

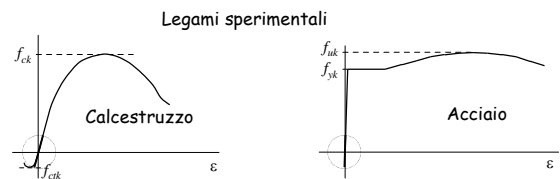
**Progetto e verifica di elementi strutturali in c.a.**

2 - Materiali

Spoletto  
26-28 novembre 2009

Aurelio Ghersi

**Legami costitutivi del materiale**



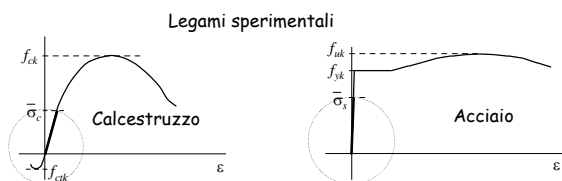
**Modelli di comportamento**

1 - per deformazioni e tensioni molto basse:  
comportamento elastico lineare  
calcestruzzo resistente anche a trazione

Usato solo per  
situazioni  
particolari

Ad esempio:  
fessurazione

**Legami costitutivi del materiale**



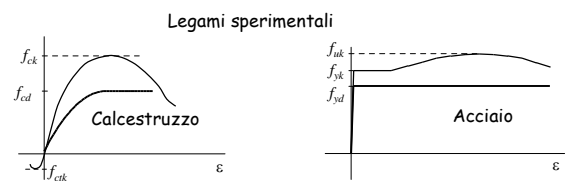
**Modelli di comportamento**

2 - per deformazioni e tensioni maggiori:  
comportamento elastico lineare  
calcestruzzo non resistente a trazione

Usato per il  
metodo delle  
tensioni  
ammissibili

Ma anche per  
verifiche S.L.E.

**Legami costitutivi del materiale**



**Modelli di comportamento**

3 - per deformazioni e tensioni ancora maggiori:  
comportamento non lineare  
calcestruzzo non resistente a trazione

Usato per le  
verifiche allo  
stato limite  
ultimo

**Calcestruzzo**

**Calcestruzzo - tensione di rottura**

Possibili valori di riferimento per la tensione di rottura:

$R_{ck}$  resistenza di provini cubici

usata dalla normativa  
italiana



$f_{ck}$  resistenza di provini cilindrici

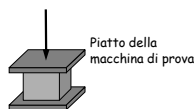
usata dalla normativa  
europea (EC2) ma ora  
anche dalle NTC08



## Relazione tra $R_{ck}$ e $f_{ck}$

Provino cubico

$R_{ck}$



il provino, compresso, si accorcia e si dilata



per attrito tra piatto e provino nascono forze trasversali

La presenza di queste forze riduce il rischio di rottura



Aumenta la resistenza

## Relazione tra $R_{ck}$ e $f_{ck}$

Provino cilindrico

$f_{ck}$



$$f_{ck} = 0.83 R_{ck}$$

$$f_{ck} < R_{ck}$$

il provino, compresso, si accorcia e si dilata; nascono forze trasversali ... ma la rottura avviene lontano dagli estremi

La presenza delle forze non influisce sul rischio di rottura



La resistenza è minore

## Relazione tra $R_{ck}$ e $f_{ck}$

Le NTC08, come l'EC2, classificano il calcestruzzo in base a entrambe le resistenze

C25/30 ← Resistenza cubica 30 MPa

← Resistenza cilindrica 25 MPa

Se si determina la resistenza cilindrica dalla resistenza cubica ...

$$R_{ck} = 30 \text{ MPa} \quad f_{ck} = 0.83 \times 30 = 24.9 \text{ MPa}$$

Si usa comunque  $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$

## Classi di resistenza del calcestruzzo

CLASSE DI RESISTENZA
C8/10
C12/15
C16/20
C20/25
C25/30
C28/35
C32/40
C35/45
C40/50
C45/55
C50/60
C55/67
C60/75
C70/85
C80/95
C90/105

} strutture non armate

↓ strutture in cemento armato ordinario

↓ strutture in cemento armato precompresso

↓ richiedono controlli particolari

↓ richiedono approvazione specifica dal Servizio Tecnico Centrale

NTC08, punto 4.1

## Resistenza a trazione

In sede di progettazione si può assumere

$$f_{ctm} = 0.30 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad \text{per classi} \leq C50/60$$

$$f_{ctm} = 2.12 \ln(1 + f_{cm}/10) \quad \text{per classi} > C50/60$$

$$f_{ctk(5\%)} = 0.7 f_{ctm} \quad f_{ctk(95\%)} = 1.3 f_{ctm}$$

$$f_{cfm} = 1.2 f_{ctm}$$

NTC08, punto 11.2.10.2

## Modulo elastico

In sede di progettazione si può assumere

$$E_{cm} = 22000 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3}$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$$

NTC08, punto 11.2.10.3

## Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

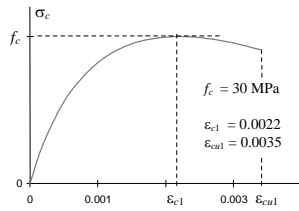
Legame più realistico

$$\sigma_c = \frac{k \eta - \eta^2}{1 + (k-2) \eta} f_c$$

con  $\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}}$

$\varepsilon_{c1}$   $\varepsilon_{cu1}$  dipendono dalla classe di resistenza

$$k = \frac{1.05 E_{c0} \varepsilon_{c1}}{f_c}$$



Si usa solo in casi particolari:  
analisi plastiche;  
determinazione della  
duttilità

EC2, punto 3.1.5

## Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

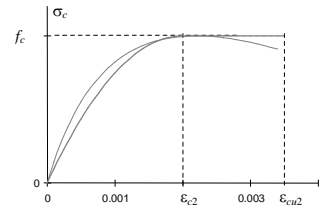
Legame semplificato

$$\sigma_c = (2 \eta - \eta^2) f_{cd}$$

$$\sigma_c = f_{cd}$$

con  $\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c2}}$

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_{c2} = 2.0 \times 10^{-3} \\ \varepsilon_{cu2} = 3.5 \times 10^{-3} \end{array} \right\} \text{ fino a } C50/60$$



Si usa per valutare la  
resistenza della sezione

NTC08, punto 4.1.2.1.2.2

## Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

Valore di calcolo  
della resistenza

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c}$$

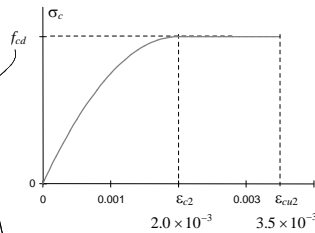
con

$$\gamma_c = 1.5$$

per strutture  
in c.a. ordinario

$$\gamma_c = 1.4$$

per produzioni  
soggette a controllo



Coefficiente che tiene conto  
della riduzione di resistenza  
per carichi di lunga durata  
 $\alpha_{cc} = 0.85$

NTC08, punto 4.1.2.1.2.2

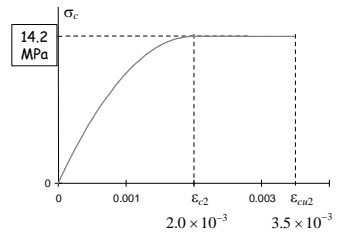
## Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

Esempio

Calcestruzzo di classe

$$R_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

$$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$$



$$f_{cd} = \frac{0.85 \times 25}{1.5} = 14.17 \text{ MPa}$$

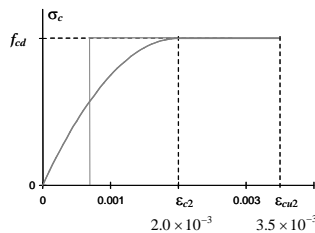
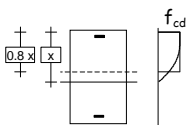
Si ricorda che  
 $\bar{\sigma}_c = 9.75 \text{ MPa}$

## Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

Alternativa:

Stress block

$$\sigma_c = f_{cd}$$



Acciaio

## Acciaio

Nel passato:

Fe B 38k e Fe B 44k

Ora:

B450C più duttile, barre da  $\varnothing 6$  a  $\varnothing 40$

B450A meno duttile, barre da  $\varnothing 5$  a  $\varnothing 10$

$$f_{y,nom} = 450 \text{ MPa}$$

$$f_{t,nom} = 540 \text{ MPa}$$

## Acciaio B450 requisiti

$$f_{yk(5\%)} \geq f_{y,nom}$$

$$f_{tk(5\%)} \geq f_{t,nom}$$

$$(f_y/f_{y,nom})_{k(90\%)} \leq 1.25$$

per B450C

$$1.15 \leq (f_t/f_y)_{k(10\%)} \\ (f_t/f_y)_{k(90\%)} < 1.35 \\ \epsilon_{uk(10\%)} \geq 7.5 \times 10^{-2}$$

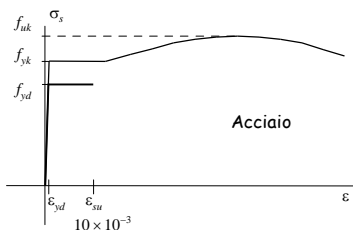
per B450A

$$1.05 \leq (f_t/f_y)_{k(10\%)} \\ \epsilon_{uk(10\%)} \geq 2.5 \times 10^{-2}$$

## Legame costitutivo di calcolo dell'acciaio

Possibili alternative

- 1 - Legame elastico-perfettamente plastico, con limite  $10 \times 10^{-3}$

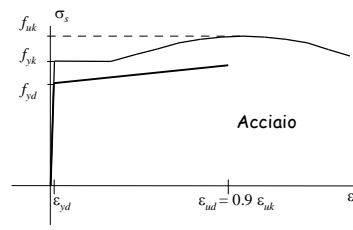


Legame "tradizionale"  
non più citato dalle NTC08

## Legame costitutivo di calcolo dell'acciaio

Possibili alternative

- 1 - Legame elastico-perfettamente plastico, con limite  $10 \times 10^{-3}$
- 2 - Legame elasto-plastico con incrudimento, con limite  $\epsilon_{ud} \sim 67 \times 10^{-3}$



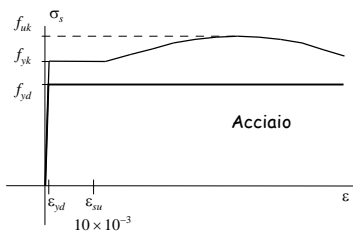
Legame poco usato

NTC08, punto 4.1.2.1.2.3

## Legame costitutivo di calcolo dell'acciaio

Possibili alternative

- 1 - Legame elastico-perfettamente plastico, con limite  $10 \times 10^{-3}$
- 2 - Legame elasto-plastico con incrudimento, con limite  $\epsilon_{ud} \sim 67 \times 10^{-3}$
- 3 - Legame elastico-perfettamente plastico, senza limiti



In molti casi può semplificare  
la trattazione

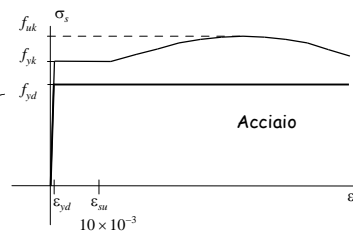
## Legame costitutivo di calcolo dell'acciaio

Valore di calcolo  
della resistenza

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

con

$$\gamma_s = 1.15$$



NTC08, punto 4.1.2.1.2.3

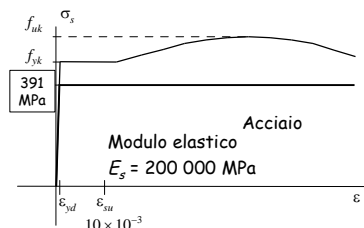
## Legame costitutivo di calcolo dell'acciaio

### Esempio

Acciaio B450C

$f_{yk} = 450 \text{ MPa}$

$$f_{yd} = \frac{450}{1.15} = 391.3 \text{ MPa}$$



Acciaio B450C

$$\epsilon_{yd} = \frac{391.3}{200000} = 0.00196$$

## 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

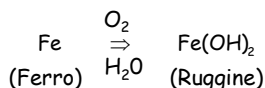
NTC08, punto 2.5.4

### Cause del degrado

- Corrosione delle armature promossa da:
  - carbonatazione;
  - dal cloruro.
- Attacco solfatico della matrice cementizia
  - esterno;
  - interno.
- Formazione di ghiaccio

### Corrosione

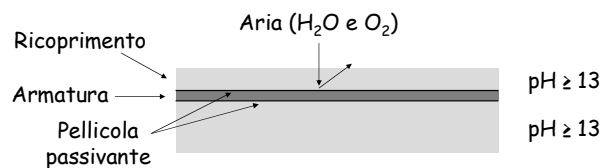
Consiste nella trasformazione dell'acciaio in ruggine (ossidi ferrici  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ecc.)



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

### Passivazione dell'armatura

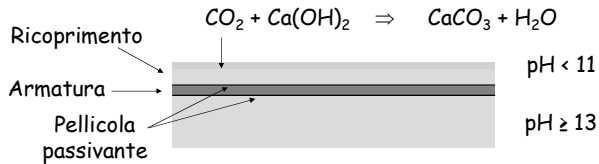
Durante l'idratazione del cemento si forma  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e si forma un ambiente fortemente basico



La pellicola passivante impedisce il contatto tra aria umida ed acciaio ed quindi la corrosione

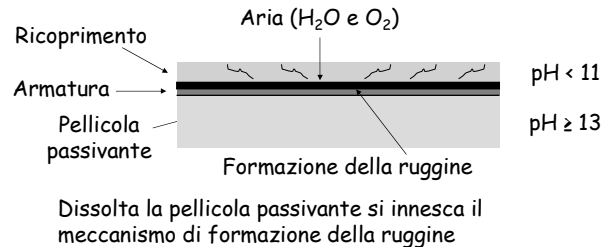
## Carbonatazione

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



## 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 <sup>-1/2</sup> )
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. Collepardi.

## 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

$$t = \frac{s_c^2}{k^2} = \frac{2.5^2}{12.3^2} = 4.1 \text{ anni}$$

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

a/c	k (mm anno <sup>-1/2</sup> )	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

Rapporto a/c: 0.5

Umidità relativa: 65%

Cemento: CEM II A-L 42.5

Tempo di carbonatazione del ricoprimento

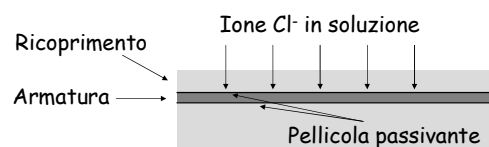
$$t = \frac{s_c^2}{k^2} = \frac{2.5^2}{7.0^2} = 12.8 \text{ anni}$$

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

$s_r$ (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

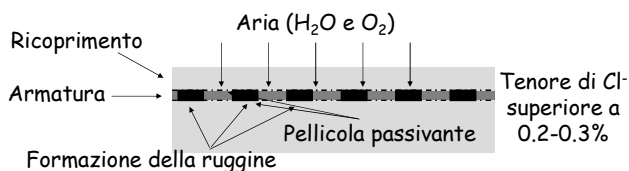
L'acqua penetra nel calcestruzzo trasportando lo ione cloruro  $\text{Cl}^-$



La pellicola passivante è stabile sino a quando il tenore di  $\text{Cl}^-$  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 allo ione  $Cl^-$ , lo spessore ( $s_{cl}$ ) penetrato dal cloruro aumenta nel tempo ( $t$ ) con la seguente legge

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

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

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

## 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

## Coefficiente di diffusione del cloruro

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

Cemento	Grado di compattazione	Temperatura $^{\circ}C$	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
Pozzolanico CEMIV	1.00	10	25
Pozzolanico CEMIV	1.00	25	30
Pozzolanico CEMIV	1.00	40	35
Pozzolanico CEMIV	0.95	25	60

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

## Come ridurre la penetrazione del cloruro?

1. Aumentando lo spessore del ricoprimento
- Esempio: Grado di compattazione: 1.00  
 Ricoprimento: 2.5 cm Temperatura:  $25^{\circ}C$   
 Rapporto  $a/c$ : 0.5 Cemento: Pozz. CEM III

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
2.5	1.30
3.0	1.88
3.5	2.55
4.0	3.33
4.5	4.22

## Come ridurre la penetrazione del cloruro?

2. Migliorando il grado di compattazione
- Esempio: Grado di compattazione: 0.95  
 Ricoprimento: 2.5 cm Temperatura:  $25^{\circ}C$   
 Rapporto  $a/c$ : 0.5 Cemento: Portland CEM I

Tempo di penetrazione del ricoprimento

$$t = \frac{s_r^2}{16 D} = \frac{25^2}{16 \times 100} = 0.39 \text{ anni}$$

$$D = 100 \text{ mm}^2 / \text{anno}$$

GC	D ( $mm^2/anno$ )	Anni
0.95	100	0.39
1.00	50	0.78

### Come ridurre la penetrazione del cloruro?

3. Cambiando tipo di cemento

Esempio: Grado di compattazione: 1.00

Ricoprimento: 2.5 cm Temperatura: 25° C

Rapporto a/c: 0.5 Cemento: Portland CEM I

Tempo di penetrazione  
del ricoprimento

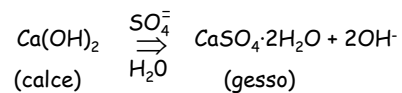
$$t = \frac{s_r^2}{16 D} = \frac{25^2}{16 \times 50} = 0.78 \text{ anni}$$

$$D = 50 \text{ mm}^2 / \text{anno}$$

Cemento	D (mm <sup>2</sup> /anno)	Anni
Portland CEM I	50	0.78
Pozzolánico CEM III	30	1.30

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

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



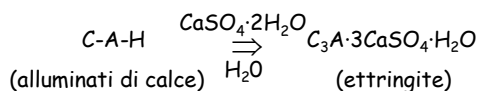
Lo ione solfato reagisce con la calce e l'acqua formando gesso.

Il gesso reagisce successivamente con altri composti.

### Aggressione dello ione $\text{SO}_4^{=}$ (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

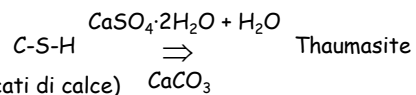


La formazione di ettringite avviene con aumento di volume e conseguente disgregamento del calcestruzzo.

### Aggressione dello ione $\text{SO}_4^{=}$ (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°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 $\text{SO}_4^{=}$ ?

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



## 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 volume di 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 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:

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

### 2. Adottare un ricoprimento adeguato:

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

### 3. Inglobare aria:

- È efficace in caso di formazione di ghiaccio.

## Indicazioni dell'Eurocodice 2 sulla durabilità delle strutture in cemento armato

## Indicazioni dell'EC2 (2005)

Al fine di ottenere una struttura durabile l'EC2 richiede di usare:

- una resistenza a compressione superiore a un minimo (confezionare il calcestruzzo con un rapporto a/c basso).
- un ricoprimento di spessore adeguato (superiore a un valore minimo).

La resistenza minima è specificato in funzione di:

- Classe di esposizione (fornita da UNI 206)

## 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 armature promossa da carbonatazione	Armata	4
XD	Corrosione delle armature promossa da 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 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 • Piscine
XD2	Bagnato raramente asciutto	• 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 <sub>4</sub> (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 <sub>4</sub> (mg/l)	pH	CO <sub>2</sub> (mg/l)	NH <sub>4</sub> (mg/l)	Mg (mg/l)
XA1	> 200 < 600	< 6,5 > 5,5	> 15 < 40	> 15 < 30	> 300 < 1000
XA2	> 600 < 3000	< 5,5 > 4,5	> 40 < 100	> 30 < 60	> 1000 < 3000
XA3	> 3000 < 6000	< 4,5 > 4,0	> 100	> 60 < 100	> 3000

## Resistenza a compressione minima

La classe di resistenza minima dipende dalla classe di esposizione:

Corrosione indotta da:						
	Carbonatazione				Ioni cloro	
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1 e XS1	XD2 e XD3 e XD3
Classe di resistenza	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Danni al calcestruzzo indotti da:						
	Nessun rischio	Gelo-disgelo			Attacco chimico	
	X0	XF1	XF2	XF3	XA1	XA2 e XA3
Classe di resistenza	C12/15	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C35/45

Nota: le classi di calcestruzzo dell'EC2 non coincidono con quelle delle NTC08

## Esempio - Edificio analizzato

Tipologia:

- Edificio adibito a civile abitazione con vita utile di 50 anni

Struttura:

- Struttura in c.a. protetta dal contatto diretto con l'ambiente.

Località:

- Lontano dal mare.
- Clima mite.

## Esempio - scelta del calcestruzzo

Cause di degrado:

- 1 - Corrosione delle armature promossa da:

- carbonatazione;
- ~~dal cloruro.~~

- 2 - ~~Attacco chimico della matrice cementizia~~

- 3 - ~~Formazione di ghiaccio~~

## Esempio - scelta del calcestruzzo

Cause di degrado:

Corrosione promossa da carbonatazione.

Classe di esposizione XC.

Solai, travi e pilastri interni:

Si trovano all'interno dell'edificio in presenza di umidità relativa bassa.

## 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

## Esempio - scelta del calcestruzzo

Cause di degrado:

Corrosione promossa da carbonatazione.

Classe di esposizione XC.

Solai, travi e pilastri interni:

Si trovano all'interno dell'edificio in presenza di umidità relativa bassa.

Classe di esposizione XC1.

Corrosione indotta da carbonatazione:				
	XC1	XC2	XC3	XC4
Classe di resistenza	C20/25	C25/30	C30/37	

### Esempio - scelta del calcestruzzo

Cause di degrado:

Corrosione promossa da carbonatazione.

Classe di esposizione XC.

Travi e pilastri perimetrali:

Si trovano in presenza di umidità relativa più elevata, ma sono protetti dal contatto diretto con la pioggia.

### 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

### Esempio - scelta del calcestruzzo

Cause di degrado:

Corrosione promossa da carbonatazione.

Classe di esposizione XC.

Travi e pilastri perimetrali:

Si trovano in presenza di umidità relativa più elevata, ma sono protetti dal contatto diretto con la pioggia.

Classe di esposizione XC3.

Corrosione indotta da carbonatazione:				
	XC1	XC2	XC3	XC4
Classe di resistenza	C20/25	C25/30	C30/37	

Uso C30/37

### Indicazioni dell'EC2 (2005)

Al fine di ottenere una struttura durabile l'EC2 richiede di usare:

- una resistenza a compressione superiore a un minimo (confezionare il calcestruzzo con un rapporto a/c basso).
- un ricoprimento di spessore adeguato (superiore a un valore minimo).

Il ricoprimento minimo è specificato in funzione di:

- Classe di esposizione (fornita da UNI 206)
- Classe di strutturale

### Classe strutturale

L'Eurocodice 2 individua 6 classi strutturali denominate S1, S2, ..., S6 in funzione di:

- Vita utile della struttura
- Classe di resistenza del calcestruzzo
- Forma dell'elemento strutturale
- Controllo della produzione del calcestruzzo

... e richiede maggiore protezione (spessore del ricoprimento) per le classi strutturali più elevate.

### Determinazione della classe strutturale (1)

Si determina applicando alla classe strutturale di riferimento (S4) i correttivi indicati in tabella:

	X0	XC1	XC2/XC3	XC4
Vita utile di 100 anni	+ 2 classi			
Classe di resistenza	≥C30/37 - 1 classe	≥C35/45 - 1 classe	≥C40/45 - 1 classe	
Forma simile a soletta	- 1 classe			
Controllo di qualità speciale	-1 classe			

## Determinazione della classe strutturale (2)

Si determina applicando alla classe strutturale di riferimento (S4) i correttivi indicati in tabella:

	XD1	XD2/XS1	XD3/XS2/XS3
Vita utile di 100 anni	+ 2 classi		
Classe di resistenza	≥C40/50 - 1 classe	≥C40/50 - 1 classe	≥C45/55 - 1 classe
Forma simile a soletta	- 1 classe		
Controllo di qualità speciale	-1 classe		

## Ricoprimento minimo nominale (1)

$$r_{nom} = r_{min} + \Delta r$$

$r_{min}$  (ricoprimento minimo) dipende da:

- classe strutturale
- classe di esposizione

Inoltre  $r_{min}$  deve essere  $\geq \phi$  (diametro barre)

$r_{min}$ (mm)	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
S5	20	25	35	40

## Ricoprimento minimo nominale (2)

$$r_{nom} = r_{min} + \Delta r$$

$r_{min}$  (ricoprimento minimo) dipende da:

- classe strutturale
- classe di esposizione

Inoltre  $r_{min}$  deve essere  $\geq \phi$  (diametro barre)

$r_{min}$ (mm)	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	20	25	30
S2	25	30	35
S3	30	35	40
S4	35	40	45
S5	40	15	50
S5	45	50	55

## Ricoprimento minimo nominale (3)

$$r_{nom} = r_{min} + \Delta r$$

$\Delta r$  tiene conto dei difetti di esecuzione e vale:

0 mm per elementi prefabbricati

5 mm se esiste sistema sicuro di controllo dello spessore del ricoprimento (distanziatori)

10 mm negli altri casi

## Esempio - scelta del ricoprimento

Solai:

- Classe di esposizione: XC1.

	X0	XC1	XC2/XC3	XC4
Vita utile di 100 anni	+ 2 classi			
Classe di resistenza	≥C30/37 - 1 classe	≥C35/45 - 1 classe	≥C40/45 - 1 classe	
Forma simile a soletta	- 1 classe			
Controllo di qualità speciale	-1 classe			

- Classe strutturale: 4 - 1 - 1 = S2.

## Esempio - scelta del ricoprimento

Solai:

- Classe di esposizione: XC1.
- Classe strutturale: S2.

$$r_{nom} = r_{min} + \Delta r$$

$r_{min}$ (mm)	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

### Esempio - scelta del ricoprimento

Solai:

- Classe di esposizione: XC1.
- Classe strutturale: S2.

$$r_{nom} = r_{min} + \Delta r$$

$$r_{min} = 10 \text{ mm}$$

$$r_{min} \geq \phi = 14 \text{ mm} \quad \text{se uso barre } \phi 14$$

$\Delta r = 5 \text{ mm}$  se faccio uso di distanziatori

$$r_{nom} = 14 + 5 = 19 \text{ mm}$$

### Esempio - scelta del ricoprimento

Solai:

- Classe di esposizione: XC1.
- Classe strutturale: S2.

$$r_{nom} = r_{min} + \Delta r$$

$$r_{min} = 10 \text{ mm}$$

$$r_{min} \geq \phi = 14 \text{ mm} \quad \text{se uso barre } \phi 14$$

$\Delta r = 5 \text{ mm}$  se faccio uso di distanziatori

$$\text{Uso } r_{nom} = 20 \text{ mm}$$

N.B. il copriferro di calcolo è pari a  $r_{nom} + \phi/2 = 20 + 7 = 27 \text{ mm}$

### Esempio - scelta del ricoprimento

Travi e pilastri perimetrali:

- Classe di esposizione: XC3.

	X0	XC1	XC2/XC3	XC4
Vita utile di 100 anni	+ 2 classi			
Classe di resistenza	$\geq C30/37$ - 1 classe	$\geq C35/45$ - 1 classe	$\geq C40/45$ - 1 classe	
Forma simile a soletta	- 1 classe			
Controllo di qualità speciale	-1 classe			

- Classe strutturale: S4.

### Esempio - scelta del ricoprimento

Travi e pilastri perimetrali:

- Classe di esposizione: XC3.
- Classe strutturale: S4.

$$r_{nom} = r_{min} + \Delta r$$

$r_{min}$ (mm)	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

### Esempio - scelta del ricoprimento

Travi e pilastri perimetrali:

- Classe di esposizione: XC3.
- Classe strutturale: S4.

$$r_{nom} = r_{min} + \Delta r$$

$$r_{min} = 25 \text{ mm}$$

$$r_{min} \geq \phi = 20 \text{ mm} \quad \text{se uso barre } \phi 20$$

$\Delta r = 5 \text{ mm}$  se faccio uso di distanziatori

$$\text{Uso } r_{nom} = 25 + 5 = 30 \text{ mm}$$

N.B. il copriferro di calcolo è  $r_{nom} + \phi_{staffe} + \phi/2 = 30 + 8 + 10 = 48 \text{ mm}$

Indicazioni delle norme UNI-EN 206 e  
UNI 11104-2004 sulla durabilità delle  
strutture in cemento armato

### CLASSI DI ESPOSIZIONE XC (UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Ambiente	Esempi	Max a/c	Min R <sub>ck</sub> (MPa)	Cemento (kg/m³)	Ricoprim. (mm)
XC1	Asciutto	Interni di edifici con U.R. bassa	0.60	30	300	15
XC2	Bagnato raramente asciutto	Strutture idrauliche Strutture interrate	0.60	30	300	25
XC3	Moderatamente e umido	Interni di edifici con U.R. alta Strutture esterne protette dal contatto con la pioggia	0.55	35	320	25
XC4	Ciclicamente asciutto e bagnato	Strutture esterne esposte all'acqua piovana	0.50	40	340	30

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

### CLASSI DI ESPOSIZIONE XD (UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Ambiente	Esempi	Max a/c	Min R <sub>ck</sub> (MPa)	Cemento (kg/m³)	Ricoprim. (mm)
XD1	Moderatamente e umido	• Strutture raramente a contatto superficiale di spruzzi d'acqua	0.55	35	320	45
XD2	Bagnato raramente asciutto	• Piscine • Vasche di trattamento di acque contenenti cloruro • Parti di ponte	0.50	40	340	45
XD3	Ciclicamente asciutto e bagnato	• Pavimenti esterni esposti occasionalmente ad acque salate • Pavimenti e salai di parcheggi coperti	0.45	45	360	45

### CLASSI DI ESPOSIZIONE XS (UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Ambiente	Esempi	Max a/c	Min R <sub>ck</sub> (MPa)	Cemento (kg/m³)	Ricoprim. (mm)
XS1	Moderatamente e umido	Strutture in prossimità delle coste	0.50	40	320	45
XS2	Bagnato	Strutture permanentemente e completamente sotto acqua di mare	0.45	45	340	45
XS3	Ciclicamente asciutto e bagnato	Strutture esposte discontinuamente all'acqua marina (alta-bassa marea)	0.45	45	340	45

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

### CLASSI DI ESPOSIZIONE XF (UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Ambiente	Esempi	aria	Max a/c	Min R <sub>ck</sub> (MPa)	Cemento (kg/m³)	Ric. (mm)
XF1	Moderata saturazione con acqua, no sali disgelanti	Superfici verticali esposte alla pioggia ed al gelo	--	0.50	40	320	30
XF2	Moderata saturazione con acqua con sali disgelanti	Superfici verticali di strutture stradali esposte al gelo e spruzzi contenenti Sali disgelanti	3%	0.50	30	340	45
XF3	Elevata saturazione con acqua, no sali disgelanti	Superfici orizzontali esposte alla pioggia ed al gelo	3%	0.50	30	340	30
XF4	Elevata saturazione con acqua con sali disgelanti	Superfici orizzontali e strutture verticali stradali esposte a sali disgelanti	3%	0.45	35	360	45

### CLASSI DI ESPOSIZIONE XA (UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Terreno		Max a/c	Min R <sub>ck</sub> (MPa)	Cemento (kg/m³)	Ric. (mm)
	Acidità (Bauman Gully)	Ione SO <sub>4</sub> (mg/kg)				
XA1	> 200	> 2000 < 3000	0.55	35	320	25
XA2	--	> 3000 < 12000	0.50	40	340	25
XA3	--	> 12000 < 24000	0.45	45	360	25

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

### CLASSI DI ESPOSIZIONE XA (UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Acqua					Max a/c	Min R <sub>ck</sub> (MPa)	Cemento (kg/m³)	Copr. (mm)
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	pH	CO <sub>2</sub> (mg/l)	NH <sub>4</sub> (mg/l)	Mg (mg/l)				
XA1	> 200 < 600	< 6.5 > 5.5	> 15 < 40	> 15 < 30	> 300 < 1000	0.55	35	320	25
XA2	> 600 < 3000	< 5.5 > 4.5	> 40 < 100	> 30 < 60	> 1000 < 3000	0.50	40	340	25
XA3	> 3000 < 6000	< 4.5 > 4.0	> 100	> 60 < 100	> 3000	0.45	45	360	25

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