

STRUTTURE IN C.A.: DEGRADO

Flora Faleschini
Dipartimento Ingegneria
Civile, Edile e Ambientale
VMSSE 2023/2024



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

Cause principali

1. Erronea **scelta delle materie prime**;
2. Errori nella **produzione** del conglomerato;
3. Errata **tecnica di posa in opera**, cattiva **compattazione** e **maturazione** del calcestruzzo;
4. **Azioni meccaniche**: erosione, urti, abrasione, carichi eccessivi, fatica;
5. **Azioni fisiche**: cicli gelo-disgelo, incendio;
6. **Azioni chimiche** – biologiche: attacco di acidi, attacco di solfuri e solfati, attacco da acque pure, attacco di cloruri, reazioni alcali-aggregati, carbonatazione;
7. Presenza di **correnti vaganti** (corrosione indotta nelle barre).



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

MACCHIE — ALTERAZIONI CROMATICHE DELLA SUPERFICIE



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

MACCHIE – ALTERAZIONI CROMATICHE DELLA SUPERFICIE (scheda)

- Tipologia di degrado: **ALTERAZIONE SUPERFICIALE** → ESTETICA SUL FACCIAVISTA;
- Tipologia di danno: **ESTETICO**;
- Dove: tutte le superfici **IN CONTATTO** con i casseri durante le fasi di messa in opera;
- Quando: tipicamente **più evidenti subito dopo l'esecuzione**, la percezione della differenza cromatica **SI RIDUCE** con il tempo;
- Come: macchie di forma **IRREGOLARE**;
- Perché: **presenza di contaminanti sulla superficie interna del cassero** (polvere, terra, etc); **presenza di acqua o ghiaccio sulla superficie interna del cassero**; **distribuzione non omogenea dell'olio disarmante** sulla superficie interna del cassero; se i casseri sono realizzati in legno, **differente tipologia** tra i casseri utilizzati;
- Diagnosi: **estrazione di carote/micro-carote** per analisi in microscopia o all'infrarosso;
- Manutenzione: preliminare **pulitura della superficie**; applicazione di **rivestimenti protettivi** in materiale acrilico o alternativamente **trattamento idrorepellente** incolore o pigmentato.

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

MACROBOLLE



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

MACROBOLLE (scheda)

- Tipologia di degrado: **ALTERAZIONE SUPERFICIALE** → ESTETICA SUL FACCIAVISTA;
- Tipologia di danno: **ESTETICO**;
- Dove: nelle superfici laterali di **elementi in contatto con casseri “impermeabili”**, ad es. acciaio, pvc rigido e pannelli in legno multistrato, quando vengono usati rivestimenti in gomma per imprimere particolari tessiture superficiali;
- Quando: visibili **da scasseratura** in poi;
- Come: si presentano come **pori circolari con diametro variabile** da pochi mm a qualche cm, di profondità tipicamente di qualche mm;
- Perché: **insufficiente vibrazione** durante la posa in opera e non espulsione di bolle d’aria intrappolate nell’impasto; **casseri impermeabili**; utilizzo di **disarmanti** a base di oli minerali emulsionabili in acqua; sovradosaggio di **additivi fluidificanti**; **eccessiva altezza di getto**;
- Diagnosi: - ;
- Manutenzione: -.

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

DILAVAMENTO



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

DILAVAMENTO (scheda)

- Tipologia di degrado: **ALTERAZIONE SUPERFICIALE** → ESTETICA SUL FACCIAVISTA;
- Tipologia di danno: ESTETICO;
- Dove: strutture a **diretto contatto con l'acqua**, tipicamente pareti e setti verticali;
- Quando: **nel corso della vita** utile dell'opera (lentamente > 15-20 anni);
- Come: progressiva **rimozione del lattime**, fino ad ottenere una superficie molto rugosa e con **tessitura porosa**; la superficie è anche più scura a causa del deposito di particolato nelle porosità superficiali;
- Perché: effetto di **dilavamento dell'acqua su calcestruzzi di scadente qualità**, invecchiamento delle opere;
- Diagnosi: estrazione di **micro-carote** per valutare il deposito all'interno dei pori e per determinare la profondità di materiale interessato;
- Manutenzione: **idropulizia delle superfici, rasatura e trattamento idrorepellente** (strutture realizzate con casseri impermeabili); rasatura con **malta tissotropica** su tutta la superficie con stampo con venature simili all'originali (strutture realizzate con casseri in legno), trattamento finale idrorepellente. Ricostruzione dell'elemento se stato avanzato del fenomeno.

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

PERDITA DI BOIACCA



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

PERDITA DI BOIACCA (scheda)

- Tipologia di degrado: **ALTERAZIONE SUPERFICIALE** → ESTETICA SUL FACCIAVISTA;
- Tipologia di danno: **ESTETICO** (può progredire a **STRUTTURALE**);
- Dove: nei punti di **CONTATTO** fra i **CASSERI** ed alla **base di elementi verticali**;
- Quando: alla **SCASSERATURA**;
- Come: si manifestano come **ACCUMULI di pasta di cemento** (boiaccia), sotto forma di striature di colore più scuro della superficie non danneggiata; nei casi più gravi appaiono molto simili a **NIDI di GHIAIA**;
- Perché: **giunzione non perfetta dei pannelli** costituenti i casseri; nei calcestruzzi con **bassa quantità di legante e fini**, con alto contenuto di acqua;
- Diagnosi: - ;
- Manutenzione: su facciavista preliminare pulitura della superficie e applicazione di **rivestimenti protettivi in materiale acrilico** o alternativamente trattamento **idrorepellente** incolore o pigmentato; alternativamente **rasatura superficiale** con riproduzione per colore e tessitura all'originale. Se in stato avanzato, **iniezione di malta cementizia** nei nidi di ghiaia.

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

CAVILLATURE — FESSURE A TELA DI RAGNO (1)



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

CAVILLATURE - FESSURE A TELA DI RAGNO (scheda)

- Tipologia di degrado: **ALTERAZIONE SUPERFICIALE** → ESTETICA SUL FACCIAVISTA;
- Tipologia di danno: **ESTETICO** (può progredire a **STRUTTURALE**);
- Dove: **nelle superfici LIBERE**, non a contatto con i casseri;
- Quando: nelle **prime ore dopo il getto**, quando il calcestruzzo è ancora PLASTICO;
- Come: si presentano con **un lieve quadro fessurativo**, a tela di ragno: nelle strutture debolmente armate, non hanno una geometria regolare; **nelle strutture fortemente armate**, seguono la **disposizione delle barre d'armatura**;
- Perché: **calcestruzzi non confezionati correttamente**, con un insufficiente apporto di umidità durante le prime ore dell'idratazione; eccesso di acqua nell'impasto;
- Diagnosi: - ;
- Manutenzione: applicazione di **protezione alla superficie mediante emulsioni acriliche**; se in strutture orizzontali con eccessiva fessurazione e/o perdita di planarità, iniezione di sistemi epossidici a bassa viscosità o demolizione del primo strato (2-3 cm) di calcestruzzo e sostituzione con malta di ripristino.

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

COLONIZZAZIONE BIOLOGICA



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

COLONIZZAZIONE BIOLOGICA (scheda)

- Tipologia di degrado: **ALTERAZIONE SUPERFICIALE** → ESTETICA SUL FACCIAVISTA;
- Tipologia di danno: **ESTETICO** (può essere di tipo **STRUTTURALE** per cls a bassa resistenza meccanica);
- Dove: strutture in ambiente **ESTERNO**, interessate **da forte UMIDITA'** (orientamento tipicamente a **NORD**), all'estradosso per strutture orizzontali;
- Quando: nel corso della **vita utile** dell'opera;
- Come: macchie o striature di colore verde-nero, in qualche caso rosso-giallo; nei casi più gravi con presenza di muschi, licheni o intrusioni di vegetazione;
- Perché: **persistenza e ristagno di acqua sulla superficie**, ambiente umido, favorita in **calcestruzzi porosi**; **difetti congeniti ai sistemi di smaltimento delle acque** sono fondamentali per l'accelerazione del fenomeno;
- Diagnosi: - ;
- Manutenzione: **idropulizia** della superficie, trattamenti **idrofobizzanti** delle superfici interessate; se il degrado compromette l'intero strato di copriferro, rimozione dello stesso, applicazione di malta a ritiro compensato, rasatura e trattamento idrofobico/biocida conclusivo .

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

EFFLORESCENZE



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

EFFLORESCENZE (scheda)

- Tipologia di degrado: **ALTERAZIONE SUPERFICIALE** → ESTETICA SUL FACCIAVISTA;
- Tipologia di danno: **ESTETICO** (può essere di tipo **STRUTTURALE** per calcestruzzi a bassa resistenza meccanica per continua asportazione di materiale);
- Dove: in tutte le superfici **a diretto contatto con l'acqua**;
- Quando: nel corso **della vita utile** dell'opera;
- Come: **macchie/patine** di struttura irregolare sulla superficie del calcestruzzo, di colore **biancastro**; se la struttura è in continuo contatto con l'acqua, si possono avere anche **depositi** di qualche mm, facilmente **asportabili** con il solo contatto con le dita;
- Perché: l'acqua penetra nel calcestruzzo e produce idrossido di calcio, che viene dilavato e trasportato in superficie. Per effetto dell'insolazione, esso evapora e perde l'acqua, lasciando un deposito superficiale costituito **da carbonato di calcio**;
- Diagnosi: analisi per **diffrazione ai raggi X** del deposito (verifica se CaCO_3);
- Manutenzione: **pulizia meccanica** della superficie, allontanamento delle acque, eventuale trattamento idrorepellente della superficie.

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

DEPOSITO DI PARTICOLATO ATMOSFERICO (1)



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

DEPOSITO DI PARTICOLATO ATMOSFERICO (scheda)

- Tipologia di degrado: **ALTERAZIONE SUPERFICIALE** → ESTETICA SUL FACCIAVISTA;
- Tipologia di danno: **ESTETICO** (può progredire a **STRUTTURALE**);
- Dove: **strutture verticali o sub-verticali** a diretto contatto con l'**acqua**;
- Quando: nel corso della **vita utile** dell'opera;
- Come: **striature** tipicamente verticali di colore **grigio-nero**, che possono interessare l'intera superficie dell'elemento o parte di essa, con ampiezza variabile da qualche cm a qualche metro;
- Perché: effetto di **dilavamento** dell'acqua su calcestruzzi di scadente qualità;
- Diagnosi: estrazione di **micro-carote per valutare la composizione** del particolato a contatto con la superficie del calcestruzzo;
- Manutenzione: **idropulizia delle superfici**, trattamento **idrofobizzante** delle superfici e realizzazione di sistemi di allontanamento delle acque adeguate.

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

DISTACCO DI INTONACI E RIVESTIMENTI



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

DISTACCO DI INTONACI E RIVESTIMENTI (scheda 1)

- Tipologia di degrado: **ALTERAZIONE SUPERFICIALE** → ESTETICA SUL FACCIAVISTA;
- Tipologia di danno: **ESTETICO + PERICOLO PER LE PERSONE/TRAFFICO**;
- Dove: **elementi verticali** esposti alle azioni atmosferiche, soggetti a **cicli gelo/disgelo** e forti escursioni termiche giornalieri o stagionali;
- Quando: **dopo qualche anno** dalla realizzazione dell'opera;
- Come: può interessare **l'interfaccia cls/intonaco**, solo la stabilitura o **l'interfaccia cls/matrice** per i rivestimenti, e si manifesta come esfoliazioni superficiali o "sbollature", in dipendenza del materiale usato;
- Perché: **INTONACI**: **tensioni di trazione indotte da ritiro idraulico e carichi termici impediti** dall'aderenza con substrato; **PITTURE**: **assorbimento di acqua in ambiente umido** e bassa permeabilità al vapore; **RIVESTIMENTI**: come per l'intonaco oppure per **cattiva aderenza con il substrato**.
- Diagnosi: auscultazione **sonica** con martello; **termografia**; **pull-off** test.

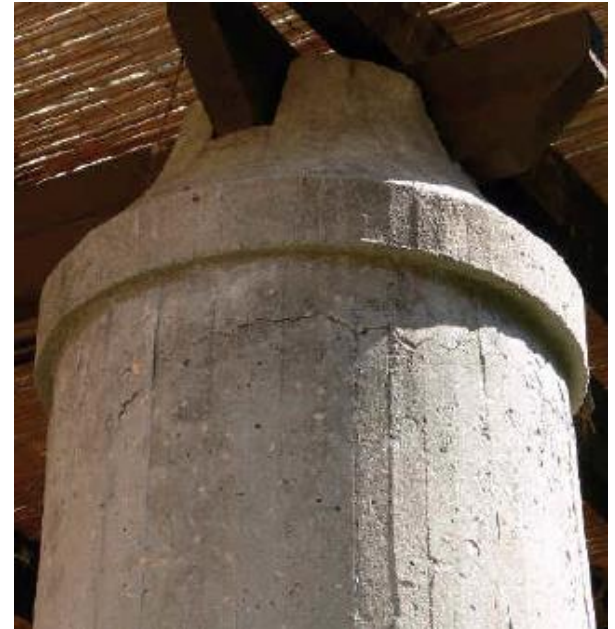
CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

DISTACCO DI INTONACI E RIVESTIMENTI (scheda 2)

- **Manutenzione: INTONACI fessurati ma adesi al substrato:** asportazione della tinteggiatura e stabilitura, rasatura con malta polimero-cemento armata con rete leggera, tinteggiatura con pittura silicata o silossilanic; **INTONACI distaccati dal substrato senza valenza architettonica-culturale:** rimozione e ricostruzione con malta a bassa resistenza e rigidità, eventuale stabilitura su tutta la superficie; **INTONACI distaccati dal substrato con valenza architettonica-culturale:** consolidamento, ad esempio con iniezione di sistemi epossidici, e rifacimento con materiali che garantiscano la medesima tessitura originaria; **per PITTURE e RIVESTIMENTI:** rimozione e nuova applicazione; per **RIVESTIMENTI con valenza architettonica-culturale:** consolidamento con iniezione di sistemi epossidici.

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

RIPRESE DI GETTO



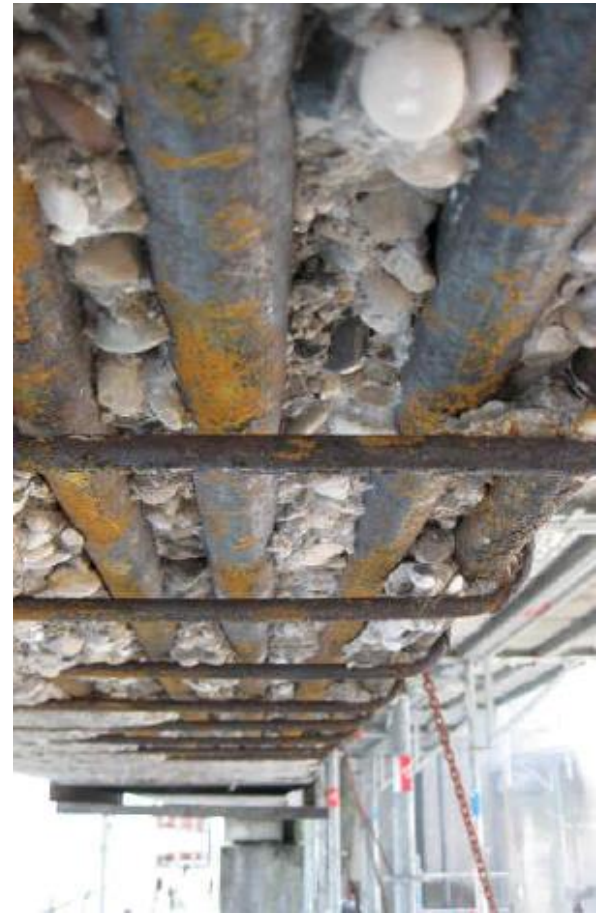
CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

RIPRESE DI GETTO (scheda)

- Tipologia di degrado: **ALTERAZIONE DELLA SEZIONE** ;
- Tipologia di danno: **ESTETICO + DURABILITA'**;
- Dove: elementi di grandi dimensioni il cui getto è stato eseguito in più momenti; connessioni fra elementi distinti quali fondazione-muro, parapetto-balcone, etc;
- Quando: **durante la posa in opera**;
- Come: comparsa di **una linea orizzontale/sub-orizzontale** che demarcano superfici con tonalità leggermente differenti, può essere anche **accompagnata da nidi di ghiaia**;
- Perché: **errori durante la posa in opera** e carenze progettuali ai dettagli costruttivi;
- Diagnosi: **indagini ultrasoniche**;
- Manutenzione: **sigillatura con iniezione di sistemi epossidici**.

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

VESPAI E NIDI DI GHIAIA



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

VESPAI E NIDI DI GHIAIA (scheda)

- Tipologia di degrado: **ALTERAZIONE DELLA SEZIONE** ;
- Tipologia di danno: **ESTETICO + DURABILITA' + RESISTENZA AL FUOCO + STRUTTURALE**;
- Dove: **tutti** con prevalenza negli elementi **verticali**, nelle **solette realizzate in carenza di fini**, in pareti realizzate con **shot-crete**;
- Quando: **durante la posa in opera**;
- Come: negli elementi realizzati con miscele con **basso dosaggio di malta fresca** (sabbia e cemento), ed eccesso di aggregati grossi, si presentano come macro-porosità diffuse o localizzate;
- Perché: **errori di posa in opera** e nel dosaggio delle miscele, **altezze di caduta maggiori a 2 metri**, erronee **aggiunte d'acqua** in cantiere o betoniera;
- Diagnosi: **sclerometro; indagini ultrasoniche**;
- Manutenzione: **rasatura superficiale e iniezione** di malte cementizie a ritiro compensato.

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

POP-OUT



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

POP OUT (scheda)

- Tipologia di degrado: **FESSURAZIONI E PERDITA DI MATERIALE**;
- Tipologia di danno: **ESTETICO + FUNZIONALITA'**;
- Dove: **pavimentazioni in cls** (interne ed esterne) con strato di usura realizzato con la tecnica della spolvero;
- Quando: nei **primi mesi di vita dell'opera**, dipendentemente dalla frequenza di contatto con acque piovane;
- Come: **espulsione di porzione di materiale a forma di cono**, la cui dimensione e distribuzione può essere molto variabile (generalmente diametro da qualche mm a qualche cm). Il materiale espulso è formato da una porzione dello strato di usura e parte dell'inerte che ha innescato il rigonfiamento;
- Perché: **reazione** alcali-silice o più generalmente **alcali-aggregato**, in presenza di contaminanti quali limo-argilla che possono adsorbire acqua e rigonfiare;
- Diagnosi: **analisi chimica elementare dello strato di usura** (ricerca alcali) e **analisi SEM in sezione sottile** del bordo aggregato-usura, previa estrazione di micro-carota;
- Manutenzione: verifica della **residua espansività + impermeabilizzazione pavimento**.

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

DISTACCO DELLO STRATO DI USURA DELLE PAVIMENTAZIONI – SCALING



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

DISTACCO DELLO STRATO DI USURA DELLE PAVIMENTAZIONI – SCALING (scheda)

- Tipologia di degrado: **FESSURAZIONI E PERDITA DI MATERIALE;**
- Tipologia di danno: **ESTETICO + FUNZIONALITA' + RESISTENZA ALL'ABRASIONE;**
- Dove: **pavimentazioni industriali;**
- Quando: immediatamente / dopo qualche anno di vita dell'opera;
- Come: porzioni a forma di **lastra irregolare** si staccano dalla pavimentazione originaria, possono essere anche molto estese, fino ad interessare tutto lo strato corticale;
- Perché: **errori nella stesura dello strato di usura** o azione **cicli gelo/disgelo;**
- Diagnosi: analisi **al microscopio ottico** per escludere danno da ASR;
- Manutenzione: **scarifica dello strato corticale e ricostruzione.**

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

MACCHIE DI RUGGINE, FESSURAZIONE, PERDITA DEL COPRIFERRO, OSSIDAZIONE E PERDITA DI SEZIONE DELLE ARMATURE METALLICHE (1)



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

MACCHIE DI RUGGINE, FESSURAZIONE, PERDITA DEL COPRIFERRO, OSSIDAZIONE E PERDITA DI SEZIONE DELLE ARMATURE METALLICHE (2)



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

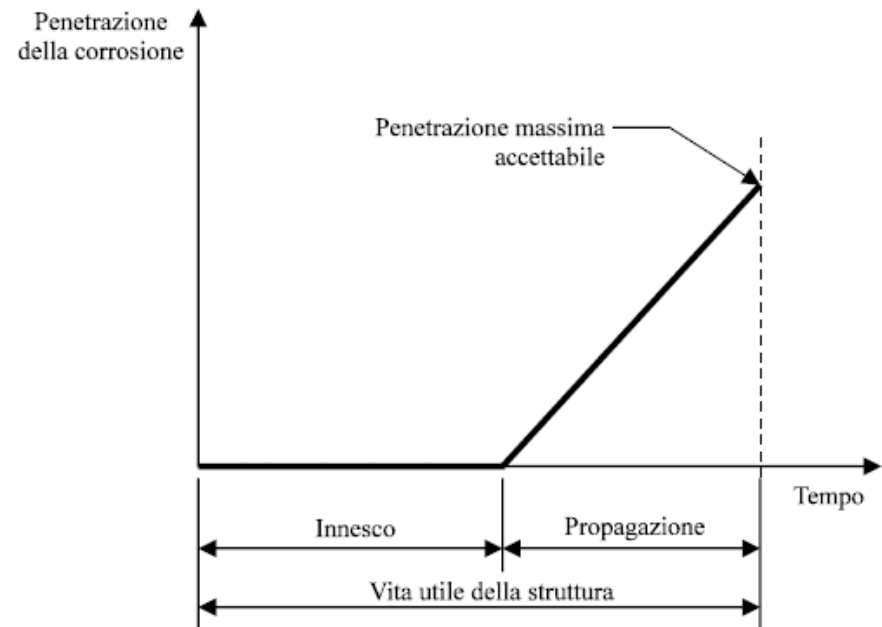
MACCHIE DI RUGGINE, FESSURAZIONE, PERDITA DEL COPRIFERRO, OSSIDAZIONE E PERDITA DI SEZIONE DELLE ARMATURE METALLICHE (scheda)

- Tipologia di degrado: **FESSURAZIONI E PERDITA DI MATERIALE;**
- Tipologia di danno: **ESTETICO + STRUTTURALE;**
- Dove: tutti gli elementi strutturali che per qualsiasi ragione si trovano a contatto con ambienti molto umidi;
- Quando: **durante la vita utile dell'opera;**
- Come: **inizialmente macchie di ruggine di colore giallastro-arancione; fessurazione lungo la direzione delle armatura interessate dalla corrosione; espulsione del copriferro; riduzione della sezione utile delle barre;** in solai in latero-cemento, **sfondellamento dei laterizi a causa della corrosione dei travetti;**
- Perché: promossa dall'utilizzo **di miscele scadenti; ridotti spessori del copriferro;** mancata maturazione umida dei getti; **fessurazione pre-esistente** dovuta ai fenomeni già visti; errori nella raccolta e smaltimento acque;

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

MACCHIE DI RUGGINE, FESSURAZIONE, PERDITA DEL COPRIFERRO, OSSIDAZIONE E PERDITA DI SEZIONE DELLE ARMATURE METALLICHE

- Perché è promossa:
 - 1) corrosione indotta da **CARBONATAZIONE**, che consiste nella neutralizzazione dell'alcalinità del calcestruzzo da parte dell'anidride carbonica proveniente dall'ambiente esterno;
 - 2) corrosione indotta da presenza di **CLORURI**, quando sulla superficie delle armature viene raggiunto e superato un determinato tenore critico, tale da distruggere il film protettivo;
 - 3) **ulteriori** fonti: correnti elettriche vaganti.



Modello di Tuutti

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

CARBONATAZIONE

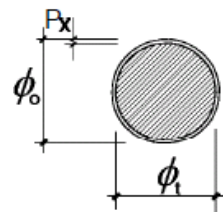
La concentrazione media attuale di CO_2 nell'aria è compresa tra 350 e 380 ppm che equivale a $0.00057\text{-}0.00062 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$

Previsione dell'INNESCO tramite modelli basati su processi Diffusivi
(Fick 1D stazionario)

$$s = k \cdot \sqrt{t}$$

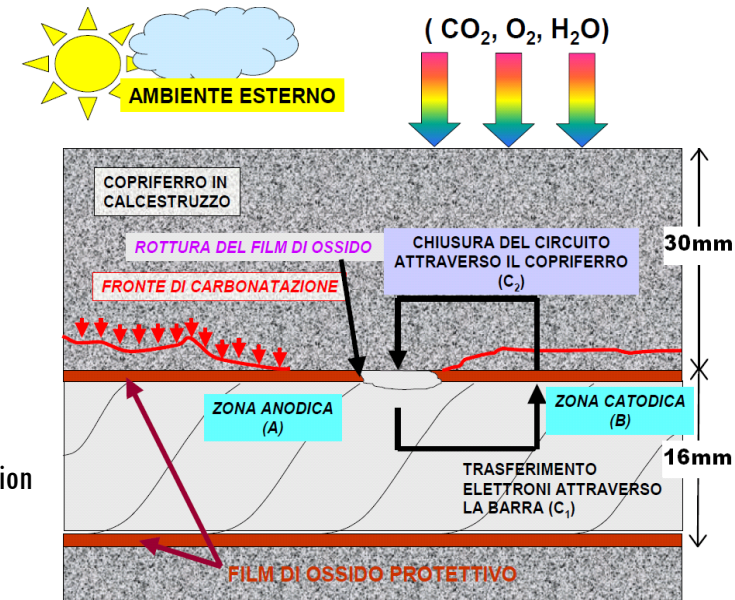
Dipende da umidità relativa, temperatura, caratteristiche del cls.

La tipologia di corrosione che si ha è distribuita in tutta la superficie della barra.



HOMOGENEOUS CORROSION

DuraCrete (1998)
Modelling of degradation



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

CARBONATAZIONE (scheda)

- Diagnosi: test colorimetrico mediante **fenoftaleina**;
- Manutenzione: **scarifica** del cls carbonatato liberando completamente i ferri d'armatura dal conglomerato non più protettivo; **pulizia** dei ferri; eventuale **integrazione** di nuova armatura; eventuale **protezione** dei tondini con protettivi polimero-cemento; **bagnatura** del supporto in cls prima della ricostruzione della sezione da effettuarsi con betoncino o malta da ripristino; **ricostruzione**; applicazione di uno strato di **rasatura** di qualche mm; eventuale protezione superficiale.



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

CORROSIONE INDOTTA DA CLORURI

Penetrazione può avvenire mediante: **Assorbimento, Permeazione, Aspirazione, Combinazione** del cloruro con la matrice cementizia.

Assorbimento: L'acqua può essere assorbita dai pori sulla superficie del calcestruzzo per effetto di **forze capillari**.
i volume di liquidi assorbito per unità di area bagnata [mm^3/mm^2], S sorptività [$\text{mm}/\text{min}^{0.5}$], t = tempo in [min].

$$i = S \cdot \sqrt{t}$$

Permeazione: La permeazione è dovuta ad un **gradiente di pressione**, dipende dalla **porosità capillare**. Si stima tramite la legge di Darcy:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{K \cdot \Delta P \cdot A}{L \cdot \mu}$$

μ è la viscosità del fluido [Ns/m^2],
 $\Delta P/L$ è il gradiente di pressione [Pa/m],
K è il coefficiente di permeabilità intrinseco del materiale [m^2].

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

CORROSIONE INDOTTA DA CLORURI

Penetrazione può avvenire mediante: Assorbimento, Permeazione, Aspirazione, Combinazione del cloruro con la matrice cementizia.

Aspirazione: Fenomeno che avviene soprattutto nelle fondazioni, rivestimenti di tunnel, quando **una faccia di calcestruzzo è a contatto con l'acqua mentre l'altra è asciutta**, si innesca uno spostamento di ioni dalla prima alla seconda faccia.

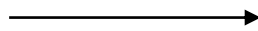
Combinazione (Chlorides Binding): Il fenomeno riguarda la **combinazione di ioni Cl⁻ con la matrice cementizia**, tramite la formazione di strutture cristalline complesse come i Sali di Friedel, e quindi non contribuiscono al raggiungimento della soglia critica, **ed aumentano il tempo di innesco**.

CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

CORROSIONE INDOTTA DA CLORURI

Si può modellare in modo semplificato tramite modelli di processi diffusivi non stazionari es. **seconda legge di Fick 1D**

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

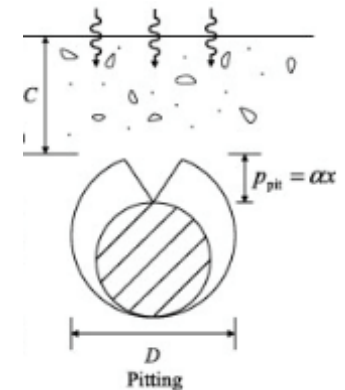


$$\frac{c}{c_s} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right)$$

Il valore di D per calcestruzzi saturi di acqua diminuisce:

- al diminuire del rapporto a/c per effetto della minore porosità capillare;
- all'aumentare del grado di compattazione grazie ad una migliore lavorabilità;
- passando dal cemento Portland al cemento pozzolanico o d'altoforno.

La velocità di corrosione è invece una costante. Modalità di corrosione **NON UNIFORME**.



CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

CORROSIONE INDOTTA DA CLORURI (scheda)

- Diagnosi: test **colorimetrico** mediante nitrato d'argento o **analisi chimica elementare** di campioni estratti tramite carotaggio;
- Manutenzione: **scarifica** del cls con cloruro oltre soglia, liberando completamente i ferri d'armatura dal conglomerato non più protettivo; **pulizia** dei ferri; eventuale **integrazione** di nuova armatura; eventuale **protezione** dei tondini con protettivi polimero-cemento; **bagnatura** del supporto in cls prima della ricostruzione della sezione da effettuarsi con betoncino o malta da ripristino; **ricostruzione**; applicazione di uno strato di **rasatura** di qualche mm; eventuale **protezione** superficiale.

