

# 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  $\text{CaCO}_3$ );
- 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.

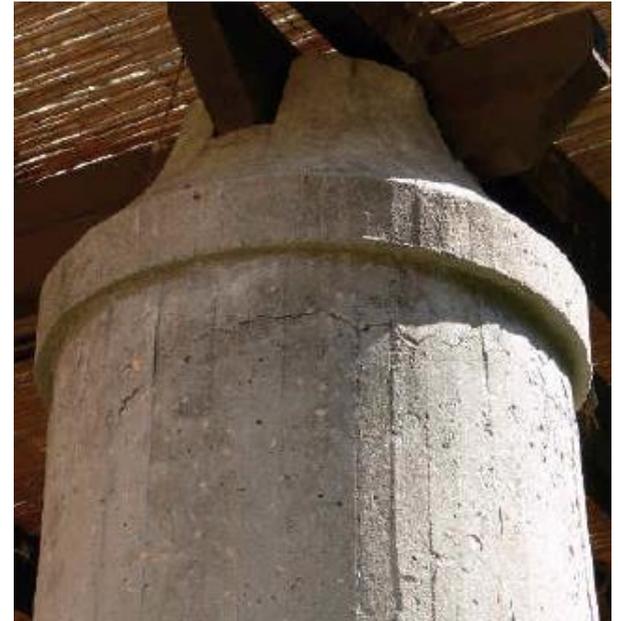
# CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

## **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



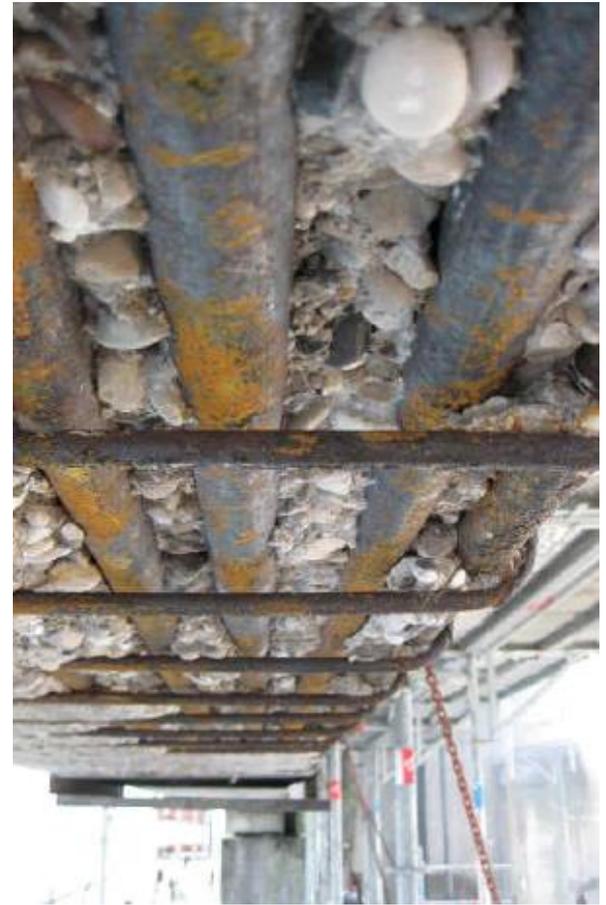
# CAUSE DEL DEGRADO NELLE OPERE IN C.A.

## 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.

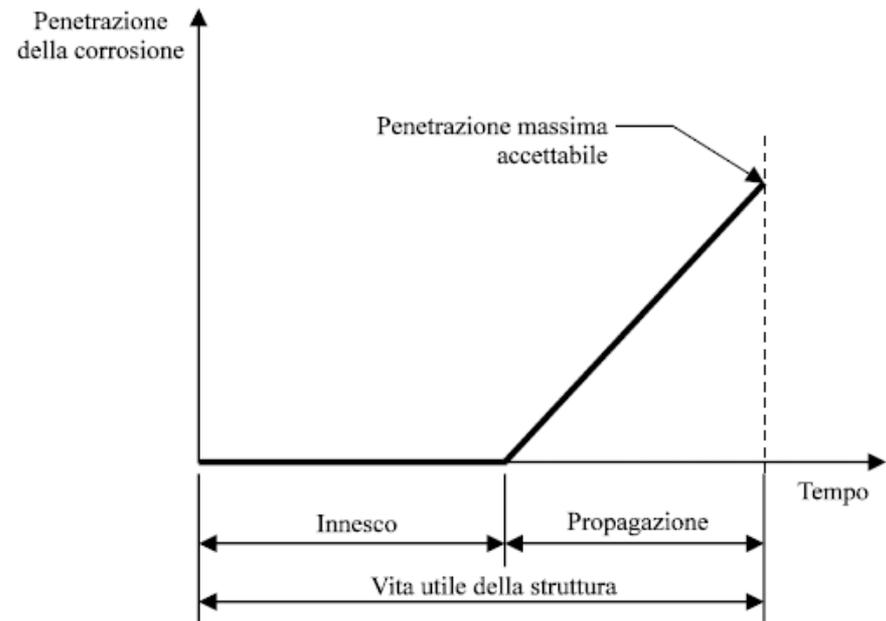
## MACCHIE DI RUGGINE, FESSURAZIONE, PERDITA DEL COPRIFERRO, OSSIDAZIONE E PERDITA DI SEZIONE DELLE ARMATURE METALLICHE (scheda)

- 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

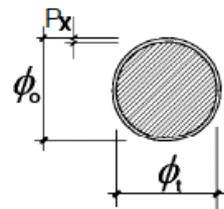
La concentrazione media attuale di  $\text{CO}_2$  nell'aria è compresa tra 350 e 380 ppm che equivale a 0.00057-0.00062  $\text{kg CO}_2/\text{m}^3$

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

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

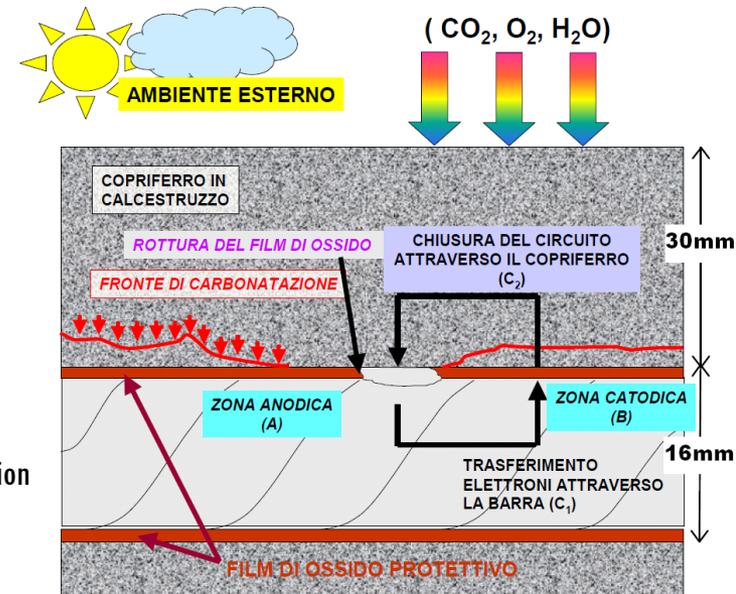
Dipende da umidità relativa, temperatura, caratteristiche del cls.

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 [ $\text{mm}^3/\text{mm}^2$ ], 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:

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

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

# 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<sup>-</sup> 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**

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

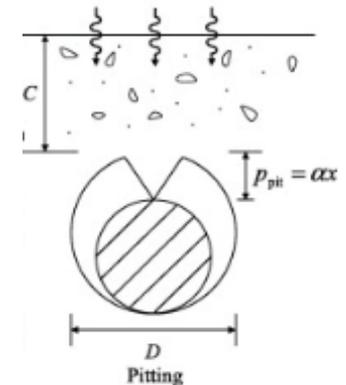


$$\frac{c}{c_s} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right)$$

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.

