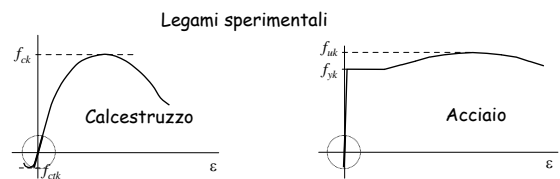


Progetto e verifica di elementi strutturali in c.a.

1 - Materiali e durabilità

Bologna
3-4 maggio 2012
Edoardo M. Marino

Legami costitutivi del materiale



Modelli di comportamento

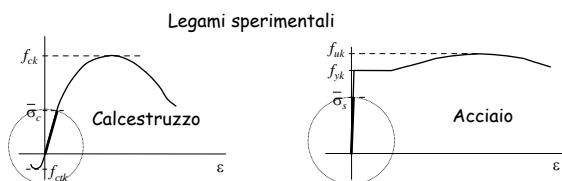
1 - per deformazioni e tensioni molto basse:
comportamento elastico lineare
calcestruzzo resistente anche a trazione

Usato solo per
situazioni
particolari

Ad esempio:
fessurazione

2/90

Legami costitutivi del materiale



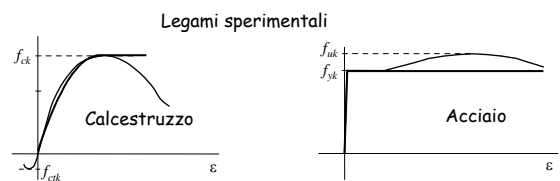
Modelli di comportamento

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 SLE.

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

4/90

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

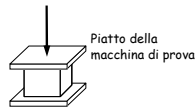


6/90

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



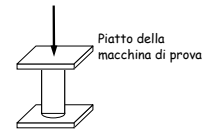
Aumenta la resistenza

7/90

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

8/90

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

9/90

Classi di resistenza del calcestruzzo

CLASSE DI RESISTENZA	
C8/10	strutture non armate
C12/15	
C16/20	
C20/25	strutture in cemento armato ordinario
C25/30	
C28/35	
C32/40	strutture in cemento armato precompresso
C35/45	
C40/50	
C45/55	richiedono controlli particolari
C50/60	
C55/67	
C60/75	richiedono approvazione specifica dal Servizio Tecnico Centrale
C70/85	
C80/95	
C90/105	NTC08, punto 4.1

Resistenza a trazione

In sede di progettazione si può assumere

$$\begin{cases} f_{ctm} = 0.30 \sqrt[3]{f_{ck}^2} & \text{per classi} \leq C50/60 \\ f_{ctm} = 2.12 \ln(1 + f_{cm}/10) & \text{per classi} > C50/60 \end{cases}$$

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

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

NTC08, punto 11.2.10.2

11/90

Resistenza a trazione per C25/30

In sede di progettazione si può assumere

$$f_{ctm} = 0.30 \sqrt[3]{f_{ck}^2} = 0.30 \sqrt[3]{25^2} = 2.56 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk(5\%)} = 0.7 f_{ctm} = 0.7 \times 2.56 = 1.79 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk(95\%)} = 1.3 f_{ctm} = 1.3 \times 2.56 = 3.33 \text{ MPa}$$

$$f_{cfm} = 1.2 f_{ctm} = 1.2 \times 2.56 = 3.07 \text{ MPa}$$

NTC08, punto 11.2.10.2

12/90

Modulo elastico

In sede di progettazione si può assumere

$$E_{cm} = 22000 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3} = 22000 \left(\frac{33}{10} \right)^{0.3} = 31476 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa} = 25 + 8 = 33 \text{ MPa}$$

Per C25/30

NTC08, punto 11.2.10.3

13/90

Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

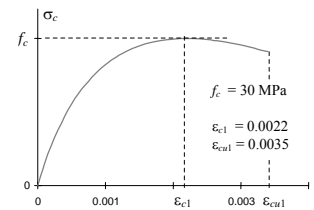
Legame più realistico

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

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

ε_{c1} ε_{cu1} dipendono dalla classe di resistenza

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



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

EC2, punto 3.1.5

14/90

Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

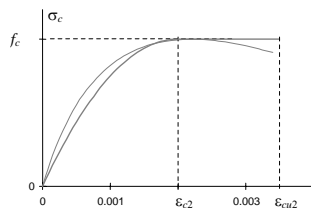
Legame semplificato

$$\sigma_c = (2 \eta - \eta^2) f_c$$

$$\sigma_c = f_c$$

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

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



Si usa per valutare la resistenza della sezione

NTC08, punto 4.1.2.1.2.2

15/90

Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

Valore di calcolo della resistenza

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

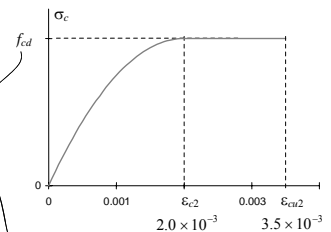
con

$$\gamma_c = 1.5$$

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

16/90

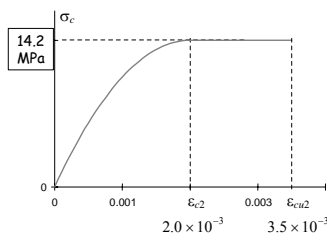
Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

Esempio

Calcestruzzo C25/30

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

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



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

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

17/90

Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

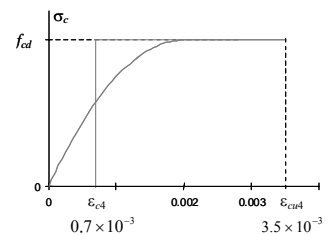
Alternativa:

Stress block

$$\sigma_c = f_{cd}$$

$$\varepsilon_c \geq \varepsilon_{c4}$$

$$\varepsilon_{c4} = 0.2 \varepsilon_{cu4}$$



NTC08, punto 4.1.2.1.2.2

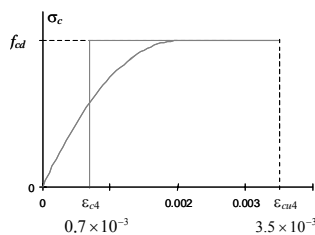
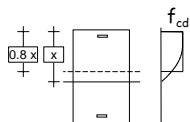
18/90

Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

Alternativa:

Stress block

$$\sigma_c = f_{cd}$$



NTC08, punto 4.1.2.1.2.2

19/90

Acciaio

Acciaio

Nel passato:

Fe B 38k e Fe B 44k

Ora:

B450C più duttile, barre da Ø6 a Ø40

B450A meno duttile, barre da Ø5 a Ø10

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

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

21/90

Acciaio B450 requisiti

$$f_{yk}(5\%) \geq f_{y,nom} = 450 \text{ MPa}$$

$$f_{tk}(5\%) \geq f_{t,nom} = 540 \text{ MPa}$$

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

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

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

22/90

Acciaio Controlli di accettazione

I valori di resistenza ed allungamento di ciascun campione, accertati in accordo con il pu 11.3.2.3, da eseguirsi comunque prima della messa in opera del prodotto riferiti ad uno ste diametro, devono essere compresi fra i valori massimi e minimi riportati nella tabella seguente:

Tabella 11.3.VI – Valori di accettazione

Caratteristica	Valore limite	NOTE
f_t minimo	425 N/mm ²	(450 - 25) N/mm ²
f_t massimo	572 N/mm ²	[450 x (1.25+0.02)] N/mm ²
A_g minimo	$\geq 6.0\%$	per acciai B450C
A_g minimo	$\geq 2.0\%$	per acciai B450A
Rottura/snervamento	$1.13 \leq f_t / f_y \leq 1.37$	per acciai B450C
Rottura/snervamento	$f_t / f_y \leq 1.03$	per acciai B450A
Piegamento/raddrizzamento	assenza di cricche	per tutti

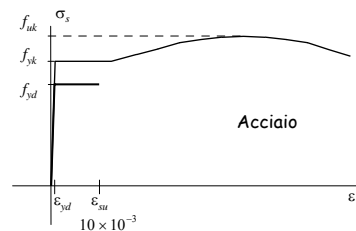
Questi limiti tengono conto della dispersione dei dati e delle variazioni che possono intervenire diverse apparecchiature e modalità di prova.

23/90

Legame costitutivo di calcolo dell'acciaio

Possibili alternative

1 - Legame elastico-perfettamente plastico, con limite 10×10^{-3}



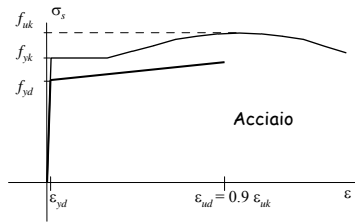
Legame "tradizionale"
non più citato dalle NTC08

24/90

Legame costitutivo di calcolo dell'acciaio

Possibili alternative

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

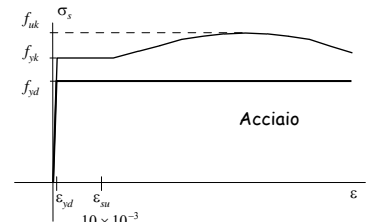


Legame poco usato

Legame costitutivo di calcolo dell'acciaio

Possibili alternative

- 1 - Legame elastico-perfettamente plastico, con limite 10×10^{-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

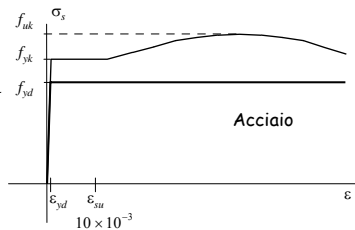
Legame costitutivo di calcolo dell'acciaio

Valore di calcolo della resistenza

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

con

$$\gamma_s = 1.15$$



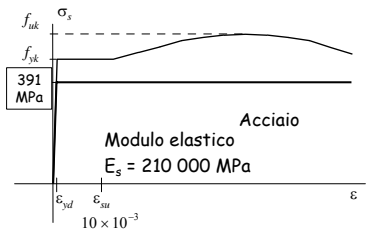
Legame costitutivo di calcolo dell'acciaio

Esempio

Acciaio B450C

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

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



$$\epsilon_{yd} = \frac{391.3}{210000} = 1.86 \times 10^{-3}$$

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

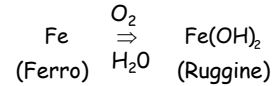
Cause del degrado

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

31/90

Corrosione

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

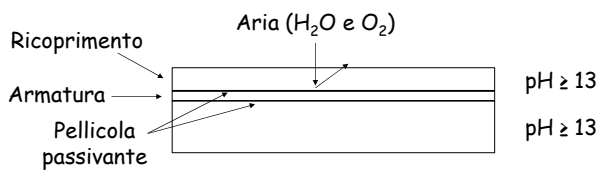


Le armature di acciaio di una struttura in cemento armato non si ossidano fino a quando sono protette dal calcestruzzo.

32/90

Passivazione dell'armatura

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

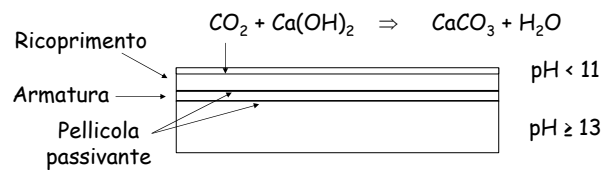


La pellicola passivante impedisce il contatto tra aria umida ed acciaio

33/90

Carbonatazione

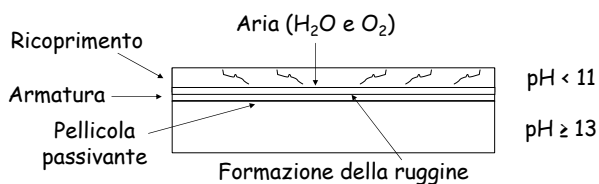
L'anidride carbonica dell'aria reagisce con la calce riducendo il pH del calcestruzzo



34/90

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

35/90

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. Collepardi.

36/90

Come ritardare la carbonatazione?

1. Riducendo il rapporto acqua cemento

Esempio:

Ricoprimento: 2.5 cm

Umidità relativa (UR): 65%

Rapporto a/c: 0.7

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

37/90

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

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

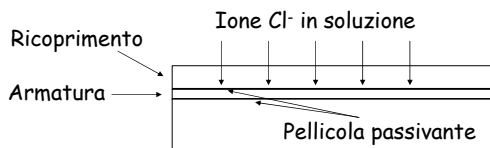
$$k = 7.0 \text{ mm/anno}^{-1/2}$$

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

38/90

Corrosione promossa dal cloruro

L'acqua penetra nel calcestruzzo trasportando lo ione cloruro Cl⁻

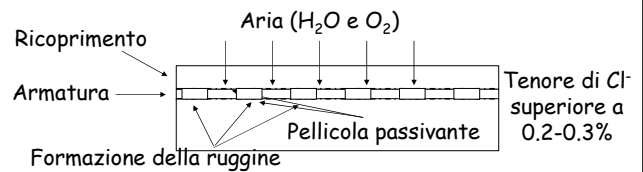


La pellicola passivante è stabile sino a quando il tenore di Cl⁻ supera la soglia dello 0.2-0.3%

39/90

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

40/90

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

41/90

Coefficiente di diffusione del cloruro

Calcestruzzi confezionati con rapporto a/c=0.50.

Cemento	Grado di compattazione	Temperatura C°	D (mm²/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
Pozzolano CEMIV	1.00	10	25
Pozzolano CEMIV	1.00	25	30
Pozzolano CEMIV	1.00	40	35
Pozzolano CEMIV	0.95	25	60

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

42/90

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

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

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

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

43/90

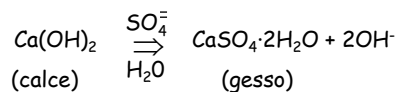
Come ridurre la penetrazione del cloruro?

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

44/90

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.

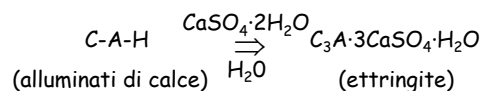
Il gesso reagisce successivamente con altri composti.

45/90

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



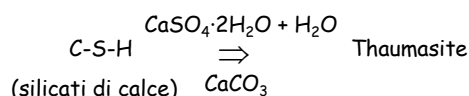
La formazione di ettringite avviene con aumento di volume e conseguente disgregamento del calcestruzzo.

46/90

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.

47/90

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

48/90

Come ridurre l'aggressione dello ione SO_4 ?

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

49/90

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.

50/90

Come ovviare ai problemi derivanti dalla formazione di ghiaccio

1. Riducendo il rapporto acqua cemento
 - Riduce la micro-porosità capillare (0.1 e $10\ \mu\text{m}$) 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, raccolgono l'acqua presente nei pori capillari evitando l'insorgere di tensioni.
3. Impiego di aggregati non gelivi

51/90

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;
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.

52/90

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 ad un valore minimo).

La resistenza minima è specificato in funzione di:

- Classe di esposizione (fornita da UNI 206)

54/90

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

55/90

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

56/90

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

57/90

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)

58/90

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

59/90

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

60/90

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	< 100	< 3000

61/90

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 XD2	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
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

Resistenza a compressione minima

La circolare n. 617 fornisce prescrizioni analoghe ma richiede calcestruzzi di resistenza minore :

Corrosione indotta da:						
	Carbonatazione				Ioni cloro	
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1 e XD2	XD3 e XD3
Classe di resistenza	C25/30	C28/35	C28/35	C35/45		
Danni al calcestruzzo indotti da:						
	Nessun rischio	Gelo-disgelo			Attacco chimico	
	X0	XF1	XF2	XF3	XA1	XA2
Classe di resistenza	C25/30	C25/30	C28/35	C28/35	C35/45	

Circolare n. 617, punto 4.1.6.1.3

63/90

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.

64/90

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~~

65/90

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.

66/90

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

67/90

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	

Sarebbe C25/30 secondo circolare 617.

68/90

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.

69/90

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

70/90

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	

Sarebbe C25/30 secondo circolare 617.

Uso C30/37

71/90

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 strutturale

72/90

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.

73/90

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			

74/90

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		

75/90

Esempio - Classe strutturale

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.

76/90

Esempio - Classe strutturale

Travi e pilastri perimetrali:

- Classe di esposizione: XC3.

	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: S4.

77/90

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
S6	20	25	35	40

78/90

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	45	50
S6	45	50	55

79/90

Ricoprimento minimo nominale (3)

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

Δr 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

80/90

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

81/90

Esempio - scelta del ricoprimento

Solai:

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

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

$r_{min} = 10$ mm

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

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

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

82/90

Esempio - scelta del ricoprimento

Solai:

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

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

$r_{min} = 10$ mm

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

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

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

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

83/90

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

84/90

Esempio - scelta del ricoprimento

Travi e pilastri perimetrali:

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

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

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

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

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

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

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

85/90

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

86/90

CLASSI DI ESPOSIZIONE XC (UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Ambiente	Esempi	Max a/c	Min R_{ck} (MPa)	Cemento (kg/m³)	Ricopr. (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.

87/90

CLASSI DI ESPOSIZIONE XD (UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Ambiente	Esempi	Max a/c	Min R_{ck} (MPa)	Cemento (kg/m³)	Ricopr. (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 solai di parcheggi coperti	0.45	45	360	45

88/90

CLASSI DI ESPOSIZIONE XS (UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Ambiente	Esempi	Max a/c	Min R_{ck} (MPa)	Cemento (kg/m³)	Ricopr. (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.

89/90

CLASSI DI ESPOSIZIONE XF (UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Ambiente	Esempi	aria	Max a/c	Min R_{ck} (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

90/90

CLASSI DI ESPOSIZIONE XA (UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Terreno		Max a/c	Min R _{ck} (MPa)	Cemento (kg/m ³)	Ric. (mm)
	Acidità (Bauman Gully)	Ione SO ₄ (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. Collepari, Edizioni Tintoretto.

91/90

CLASSI DI ESPOSIZIONE XA (UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Acqua					Max a/c	Min R _{ck} (MPa)	Cemento (kg/m ³)	Copr. (mm)
	SO ₄ (mg/l)	pH	CO ₂ (mg/l)	NH ₄ (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. Collepari, Edizioni Tintoretto.

92/90