

**(PR-E-1059) - INTERVENTI URGENTI PER IL RIPRISTINO  
 DELLA CONDIZIONE DI SICUREZZA DEI MANUFATTI DELLE  
 CASSE DI ESPANSIONE, DI MONTE E DI VALLE, DEL  
 TORRENTE ENZA NEI COMUNI DI MONTECHIARUGOLO (PR)  
 E MONTECCHIO EMILIA (RE)**

**PROGETTO ESECUTIVO**

**MANUFATTI DI MONTE**

**RELAZIONE SUI MATERIALI**

Ø	01/07/2020	Prima emissione	L. D'Antonio	A. De Paola	E. Baldovin
<b>REV.</b>	<b>DATA</b>	<b>MODIFICHE</b>	<b>REDATTO</b>	<b>CONTROLLATO</b>	<b>APPROVATO</b>

**IL PROGETTISTA:**

Dott. Ing. Ezio Baldovin


 GEOTECNA PROGETTI  
 Milano - Roma

**IL R.U.P.:**

Dott. Ing. Mirella Vergnani

<b>3</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>Ø</b>
<b>N. COMMESSA</b>				<b>PROGR.</b>		<b>REV.</b>	



## **INDICE**

<b>1.</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>NORME DI RIFERIMENTO.....</b>	<b>1</b>
<b>3.</b>	<b>METODI DI CARATTERIZZAZIONE DELLE PROPRIETA' MATERICHE.....</b>	<b>2</b>
3.1	ACCIAI.....	2
3.2	CALCESTRUZZI ESISTENTI .....	3
3.2.1	<i>Degrado dovuto alla corrosione delle armature per carbonatazione .....</i>	<i>7</i>
3.2.2	<i>Degrado dovuto alla corrosione delle armature per attacco da cloruri.....</i>	<i>8</i>
3.2.3	<i>Degrado della matrice cementizia dovuto a cicli di gelo-disgelo.....</i>	<i>8</i>
3.2.4	<i>Degrado della matrice cementizia dovuto ad attacco chimico .....</i>	<i>9</i>
3.2.5	<i>Abrasione/cavitazione/erosione superficiale del calcestruzzo.....</i>	<i>9</i>
3.2.6	<i>Altre forme di degrado delle strutture in calcestruzzo armato .....</i>	<i>10</i>
3.2.6.1	Reazione alcali-aggregato.....	10
3.2.6.2	Fessurazioni da ritiro, termiche o strutturali.....	10
3.3	NUOVI MATERIALI.....	11
3.3.1	<i>Prodotti per la protezione.....</i>	<i>11</i>
3.3.2	<i>Prodotti per il ripristino.....</i>	<i>11</i>
3.3.2.1	Malte da ripristino.....	12
3.3.3	<i>Prodotti per la riparazione.....</i>	<i>13</i>
3.3.3.1	Calcestruzzi da ripristino/riparazione.....	13
<b>4.</b>	<b>PROPRIETA' DEI MATERIALI .....</b>	<b>14</b>
4.1	MATERIALI ESISTENTI - MANUFATTO LIMITATORE DI MONTE .....	14
4.1.1	<i>Ramo in alveo .....</i>	<i>15</i>
4.1.1.1	Platea di Fondazione – Vasca.....	15
4.2	ACCIAI.....	15
4.2.1.1	Strato protettivo .....	17
4.2.1.2	Trave laminatrice .....	17
4.3	NUOVI MATERIALI .....	18
<b>5.</b>	<b>ANALISI DELLE ACQUE .....</b>	<b>19</b>

**INDICE FIGURE**

<i>Fig.3.1 – Armature in alveo abrase. ....</i>	<i>3</i>
<i>Fig.3.2 – Fattore di disturbo.....</i>	<i>4</i>
<i>Fig.3.3 – Classi ambientali per l'usura .....</i>	<i>4</i>
<i>Fig.3.4 – Classe di esposizione ambientale secondo UNI EN 206-1 .....</i>	<i>5</i>
<i>Fig 3.5 – Classe di esposizione secondo le UNI EN 206-1 .....</i>	<i>6</i>
<i>Fig.3.6 – Classi di degrado secondo le UNI EN 1504.....</i>	<i>6</i>
<i>Fig.4.1 - Manufatto limitatore di monte con impalcato.....</i>	<i>14</i>
<i>Fig.4.2 - Manufatto limitatore di monte – sezione trasversale della vasca</i>	<i>15</i>
<i>Fig.4.3 – Risultati di laboratorio sulle armature metalliche.....</i>	<i>16</i>
<i>Fig.4.4 – Prescrizione sugli acciai previste dalle norme all'epoca della costruzione.....</i>	<i>16</i>

## **1. PREMESSA**

Nell'ambito della progettazione degli interventi denominati “(PR-E-1059) LAVORI URGENTI DI MESSA IN SICUREZZA DEL MANUFATTO LIMITATORE DELLA CASSA DI ESPANSIONE DI MONTE DEL FIUME ENZA NEI COMUNI DI MONTECCHIO EMILIA (RE) E MONTECHIARUGOLO (PR)”, la presente relazione è stata redatta a partire dall'interpretazione dei risultati delle indagini strutturali (ved. documento 3644\_030 - Manufatti di Monte - Relazione interpretativa dei risultati di laboratorio) con lo scopo di stimare lo stato dei materiali della vasca e della trave laminatrice del Manufatto Limitatore di Monte nella tratta in alveo.

Le analisi sono svolte su opere che risultano costruite nel periodo compreso tra il 1996 e il 2003.

## **2. NORME DI RIFERIMENTO**

Il progetto sarà eseguito in osservanza di tutte le seguenti Leggi, Decreti, Norme e Direttive (comprese eventuali varianti, completamenti o integrazioni alle stesse) attualmente vigenti e precisamente:

- LEGGE 5 NOVEMBRE 1971 N. 1086 G.U. N. 321 DEL 21 DICEMBRE 1971  
“Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica”;
- LEGGE 2 FEBBRAIO 1974, N. 64 G.U. N. 076 DEL 21/03/1974  
“Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche”;
- D.M. INFRASTRUTTURE TRASPORTI 17 GENNAIO 2018  
”Norme Tecniche per le Costruzioni”;
- CIRCOLARE MINISTERO INFRASTRUTTURE TRASPORTI 21 GENNAIO 2019, N. 7;  
”Istruzioni per l'applicazione delle Nuove Norme tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008”;
- UNI EN 206:2016 ;  
“Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità”;
- UNI 11104:2016;  
” Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Specificazioni complementari per l'applicazione della EN 206”;
- UNI EN 1504

“Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture in calcestruzzo. Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione di conformità”.

- CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI SERVIZIO TECNICO CENTRALE

“Linee guida per la valutazione delle caratteristiche del calcestruzzo in opera”. Sett. 2017

### **3. METODI DI CARATTERIZZAZIONE DELLE PROPRIETA' MATERICHE**

La fase progettuale passa per lo studio dei materiali costituenti le opere. In particolare devono essere analizzati i calcestruzzi e gli acciai. I materiali sono studiati tramite prove e indagini normalizzate eseguite da un laboratorio autorizzato. I calcestruzzi sono classificati tramite la prova di schiacciamento di carote cilindriche estratte dai manufatti esaminati. dai risultati delle prove di compressione è possibile risalire ad una opportuna classe di resistenza. Gli acciai sono classificati tramite una prova di trazione. Tutto lo studio approntato prevede inoltre anche la valutazione dello stato di degrado dei materiali. La corretta individuazione all'esposizione degli agenti esterni è fondamentale per determinare lo stato di degrado e il conseguente intervento. A seconda della penetrazione dei fenomeni aggressivi le tipologie degli interventi sono classificati come:

- sistema di protezione
- sistema di ripristino
- sistema di riparazione.

Al fine di 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, dalla corrosione delle armature e dai cicli di gelo e disgelo. I nuovi materiali, sono scelti in funzione dell'obiettivo di soddisfare i requisiti specifici per contrastare il degrado rilevato al fine di limitarne la progressione nel corso della vita utile della struttura e di minimizzare le manutenzioni ordinarie.

#### **3.1 Acciai**

Sono catalogati sia in funzione della tensione di rottura/snervamento che della loro categoria commerciale relativa al periodo di costruzione dei manufatti.

Gli acciai sono verificati nei confronti della corrosione e delle abrasioni indotte dal trasposto detritico.



*Fig.3.1 – Armature in alveo abrase.*

Non sono stati rilevati segni di attacco alle armature, le quali sono risultate integre in tutte le verifiche effettuate, sia dirette (visive) sia indirette (analisi delle profondità dei fenomeni di degrado).

Le uniche armature che hanno manifestato segni di degrado riguardano quelle in alveo dove l'abrasione ha parzialmente usurato i ferri esposti, i quali però non risultano corrosi (v. foto 3.1) .

I nuovi materiali saranno conformi alle NTC2018.

In particolare, se necessario, si adotteranno acciai tipo B450C per le armature ad aderenza migliorata e acciai B450A per le reti elettrosaldate.

### **3.2 Calcestruzzi esistenti**

I cls sono classificati in funzione della resistenza a compressione attraverso prove su carote cilindriche e confrontati, ove riscontrabile, con le caratteristiche previste nel progetto originario.

Le “Linee guida per la valutazione delle caratteristiche del calcestruzzo in opera” al p.to 3.3, stabiliscono che, nel caso di costruzioni esistenti, non si farà riferimento ai valori  $f_{ck}$  ed  $R_{ck}$  caratteristici, bensì si calcoleranno i valori medi cilindrici  $f_{m(n)is}$  o cubici  $R_{m(n)is}$ , ai quali andranno applicati i “fattori di confidenza” FC che ridurranno preliminarmente, in base al livello di conoscenza conseguito nelle indagini conoscitive, i valori medi di resistenza dei materiali.

Le Linee Guida sottolineano come l'estrazione delle carote dalla struttura, per quanto condotta con le attenzioni sopra raccomandate, produca comunque un disturbo al calcestruzzo, per cui nel risultato di prova sulla carota si manifesta un decremento di resistenza. Per tenere conto di tale decremento, le citate Linee Guida e la Circ.N.7/19 hanno introdotto un Fattore di disturbo  $F_d$ , moltiplicativo della resistenza ottenuta dalla prova; il valore di  $F_d$  decresce

all'aumentare della resistenza ***f<sub>carota</sub>*** rilevata sulla specifica carota, come indicato nella tabella seguente:

Tabella C11.2.6.1.- Fattore di disturbo in funzione della resistenza a compressione delle carote ( $H/D=1$ ;  $d=100$  mm)

$f_{carota}[N/mm^2]$	10 ÷ 20	20 ÷ 25	25 ÷ 30	30 ÷ 35	35 ÷ 40	> 40
<b>F<sub>d</sub></b>	1.10	1.09	1.08	1.06	1.04	1.00

Fig.3.2 – Fattore di disturbo

La UNI EN 12504-1 prevede che, se la resistenza potenziale è espressa in valori cubici, l'eventuale determinazione della resistenza strutturale va effettuata su campioni ricavati da carote aventi rapporto  $h/d = 1$  (con tolleranza  $\pm 0,05$ ); se invece la resistenza potenziale è espressa in valori cilindrici, l'eventuale determinazione della resistenza strutturale va effettuata su campioni ricavati da carote aventi rapporto  $h/d = 2$  (con tolleranza  $\pm 0,05$ ).

Pertanto, il valore della resistenza strutturale di ciascuna carota si determina come segue:

$$f_{carota} * F_d = R_{c, is}$$

nel caso di provini ottenuti da carote con rapporto  $h/d=1$

$$f_{carota} * F_d = f_{c, is}$$

nel caso di provini ottenuti da carote con rapporto  $h/d=2$

I valori saranno divisi per il fattore FC.

I valori così ottenuti saranno confrontati con quelli riportati nella tabella della fig. 3.4 a seconda della classe di esposizione ambientale.

Le UNI EN206-1 stabiliscono le classi di esposizione ambientali.

Vi è una ulteriore classe ambientale relativa alla abrasione meccanica la XM, ove M sta per Mechanical abrasione (azione meccanica-abrasione, usura, ecc...)

Aggressione di usura		
XM1	Moderata sollecitazione di usura	Pavimenti industriali portanti o rinforzati sollecitati da transito di mezzi con ruote con pneumatici.
XM2	Forte sollecitazione di usura	Pavimenti industriali portanti o rinforzati sollecitati da transito di mezzi con ruote con pneumatici o gomma piena
XM3	Fortissima sollecitazione di usura	Pavimenti industriali portanti o rinforzati sollecitati da transito di carrelli elevatori su rulli rivestiti con elastomeri o acciaio.
		Superfici soggette a frequente transito di mezzi con catene. Strutture idrauliche in acque trasportanti materiali detritici, ad es. bacini di ritenzione.

Fig.3.3 – Classi ambientali per l'usura



<b>Classi di esposizione ambientale secondo UNI EN 206-1</b>								
Classe di esposizione ambientale	Descrizione dell'ambiente di esposizione	Esempi di condizioni ambientali	UNI 9858	A/C massimo	Contenuto minimo di cemento kg/m <sup>3</sup>	Rck minima N/mm <sup>2</sup>	Contenuto minimo di aria %	Copriferro minimo Mm
<b>1 Assenza di rischio di corrosione o attacco</b>								
X0	Molto secco	Clis per interni di edifici con umidità dell'aria molto bassa	1	-		C12/15	-	15
<b>2 Corrosione delle armature per effetto della carbonatazione</b>								
XC1	Secco o permanentemente bagnato	Clis per interni di edifici con umidità relativa bassa o immerso in acqua	2a	0,65	260	C20/25	-	20
XC2	Bagnato, raramente secco	Superfici in cls a contatto con acqua per lungo tempo es. fondazioni	2a	0,60	280	C25/30	-	20
XC3	Umidità moderata	Clis per interni con umidità relativa moderata o alta e cls all'esterno protetto dalla pioggia	5a	0,55	280	C30/37	-	30
XC4	Ciclicamente bagnato ed asciutto	Superfici in cls a contatto con l'acqua, non nella classe XC2.	4a, 5b	0,50	300	C30/37	-	30
<b>3 Corrosione delle armature per effetto dei cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare</b>								
XD1	Umidità moderata	Superfici in cls esposte a nebbia salina	5a	0,55	300*	C30/37	-	30
XD2	Bagnato, raramente asciutto	Piscine; cls esposto ad acque industriali contenenti cloruri	4a, 5b	0,55	300	C30/37	-	30
XD3	Ciclicamente bagnato ed asciutto	Parti di ponti esposte a spruzzi contenenti cloruri, pavimentazioni di parcheggi	5c	0,45	320	C35/45	-	40
<b>4 Corrosione delle armature indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare</b>								
XS1	Esposto alla nebbia salina ma non all'acqua di mare	Strutture prossime o sulla costa	4a, 5b	0,50	300	C30/37	-	30
XS2	Permanentemente sommerso	Parti di strutture marine	5c	0,45	320	C35/45	-	40
XS3	Zone esposte alle onde o alla marea	Parti di strutture marine	5c	0,45	340	C35/45	-	40
<b>5 Attacco dei cicli di gelo/disgelo con o senza sali disgelanti</b>								
XF1	Moderata saturazione d'acqua in assenza di sali disgelanti	Superfici verticali in cls esposte alla pioggia e al gelo	2b	0,55	300	C30/37	-	30
XF2	Moderata saturazione d'acqua in presenza di sali disgelanti	Superfici verticali in cls di strutture stradali esposte al gelo e nebbia dei sali disgelanti	3, 4b	0,55	300	C25/30	4,0 e aggregati resistenti al gelo/disgelo	30
XF3	Elevata saturazione d'acqua in assenza di sali disgelanti	Superfici orizzontali in cls esposte alla pioggia e al gelo	2b	0,50	320	C30/37	4,0 e aggregati resistenti al gelo/disgelo	30
XF4	Elevata saturazione d'acqua in presenza di sali disgelanti o acqua di mare	Strade e impalcati da ponte esposti ai sali disgelanti. Superfici in cls esposte direttamente a nebbia contenente sali disgelanti	3, 4b	0,45	340	C30/37	4,0 e aggregati resistenti al gelo/disgelo	40
<b>6 Attacco chimico</b>								
XA1	Ambiente chimico debolmente aggressivo (vd. prospetto 2 della EN 206)	-	5a	0,55	300	C30/37	-	30
XA2	Ambiente chimico moderatamente aggressivo (vd. prospetto 2 della EN 206)	-	4°, 5b	0,50	320 cemento resistente ai solfati	C30/37	-	30
XA3	Ambiente chimico fortemente aggressivo (vd. prospetto 2 della EN 206)	-	5c	0,45	360 cemento resistente ai solfati	C35/45	-	40

Fig.3.4 – Classe di esposizione ambientale secondo UNI EN 206-1

Le strutture in calcestruzzo armato sono sensibili a diverse forme di degrado. In primo luogo conviene distinguere il degrado che si manifesta a seguito dell'ossidazione delle armature da quello che invece riguarda la matrice cementizia. L'impostazione della UNI EN 206-1, adottata anche dal DM 17/01/2018, considera il Degrado Strutturale come il risultato di uno o più fenomeni "elementari" ciascuno descritto da una Classe di Esposizione.

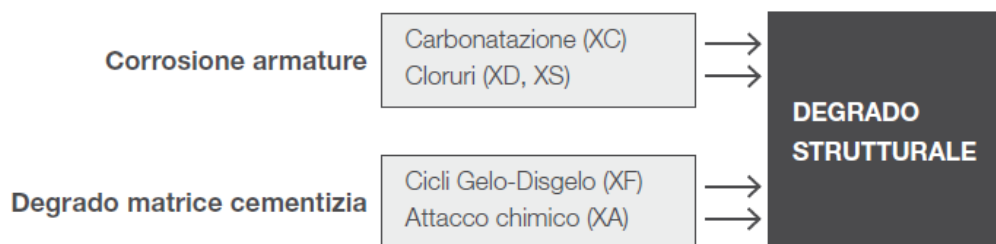


Fig 3.5 – Classe di esposizione secondo le UNI EN 206-1

Tuttavia gli interventi di ripristino materico sono meglio dettagliati dalla Norma UNI EN 1504 “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture in calcestruzzo. Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione di conformità”, la quale codifica razionalmente le procedure di intervento sulle strutture esistenti, anche sulla base di ulteriori cause di degrado.



Fig.3.6 – Classi di degrado secondo le UNI EN 1504

### 3.2.1 Degrado dovuto alla corrosione delle armature per carbonatazione

Si tratta di una delle forme di degrado più comuni di natura corrosiva. L'anidride carbonica presente nell'aria tende a penetrare, attraverso il copriferro, all'interno degli elementi strutturali evidentemente esposti all'aria. L'ossido di calcio (CaO) presente all'interno della matrice cementizia, come sottoprodotto della reazione di idratazione del cemento, reagisce con l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) trasformandosi in carbonato di calcio (CaCO<sub>3</sub>). Di per sé questa reazione non porta ad alcun degrado, anzi, in un certo senso rende più compatto il copriferro a seguito della sostituzione di un componente molto dilavabile (CaO) con uno invece più stabile (CaCO<sub>3</sub>). Tuttavia, il CaO presente nella matrice cementizia risulta essenziale perché determina un valore del pH estremamente alcalino (circa 13) nel quale le armature tendono a "passivarsi", ovvero a rivestirsi di un sottilissimo film di ossido che le protegge dalla corrosione. La progressiva riduzione del contenuto di CaO è accompagnata da una progressiva riduzione del valore del pH del calcestruzzo. Quando quest'ultimo arriva a valori prossimi a 9, il film passivante che riveste le armature diventa instabile e si disgrega, rendendo le barre vulnerabili alla corrosione. La corrosione potrà tuttavia avvenire solo quando acqua (H<sub>2</sub>O) ed ossigeno (O<sub>2</sub>) giungeranno, penetrando sempre attraverso il copriferro, a ridosso delle armature. Pertanto le strutture sensibili a questa tipologia di degrado sono quelle esposte all'aria (presenza di CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>) e al contatto con l'acqua (H<sub>2</sub>O), in forma alterna. Una volta avviato il processo di corrosione, questo porterà alla formazione di ossidi di ferro (quella che comunemente viene chiamata "ruggine") che essendo più voluminosi del metallo di partenza tenderanno a "spingere" il copriferro verso l'esterno portando al suo distacco. Il degrado da carbonatazione quando attacca le armature è ben riconoscibile.

È possibile stimare il tempo necessario al fronte di carbonatazione per giungere a ridosso delle armature con la seguente formula:

$$t_{res} = t_{ind} * (c/d)^2 \quad [1]$$

dove:

***t<sub>res</sub>*** è il tempo residuo (in anni) prima della depassivazione delle armature e dell'innesco della corrosione;

***t<sub>ind</sub>*** è il numero di anni trascorso tra la realizzazione dell'opera e l'istante in cui è stato misurato lo spessore di carbonatazione (tempo di indagine);

***c*** è lo spessore del copriferro, valutato o in maniera diretta, attraverso indagine diretta, o indirettamente, mediante una indagine pacometrica;

***d*** è la misura dello spessore dello strato carbonatato al tempo ***t<sub>ind</sub>***.

La valutazione dell'intervento è subordinata al rapporto tra il tempo residuo e la vita utile del manufatto decurtato dell'età (***V<sub>nres</sub>*** vita nominale residua). Posto

$$V_{nres} = V_n \cdot t_{ind}$$

si determina il coefficiente di sicurezza nei confronti della carbonatazione

$$\text{Coeff. sic.} = t_{res} / V_{nres} > 1$$

Se il parametro **Coeff. sic.** risulta minore dell'unità è opportuno intervenire prima che la carbonatazione raggiunga le armature in modo da evitare che il copriferro possa subire fessurazioni.

Ove il valore fosse lievemente maggiore ma prossimo all'unità è necessario prevedere uno *screening* periodico con tempi stretti per valutare l'andamento temporale del fenomeno anche dopo un intervento di protezione.

### 3.2.2 Degrado dovuto alla corrosione delle armature per attacco da cloruri

Come la carbonatazione è un degrado di natura corrosiva. I cloruri presenti nei sali disgelanti applicati d'inverno sulle strutture o quelli di origine marina possono determinare forme di degrado molto intense sul calcestruzzo armato. A seguito del loro progressivo ingresso attraverso il copriferro, essi tendono ad accumularsi a ridosso delle barre di armatura, dove, raggiunta una concentrazione limite nota come concentrazione critica, determinano una depassivazione delle armature (analoga a quella conseguente al processo di carbonatazione). In funzione di una serie di parametri, tra i quali il più importante è certamente la permeabilità del calcestruzzo ai cloruri, l'attacco da parte di questi ultimi può avvenire più o meno rapidamente. Una volta depassivate, le armature sono vulnerabili all'azione dell'acqua e dell'ossigeno che, se presenti contemporaneamente sulla loro superficie, determinano l'innescare dei fenomeni di ossidazione. La corrosione da cloruri, a differenza di quella da carbonatazione che si presenta in genere come un fenomeno distribuito, è molto insidiosa perché è spesso localizzata in specifici punti dell'armatura. In questi punti, si verifica il fenomeno di "pitting corrosion" che in tempi molto brevi porta dapprima ad una forte riduzione della sezione resistente ed infine ad una rottura delle barre.

### 3.2.3 Degrado della matrice cementizia dovuto a cicli di gelo-disgelo

È un fenomeno di natura fisica. Le strutture esterne esposte al contatto con acqua tendono ad assorbirla per capillarità. Normalmente questo fenomeno non comporta alcun problema, ma per le strutture situate in ambienti dove la temperatura scende periodicamente sotto 0 °C diventa un problema rilevante. Al di sotto di tale temperatura, infatti, l'acqua assorbita dal conglomerato e

presente nelle porosità capillari, si trasforma in ghiaccio aumentando di volume. A seguito di tale variazione dimensionale, nascono delle tensioni di trazione nel materiale che portano alla sua rottura. Il risultato di un certo numero di cicli di gelo-disgelo è quello di una completa disgregazione della parte corticale delle strutture. Se si tratta poi di una struttura armata, il degrado coinvolge anche le armature che, private del copriferro, sono in balia della corrosione. Questo fenomeno si amplifica ad esempio nel caso delle infrastrutture montane dove, nei periodi invernali, si fa uso di sali disgelanti, con particolare riferimento al Cloruro di Calcio ( $\text{CaCl}_2$ ). Questo sale provoca una sorta di dilavamento superficiale del calcestruzzo in quanto reagisce con il  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presente nella matrice cementizia. È chiaro che la combinazione dei due fenomeni (gelo-disgelo ed applicazione del  $\text{CaCl}_2$ ) può determinare forme di degrado particolarmente intense.

#### **3.2.4 Degrado della matrice cementizia dovuto ad attacco chimico**

L'aggressione per attacco chimico, ed in particolare quello solfatica, rappresenta una delle forme di degrado più aggressive. Essa riguarda direttamente la matrice cementizia che, a contatto con tali sostanze, tende a manifestare perdite di massa, espansioni, disallineamenti, deformazioni e fessurazioni. In caso di attacchi particolarmente intensi, gli elementi strutturali possono subire importanti penalizzazioni di resistenza, fino a compromettere la stabilità e la sicurezza della struttura. Inoltre, come nel caso dei fenomeni di gelo-disgelo, la fessurazione e disgregazione del copriferro espone le eventuali armature agli agenti ossidanti. Le principali sostanze chimiche che possono minare la durabilità del calcestruzzo sono:

- Solfati ( $\text{SO}_4^{2-}$ )
- Magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ )
- Ammonio ( $\text{NH}_4^{++}$ )
- $\text{CO}_2$  libera
- Acidi

#### **3.2.5 Abrasione/cavitazione/erosione superficiale del calcestruzzo**

Per i calcestruzzi in alveo sono stati rilevati fenomeni di abrasione/erosione superficiale. È un attacco di natura fisica. L'abrasione superficiale del conglomerato è dovuta all'azione delle sabbie trasportate in sospensione o sul fondo dalla corrente e degli urti di ghiaie e ciottoli trascinati sul fondo. L'erosione riguarda inizialmente la pasta di cemento che è più vulnerabile, in seguito vengono rimosse le particelle di aggregato in superficie: si instaura un processo inarrestabile al perdurare della causa. Anche la cavitazione produce l'erosione del conglomerato: in presenza di correnti con forte velocità, anche senza

trasporto solido, localmente si possono creare riduzioni di pressione fino a raggiungere il valore della tensione di vapore; quando le bollicine di vapore giungono in una zona a più alta pressione subiscono il collasso. Se la cavitazione avviene vicino al conglomerato cementizio, questo è sottoposto ad innumerevoli urti che causano erosione.

### **3.2.6 Altre forme di degrado delle strutture in calcestruzzo armato**

#### **3.2.6.1 Reazione alcali-aggregato**

Coinvolge quei conglomerati confezionati con aggregati contenenti forme particolari di silice reattiva che, reagendo con l'acqua e gli alcali ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) provenienti dal cemento, producono una reazione espansiva a carattere distruttivo. Oltre che dal cemento, gli alcali  $\text{Na}^+$  possono derivare anche dalla applicazione del sale disgelante  $\text{NaCl}$ . La reazione si manifesta attraverso diffuse fessurazioni del copriferro, di intensità più o meno marcata a seconda del contenuto di silice negli aggregati e di alcali nel cemento. In presenza di tale degrado, la durabilità strutturale viene seriamente compromessa, in quanto il copriferro non riesce a svolgere la sua funzione protettiva. Nelle forme più intense, la fessurazione può essere tale da compromettere la staticità dell'elemento strutturale o dell'intera struttura.

#### **3.2.6.2 Fessurazioni da ritiro, termiche o strutturali**

Gli elementi strutturali interessati da fessurazioni o microfessurazioni possono subire una notevole penalizzazione di durabilità. Le fessure, infatti, rappresentano vere e proprie vie di accesso preferenziali degli agenti aggressivi esterni. Anidride carbonica, Cloruri, Solfati, Ossigeno e acqua possono penetrare facilmente attraverso il copriferro lesionato e degradare in tempi rapidi sia il calcestruzzo che le barre di armatura. Le fessure possono svilupparsi per una serie di motivi. I principali sono:

- **Ritiro igrometrico**, ovvero la variazione dimensionale (contrazione) che il calcestruzzo subisce quando è esposto in ambienti insaturi di umidità. Tale contrazione, quando impedita dal vincolo strutturale, determina la nascita di coazioni interne di trazione che sfociano in fessure.
- **Gradienti termici** derivanti da differenti temperature tra la periferia della struttura ed il nucleo dei getti di calcestruzzo. Il caso più comune è quello della realizzazione di getti massivi.
- **Applicazione di carichi statici o dinamici** che comportano la nascita di tensioni di trazione superiori alla resistenza a trazione del calcestruzzo. L'acqua può penetrare all'interno del calcestruzzo mettendo in soluzione l'idrossido di calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Il successivo processo di evaporazione porta questa soluzione di calce verso la superficie, dove, in presenza di anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ), si trasforma in carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), caratterizzato da una colorazione bianca.

### **3.3 Nuovi materiali**

Gli interventi saranno disciplinati nella specifica Relazione Tecnica Generale. Essi sono riassumibili in tre categorie sostanziali:

- Sistemi di protezione
- Sistemi di ripristino
- Sistemi di riparazione.

I prodotti commerciali per tali interventi devono essere a marchiatura C.E. Per i conglomerati da utilizzare in alveo o come pavimentazione si farà riferimento a prodotti specifici ad alta prestazione rispetto ai fenomeni di degrado di natura fisica, chimica, meccanica, e corrosiva come meglio esplicitato al cap. 4.

Un prodotto che ben si presta alle richieste progettuali è rappresentato dal calcestruzzo ad alta prestazione con specifiche caratteristiche.

#### **3.3.1 Prodotti per la protezione**

I principali prodotti in commercio prevedono:

- premiscelato elasto-cementizio finalizzato ad ottenere uno strato protettivo e impermeabile continuo sulla superficie del calcestruzzo;
- Rete in fibra di vetro 4x4,5 con grammatura 150 g/mq;
- Promotori di adesione per supporti cementizi e sistemi protettivi;
- Additivo idrofobizzante per calcestruzzi;
- nei calcestruzzi soggetti a reazioni alcali-aggregato può essere utilizzato un prodotto a base di litio che consente di conservare l'integrità della struttura.

#### **3.3.2 Prodotti per il ripristino**

Si farà riferimento ai seguenti prodotti commerciali.

- Inibitore di corrosione per la protezione delle armature .
- prodotti liquido a base di litio capaci di bloccare l'evoluzione della reazione alcali aggregato e di conservare l'integrità della struttura.
- Malta tixotropica monocomponente di classe R2.
- Malta tixotropica monocomponente di classe R2 (Media Resistenza) per rasatura.
- Malta tixotropica fibrorinforzata di classe R3 o R4.
- Sigillanti per chiusura delle fessure.
- Agenti stagionanti specificamente studiati per garantire alle malte l'adeguata stagiona umida in tutte le condizioni climatiche.

- Prodotti disarmanti ideali per garantire una adeguata idratazione della malta nella zona corticale e favorire nel contempo una fase di disarmo agevole e veloce.
- Rete in fibra di vetro 4x4,5 con grammatura 150 g/mq.

### **3.3.2.1 Malte da ripristino**

Negli interventi di ripristino e rinforzo di strutture in c.a. possono essere utilizzate malte cementizie, definite malte da ripristino.

La norma UNI EN 206-1:2016 “*Calcestruzzo – Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità*” definisce al Paragrafo 1 il requisito di classificazione di una malta rispetto al calcestruzzo, stabilito nel diametro massimo dell’aggregato pari a 4 mm. Di conseguenza, conglomerati cementizi con aggregato avente diametro massimo minore di 4 mm sono da considerarsi malte. Le principali tipologie di intervento possibili possono essere così classificate:

- Interventi di protezione dello strato corticale del calcestruzzo integro;
- Interventi di ripristino
- del calcestruzzo ammalorato con armature integre;
- di calcestruzzo ammalorato e dell’armatura esistente;
- Interventi di riparazione di sezioni in calcestruzzo, quali incrementi di sezioni, ringrossi di sezioni di pile o pulvini sostituzione di spessori consistenti, superiori ai copriferri, di calcestruzzo.

La UNI EN 1504 definisce quattro classi di malte da ripristino, suddividendole in malte per riparazioni strutturali e non strutturali. In particolare le malte per uso non strutturale sono identificate dalle sigle R1 e R2, mentre le sigle R3 e R4 indicano malte per uso strutturale. Non è ammesso l’impiego di malte R1 e R2 per qualsiasi uso di tipo strutturale. In particolare per uso strutturale sono ammesse solo malte di classe R3 e R4. **L’impiego di malte di classe R1, R2, R3 e R4 è ammesso solo ed esclusivamente nel caso in cui siano dotate di Marcatura CE.**

Nel caso di utilizzo di malte da ripristino con implicazioni di tipo strutturale, quali a titolo di esempio interventi di ricostruzione degli strati di copriferro o di rinforzo strutturale, trova applicazione il Decreto Ministeriale 17.01.2018 e relativa Circolare n. 7/2019.

La malta da ripristino deve quindi essere classificata secondo la stessa metodologia prevista per il calcestruzzo. In particolare la prescrizione della malta da ripristino deve essere caratterizzata almeno mediante la classe di resistenza, la classe di consistenza, il diametro massimo dell’aggregato e la classe di esposizione.



### **3.3.3 Prodotti per la riparazione**

- Inibitore di corrosione migratorio a protezione dell'interfaccia ferro-calcestruzzo delle strutture degradate.
- prodotti liquido a base di litio capaci di bloccare l'evoluzione della reazione alcali-aggregato e di conservare l'integrità della struttura.
- Malta per rasatura (Classe R3).
- Malta tixotropica (Classe R4)
- Malta fluida (Classe R4)
- Betoncino fluido (Classe R4)
- Sigillante per chiusura delle fessure
- Prodotto colabile per ancoraggi e per riprese di getto strutturali.
- Agenti stagionanti specificamente studiati per garantire alle malte l'adeguata stagionatura umida in tutte le condizioni climatiche.
- Prodotti disarmanti per garantire un'adeguata idratazione della malta nella zona corticale e favorire nel contempo una fase di disarmo agevole e veloce.
- Calcestruzzi ad alta prestazione come specificato a seguire.

#### **3.3.3.1 Calcestruzzi da ripristino/riparazione**

Le principali tipologie di intervento possibile possono essere così classificate:  
Interventi di ripristino dello strato corticale del calcestruzzo ammalorato, per spessori non inferiori a 40 mm;

Interventi di ripristino di strati corticali di calcestruzzo ammalorato e dell'armatura esistente, per spessori non inferiori a 40 mm;

Interventi di rinforzo di sezioni in calcestruzzo, quali incrementi di sezioni, ringrossi di sezioni di pile o pulvini, solitamente per spessori maggiori di 40 mm.

Le prescrizioni sul calcestruzzo secondo le NTC 2018 par. 11.2.1 prevedono, a seconda la destinazione d'uso del materiale:

classe di resistenza,

classe di esposizione ambientale UNI EN 206: 2016,

classe di consistenza al getto,

diametro massimo aggregato,

classe di contenuto in cloruri, nel caso di armature di pre o post-tensione permanentemente incorporate nei getti.

Saranno analizzati anche cls speciali a seconda le destinazioni d'uso a cui saranno destinati.

Lo studio passa per la valutazione delle condizioni ambientali del sito ove sorge la costruzione e quelle di impiego. Si devono fissare le caratteristiche del calcestruzzo da impiegare (composizione e resistenza meccanica), i valori del copriferro e le regole di maturazione. La durabilità del calcestruzzo è la capacità di durare nel tempo, resistendo agli attacchi chimici, all'abrasione o ad ogni altro processo di degrado che coinvolge oltre alla pasta cementizia e agli aggregati anche le armature metalliche del c.a. Escludendo tutti i fenomeni di carattere straordinario il degrado delle strutture il calcestruzzo armato può essere ricondotto a fenomeni legati all'ambiente e con progressioni lenti nel tempo.

Le azioni ambientali sono suddivise come classi di esposizione secondo le UNI EN 206:2016 e UNI 11104:2016 (v. fig 3.2).

#### **4. PROPRIETA' DEI MATERIALI**

Gli interventi sono organizzati sulla vasca e sulla trave laminatrice del manufatto limitatore della cassa di monte.

##### **4.1 Materiali esistenti - Manufatto limitatore di monte**

L'opera risulta costituita da tre rami. Il primo tratto, realizzato in alveo, è il manufatto limitatore articolato con una platea di fondazione che costituisce la vasca, uno strato protettivo a monte a contatto con l'acqua della corrente e una trave laminatrice in alto (Fig 4.2).



*Fig.4.1 - Manufatto limitatore di monte con impalcato*

#### 4.1.1 Ramo in alveo

### SEZIONE TRASVERSALE VASCA

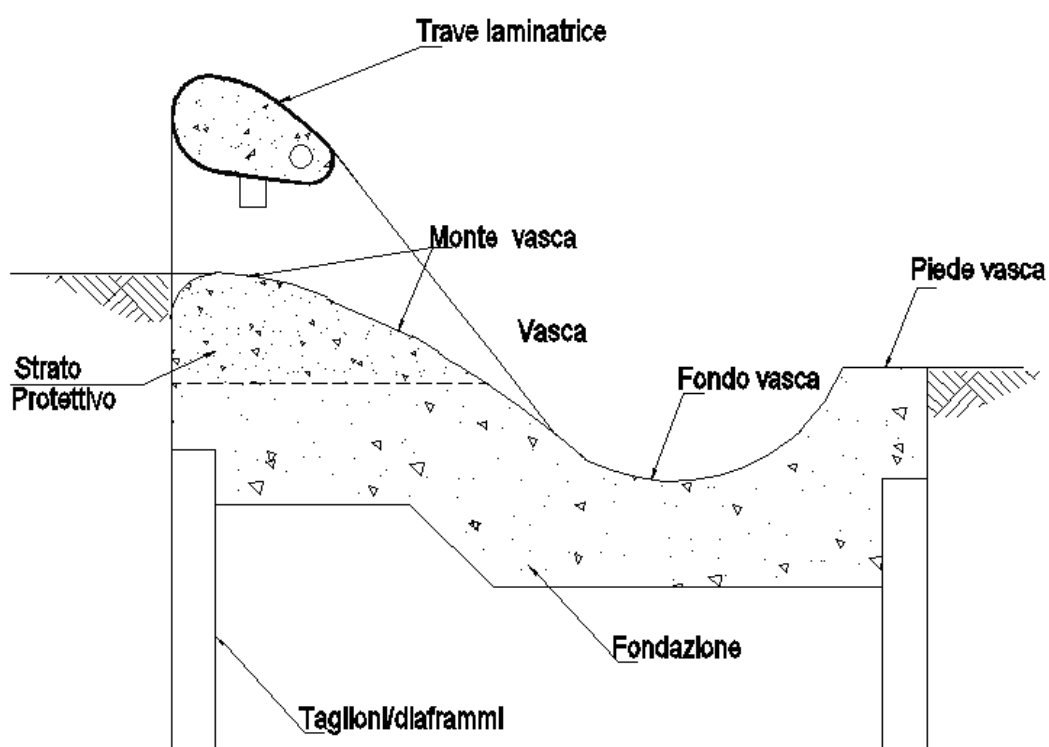


Fig.4.2 - Manufatto limitatore di monte – sezione trasversale della vasca

#### 4.1.1.1 Platea di Fondazione – Vasca

I dati relativi al progetto della struttura non sono stati reperiti. Pertanto si ritiene plausibile raggiunto il livello **LC2** a cui corrisponde **FC=1,2**.

Il valore medio della resistenza su campioni cilindrici con rapporto  $h/d=1$  è pari a  $f_{carota}=33,6$  Mpa, a cui si associa (v. fig. 3.1) un fattore di disturbo **Fd**=1,06. Per quanto esposto al p.to 3.4 si determina

$$R_{c,is} = f_{carota} * Fd = 33,6 * 1,06 / 1,2 = 30 \text{ MPa}$$

La classe del calcestruzzo di fondazione è riconducibile alla C25/30.

#### 4.2 Acciai

Gli acciai sono catalogati sia in funzione della tensione di rottura/snervamento che della loro categoria commerciale relativa al periodo di costruzione dei

manufatti. Gli acciai prelevati, sono stati soggetti a prove di trazione da un laboratorio autorizzato e i risultati sono riportati nella tabella successiva.

RISULTATI DELLE PROVE A TRAZIONE							
N° identificativo L.T.M.	Contrassegno	Ø nominale effettivo (mm)	Sezione effettiva $S_0$ (mm <sup>2</sup> )	Tensione di snervamento $f_y$ (MPa)*	Tensione di rottura $f_t$ (MPa)*	$A_{gt}(\%)$	Data di prova
1	F4 - Fondazione - Manufatto limitatore di monte	12	113,0	617,0	715,7	11,6	18/06/19
2	F5 - Fondazione - Manufatto limitatore di monte	14	153,9	508,5	596,6	12,1	18/06/19
3	F6 - Fondazione - Manufatto limitatore di monte	12	113,0	636,8	740,9	12,3	18/06/19

Fig.4.3 – Risultati di laboratorio sulle armature metalliche.

Durante il periodo di costruzione dei manufatti erano vigenti il D.M. 27.07.1985 e il D.M. 09.01.1996 “Norme tecniche per l'esecuzione dell'opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche.”

Per gli acciai, le norme, dell'epoca prevedevano le seguenti prescrizioni.

Tipo di acciaio		Fe B 38 k	Fe B 44 k
Tensione caratteristica di snervamento ..... $f_{yk}$ N/mm <sup>2</sup>		≥ 375	≥ 430
Tensione caratteristica di rottura ..... $f_{tk}$ N/mm <sup>2</sup>		≥ 450	≥ 540
Allungamento $A_5$ ..... %		≥ 14	≥ 12
Per barre ad aderenza migliorata aventi Ø (*)	fino a 12 mm	Piegamento a 180° su mandrino avente diametro D	3 Ø
	oltre 12 mm fino a 18 mm		
	oltre 18 mm fino a 25 mm	Piegamento e raddrizzamento su mandrino avente diametro D	8 Ø
	oltre 25 mm fino a 30 mm		

(\*) Il diametro Ø è quello della barra tonda liscia equipasante.

Fig.4.4 – Prescrizione sugli acciai previste dalle norme all'epoca della costruzione

Dal confronto delle proprietà riscontrate con quelle previste dalle neornative è possibile confermare gli acciai dichiarati negli elaborati progettuali originari.

Le armature delle strutture sono state realizzate con acciai Fe B 44 k.

Le armature sono costituite da acciaio FeB44 k c.s.

La profondità di carbonatazione è pari a 20 mm con copriferri minimi rilevati pari a 98 mm.

La classe ambientale della fondazione è assunta pari a XC2.

Ai sensi delle UNI EN 206 per tali strutture sono previsti calcestruzzi con le seguenti caratteristiche minime:

- classe di resistenza C25/30,
- rapporto acqua / cemento = 0,6
- contenuto minimo di cemento = 280 Kg/mc
- copriferro minimo = 20 mm.

#### **4.2.1.1 Strato protettivo**

La disponibilità del progetto strutturale consente di ritenere raggiunto il livello di conoscenza **LC3** a cui corrisponde **FC**=1.

Il valore medio della resistenza su campioni cilindrici con rapporto  $h/d=1$  è pari a  $f_{carota}=64,9$  Mpa, a cui si associa (v. fig. 3.1) un fattore di disturbo  $F_d=1$ .

Per quanto esposto al p.to 3.4 si determina

$$R_{c,is} = f_{carota} * F_d = 64,9 * 1/1 = 64,9 \text{ MPa}$$

La classe del calcestruzzo è riconducibile alla C50/60.

Le armature sono costituite da acciaio FeB44 k c.s.

Sullo strato di calcestruzzo realizzato per proteggere le fondazioni, si rileva una profondità di carbonatazione inferiore ai 10 mm, mentre i copriferri risultanti dagli elaborati progettuali sono pari a 50 mm mentre le pacomentriche hanno registrato profondità di 120/150 mm.

Le classi ambientali sono XC4, XF3 e XM3 per la resistenza meccanica all'abrasione.

Ai sensi delle UNI EN 206 per tali strutture sono previsti calcestruzzi con le seguenti caratteristiche minime:

- classe di resistenza C30/37,
- rapporto acqua / cemento = 0,5
- contenuto minimo di cemento = 320 Kg/mc
- copriferro minimo = 30 mm,
- contenuto d'aria 4% e aggregati resistenti al gelo/disgelo.

Il contenuto di aria richiesto per la classe XF3 però è sconsigliata nei casi di abrasione meccanica (XM3).

#### **4.2.1.2 Trave laminatrice**

Data la disponibilità dei disegni esecutivi, si ritiene raggiunto il livello **LC3** a cui corrisponde **FC**=1.

I valori medi della resistenza su campioni cilindrici con rapporto  $h/d=1$  è pari a  $f_{carota}=50,1$  Mpa, a cui si associa (v. fig. 3.1) un fattore di disturbo  $F_d=1$ .

Per quanto esposto al p.to 3.4 si determina

$$R_{c,is} = f_{carota} * F_d = 50,1 * 1/1 = 50,1 \text{ MPa}$$

La classe del calcestruzzo di fondazione è riconducibile alla C40/50.

Le armature sono costituite da acciaio FeB44 k c.s.

E' stata rilevata una profondità di carbonatazione massima di 12 mm, mentre i copriferri di progetto risultano pari a 50 mm.

Le classi ambientali sono XC4, XF3.

Ai sensi delle UNI EN 206 per tali strutture sono previsti calcestruzzi con le seguenti caratteristiche minime:

- classe di resistenza C30/37,
- rapporto acqua/cemento = 0,5
- contenuto minimo di cemento = 320 Kg/mc
- copriferro minimo = 30 mm,
- contenuto d'aria 4% e aggregati resistenti al gelo/disgelo.

### **4.3 Nuovi Materiali**

Le analisi e lo studio delle cause dello stato di degrado hanno consentito di tarare un modello di materiale mirato a fornire la domanda prestazionale ottimale nei confronti della resistenza e delle durabilità.

in particolare, per contrastare le principali cause di degrado prodotte dall'azione meccanica di abrasione è stato progettato un adeguato mix-design del conglomerato.

Lo studio del nuovo calcestruzzo prevede che esso debba possedere le seguenti proprietà:

- Classe di resistenza: C35/45.
- Classe di consistenza: S2.
- Contenuto in cloruri: <2%.
- Diametro massimo dell'inerte: 25 mm.
- Rapporto acqua/cemento: 0,4.
- Classe di esposizione: XM3-XF3.
- Tipo di cemento: 42,5N del tipo IV/A o III/A
- Quantità di cemento:  $\geq 350 \text{ Kg/m}^3$ .
- Additivi:
  - Superfluidificante: 0,8-1,2 litri ogni 100 kg di legante.
  - silica fume:  $25 \text{ kg/m}^3$
  - riduttore di ritiro: 0,8 litri ogni 100 kg di legante
  - agente espansivo:  $25 \text{ kg/m}^3$

Per i nuovi acciai sono previsti:

- rete elettrosaldate B450A
- ferri di armatura B450C

## **5. ANALISI DELLE ACQUE**

Le analisi chimiche svolte sulle acque del torrente mostrano la quasi assenza dei fluoruri, ma una concentrazione minima di cloruri.

Essa risulta poco rilevante ai fini dell'aggressività ambientale.

Nel caso di manufatti in calcestruzzo armato immersi in acqua, non sono stati rilevati elementi che fanno pensare a fattori di degrado di natura biologica (*fouling*).