della matrice legante che all'aspetto si presenta come una terra incoerente.

Foto 3.4.1 – *Degrado da attacco chimico: ettringite e thaumasite*

Foto 3.4.2 e 3.4.3 – ***Degrado da attacco chimico***

4. CONCLUSIONI

Le Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 17.01.2018, introducono nei principi fondamentali l'importanza dello studio dell'ambiente con le relative aggressioni sulle strutture in generale e in particolare sulle strutture in calcestruzzo armato, come quella di progetto, al fine di garantire il raggiungimento della vita nominale prevista.

Per "Vita Nominale" si intende il ***tempo durante il quale le strutture e/o i materiali conservano le loro prestazioni iniziali mantenendo il livello di sicurezza e di efficienza funzionale di progetto, per qualsiasi azione e condizione ambientale prevista.***

Tale obiettivo può essere raggiunto, non solo con lo studio delle forme di degrado, ma attraverso un "**percorso che conduce alla durabilità**", partendo dalla progettazione, con la corretta esecuzione, con la maturazione, con un rigido e serrato controllo da parte della Direzione Lavori, con una costante cadenza temporale dei monitoraggi delle strutture, o su particolari di esse, e con azioni manutentive preventive.

Tutto il "*percorso che conduce alla durabilità*" è stato sintetizzato nel presente documento allegato al progetto.

Bibliografia

Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 17.01.2018*;*

UNI EN 206 - *Calcestruzzo - Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità;*

UNI 11104 - *Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità – Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206;*

*Gianluca Pagazzi, "**Progetto Concrete – Le soluzioni più corrette per qualsiasi opera in calcestruzzo",** Dimensione Geometra, 12-2006.*

*Gianluca Pagazzi, "**Progetto Concrete – Calcestruzzo: prescrizioni per garantire la durabilità",** GB News n. 27-2008.*

*Gianluca Pagazzi, "**Pavimentazioni industriali: problematiche e soluzioni nell'uso del calcestruzzo - Parte 1",** Dimensione Geometra, 12-2007.*

*Alessandra Buoso, Gianluca Pagazzi, Luigi Coppola, "**Le Prescrizioni di Capitolato per le Opere in Calcestruzzo**", In Concreto, N. 80, Gennaio/Febbraio 2008, pp. 68-86.*

*Alessandra Buoso, Gianluca Pagazzi, Luigi Coppola, "**Iter progettuale ed esecutivo – I passaggi necessari per garantire la durabilità e la sicurezza delle strutture in c.a.",** GB News n. 30-2009.*

*Gianluca Pagazzi, "**La maturazione dei getti",** In Concreto, N. 98, Gennaio/Febbraio 2011, pp. 84-99. Gianluca Pagazzi, "**Processo esecutivo per garantire la durabilità e la sicurezza delle strutture in c.a.",** In Concreto, N. 102, Settembre/Ottobre 2011, pp. 70-75.*

*Gianluca Pagazzi, "**Degrado delle strutture in c.a.: gli ambienti aggressivi per il calcestruzzo e l'acciaio.",** In Concreto, N. 104, Gennaio/Febbraio 2012, pp. 64-72.*

*Luigi Coppola, "**Concretum**", pp.660, McGraw-Hill, Milano, Italia (2007),ISBN978-88-386-6465-6.I;*

*Luigi Coppola, "**Il Manuale del Calcestruzzo di Qualità**", pp. 350, Il Sole 24 Ore, Milano, Italia (Aprile 2008), ISBN 978 88 324 7027 – 7;*

*Luigi Coppola, "**Concrete Tender**", pp.300, Ed. Studium Bergomense s.c., Italia (Ottobre 2008), ISBN 978-88- 89555-07-1;*

*L. Coppola, G. Pagazzi, A. Buoso, A. Caddeu, R. Caiaro, G. Ruggeri, D. Ruggeri, A. Farci, M. Iuorio, M. Conti, G. Albani, "**Linee guida per la prescrizione delle opere in c.a."**, Il Sole 24ore (Ottobre 2007).*

*G. Pagazzi, R. Caiaro, E. Ciferri, G. Ruggeri, D. Ruggeri, A. Farci, M. Iuorio, G. Albani, **"I controlli sul c.a. - Linee guida per la Direzione Lavori"**, Progetto Concrete - (Ottobre 2009).*

*G. Pagazzi, R. Caiaro, E. Ciferri, G. Ruggeri, D. Ruggeri, A. Farci, M. Iuorio, G. Albani, **"Le forniture di c.a. - Linee guida per la Imprese di Costruzione"**, Progetto Concrete – Edilstampa - (Ottobre 2009).*

*G. Pagazzi, G. Ruggeri, D. Ruggeri, A. Farci, M. Iuorio, G. Albani, **"I controlli sul c.a. - Linee guida per la Direzione Lavori"**, Progetto Concrete - (Settembre 2011).*

*G. Pagazzi, G. Ruggeri, D. Ruggeri, A. Farci, M. Iuorio, G. Albani, **"Le forniture di c.a. - Linee guida per la Imprese di Costruzione"**, Progetto Concrete (Settembre 2011).*