

Durabilità del calcestruzzo armato

Durabilità

- La struttura deve essere progettata così che il **degrado** nel corso della sua vita nominale, purché si adotti la normale manutenzione ordinaria, non pregiudichi le sue prestazioni in termini di resistenza, stabilità e funzionalità, portandole al di sotto del livello richiesto dalle presenti norme
- Le misure di protezione contro l'eccessivo degrado devono essere stabilite con riferimento alle **previste condizioni ambientali**
- La **protezione contro l'eccessivo degrado** deve essere ottenuta attraverso un'opportuna scelta dei dettagli, dei materiali e delle dimensioni strutturali, con l'eventuale applicazione di sostanze o ricoprimenti protettivi, nonché con l'adozione di altre misure di protezione attiva o passiva

Cause del degrado

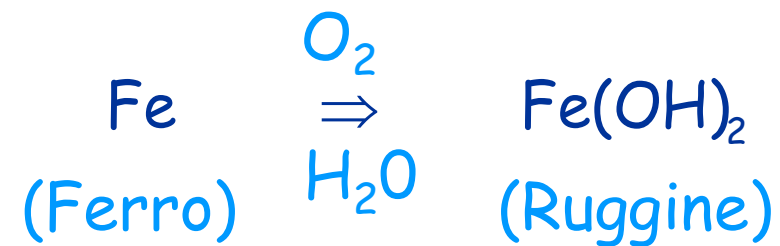
- 1 - Corrosione delle armature promossa da:
 - carbonatazione;
 - dal cloruro.

- 2 - Attacco solfatico della matrice cementizia
 - esterno;
 - interno.

- 3 - Formazione di ghiaccio

Corrosione

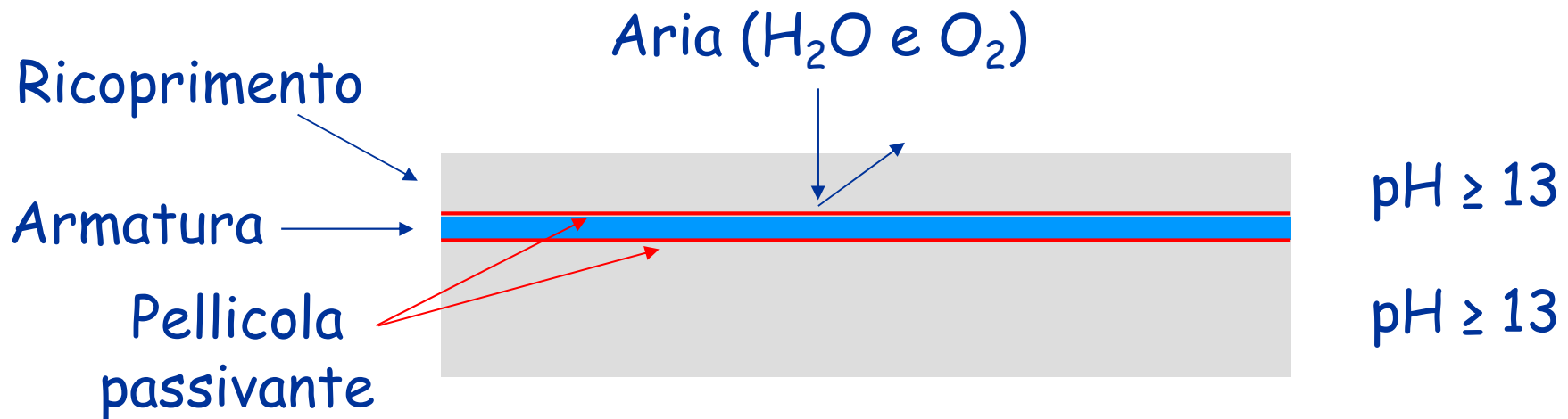
Consiste nella trasformazione dell'acciaio in ruggine (ossidi ferrici Fe(OH)_2 , Fe(OH)_3 , ecc.)



Le armature di acciaio di una struttura in cemento armato non si ossidano fino a quando sono protette dal calcestruzzo.

Passivazione dell'armatura

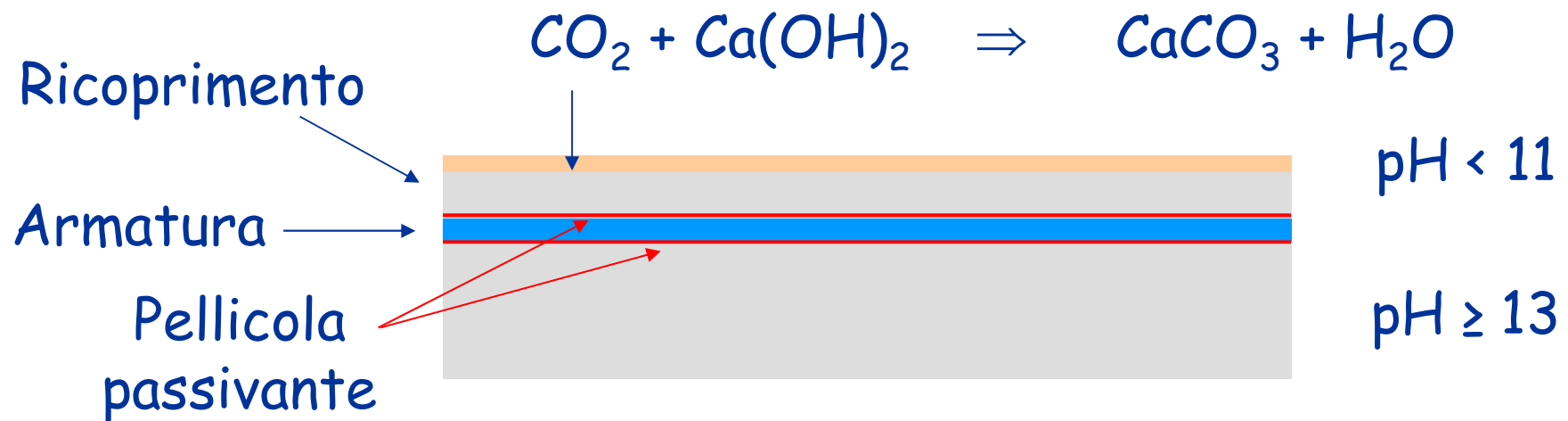
Durante l'idratazione del cemento si forma Ca(OH)_2 e si forma un ambiente fortemente basico



La pellicola passivante impedisce il contatto tra aria umida ed acciaio e

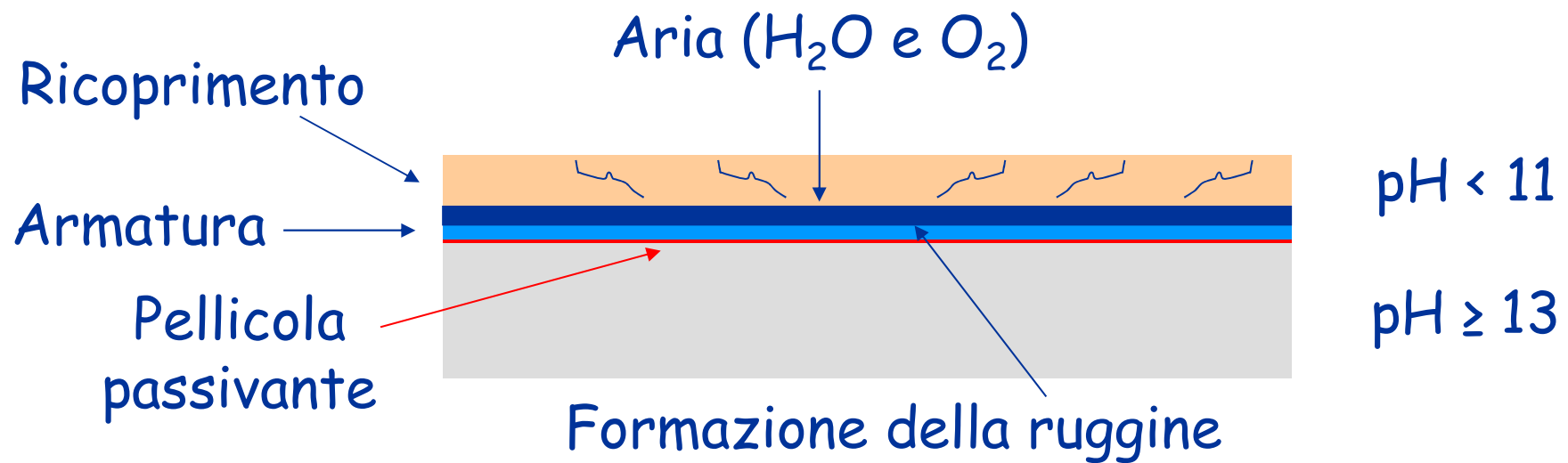
Carbonatazione

L'anidride carbonica dell'aria reagisce con la calce riducendo il pH del calcestruzzo



Carbonatazione

L'anidride carbonica dell'aria reagisce con la calce riducendo il pH del calcestruzzo



Dissolta la pellicola passivante si innesca il meccanismo di formazione della ruggine

Velocità di carbonatazione

Lo spessore (s_c) di calcestruzzo carbonatato aumenta nel tempo (t) con la seguente legge

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

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

Tratta da "Il nuovo calcestruzzo",
M. Collepari.

Come ritardare la carbonatazione?

1. Riducendo il rapporto acqua cemento

Esempio:

Ricoprimento: 2.5 cm

Rapporto a/c: 0.7

Umidità relativa (UR): 65%

Cemento: CEM II A-L 42.5

Tempo di carbonatazione
del ricoprimento

$$t = \frac{s_r^2}{k^2} = \frac{25^2}{12.3^2} = 4.1 \text{ anni}$$

$$k = 12.3 \text{ mm/anno}^{-1/2}$$

a/c	k (mm anno ^{-1/2})	Anni
0.4	3.8	43.3
0.5	7.0	12.8
0.6	10.1	6.1
0.7	12.3	4.1
0.8	15.1	2.7

Come ritardare la carbonatazione?

2. Aumentando lo spessore del ricoprimento

Esempio:

Ricoprimento: 2.5 cm

Umidità relativa: 65%

Rapporto a/c: 0.5

Cemento: CEM II A-L 42.5

Tempo di carbonatazione
del ricoprimento

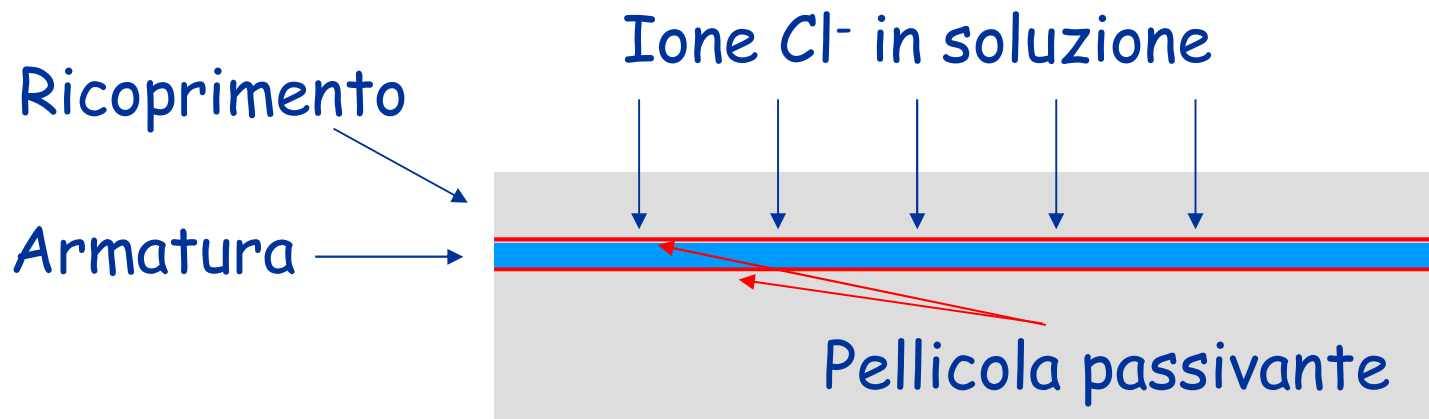
$$t = \frac{s_r^2}{k^2} = \frac{25^2}{7.0^2} = 12.8 \text{ anni}$$

$$k = 7.0 \text{ mm/anno}^{-1/2}$$

s_r (cm)	Anni
2.5	12.8
3.0	18.4
3.5	25.0
4.0	32.7
4.5	41.3

Corrosione promossa dal cloruro

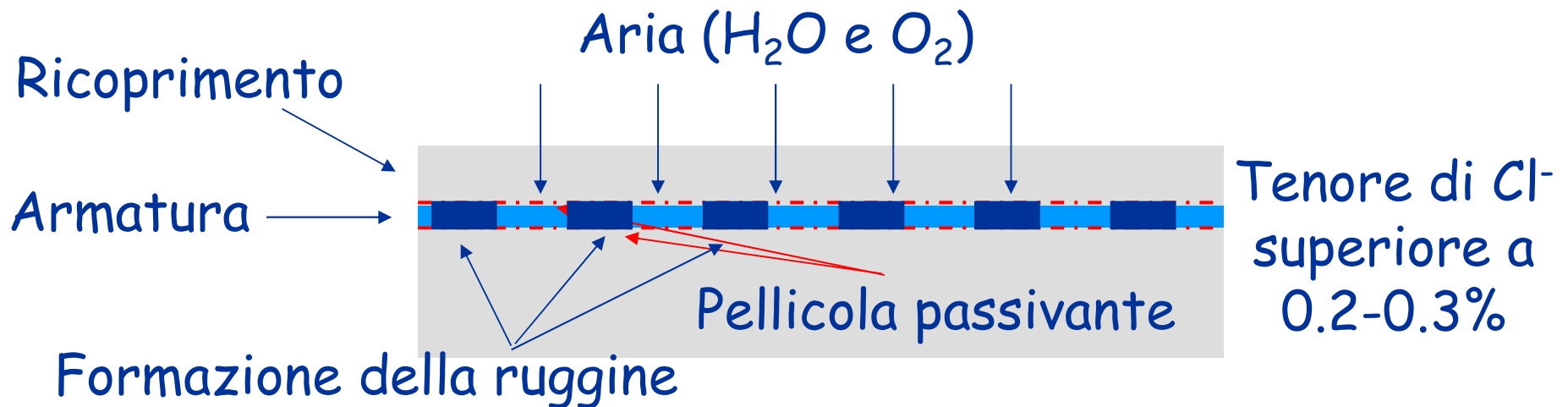
L'acqua penetra nel calcestruzzo trasportando lo ione cloruro Cl^-



La pellicola passivante è stabile sino a quando il tenore di Cl^- supera la soglia dello 0.2-0.3%

Corrosione promossa dal cloruro

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



Dissolta la pellicola passivante si innesca il meccanismo di formazione della ruggine

Penetrazione del cloruro

Se il calcestruzzo è permanentemente esposto all'ione Cl^- , lo spessore (s_{cl}) penetrato dal cloruro aumenta nel tempo (t) con la seguente legge

$$s_{\text{cl}} = k\sqrt{t} = 4\sqrt{D t}$$

"D" è il coefficiente di diffusione e dipende da:

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

Coefficiente di diffusione del cloruro

Calcestruzzi confezionati con rapporto $a/c=0.50$.

Cemento	Grado di compattazione	Temperatura C°	D (mm ² /anno)
Portland CEM I	1.00	10	25
Portland CEM I	1.00	25	50
Portland CEM I	1.00	40	100
Portland CEM I	0.95	25	100
Pozzolánico CEMIV	1.00	10	25
Pozzolánico CEMIV	1.00	25	30
Pozzolánico CEMIV	1.00	40	35
Pozzolánico CEMIV	0.95	25	60

Tabella tratta da "Il nuovo calcestruzzo", M. Collepari, Edizioni Tintoretto.

Come ridurre la penetrazione del cloruro?

Esempio:

Ricoprimento: 2.5 cm

Rapporto a/c: 0.5

Grado di compattazione: 1.00

Temperatura: 25° C

Cemento: Pozz. CEM III

Per carbonatazione

Tempo di penetrazione
del ricoprimento

$$t = \frac{s_r^2}{16 D} = \frac{25^2}{16 \times 30} = 1.30 \text{ anni}$$

$$D = 30 \text{ mm}^2 / \text{anno}$$

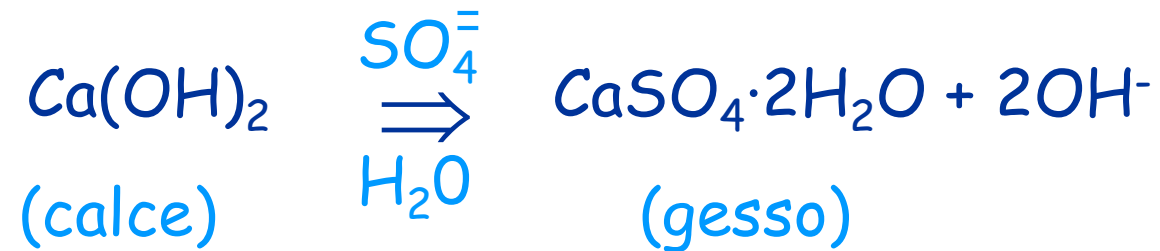
s_r (cm)	Anni	Anni
2.5	1.30	12.8
3.0	1.88	18.4
3.5	2.55	25.0
4.0	3.33	32.7
4.5	4.22	41.3

Come ridurre la penetrazione del cloruro?

1. Riducendo il rapporto acqua/cemento
2. Aumentando lo spessore del ricoprimento
3. Migliorando il grado di compattazione
4. Cambiando il tipo di cemento

Aggressione dello ione SO_4^- (attacco solfatico esterno)

Lo ione solfato, che si trova in alcuni terreni e nell'acqua di mare, viene trasportato dall'acqua nel calcestruzzo.



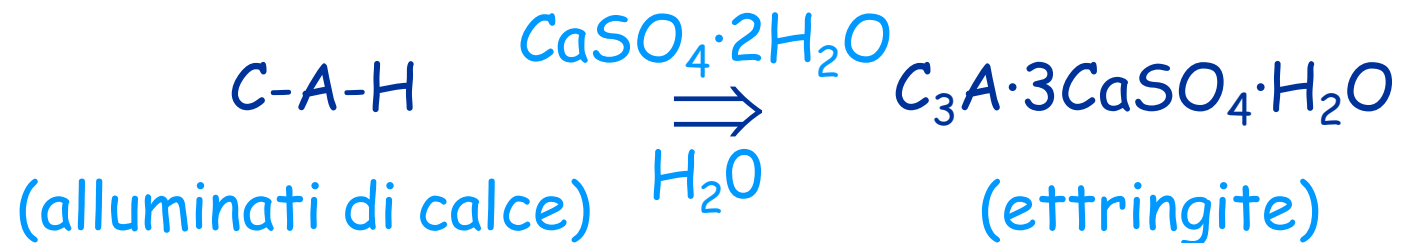
Lo ione solfato reagisce con la calce e l'acqua formando gesso.

Il gesso reagisce successivamente con altri composti.

Aggressione dello ione SO_4^- (attacco solfatico esterno)

Lo ione solfato, che si trova in alcuni terreni e nell'acqua di mare, viene trasportato dall'acqua nel calcestruzzo.

Reazione n. 1

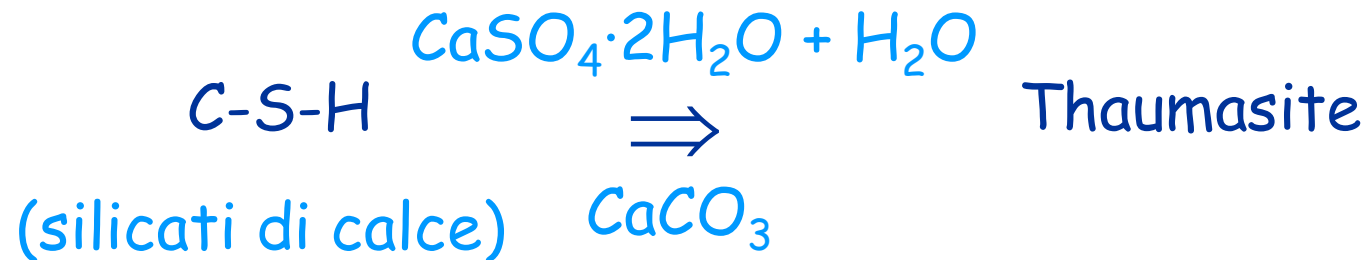


La formazione di ettringite avviene con aumento di volume e conseguente disgregamento del calcestruzzo.

Aggressione dello ione SO_4^- (attacco solfatico esterno)

Lo ione solfato, che si trova in alcuni terreni e nell'acqua di mare, viene trasportato dall'acqua nel calcestruzzo.

Reazione n. 2: avviene a temperatura $< 10^\circ\text{C}$, con U.R. $> 95\%$ ed in presenza di carbonato di calcio



Provoca una forte riduzione della resistenza meccanica del calcestruzzo in conseguenza della perdita di C-S-H.

Aggressione dello ione $\text{SO}_4^{=}$ (attacco solfatico interno)

Lo ione solfato si trova presente nell'aggregato del calcestruzzo sotto forma di gesso o anidrite.

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

Come ridurre l'aggressione dello ione SO_4^{2-} ?

1. Impiegando aggregati privi dello ione solfato
2. Riducendo il rapporto acqua cemento

Formazione di ghiaccio

Alle basse temperature l'acqua contenuta nel calcestruzzo si trasforma in ghiaccio.

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.

Come ovviare ai problemi derivanti dalla formazione di ghiaccio

1. Riducendo il rapporto acqua cemento

- Riduce la micro-porosità capillare (0.1 e 10 μm) e, dunque, la capacità di assorbire acqua.
- Riduce l'acqua d'impasto che rimane intrappolata nel calcestruzzo.

2. Inglobare bolle d'aria a elevato diametro

- Durante il processo di congelamento, accolgono l'acqua presente nei pori capillari evitando l'insorgere di tensioni.

3. Impiego di aggregati non gelivi

In sintesi, come ottenere strutture in cemento armato durabili?

1. Adottare un rapporto a/c basso:

- È efficace per tutte le cause di degrado;
- Rende il calcestruzzo poco permeabile;
- Equivale ad adottare una resistenza minima.

2. Adottare un ricoprimento adeguato:

- È efficace contro la corrosione;
- Aumenta il tempo necessario a CO_2 e ioni Cl^- per raggiungere l'armatura.

3. Inglobare aria:

- È efficace in caso di formazione di ghiaccio.

Classi di esposizione

CLASSI DI ESPOSIZIONE (UNI-EN 206)

Classe di esp.	Ambiente	Struttura	Sottoclassi
XO	Nessun rischio di corrosione (interni di edifici asciutti)	Tutte	1
XC	Corrosione delle armatura promossa da carbonatazione	Armata	4
XD	Corrosione delle armatura promossa da cloruri esclusi quelli presenti in acqua di mare	Armata	3
XS	Corrosione delle armatura promossa dai cloruri dell'acqua di mare	Armata	3
XF	Degrado del calcestruzzo per cicli di gelo e disgelo	Tutte	4
XA	Attacco chimico	Tutte	3

CLASSI DI ESPOSIZIONE XC

(UNI-EN 206, UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Ambiente	Esempi
XC1	Asciutto	Interni di edifici con U.R. bassa
XC2	Bagnato raramente asciutto	Strutture idrauliche Strutture interrato
XC3	Moderatamente umido	Interni di edifici con U.R. alta Strutture esterne protette dal contatto con la pioggia
XC4	Ciclicamente asciutto e bagnato	Strutture esterne esposte all'acqua piovana

CLASSI DI ESPOSIZIONE XD

(UNI-EN 206, UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Ambiente	Esempi
XD1	Moderatamente umido	• Strutture raramente a contatto superficiale di spruzzi d'acqua
XD2	Bagnato raramente asciutto	• Piscine • Vasche di trattamento di acque contenenti cloruro • Parti di ponte
XD3	Ciclicamente asciutto e bagnato	• Pavimenti esterni esposti occasionalmente ad acque salate • Pavimenti e solai di parcheggi coperti

CLASSI DI ESPOSIZIONE XS

(UNI-EN 206, UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Ambiente	Esempi
XS1	Moderatamente umido	Strutture in prossimità delle coste
XS2	Bagnato	Strutture permanentemente e completamente sotto acqua di mare
XS3	Ciclicamente asciutto e bagnato	Strutture esposte discontinuamente all'acqua marina (alta-bassa marea)

CLASSI DI ESPOSIZIONE XF

(UNI-EN 206, UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Ambiente	Esempi
XF1	Moderata saturazione con acqua, no sali disgelanti	Superfici verticali esposte alla pioggia ed al gelo
XF2	Moderata saturazione con acqua con sali disgelanti	Superfici verticali di strutture stradali esposte al gelo e spruzzi contenenti Sali disgelanti
XF3	Elevata saturazione con acqua, no sali disgelanti	Superfici orizzontali esposte alla pioggia ed al gelo
XF4	Elevata saturazione con acqua con sali disgelanti	Superfici orizzontali e strutture verticali stradali esposte a sali disgelanti

CLASSI DI ESPOSIZIONE XA (UNI-EN 206, UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Terreno	
	Acidità (Bauman Gully)	Ione SO_4 (mg/kg)
XA1	> 200	> 2000 < 3000
XA2	--	> 3000 < 12000
XA3	--	> 12000 < 24000

CLASSI DI ESPOSIZIONE XA (UNI-EN 206, UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Acqua				
	SO ₄ (mg/l)	pH	CO ₂ (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	Mg (mg/l)
XA1	> 200	< 6.5	> 15	> 15	> 300
	< 600	> 5.5	< 40	< 30	< 1000
XA2	> 600	< 5.5	> 40	> 30	> 1000
	< 3000	> 4.5	< 100	< 60	< 3000
XA3	> 3000	< 4.5	> 100	> 60	> 3000
	< 6000	> 4.0		< 100	