

Nota del Direttore

Su disposizione del Direttore del DICAr prof. Enrico Foti, nella sua qualità di responsabile della didattica dei corsi di studio afferenti allo stesso DICAr, si ricorda che

«la partecipazione alle lezioni telematiche vincola gli studenti alla corretta gestione del materiale didattico distribuito dal docente così come della eventuale registrazione della stessa lezione, entrambi, per legge, di esclusiva proprietà dell'Università degli Studi di Catania».

«In particolare, si ricorda che è fatto divieto agli studenti di qualunque forma di divulgazione ovvero di qualunque uso diverso da quello strettamente personale della eventuale registrazione della lezione e del correlato materiale didattico distribuito in qualunque forma dal docente. Pertanto, la partecipazione dello studente alla lezione telematica implica l'automatica accettazione dei vincoli suddetti la cui violazione espone lo studente stesso alle sanzioni previste dalla legge».

Forme di degrado del conglomerato cementizio armato

Durabilità delle opere in cls

Indicazioni di normativa

La costruzione e la specifica manutenzione devono essere progettate in modo che il degrado della struttura, che si dovesse verificare durante la sua vita nominale di progetto, non riduca le prestazioni della costruzione al di sotto del livello previsto.

Adozione di appropriate misure in termini di:

- a) scelta opportuna dei materiali;
- b) dimensionamento opportuno delle strutture;
- c) scelta opportuna dei dettagli costruttivi...

Le condizioni ambientali devono essere identificate in fase di progetto in modo da valutarne la rilevanza nei confronti della durabilità

Cause di degrado

1. Corrosione delle armature

- promossa da carbonatazione del cls
- promossa da cloruri

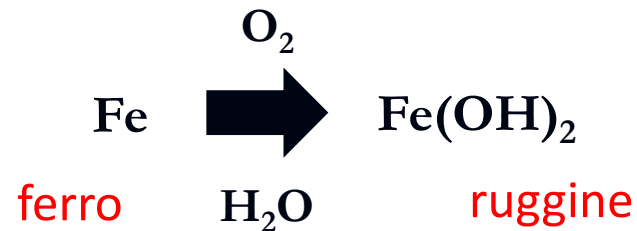
2. Attacco solfatico della matrice cementizia

3. Reazione alcali-silice

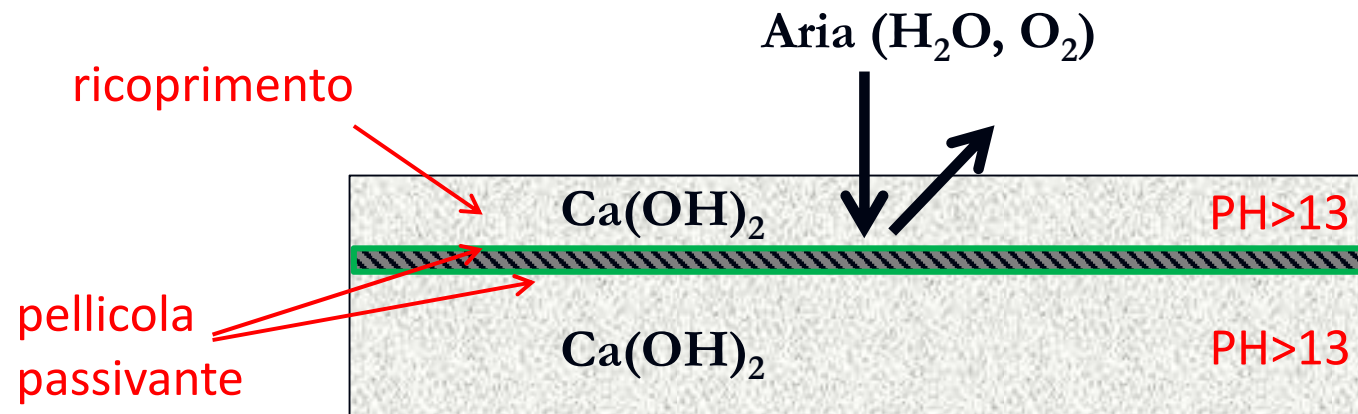
4. Formazione di ghiaccio

Corrosione delle armature

Reazione



Il processo non si attiva se l'ambiente in cui si trovano le armature ha $\text{PH} > 11$



Corrosione delle armature

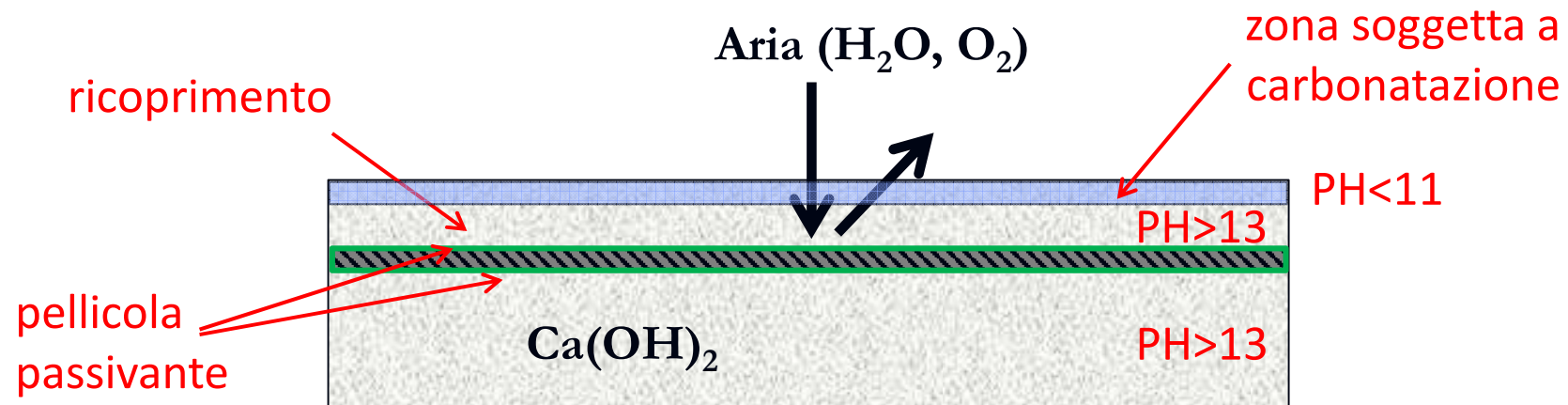
Promossa da carbonatazione del calcestruzzo



calce

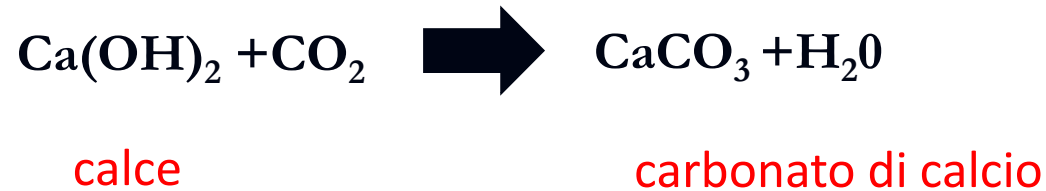
carbonato di calcio

Il processo non si attiva se l'ambiente in cui si trovano le armature ha $\text{pH} > 11$

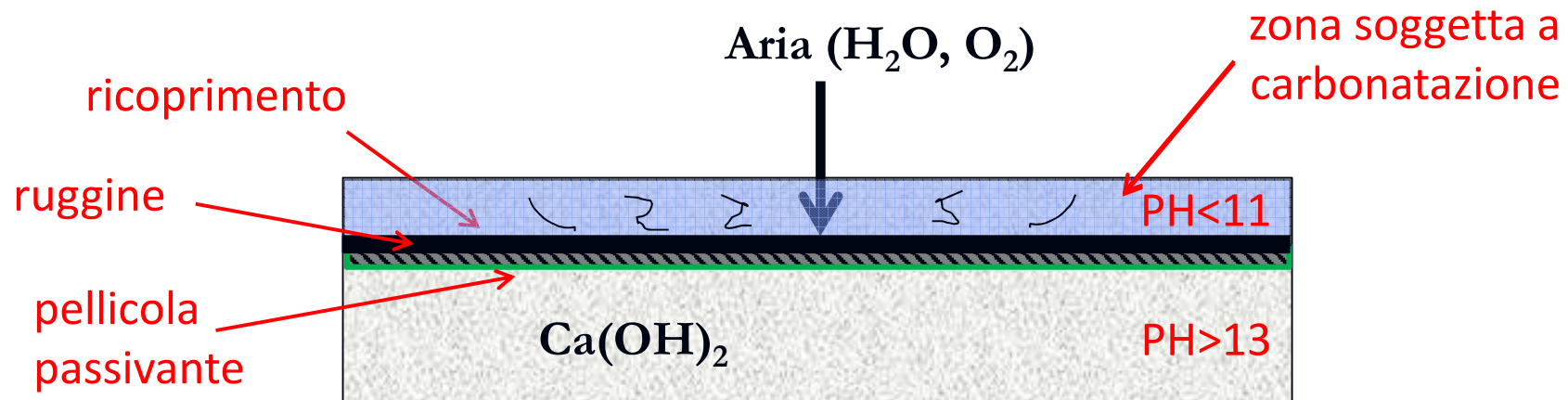


Corrosione delle armature

Promossa da carbonatazione del calcestruzzo



Il processo non si attiva se l'ambiente in cui si trovano le armature ha $\text{PH} > 11$



Carbonatazione

Spessore della zona affetta da carbonatazione

$$s_c = k\sqrt{t}$$

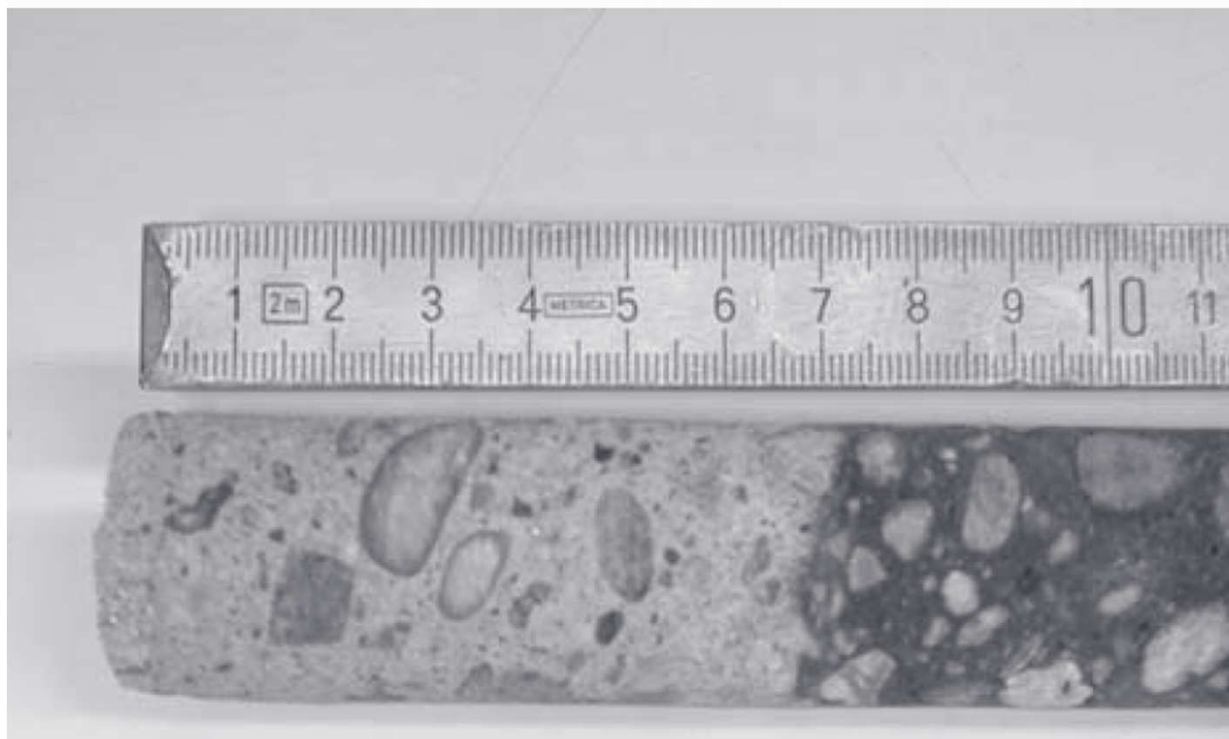
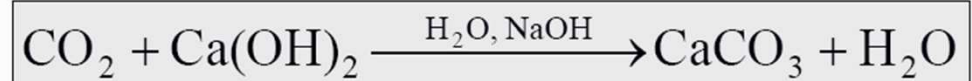
La costante k dipende da:

- rapporto acqua/cemento (a/c)
- tipo di cemento
- umidità dell'aria (UR)

| a/c | k (mm anno ^{-1/2}) |
|-------|-----------------------------------|
| 0.4 | 3.8 |
| 0.5 | 7.0 |
| 0.6 | 10.1 |
| 0.7 | 12.3 |
| 0.8 | 15.1 |

Carbonatazione

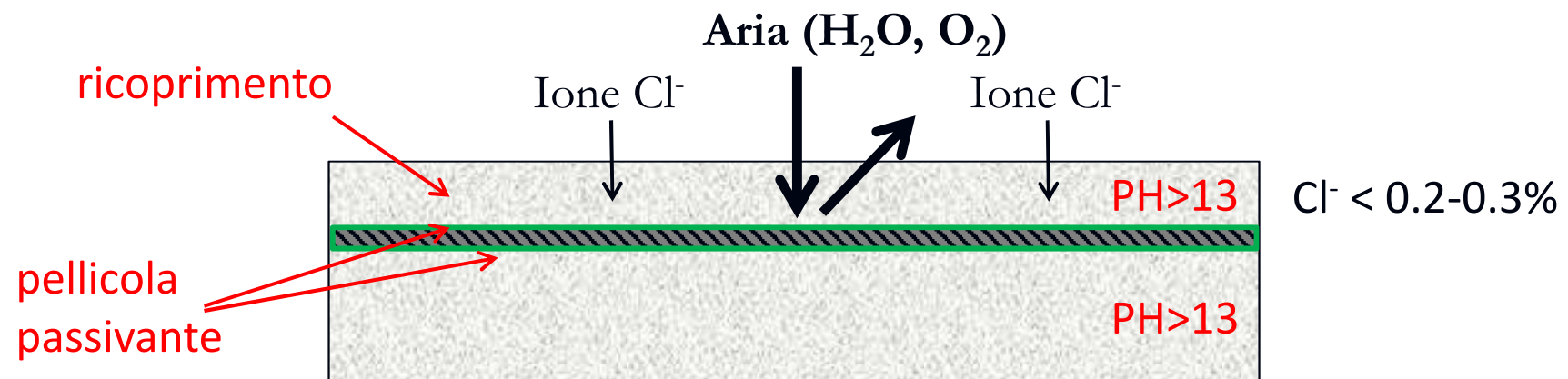
Test con fenolftaleina



Corrosione delle armature

Promossa da cloruri

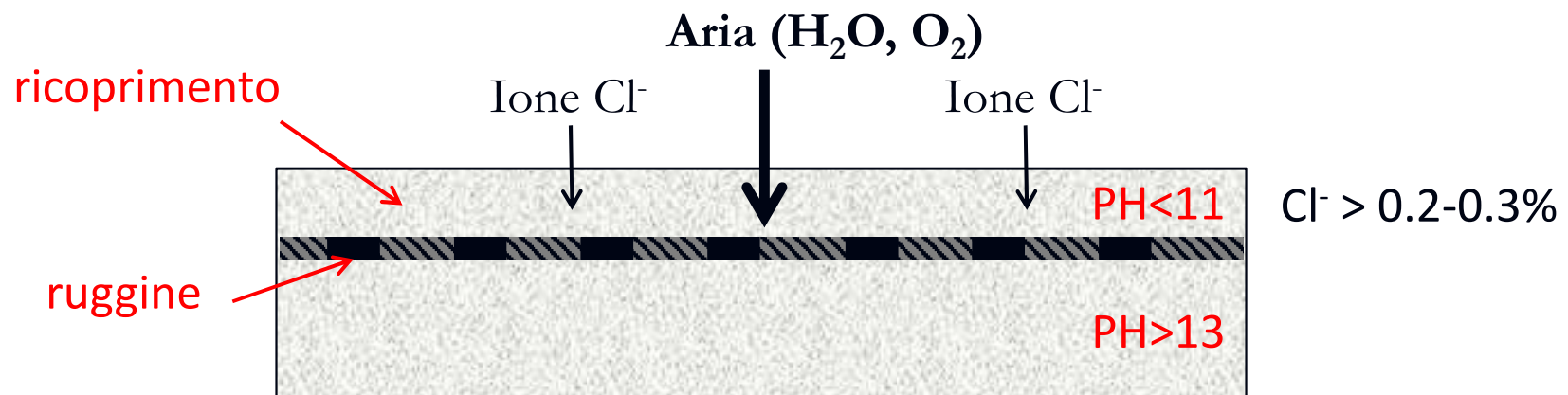
L'acqua penetra nel calcestruzzo trasportando lo ione cloruro Cl^- .



Corrosione delle armature

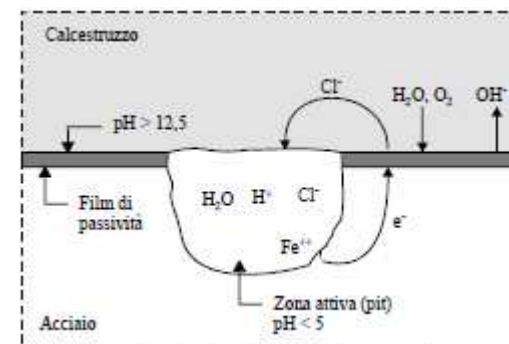
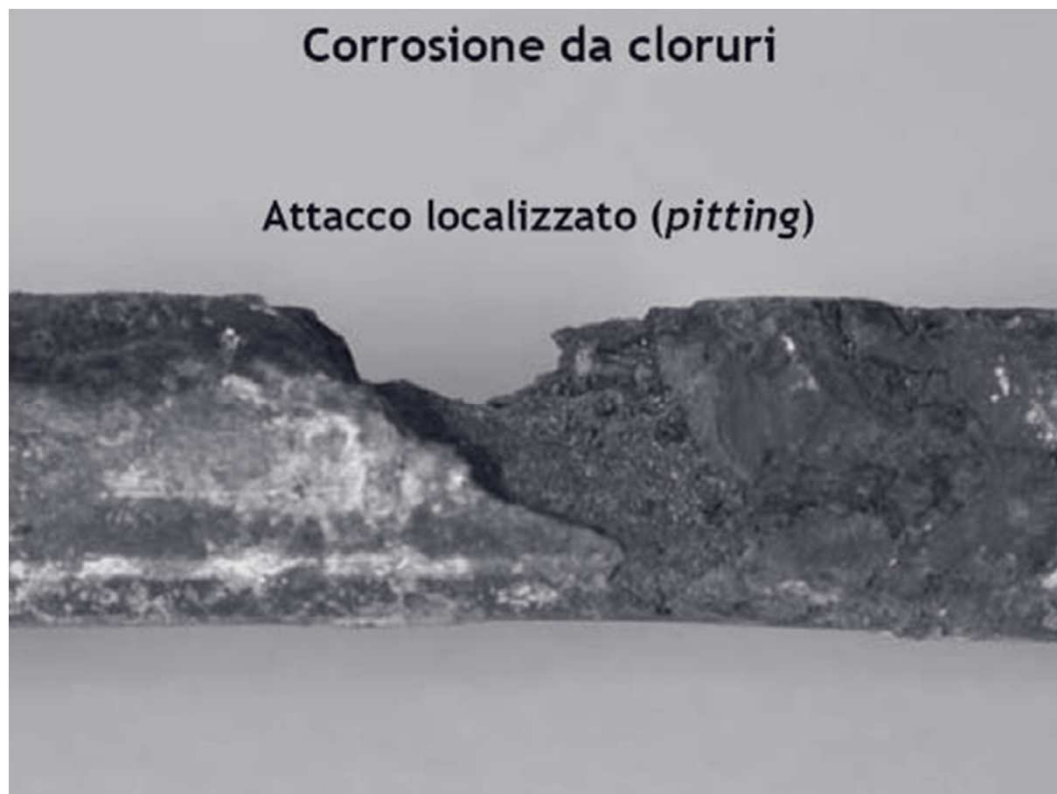
Promossa da cloruri

L'acqua penetra nel calcestruzzo trasportando lo ione cloruro Cl^- .



Corrosione promossa da cloruri

Pitting



Penetrazione del cloruro

Spessore penetrato dal cloruro

$$s_c = 4\sqrt{D t}$$

Il coefficiente di diffusione D dipende da:

- rapporto acqua/cemento (a/c)
- Compattazione del calcestruzzo
- tipo di cemento
- temperatura

Mitigazione del degrado armature

Interventi progettuali

1. Aumentare lo spessore del ricoprimento
2. Ridurre il rapporto a/c
3. Cambiare tipo di cemento
4. Migliorare il grado di compattazione

Degrado del calcestruzzo

Attacco solfatico esterno

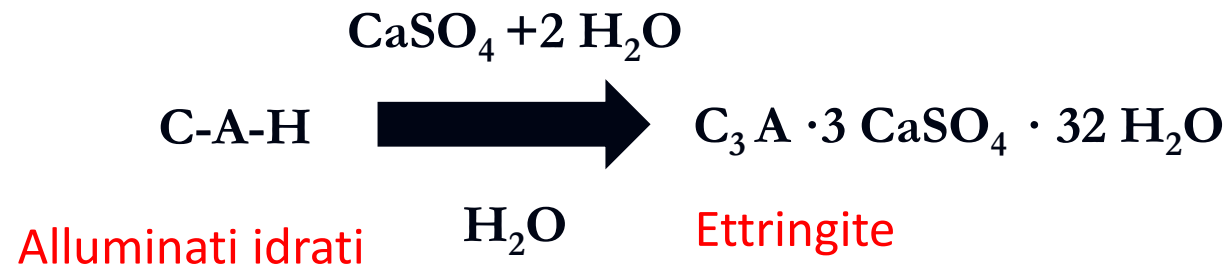
Lo ione SO_4^- può essere presente nei terreni e nelle acque a contatto con strutture in calcestruzzo.



Attacco solfatico esterno

Reazione n. 1

Il gesso prodotto può reagire con gli alluminati idrati (C-A-H) e formare ettringite

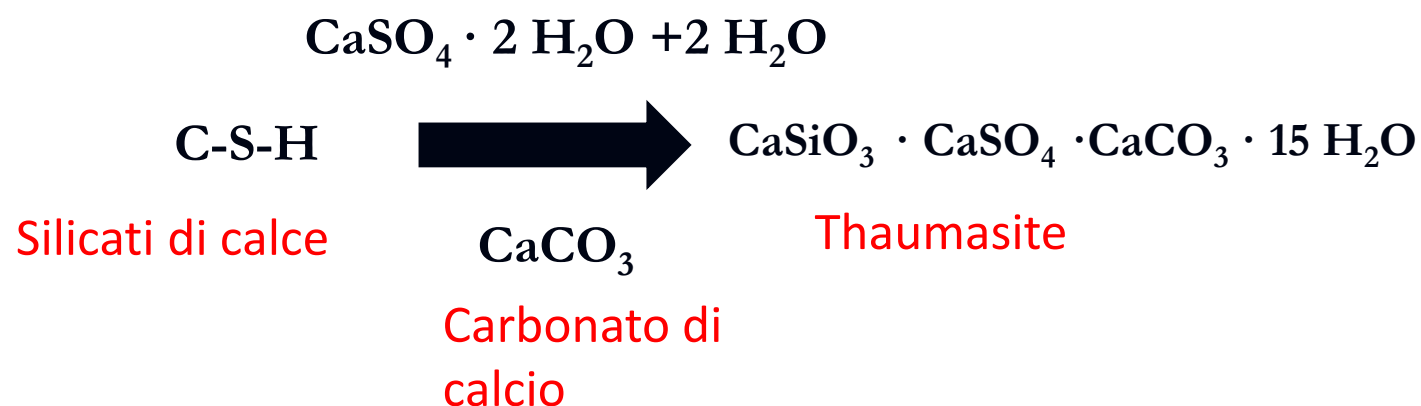


La formazione di ettringite secondaria provoca rigonfiamenti, delaminazioni, fessurazioni e distacchi per l'aumento di volume associato alla reazione.

Attacco solfatico esterno

Reazione n. 2

In caso di temperature fredde e umide sotto i 10° C con UR > 95%, l'attacco solfatico si esplica attraverso la formazione della thaumasite:



La formazione di thaumasite è il più devastante tra tutti gli attacchi solfatici.

Degrado del calcestruzzo

Attacco solfatico interno

Si sviluppano reazioni analoghe a quelle descritte nel caso di attacco solfatico esterno

Lo ione $\text{SO}_4^{=}$ è presente negli aggregati sotto forma di gesso

Mitigazione del degrado da $\text{SO}_4^{=}$

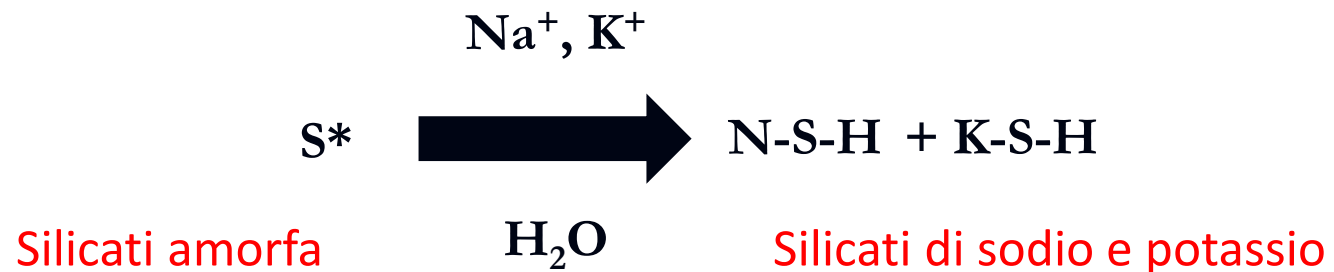
Interventi progettuali

1. Evitare l'utilizzo di aggregati che contengono solfati
2. Ridurre il rapporto a/c

Degrado del calcestruzzo

Reazione alcali-silice

Coinvolge gli aggregati che contengono una particolare forma di silice, capace di reagire con gli alcali, sodio e potassio per produrre una reazione espansiva a carattere distruttivo.



Mitigazione del degrado da Silice

Interventi progettuali

1. Utilizzo di cementi con pozzolana

Degrado del calcestruzzo

Formazione di ghiaccio

Alle basse temperature, la trasformazione avviene con un aumento di volume di circa il 9%.

Se il rapporto acqua/volume dei vuoti è superiore al 91% il ghiaccio solleciterà il calcestruzzo fino a farlo fessurare.

Gli effetti diventano devastanti per successivi cicli di gelo e disgelo.

Riduzione del degrado da ghiaccio

Interventi progettuali

1. Riduzione del rapporto a/c
2. Utilizzo di additivi aeranti
3. Impiego di aggregati non gelivi

Classi di esposizione

UNI EN 206

| Classe di esposizione | Ambiente | Tipo di struttura | Sottoclassi |
|-----------------------|---|---------------------|-------------|
| XO | Nessun rischio di corrosione (interni di edifici con UR molto bassa) | Non armata e armata | 1 |
| XC | Corrosione delle armature promossa dalla carbonatazione | Armata | 4 |
| XD | Corrosione delle armature promossa dai cloruri esclusi quelli presenti in acqua di mare | Armata | 3 |
| XS | Corrosione delle armature promossa dai cloruri dell'acqua di mare | Armata | 3 |
| XF | Degrado del calcestruzzo per cicli di gelo-disgelo | Non armata e armata | 4 |
| XA | Attacco chimico del calcestruzzo (incluso quello promosso dall'acqua di mare) | Non armata e armata | 3 |

Caratteristiche del calcestruzzo

UNI EN 206 - UNI 11104

| Denom. della classe | Descrizione dell'ambiente | Esempi informativi di situazioni a cui possono applicarsi le classi di esposizione |
|------------------------|--|---|
| XC1 | Asciutto o permanentemente bagnato | Interni di edifici con umidità relativa bassa. Calcestruzzo armato ordinario o precompresso con le superfici all'interno di strutture con eccezione delle parti esposte a condensa immerse in acqua |
| XC2 | Bagnato, raramente asciutto | Parti di strutture di contenimento liquidi, fondazioni. Calcestruzzo armato ordinario o precompresso prevalentemente immerso in acqua o terreno non aggressivo. |
| XC3 | Umidità moderata | Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in esterni con superfici esterne riparate dalla pioggia o in interni con umidità da moderata ad alta |
| XC4 | Ciclicamente asciutto e bagnato | Calcestruzzo armato ordinario o precom. in esterni con superfici soggette ad alternanze di asciutto ed umido. Calcestruzzi a vista in ambienti urbani. |

Caratteristiche del calcestruzzo

UNI EN 206 - UNI 11104

| Denom. della classe | Descrizione dell'ambiente | Esempi informativi di situazioni a cui possono applicarsi le classi di esposizione |
|------------------------|------------------------------------|---|
| XD1 | Moderatamente umido | Strutture raramente a diretto contatto superficiale di spruzzi di acqua (pavimenti esposti a spruzzi occasionali di salamoia) |
| XD2 | Bagnato, raramente asciutto | Piscine natatorie; vasche di trattamento di acque industriali contenenti cloruro; parti di ponte |
| XD3 | Ciclicamente asciutto e bagnato | Pavimenti esterni esposti occasionalmente ad acque salate; pavimenti e solai di parcheggi coperti |

Caratteristiche del calcestruzzo

UNI EN 206 - UNI 11104

| Denom. della classe | Descrizione dell'ambiente | Esempi informativi di situazioni a cui possono applicarsi le classi di esposizione |
|------------------------|------------------------------------|---|
| XS1 | Moderatamente umido | Strutture in prossimità delle coste esposte al trascinamento eolico dell'acqua (aerosol) |
| XS2 | Bagnato, raramente asciutto | Strutture permanentemente e completamente sotto acqua di mare |
| XS3 | Ciclicamente asciutto e bagnato | Strutture esposte discontinuamente all'acqua marina (alta-bassa marea) |

Caratteristiche del calcestruzzo

UNI EN 206 - UNI 11104

| Denom. della classe | Descrizione dell'ambiente | Esempi informativi di situazioni a cui possono applicarsi le classi di esposizione |
|------------------------|---|---|
| XF1 | Moderata saturazione con acqua in assenza di sali disgelanti | Superfici verticali esposte alla pioggia ed al gelo |
| XF2 | Moderata saturazione con acqua in presenza di sali disgelanti | Superfici verticali di strutture stradali esposte al gelo e spruzzi contenenti sali disgelanti |
| XF3 | Elevata saturazione con acqua in assenza di sali disgelanti | Superfici orizzontali esposte alla pioggia ed al gelo |
| XF4 | Elevata saturazione con acqua in presenza di sali disgelanti | Superfici orizzontali e strutture verticali stradali esposte direttamente ai sali disgelanti |

Caratteristiche del calcestruzzo

UNI EN 206 - UNI 11104

| Denom. della classe | Acidità | SO ₄ (mg/Kg) |
|------------------------|---------|----------------------------|
| XA1 | >200 | ≥ 2000 ≤ 3000 |
| XA2 | ---- | >3000 ≤ 12000 |
| XA3 | ---- | >12000 |

Classi di resistenza minime

Eurocodice 2 – Appendice 3

prospetto E.1N Classi di resistenza indicativa

| | Classi di esposizione secondo il prospetto 4.1 | | | | | | | | | |
|---------------------------------|--|----------------------|--------|--------|----------------------------------|--------|-----------------|--|--------|--------|
| Corrosione | | | | | | | | | | |
| | Corrosione indotta da carbonatazione | | | | Corrosione indotta da ioni cloro | | | Corrosione indotta da ioni cloro di origine marina | | |
| | XC1 | XC2 | XC3 | XC4 | XD1 | XD2 | XD3 | XS1 | XS2 | XS3 |
| Classi di resistenza indicativa | C20/25 | C25/30 | C30/37 | | C30/37 | C35/45 | | C30/37 | C35/45 | |
| Danni al calcestruzzo | | | | | | | | | | |
| | Nessun rischio | Attacco gelo/disgelo | | | | | Attacco chimico | | | |
| | X0 | XF1 | | XF2 | | XF3 | | XA1 | XA2 | XA3 |
| Classi indicative di resistenza | C12/15 | C30/37 | | C25/30 | | C30/37 | | C30/37 | | C35/45 |

Ricoprimento Minimo

Eurocodice 2 – prospetto 4.4N



| Classe strutturale | Classe di esposizione secondo il prospetto 4.1 | | | |
|--------------------|--|-----|-----------|-----|
| | X0 | XC1 | XC2 / XC3 | XC4 |
| S1 | 10 | 10 | 10 | 15 |
| S2 | 10 | 10 | 15 | 20 |
| S3 | 10 | 10 | 20 | 25 |
| S4 | 10 | 15 | 25 | 30 |
| S5 | 15 | 20 | 30 | 35 |
| S6 | 20 | 25 | 35 | 40 |

Classificazione strutturale

Eurocodice 2 – 4.4.1.2

| Criterio | Classe di esposizione secondo il prospetto 4.1 | | | |
|--|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | X0 | XC1 | XC2 / XC3 | XC4 |
| Vita utile di progetto di 100 anni | aumentare di 2 classi | aumentare di 2 classi | aumentare di 2 classi | aumentare di 2 classi |
| Classe di resistenza 1) 2) | $\geq C30/37$ ridurre di 1 classe | $\geq C30/37$ ridurre di 1 classe | $\geq C35/45$ ridurre di 1 classe | $\geq C40/50$ ridurre di 1 classe |
| Elemento di forma simile ad una soletta (posizione delle armature non influenzata dal processo costruttivo) | ridurre di 1 classe | ridurre di 1 classe | ridurre di 1 classe | ridurre di 1 classe |
| È assicurato un controllo di qualità speciale della produzione del calcestruzzo | ridurre di 1 classe | ridurre di 1 classe | ridurre di 1 classe | ridurre di 1 classe |

Condizioni ambientali

Le condizioni ambientali, ai fini della protezione contro la corrosione delle armature metalliche, possono essere suddivise in ordinarie, aggressive e molto aggressive con riferimento alle classi di esposizione definite nelle Linee Guida per il calcestruzzo strutturale emesse dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

| Condizioni ambientali | Classi di esposizione |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Ordinarie | X0, XC1, XC2, XC3, XF1 |
| Aggressive | XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3 |
| Molto aggressive | XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4 |

Ricoprimento

Valori minimi (r_{\min})

Al fine della protezione delle armature dalla corrosione,
il valore r_{\min} deve essere maggiore o uguale ai valori sotto indicati

| C_{\min} | C_o | Ambiente | Barre da c.a. elementi a piastra | | Barre da c.a. altri elementi | | Cavi da c.a.p. elementi a piastra | | Cavi da c.a.p. altri elementi | |
|------------|--------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | | | $C \geq C_o$ | $C_{\min} \leq C < C_o$ | $C \geq C_o$ | $C_{\min} \leq C < C_o$ | $C \geq C_o$ | $C_{\min} \leq C < C_o$ | $C \geq C_o$ | $C_{\min} \leq C < C_o$ |
| C25/30 | C35/45 | Ordinario | 15 | 20 | 20 | 25 | 25 | 30 | 30 | 35 |
| C28/35 | C40/50 | Aggressivo | 25 | 30 | 30 | 35 | 35 | 40 | 40 | 45 |
| C35/45 | C45/55 | Molto aggressivo | 35 | 40 | 40 | 45 | 45 | 50 | 50 | 50 |