

Il degrado del *calcestruzzo*

Il degrado del calcestruzzo



SEDE
MAPEI SpA
Via Cafiero, 22 - 20158 Milano
Tel. +39-02-37673.1
Fax +39-02-37673.214
Internet: www.mapei.com
E-mail: mapei@mapei.it



Da MAPEI una collana di fascicoli tecnici che permettono di approfondire il tema del degrado del calcestruzzo ed affrontare in maniera professionale le problematiche del ripristino.

Questo fascicolo è dedicato a:

Il degrado del calcestruzzo



Gli altri fascicoli disponibili sono dedicati a:



Fascicoli a disposizione su richiesta.

Il degrado del *calcestruzzo*

Indice

▶ 1	Introduzione	2
▶ 2	Il degrado del calcestruzzo	4
▶ 3	Aggressioni di tipo chimico	5
3.1	Aggressione da anidride carbonica	5
3.1.1	Diagnosi del degrado dovuto alla carbonatazione	7
3.1.2	Diagnosi del degrado dovuto al dilavamento	8
3.2	Aggressione da solfati	9
3.2.1	Diagnosi del degrado dovuto all'attacco solfatico	10
3.3	Aggressione da cloruri	11
3.3.1	Diagnosi del degrado dovuto all'attacco dei cloruri	12
3.4	Reazione alcali-aggregati	13
3.4.1	Diagnosi del degrado dovuto alla reazione alcali-aggregati	14
▶ 4	Aggressioni di tipo fisico	15
4.1	Gelo e disgelo	15
4.2	Alte temperature	17
4.3	Ritiro e fessurazione	19
▶ 5	Aggressioni di tipo meccanico	20
5.1	Abrasione	20
5.2	Urto	21
5.3	Erosione	22
5.4	Cavitazione	22
▶ 6	Difetti	22
▶ 7	Le classi d'esposizione	25

► 1 | Introduzione

Le prime vere costruzioni in calcestruzzo sono da attribuire ai Romani che utilizzavano una miscela di calce, pozzolana, pietrisco ed acqua. Famose e maestose costruzioni romane sono per esempio l'acquedotto Pont du Gard a Nimes (*foto 1*) edificato attorno al 150 a.C. e l'ancor più famoso Pantheon (*foto 2*) a Roma risalente al 27 a.C. Questi esempi ci danno un'idea delle fantastiche prestazioni che questo materiale ci può fornire.

Nel trattato "De architettura" dello scrittore, architetto ed ingegnere Vitruvio, scritto attorno al

foto 1
Pont du Gard a Nimes
Francia



25 a.C., si parla di conglomerato, in latino "opus caementitium", definito come un insieme di calce, sabbia e acqua miscelato con parti di pietra o di mattoni. Questi pochi esempi ci fanno capire quanto siano antiche le origini del materiale che cercheremo di analizzare. Per parlare di calcestruzzo "moderno" ci portiamo agli inizi del 1800. Il legante utilizzato all'interno della miscela deriva dalla cottura ad elevate temperature, fino a 1500 °C, di terreni composti da argilla e calcare, che da luogo alla formazione di clinker in palline. Una volta miscelato con opportuni additivi di macinazione e macinato prende il nome di cemento.

Il calcestruzzo dell'era moderna è una miscela di acqua, cemento, aggregati ed eventuali additivi (fluidificanti, superfluidificanti, ecc.), aggiunti in accordo con la UNI EN 934-2:2002, che ne modificano la reologia, le proprietà e le prestazioni. Questo materiale sembra non avere

punti deboli, in termini di durabilità, composto da prodotti facilmente reperibili, relativamente di basso costo, facile da usare, ecc. Questo è vero solo in parte, ad esempio il calcestruzzo ha un'ottima resistenza alla compressione ma è scarsa quella a trazione, da cui nasce l'esigenza di armare con barre di acciaio che vanno ad ovviare a questo inconveniente, ma ne possono creare di altri come vedremo in seguito. Altro fondamentale limite del calcestruzzo è quello di essere molto sensibile alle condizioni in cui viene confezionato ed utilizzato; essendo queste



foto 2
Pantheon
Roma - Italia

le più svariate ecco che nascono altrettanti inconvenienti. Esistono molte variabili che possono incidere sulla qualità del prodotto, ed è proprio la poca cura di queste la causa che rende il calcestruzzo più vulnerabile. La necessità sempre più crescente, in questi ultimi anni, di ricorrere ad interventi di manutenzione e di ripristino delle strutture, ha determinato un decisivo cambiamento della spesa per gli interventi di risanamento, rispetto a quella sostenuta per la realizzazione di nuove costruzioni.

La continua crescita dei costi di costruzione, inoltre, rende quasi sempre più conveniente il recupero, anche se il deterioramento delle strutture ha raggiunto una certa gravità. Un calcestruzzo, anche se ben realizzato, posto in ambienti aggressivi, prima o poi presenterà dei difetti che definiscono il degrado.

► 2| Il degrado del calcestruzzo

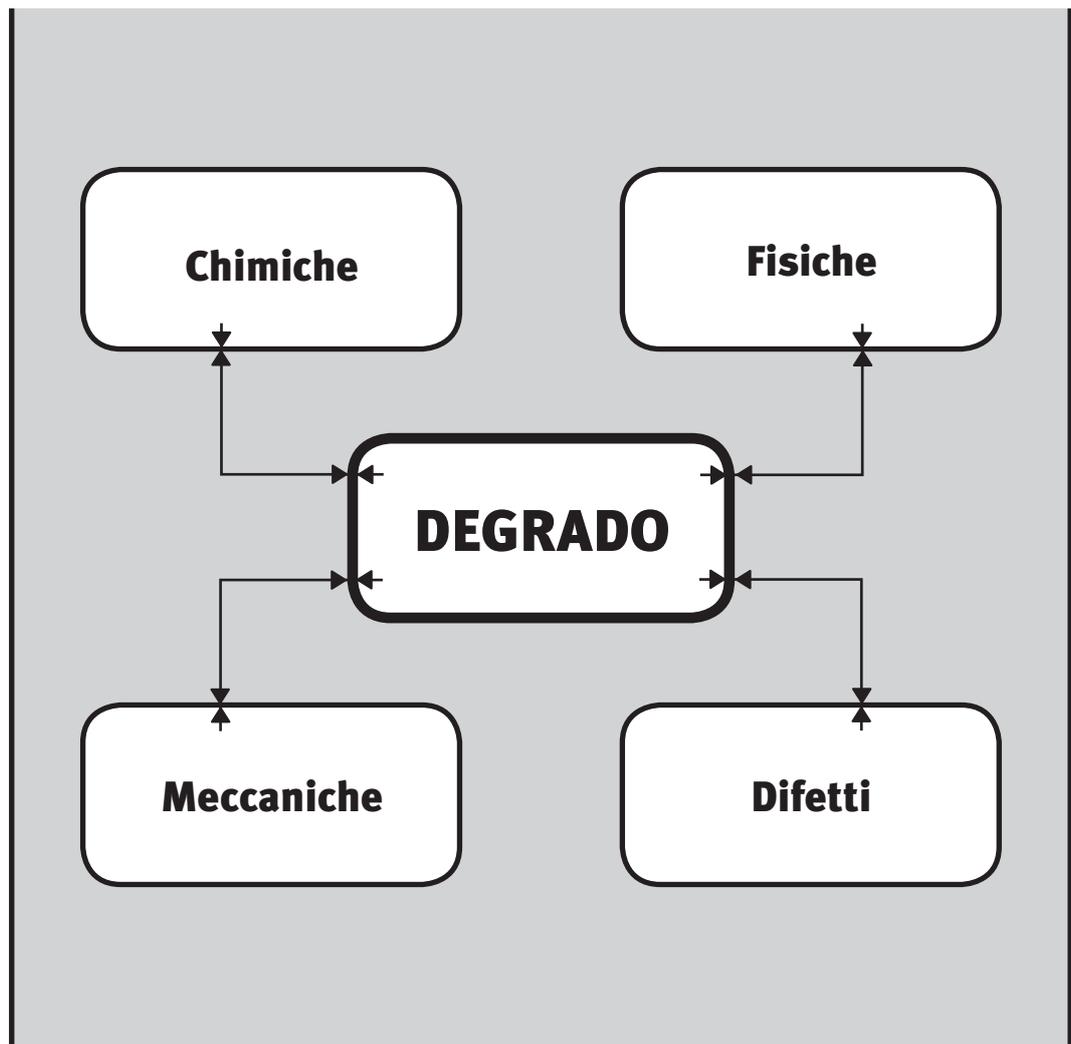
Lo scopo di questo “quaderno” è quello di far comprendere nella maniera più chiara possibile i fenomeni di degrado che interessano il calcestruzzo, di collegarli a delle ben precise cause, in modo da individuare dei validi rimedi, così da aiutare chiunque si trovi ad affrontare problemi riguardanti il suo ammaloramento.

A| Cause

B| Effetto

C| Rimedio

Le cause del degrado si possono dividere in quattro grandi famiglie:



► 3 | **Aggressioni di tipo chimico**

3.1 | *Aggressione da anidride carbonica*

3.2 | *Aggressione da solfati*

3.3 | *Aggressione da cloruri*

3.4 | *Reazione alcali-aggregati*

► 3.1 | **Aggressione da anidride carbonica**

L'aggressione dovuta alla CO_2 si può manifestare in due diversi modi a seconda del contesto in cui ci si trova. Nelle opere esposte all'aria si verifica la carbonatazione del calcestruzzo, mentre nelle opere idrauliche s'instaura il fenomeno del dilavamento della pasta cementizia. La carbonatazione è dovuta alla penetrazione della CO_2 nel calcestruzzo. Il fenomeno consiste nella trasformazione della calce, che si genera a seguito dell'idratazione del cemento, in carbonato di calcio a causa della presenza di anidride carbonica, il cui contenuto dipende dall'ambiente in cui ci si trova (zone più o meno industrializzate).

Un calcestruzzo sano ha un pH maggiore di 13 e in questa condizione sui ferri di armatura si crea



foto 3

Esempio di degrado dovuto all'anidride carbonica

un film di ossido ferrico passivo che li impermeabilizza al passaggio di ossigeno e umidità. Se la struttura è carbonatata il pH del cls si abbassa passando a valori che possono essere anche inferiori a 9, creando così un ambiente poco alcalino per le armature. In presenza di pH inferiori a 11 il film passivante viene neutralizzato lasciando così i ferri esposti all'aggressione dell'ossigeno e dell'umidità presenti nell'aria. In queste condizioni si innesca il processo di corrosione delle

armature che aumentano il loro volume di circa 6 volte. Il copriferro in questo modo si distacca dall'armatura fino ad arrivare alla completa espulsione (*foto 3*). Una volta che il calcestruzzo è degradato il deterioramento dei ferri sarà sempre più veloce in quanto si creeranno vie di accesso più facili per ossigeno e umidità.

La CO_2 procede dall'esterno verso l'interno del calcestruzzo, la velocità con cui penetra è fortemente influenzata dal tenore di umidità. Il trasporto dell'anidride carbonica è molto veloce in fase gassosa e cioè all'interno dei pori pieni di aria mentre è molto più lento nei pori dove c'è umidità, di conseguenza nei pori saturi di acqua la velocità di penetrazione sarà pressoché nulla. Bisogna però ricordare che perché la carbonatazione avvenga, la presenza di umidità è assolutamente necessaria. Il seguente grafico riassume il concetto di velocità di penetrazione della CO_2 legata all'umidità relativa del calcestruzzo.

grafico 1
Velocità di carbonatazione
rispetto alla %
di umidità relativa

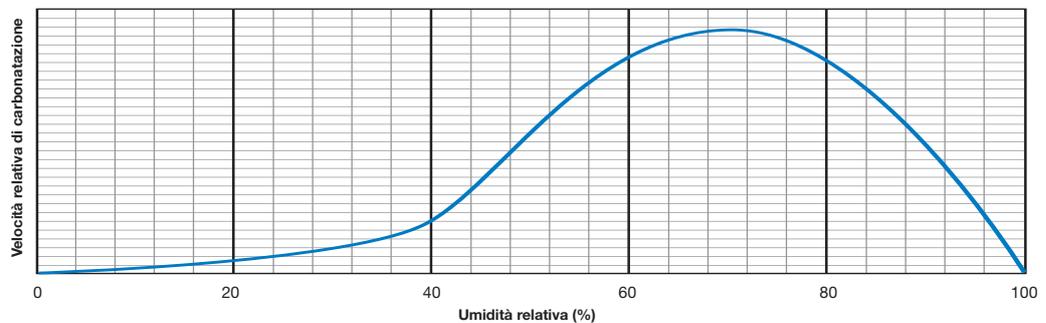


foto 4
Struttura degradata a causa
della corrosione dei ferri



I valori di umidità più pericolosi sono quelli compresi tra il 50 e l'80%, all'esterno di questo intervallo la velocità va diminuendo fino ad azzerarsi, sia in condizioni completamente asciutte sia completamente sature (*grafico 1*).

In conclusione si può affermare che il fenomeno della carbonatazione è dannoso solo per le strutture armate per i motivi sopra menzionati, mentre non è determinante in quelle realizzate in calcestruzzo non armato.

Trovandosi ad osservare una costruzione in calcestruzzo che si presenta come nella foto 4, ora è possibile fare una prima ipotesi sulle cause del degrado.

Il fenomeno del dilavamento consiste nell'asportazione di matrice cementizia dovuta ad un'azione meccanica dell'acqua sul calcestruzzo come si può notare nella foto 5. Questo fenomeno è aggravato se ci troviamo in presenza di acque particolarmente acide a causa dell'anidride carbonica aggressiva, presente soprattutto nelle acque pure di montagna, oppure per la presenza di sostanze dovute a scarichi industriali o ancora, per colpa dell'acido solforico di origine organica, che si sviluppa nelle acque reflue delle fognature.



foto 5
Effetto del dilavamento
su una superficie
in calcestruzzo

3.1.1| Diagnosi del degrado dovuto alla carbonatazione

Per individuare il degrado dovuto alla carbonatazione si utilizza un metodo colorimetrico basato sulla colorazione che il calcestruzzo assume dopo che la sua superficie viene trattata con una soluzione all'1% di fenolftaleina in alcool etilico (UNI EN 13295:2005). Questa soluzione a contatto

foto 6
Esame colorimetrico
con fenolftaleina



con un materiale non carbonatato si colora di rosso mentre se interessato dalla carbonatazione rimarrà incolore. In questo modo si riesce ad individuare lo spessore di calcestruzzo interessato dal fenomeno. Un esempio è riportato nella foto 6 dove si può notare la profondità di carbonatazione di circa 3 cm.

La profondità del calcestruzzo armato interessato dal fenomeno va ad identificare la gravità del danno. Per eseguire il ripristino bisogna eliminare tutto lo spessore di materiale penetrato dalla CO_2 in corrispondenza dei ferri d'armatura.

3.1.2| Diagnosi del degrado dovuto al dilavamento

In questo caso l'analisi chimica, termica, piuttosto che per diffrazione dei raggi X non risulta essere appropriata per individuare il fenomeno del dilavamento in quanto il prodotto di questo tipo di degrado è il bicarbonato di calcio che è molto solubile e di conseguenza con il passaggio dell'acqua viene asportato e non si può più individuare sulla superficie. Un altro motivo per cui le suddette analisi non sono significative è il fatto che il primo passaggio per ottenere bicarbonato di calcio è la formazione di carbonato di calcio ma questo è anche presente nella maggior parte dei calcestruzzi, in quanto presente negli aggregati di natura calcarea o nei filler, e sarebbe impossibile stabilire quale appartiene ad essi e quale si è sviluppato per effetto dell'anidride carbonica aggressiva.

L'unico modo per evidenziare la presenza di dilavamento su un calcestruzzo è quello di fare un'attenta analisi visiva in modo da valutare la superficie che se degradata presenta gli aggregati scoperti, liberi dalla matrice cementizia.

► 3.2| **Aggressione da solfati**

I solfati solubili più comuni presenti nei terreni, nelle acque e nei processi industriali sono quelli di calcio e di sodio. Esistono anche quelli di magnesio, un po' meno comuni ma più distruttivi. Lo ione solfato può essere presente nelle acque come nei terreni ma può anche trovarsi direttamente negli aggregati sotto forma di impurità. Se i solfati provengono dai terreni o dalle acque a contatto con la struttura, lo ione solfato trasportato all'interno della matrice cementizia dall'acqua (fondamentale per il trasporto) reagisce con l'idrossido di calce e forma gesso.



foto 7/8
Esempio di struttura interessata da aggressione solfatica

Questo va a reagire a sua volta con gli alluminati di calcio idrati (C-A-H) formando ettringite secondaria che aumentando di volume provoca delaminazione, rigonfiamenti, fessurazioni e distacchi (*foto 7/8*). L'ettringite primaria a differenza di quella secondaria non è dannosa per il cls perché è quella che si forma dal legame tra gli alluminati anidri e il gesso aggiunto nel cemento per regolare la presa. Questo tipo di ettringite è utile oltre che non dannosa poiché crea una barriera attorno agli alluminati e ne rallenta il processo d'idratazione. Un'ulteriore differenza tra ettringite primaria e secondaria è che la prima si forma quasi subito e in maniera uniforme all'interno del getto, questi due fattori uniti al fatto che in quel momento il cls è ancora in uno stato plastico, fanno sì che si creino piccole tensioni espansive che non sono dannose. La secondaria invece si forma dopo molto tempo dal getto per lo più nella parte corticale del cls (quella penetrata dai solfati), creando forti tensioni espansive a causa della rigidità ormai acquisita dal getto.

Un altro tipo di attacco solfatico si manifesta quando in presenza di carbonato di calcio con temperature basse (inferiori ai 10 °C) e un'umidità relativa superiore al 95%, si forma thaumasite

che provocando la decalcificazione crea il vero e proprio spappolamento del calcestruzzo. I solfati oltre che dall'esterno possono provenire anche dall'interno del cls, sotto forma di impurità naturali negli aggregati, in forma di gesso o anidrite. Il gesso degli aggregati ha dimensioni più elevate rispetto a quello aggiunto al cemento per la presa, di conseguenza è meno solubile in acqua. Questo fa sì che non sia subito disponibile per la formazione di ettringite primaria, ma successivamente andrà a formare ettringite secondaria nel cls ormai stagionato creando così fessurazione.

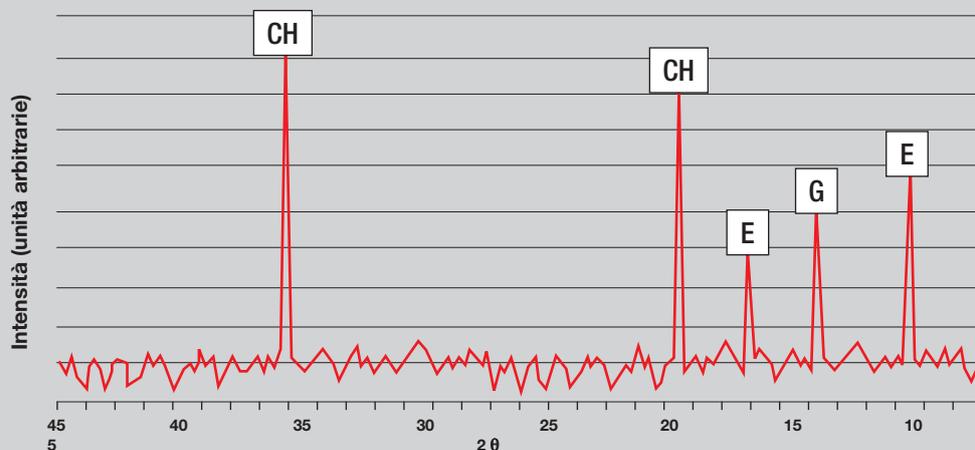
3.2.1 | Diagnosi del degrado dovuto all'attacco solfatico

Per stabilire se il degrado del calcestruzzo è dovuto all'attacco solfatico, si effettua un'analisi chimica per identificare la quantità di solfato presente. Normalmente nel cls è presente, se pur in minima parte, una quantità di solfato di calcio, aggiunto al cemento durante la macinazione, che agisce da regolatore di presa. Il contenuto considerato normale all'interno del cls si può stimare attorno allo 0,4 – 0,6%.

Un metodo per individuare se vi è o meno la presenza di ettringite piuttosto che gesso è il diffrattogramma ai raggi x che individua i picchi di queste sostanze come evidenziato nel grafico qui sotto (9).

Dopo aver analizzato i campioni, si confrontano i valori e se questi risultano notevolmente superiori del contenuto considerato normale (almeno il 30 % di scarto), allora il degrado si può considerare dovuto all'attacco solfatico. Facendo l'analisi chimica di un provino si può definire quanto i solfati siano superiori alla quota normale stabilita ma non possiamo definire lo stato di degrado poiché questo si manifesta con la formazione di prodotti degradanti quali gesso, ettringite o thaumasite.

foto 9
Diffrattogramma ai raggi X
(CH:calce E:ettringite G:gesso)



► 3.3| Aggressione da cloruri

L'aggressione da parte dei cloruri (*foto 10*) sul calcestruzzo può avvenire se questo rimane a contatto con ambienti in cui il contenuto è alto, come l'acqua marina o i sali disgelanti, oppure se confezionato con materie prime inquinate. Il cloruro una volta penetrato nel cls se raggiunge i ferri d'armatura elimina il film passivante di ossido ferrico lasciandoli così esposti al



foto 10
Corrosione dovuta
all'attacco da cloruri

processo di corrosione. La penetrazione ha inizio sulla superficie per poi proseguire all'interno del calcestruzzo; il tempo di penetrazione dipende da:

- Concentrazione di cloruri che entrano in contatto con la superficie del cls;
- Permeabilità del cls;
- Percentuale di umidità presente.

La corrosione avviene con la combinazione di due fattori, entrambi necessari. La presenza di cloruri, che depassivizzano i ferri e l'umidità unita all'ossigeno. Ad esempio una struttura completamente immersa nell'acqua marina, presenterà un contenuto di cloruri sicuramente molto alto, ma avendo le porosità totalmente sature di umidità, l'ossigeno non riuscirà a penetrare e di conseguenza la corrosione dei ferri non avverrà o sarà trascurabile. Considerando sempre una struttura realizzata nell'acqua di mare, la zona che è più interessata dal degrado

dovuto ai cloruri è la splash-zone, cioè quella che a causa del moto ondoso o delle maree è periodicamente bagnata e asciutta. Per quanto riguarda i sali disgelanti, questi vengono stesi sul manto stradale nei periodi invernali, e grazie all'acqua piovana penetrano nella struttura, creando corrosione e quindi degrado.

Una volta innescato il processo, qualsiasi sia l'ubicazione della struttura, la corrosione diventa più veloce in quanto trova vie di accesso più facili. La concentrazione di cloruri necessaria a promuovere la corrosione dei ferri è direttamente proporzionale al pH del cls, più è alcalino più cloruro è necessario per innescare il processo. Facendo riferimento a quest'ultima considerazione, si può legare il fenomeno della carbonatazione al degrado dovuto ai cloruri, in quanto il primo abbassa il pH del cls e quindi rende vulnerabili anche porzioni di struttura che presentano una minor concentrazione di cloruri.

3.3.1 | Diagnosi del degrado dovuto all'attacco dei cloruri

Anche per i cloruri si può stabilire, con delle semplici analisi chimiche di laboratorio, la loro presenza. In questo caso un contenuto attorno allo 0,2-0,4% rispetto al peso di cemento si può considerare naturale in un calcestruzzo, in presenza di percentuali maggiori il cloruro si è infiltrato creando danno.

Oltre all'analisi chimica è possibile effettuare altre due prove:

- Prova colorimetrica alla fluoresceina e nitrato di argento (norma UNI 7928);
- Analisi per diffrazione dei raggi X.

La prima prova consiste nello spruzzare una carota prelevata con una soluzione di fluoresceina e nitrato di argento. Per reazioni chimiche, che non andremo a trattare nello specifico, la parte di cls penetrata dai cloruri si colorerà di rosa chiaro, mentre la parte sana diventerà scura. La linea che demarca il cambio di colore indica lo spessore di calcestruzzo degradato e quindi se i cloruri hanno raggiunto i ferri d'armatura.

La seconda prova evidenzia i prodotti sviluppati dai cloruri all'interno del calcestruzzo.

I cloruri che provengono dai sali disgelanti, sono di due tipi, cloruro di sodio (NaCl) e cloruro di calcio (CaCl₂), il primo può portare ad una reazione alcali-aggregato e al fenomeno del pop-out sulla pavimentazione. Il secondo, ormai poco utilizzato, dà origine alla formazione di ossicloruro, prodotto fortemente degradante per il calcestruzzo in quanto crea l'asportazione del matrice cementizia assimilabile al degrado da dilavamento.

► 3.4| **Reazione alcali-aggregati**

La reazione alcali-aggregati può creare una forte espansione e un grave ammaloramento delle strutture in cls. Alcuni tipi di aggregati come quelli che contengono silice reattiva, reagiscono con due alcali, potassio e sodio, contenuti nel cemento, oppure, come citato nel paragrafo precedente, con quelli provenienti dall'ambiente esterno sotto forma di cloruro di sodio (NaCl) (sali disgelanti o acqua di mare). Dalla reazione si forma un gel fortemente espansivo se esposto all'umidità. Questo va a creare forze che rompono il cls attorno all'aggregato. La reazione alcali-aggregati è un processo che avviene in maniera eterogenea e lentamente nel tempo in quanto legata alla composizione degli aggregati contenenti silice amorfa. Il prodotto della reazione che si ha nelle condizioni appena descritte, sono i silicati di sodio e potassio idrati, molto voluminosi. La reazione alcali-aggregati si manifesta quando si innesca nella parte corticale del cls mostrando sulla sua superficie delle micro o macro fessurazioni, oppure rialzando una piccola porzione di calcestruzzo al di sopra dell'aggregato siliceo reattivo (pop-out), quest'ultimo fenomeno è possibile riscontrarlo nelle pavimentazioni industriali. La foto 11 raffigura una struttura che presenta una forte fessurazione ramificata, tipico esempio di degrado dovuto alla reazione alcali-aggregati. Una volta che il cls si è ammalorato un'ulteriore percentuale di umidità accelererà il processo di reazione ed aggiungerà anche il rischio di deterioramento dovuto al gelo-disgelo.



foto 11

Degrado dovuto alla reazione alcali-aggregati

3.4.1| Diagnosi del degrado dovuto alla reazione alcali aggregati

Una prima ed immediata valutazione per individuare la presenza di reazione alcali-aggregati è un'attenta analisi visiva. Questo tipo di degrado si manifesta con la fessurazione del cls distribuita a ragnatela più o meno disordinata a seconda dell'armatura presente. In concomitanza alla fessurazione si ha un rigonfiamento causato dall'aumento di volume.

Un'analisi chimica che può individuare con certezza la presenza di reazione tra alcali e aggregati reattivi (silice amorfa), è di tipo colorimetrico, effettuata con un reagente di esanitrocobaltato di sodio.

Questo test è usato per l'identificazione del gel prodotto dalla reazione tra gli alcali del cemento e la silice degli aggregati (brevetto americano). In pratica l'esanitrocobaltato di sodio reagisce con il K (potassio) del gel creando un precipitato colorato, per cui laddove è avvenuta la reazione si verifica il cambiamento del colore che passa a giallo. Per stabilire se gli aggregati sono reattivi e quindi potenzialmente soggetti al fenomeno si può effettuare un'analisi petrografica secondo la norma UNI EN 932-3.

Nelle foto 12 e 13 si nota rispettivamente la carota prelevata su una struttura ammalorata e il risultato dell'analisi all'esanitrocobaltato che individua la reazione.

foto 12

Carota prelevata su una struttura ammalorata

foto 13

Esame colorimetrico all'esanitrocobaltato



► 4 | **Aggressioni di tipo fisico**

- 4.1 | *Gelo e disgelo*
- 4.2 | *Alte temperature*
- 4.3 | *Ritiro e fessurazione*

► 4.1 | **Gelo e disgelo**

L'effetto del ghiaccio è deleterio solo se c'è acqua allo stato liquido all'interno del cls. Questo non vuol dire che debba essere perfettamente secco ma che il livello di umidità non superi un determinato valore chiamato "saturazione critica".

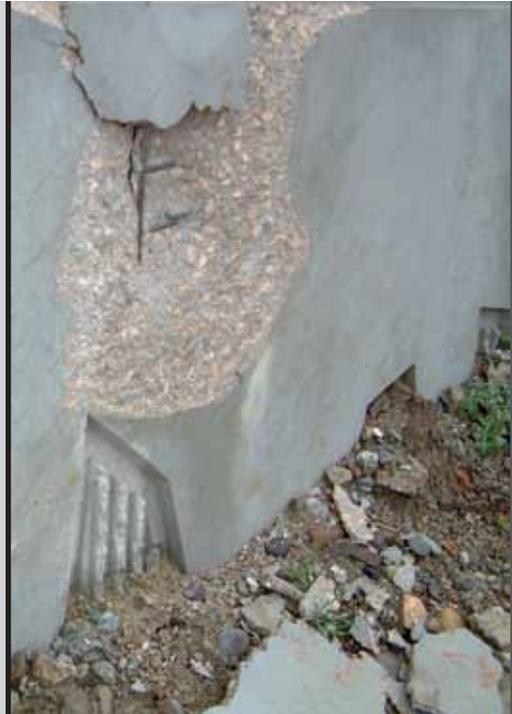
S'intende che l'acqua presente all'interno della porosità deve essere al di sotto di detto valore in modo che pur aumentando di volume ghiacciando, riesca a rimanere all'interno dei pori senza creare tensioni. Differentemente se l'acqua riempisse tutto o quasi il volume dei pori, ghiacciando andrà a spaccare il cls a causa della pressione instaurata (l'acqua ghiacciando aumenta il suo volume di partenza del 9%).

Pur non superando il valore di saturazione critica potrebbe comunque verificarsi la rottura del cls a causa della presenza di acqua. Se prendiamo in considerazione la percentuale di acqua presente in tutto il calcestruzzo non consideriamo la distribuzione eterogenea che questa ha all'interno del getto. Per risolvere questo inconveniente si misura la percentuale presente sulla fascia corticale e cioè dove s'innescano i fenomeni di degrado dovuti ai cicli di gelo e disgelo (*foto 14/15*).



foto 14
Degrado dovuto al gelo

foto 15
Degrado dovuto al gelo



Per limitare gli effetti negativi delle basse temperature bisogna diminuire la microporosità capillare e favorire la presenza di macropori (dimensioni comprese tra 100 e 300 μm), aggiungendo alla miscela additivi aeranti, mantenere un basso rapporto a/c ma soprattutto utilizzare aggregati non gelivi.

I danni dovuti al gelo e disgelo, comunque avvengono quando sono presenti in concomitanza le seguenti condizioni:

- 1) Basse temperature;
- 2) Assenza di macroporosità.

Il tipo di danno è proporzionale a:

- Livello di porosità;
- Livello di saturazione di umidità;
- Numeri di cicli;
- Aria inglobata (nell'ordine del 4-6% per aggregati con diametro massimo 20-50 mm, ma anche dell'8% per aggregati più piccoli).

► 4.2 | Alte temperature

L'effetto delle alte temperature sul calcestruzzo è distruttivo. I ferri di armatura possono resistere fino ad una temperatura di 500°C mentre il calcestruzzo può resistere fino a 650°C. La funzione del copriferro in questo caso è fondamentale in quanto rallenta il propagarsi della temperatura. Più è spesso il copriferro maggiore è il tempo che i ferri ci mettono a raggiungere la temperatura di collasso di 500°C.

I danni che il fuoco può creare al calcestruzzo sono molti e molto importanti:

- Le armature pur protette dal copriferro riscaldandosi sotto l'effetto delle alte temperature espandono il loro volume, creando tensioni nel cls fino all'espulsione dello stesso.
- Una volta che le armature sono esposte al fuoco, espandono molto più velocemente del cls in cui sono inserite causandone l'espulsione e la perdita di aderenza.
- Pur non arrivando alla temperatura limite di collasso, il calcestruzzo può perdere le sue caratteristiche prestazionali nel momento in cui viene repentinamente raffreddato, situazione che si crea quando si eseguono le operazioni di spegnimento dell'incendio. In questa situazione l'ossido che si è formato a causa del calore si trasforma in calce disintegrando il cls.
- Sulla faccia più vicino al fuoco a causa dell'estremo caldo si verifica spalling dovuto alla rapida espansione, alcuni aggregati scoppiando potrebbero staccare anche il cls adiacente, stesso risultato che si ha quando l'umidità presente si trasforma repentinamente in vapor acqueo creando piccoli scoppi.
- Se l'esposizione al fuoco è prolungata anche le armature raggiungono la temperatura di collasso e perdono la loro resistenza a trazione, causando il cedimento della struttura.

Di seguito uno schema che riassume le fasi del degrado dovuto al fuoco.

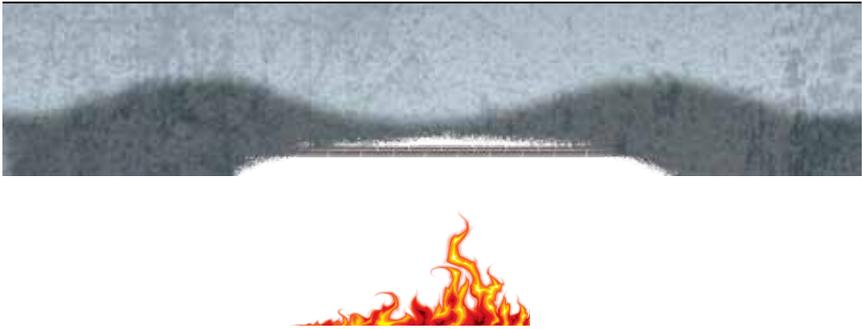
<p>Il calcestruzzo può sopportare temperature fino a 650°C.</p>	
<p>La prima parte a disgregarsi sarà il copriferro, parte fondamentale per la protezione delle armature.</p>	
<p>Una volta che le armature sono scoperte il calore si propaga più velocemente.</p>	
<p>Con un'esposizione prolungata alle alte temperature anche il ferro perde le sue caratteristiche prestazionali causando il collasso della struttura.</p>	

Tabella 1

► 4.3| Ritiro e fessurazione

In questo paragrafo verranno trattati due tipi di ritiro, quello plastico e quello igrometrico. Il primo avviene quando il calcestruzzo ancora nella fase plastica cede parte della sua umidità all'ambiente esterno causando così una contrazione. La fessurazione in questo caso è legata alle condizioni in cui viene realizzato il getto. In strutture casserate l'evaporazione non avviene per ovvi motivi, mentre in opere dove il cls è direttamente a contatto con l'ambiente, avviene a causa della temperatura, della bassissima umidità esterna o del forte vento. Il ritiro plastico avvenendo quando il calcestruzzo è ancora fresco può portare ad una micro fessurazione superficiale. Il ritiro igrometrico è dovuto alla cessione di umidità all'ambiente con un U.R. bassa lungo tutto l'arco della vita utile.

Per evitare i problemi dovuti al ritiro plastico bisogna evitare che l'acqua presente nell'impasto evapori troppo velocemente, questo si può fare in più modi:

- 1) Stendendo sul getto un telo impermeabile che impedisce l'evaporazione
- 2) Nebulizzando completamente la superficie nei primi giorni dopo il getto
- 3) Applicando sul getto ancora fresco un film di prodotto antievaporante

Siccome il calcestruzzo "consuma" la maggior parte del ritiro igrometrico nei primi sei mesi, è impossibile pensare di bagnarlo per tutto il tempo quindi si deve agire su fattori diversi, quali, diminuire il rapporto a/c e aumentare il rapporto i/c.

Le immagini 16 e 17 sono un esempio di fessurazione in una pavimentazione in cls.



foto 16
Fessurazione
di calcestruzzo

foto 17
Fessurazione
di lastre in cls

► 5 | **Aggressioni di tipo meccanico**

5.1 | *Abrasione*

5.2 | *Urto*

5.3 | *Erosione*

5.4 | *Cavitazione*

► 5.1 | **Abrasione**

Se un materiale viene investito ripetutamente da particelle provenienti da un altro corpo più duro s'instaura il fenomeno dell'abrasione. Questo avviene a causa dell'attrito che le polveri più dure esercitano sulla superficie del materiale. Quindi si può benissimo capire che l'abrasione dipende direttamente da caratteristiche interne al materiale costituente il calcestruzzo. Possiamo di conseguenza migliorare la resistenza all'abrasione sia abbassando il rapporto a/c sia facendo uno spolvero di cemento miscelato ad additivi ed aggregati duri sulla superficie del calcestruzzo.

Fattori che influenzano la resistenza all'abrasione:

- Resistenza alla compressione;
- Proprietà degli aggregati;
- Finitura;
- Presenza di rappezzi;
- Condizioni della superficie.

Strutture particolarmente interessate da questo fenomeno sono le pavimentazioni industriali, gravate da un continuo passaggio di mezzi.

Nella foto 18 un esempio di erosione dovuta alla presenza di acqua in movimento.

foto 18
Esempio di erosione



► 5.2| Urto

Un altro tipo di degrado dovuto a cause meccaniche è quello provocato da urti. Le considerazioni da fare non sono molte in questo caso in quanto il calcestruzzo è un materiale fragile e quindi se subisce degli impatti di una certa entità si degrada con conseguente perdita di resistenza. Non è detto che il danno si presenti immediatamente, può essere che questo avvenga dopo molti cicli, ad esempio su giunti di una pavimentazione gravati dal passaggio di mezzi meccanici. In questo caso l'unico metodo per diminuire gli effetti di degrado è quello di confezionare un cls il più resistente possibile.



foto 19
Esempio di degrado
su giunti

Per rendere il calcestruzzo più resistente agli urti è bene rinforzarlo con delle fibre in acciaio in modo che l'eventuale energia d'impatto sia meglio ripartita su tutta la struttura.

Nelle foto 19 e 20 due esempi di degrado dovuti a ripetuti urti su pavimentazioni in cls.



foto 20
Calcestruzzo ammalorato

► 5.3| **Erosione**

L'erosione è una particolare tipologia di usura dovuta al vento, all'acqua o al ghiaccio, provoca l'asportazione di materiale dalla superficie. Dipende dalla velocità, dal contenuto di polveri dure e dalla qualità del calcestruzzo. In questo caso l'unico rimedio è la cura del confezionamento del materiale e valgono gli stessi termini utilizzati per l'abrasione.

► 5.4| **Cavitazione**

La cavitazione è un problema che si presenta laddove c'è la presenza di acqua in movimento (> 12 m/s), la velocità elevata dell'acqua unita ad una superficie di scorrimento non regolare provoca delle turbolenze, si creano delle zone di bassa pressione e s'instaurano dei vortici che vanno ad usurare il sottofondo. Le bolle d'aria che si formano nell'acqua corrono fino a valle con essa e quando incontrano una zona di alta pressione implodono creando un forte impatto, questo crea erosione. Se la velocità dell'acqua è notevole l'erosione dovuta alla cavitazione può essere anche di grande entità. Il fenomeno della cavitazione può essere evitato realizzando superfici lisce e senza ostruzioni al corso dell'acqua.

► 6| **Difetti**

Il calcestruzzo è una miscela di più elementi. Il suo confezionamento è legato alle singole esigenze, più alte sono le richieste più delicato è il mix-design. I componenti principali sono il cemento, gli aggregati, l'acqua e gli additivi. Ognuno di questi se utilizzato nella maniera scorretta potrebbe creare uno o più punti deboli. Ipotizzando di avere a disposizione i migliori prodotti presenti sul mercato ma per scarsa conoscenza o per altri motivi vengono miscelati tra di loro con rapporti del tutto errati, il risultato sarà il medesimo di quello che si raggiungerebbe se venissero utilizzati gli "ingredienti" più scadenti. È di fondamentale importanza curare la qualità dei materiali ma ancor di più la miscela tra di essi. Nella foto 21 un esempio di segregazione degli aggregati dovuta ad un errato confezionamento e/o messa in opera. Il componente fondamentale è il cemento che deve essere adatto al tipo di opera che da eseguire e alla classe d'esposizione (argomento che sarà trattato nei prossimi paragrafi). Riguardo a questo "ingrediente" bisogna fare una considerazione e cioè che pur essendo l'elemento che fa da legante e che quindi fa in modo che vengano raggiunte le prestazioni richieste, non sempre aumentandone la quantità si migliorano le prestazioni. Si può facilmente comprendere che più cemento è presente in un



foto 21

Segregazione degli aggregati
in un calcestruzzo

impasto più elevato sarà il ritiro che il getto subirà.

Gli aggregati devono essere di granulometria adatta e ben dosati tra parte grossa e fine, ben puliti perché sostanze estranee potrebbero variare le caratteristiche previste o nel peggiore dei casi essere la causa del degrado se inquinati da sostanze come quelle analizzate nei paragrafi precedenti.

Per la scelta dell'additivo è fondamentale sapere che tipo di caratteristiche si vogliono dal calcestruzzo. Nella miscela tra gli elementi, il rapporto acqua/cemento (a/c) gioca un ruolo fondamentale insieme a quello aggregati/cemento. Il primo a parità di qualità più basso è meglio è, il secondo deve essere ben proporzionato secondo la quantità di parti fini e grosse.

Dalla foto 22 si può notare, oltre alla chiara segregazione degli aggregati, anche l'esposizione dei ferri d'armatura, sintomo di una errata messa in opera del calcestruzzo. Non garantendo un



foto 22

Ferri scoperti
in un calcestruzzo

adeguato coprirebbero tutti i problemi dovuti alla penetrazione di agenti degradanti sono facilmente innescabili.

Riassumendo i difetti del calcestruzzo possono essere raggruppati in tre famiglie:

- Difetti dovuti alla mal progettazione della miscela;
- Difetti dovuti a una sbagliata composizione;
- Difetti dovuti ad un'errata messa in opera.

► 7 | Le classi d'esposizione

Il degrado del calcestruzzo può essere evitato facendo attenzione alla progettazione, considerando attentamente l'ambiente in cui questo sarà messo in opera.

La norma tecnica UNI 11104:2004, (Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità – Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1) individua 6 classi d'esposizione, per ognuna delle quali vengono date indicazioni per la progettazione, confezionamento e messa in opera del calcestruzzo.

Classe di esposizione	Ambiente	Struttura	Sottoclassi
X0	Assenza di rischio di corrosione o attacco	Calcestruzzo armato e non	X0
XC	Corrosione indotta da carbonatazione	Calcestruzzo armato	XC1, XC2, XC3, XC4
XD	Corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare	Calcestruzzo armato	XD1, XD2, XD3
XS	Corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare	Calcestruzzo armato	XS1, XS2, XS3
XF	Attacco dei cicli gelo/disgelo con o senza sali disgelanti	Calcestruzzo armato e non	XF1, XF2, XF3, XF4
XA	Attacco chimico	Calcestruzzo armato e non	XA1, XA2, XA3

Tabella 2

Le 6 classi d'esposizione secondo la UNI 11104

Tutte le classi e sottoclassi vengono definite e descritte dalla norma UNI 11104 come segue:

CLASSE X0: Per calcestruzzo privo di armatura o inserti metallici: tutte le esposizioni eccetto dove c'è gelo/disgelo, o attacco chimico.

Calcestruzzi con armatura o inserti metallici: in ambiente molto asciutto.

CLASSE XC: Corrosione indotta dalla carbonatazione.

XC1: Asciutto o permanentemente bagnato

XC2: Bagnato, raramente asciutto

XC3: Umidità moderata

XC4: Ciclicamente asciutto e bagnato

CLASSE XD: Corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare.

XD1: Umidità moderata

XD2: Bagnato, raramente asciutto

XD3: Ciclicamente asciutto e bagnato

CLASSE XS: Corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare.

XS1: Esposto alla salsedine marina ma non direttamente in contatto con l'acqua di mare

XS2: Permanentemente sommerso

XS3: Zone esposte agli spruzzi oppure alla marea

CLASSE XF: Attacco dei cicli gelo/disgelo con o senza disgelanti.

XF1: Moderata saturazione d'acqua, in assenza di agente disgelante

XF2: Moderata presenza d'acqua in presenza di agente disgelante

XF3: Elevata saturazione d'acqua in assenza di agente disgelante

XF4: Elevata saturazione d'acqua con presenza di agente disgelante o acqua di mare

CLASSE XA: Attacco chimico da parte di acque del terreno e acqua fluenti.

XA1: Ambiente chimicamente debolmente aggressivo

XA2: Ambiente chimicamente moderatamente aggressivo

XA3: Ambiente chimicamente fortemente aggressivo

Nel caso in cui ci si trovi in un ambiente che comprende più classi d'esposizioni, in teoria bisognerebbe realizzare tanti tipi di calcestruzzo quante sono le classi. In realtà questo non può essere fatto di conseguenza quando si trovano condizione di questo genere si confeziona il calcestruzzo con le prescrizioni dettate dalla classe d'esposizione peggiore.

La tabella 3 riassume direttive per il confezionamento di calcestruzzo a seconda della classe d'esposizione, secondo la norma UNI 11104.

Tabella 3
Direttive per il
confezionamento
del calcestruzzo
secondo la UNI 11104

Classe	Sottoclasse	Max a/c	Min Rck (Mpa)	Min contenuto di cemento (kg/m ³)	Spessore di copriferro	
					c.a.(mm)	c.a.p.(mm)
X0	-	Nessun limite	Nessun limite	Nessun limite	15	20
XC	XC1	0,65	25	300	15	25
	XC2	0,60	30	300	25	35
	XC3	0,55	37	320	25	35
	XC4	0,50	37	340	30	40
XD	XD1	0,55	37	320	45	55
	XD2	0,55	37	340	45	55
	XD3	0,45	45	360	45	55
XS	XS1	0,50	37	340	45	55
	XS2	0,45	45	360	45	55
	XS3	0,45	45	360	45	55
XF	XF1	0,55	37	320	30	40
	XF2	0,55	30	340	45	55
	XF3	0,50	37	340	30	40
	XF4	0,45	30	360	45	55
XA	XA1	0,55	37	320	25	35
	XA2	0,50	37	340	25	35
	XA3	0,45	45	360	25	35

Lo spessore del copriferro è stato inserito secondo quanto prescritto nell'EUROCODICE 2.

Il degrado del **calcestruzzo**

Note: _____
