

Corso di aggiornamento

NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI

D.M. 14 Gennaio 2008

**MODULO 2 - PROGETTO E VERIFICA DI
ELEMENTI STRUTTURALI IN C.A.**

Ordine degli Ingegneri della provincia di Catania

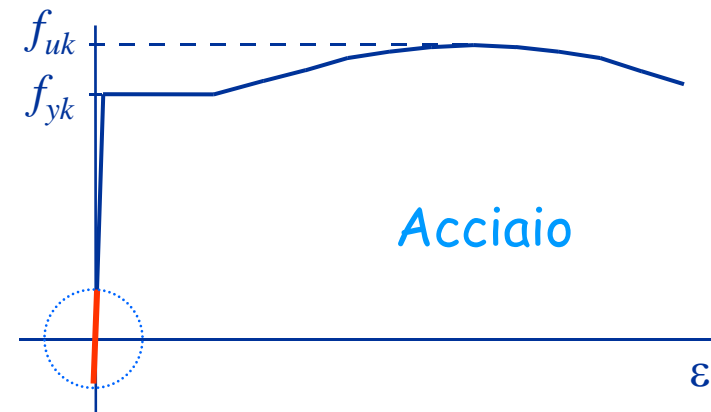
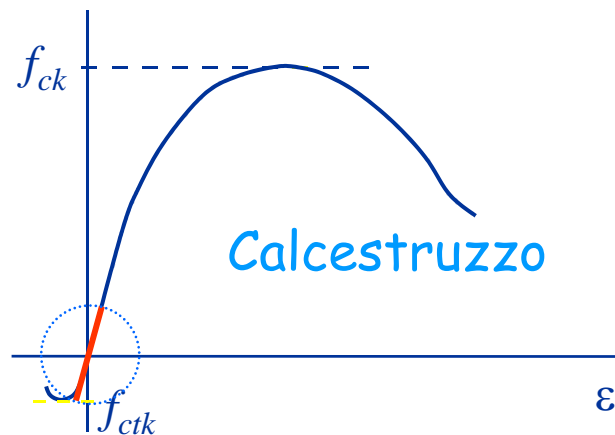
22 ottobre 2008

Edoardo Marino

Materiali

Legami costitutivi del materiale

Legami sperimentali



Modelli di comportamento

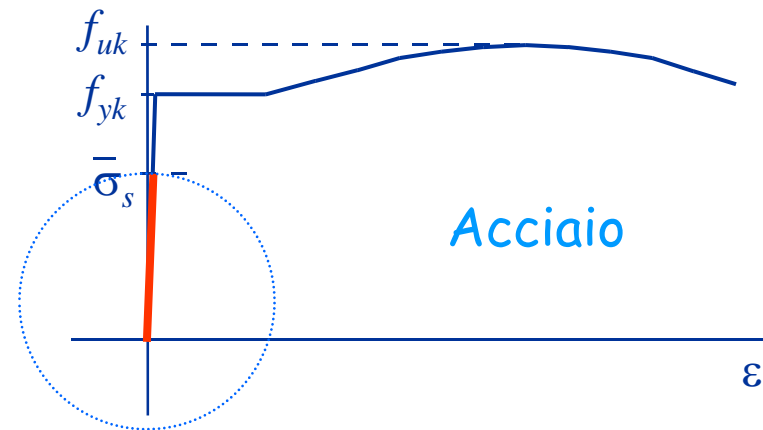
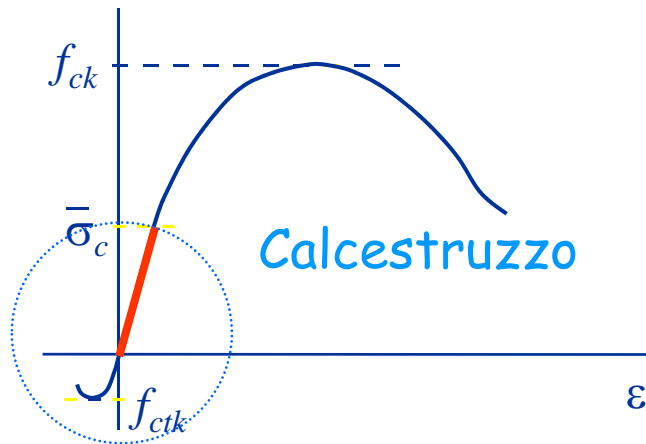
- 1 - per deformazioni e tensioni molto basse:
comportamento elastico lineare
calcestruzzo resistente anche a trazione

Usato solo per
situazioni
particolari

Ad esempio:
fessurazione

Legami costitutivi del materiale

Legami sperimentali



Modelli di comportamento

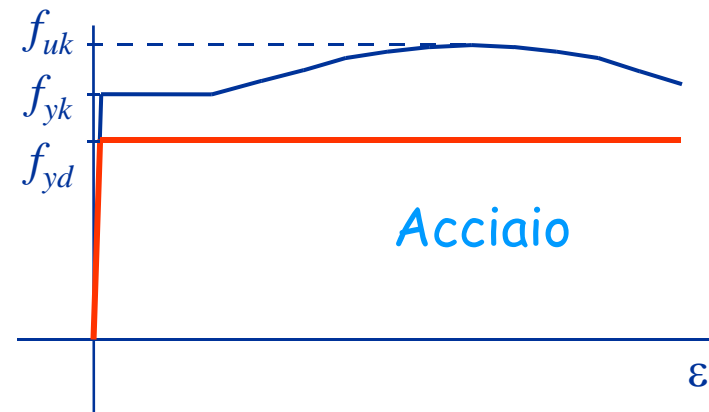
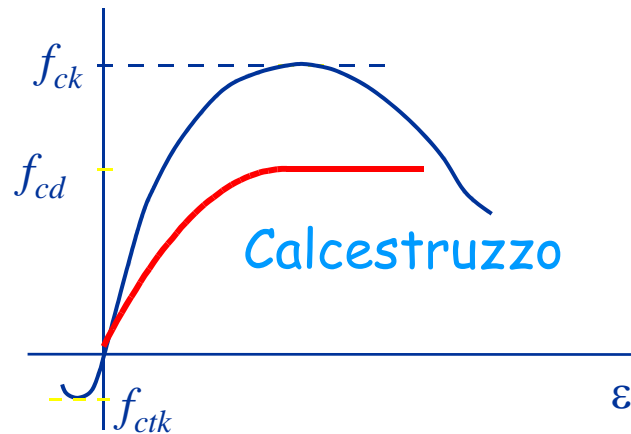
- 2 - per deformazioni e tensioni maggiori:
comportamento elastico lineare
calcestruzzo non resistente a trazione

Usato per il
metodo delle
tensioni
ammissibili

Ma anche per
verifiche S.L.E.

Legami costitutivi del materiale

Legami sperimentali



Modelli di comportamento

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

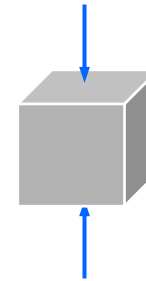
Usato per le
verifiche allo
stato limite
ultimo

Calcestruzzo - 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

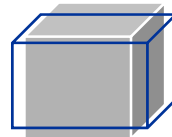
usata dalla normativa
europea (EC2) ma ora
anche dalle NTC08



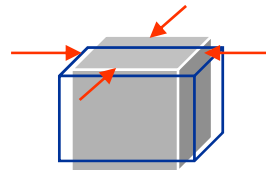
Relazione tra R_{ck} e f_{ck}

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

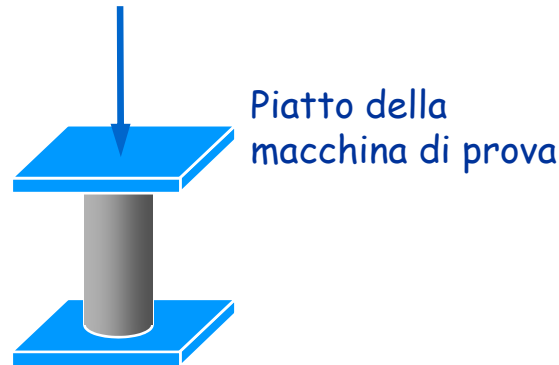
Relazione tra R_{ck} e f_{ck}

Provino cilindrico

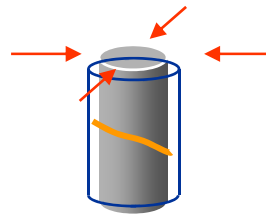
f_{ck}

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

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



Piatto della
macchina di prova



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 ...

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

Che valore utilizzare per f_{ck} ?

Classi di resistenza del calcestruzzo

CLASSE DI RESISTENZA
C8/10
C12/15
C16/20
C20/25
C25/30
C28/35
C 32/40
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

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

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

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

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

Modulo elastico

In sede di progettazione si può assumere

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

Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

Legame più realistico

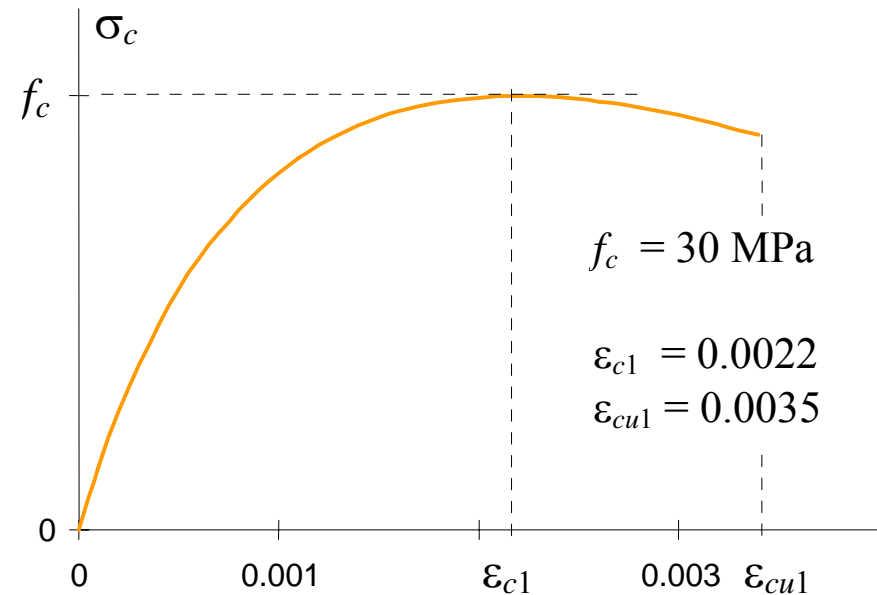
$$\sigma_c = \frac{k \eta - \eta^2}{1 + (k - 2) \eta} f_c$$

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

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

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

EC2, punto 3.1.5



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

Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

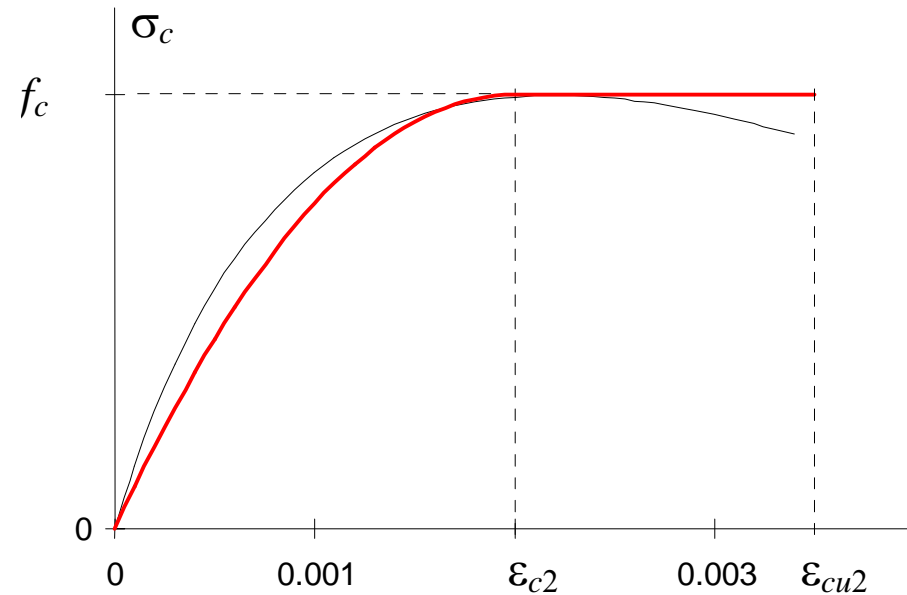
Legame semplificato

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

$$\sigma_c = f_{cd}$$

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

Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

Valore di calcolo della resistenza

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

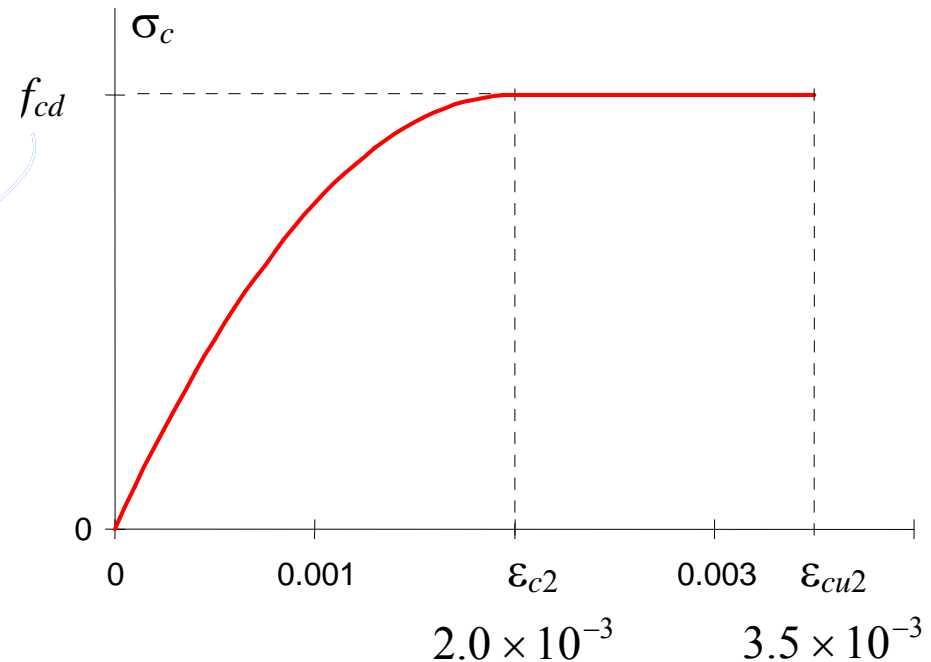
con

$$\gamma_c = 1.5$$

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

$$\alpha_{cc} = 0.85$$

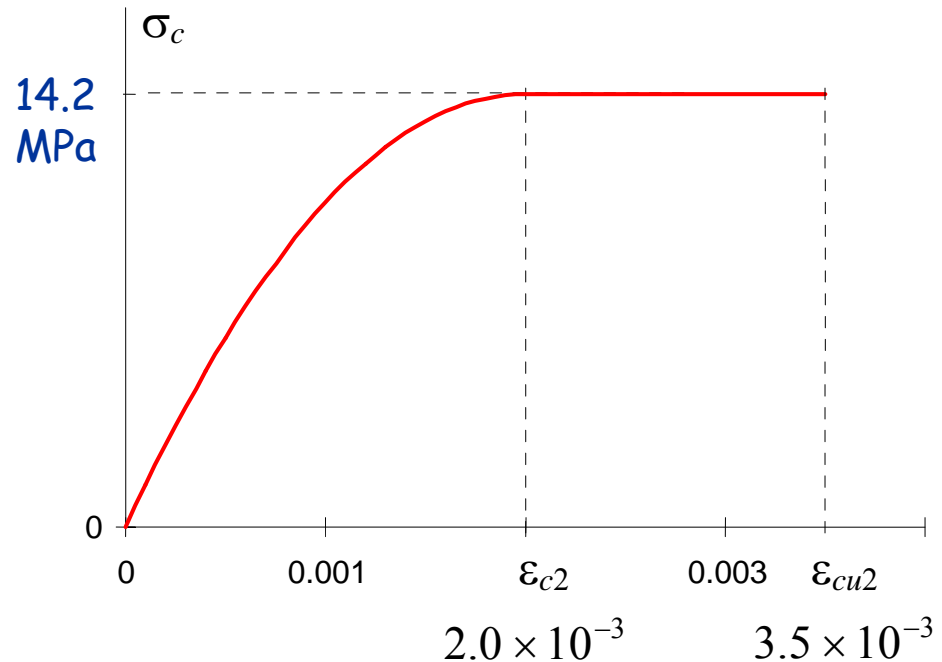
Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

Esempio

Calcestruzzo di classe

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

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



$$f_{cd} = \frac{0.85 \times 25}{1.5} = 14.2 \text{ MPa}$$

Si ricorda che

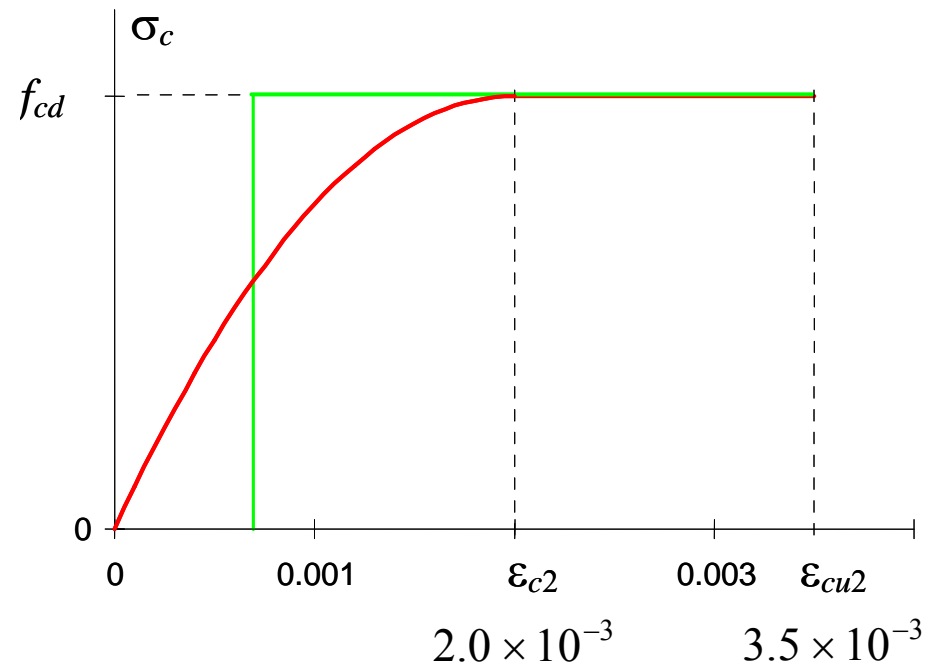
$$\bar{\sigma}_c = 9.75 \text{ MPa}$$

Legame costitutivo di calcolo del calcestruzzo

Alternativa:

Stress block

$$\sigma_c = f_{cc}$$



Acciaio

Nel passato:

Fe B 384k 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

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

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

$$(f_y/f_{y,nom})_{k(10\%)} \leq 1.25$$

per B450C

$$1.15 \leq (f_t/f_y)_{k(10\%)} < 1.35$$

$$\epsilon_{uk(10\%)} \geq 7.5 \times 10^{-2}$$

per B450A

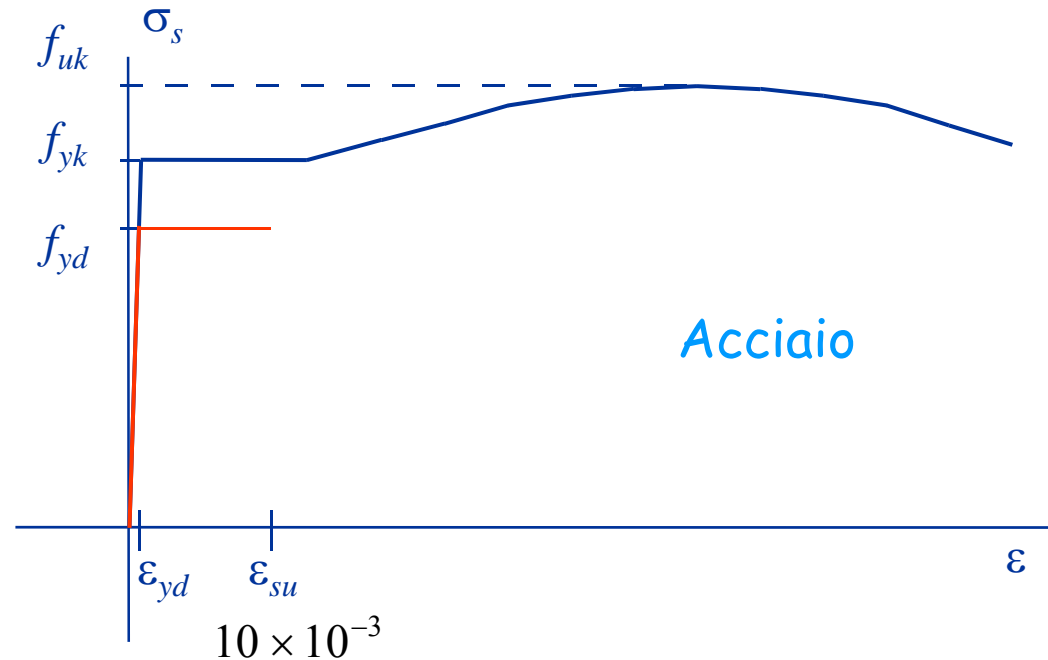
$$1.05 \leq (f_t/f_y)_{k(10\%)}$$

$$\epsilon_{uk(10\%)} \geq 2.5 \times 10^{-2}$$

Legame costitutivo di calcolo dell'acciaio

Possibili alternative

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



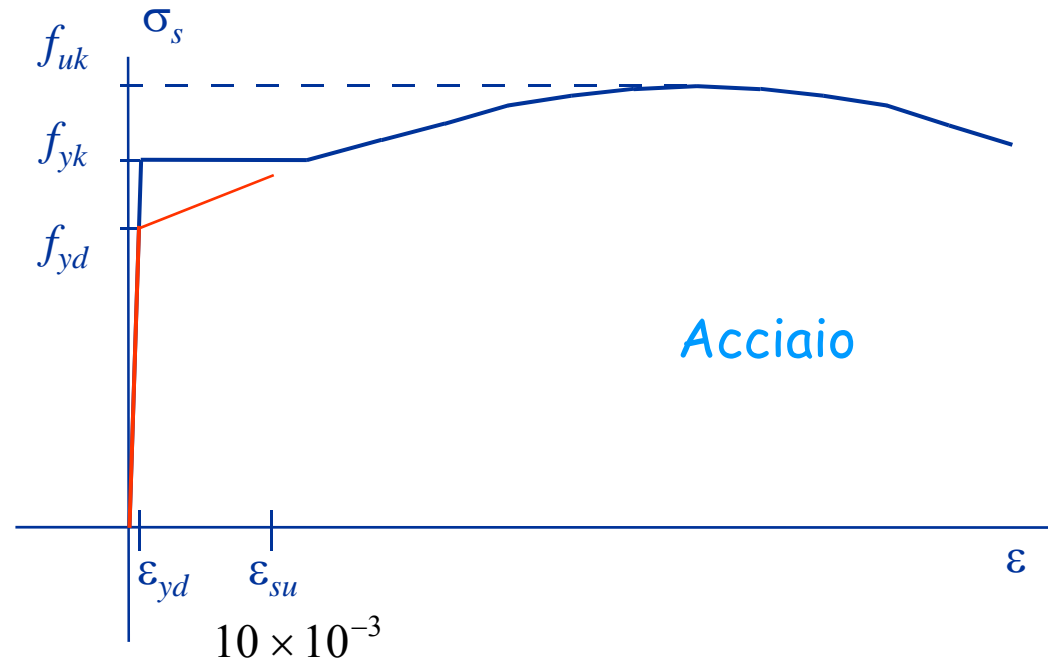
Legame "tradizionale"
non più citato dalle NTC08

Legame costitutivo di calcolo dell'acciaio

Possibili alternative

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

2 - Legame elasto-plastico con incrudimento, con limite 10×10^{-3}



Legame poco usato

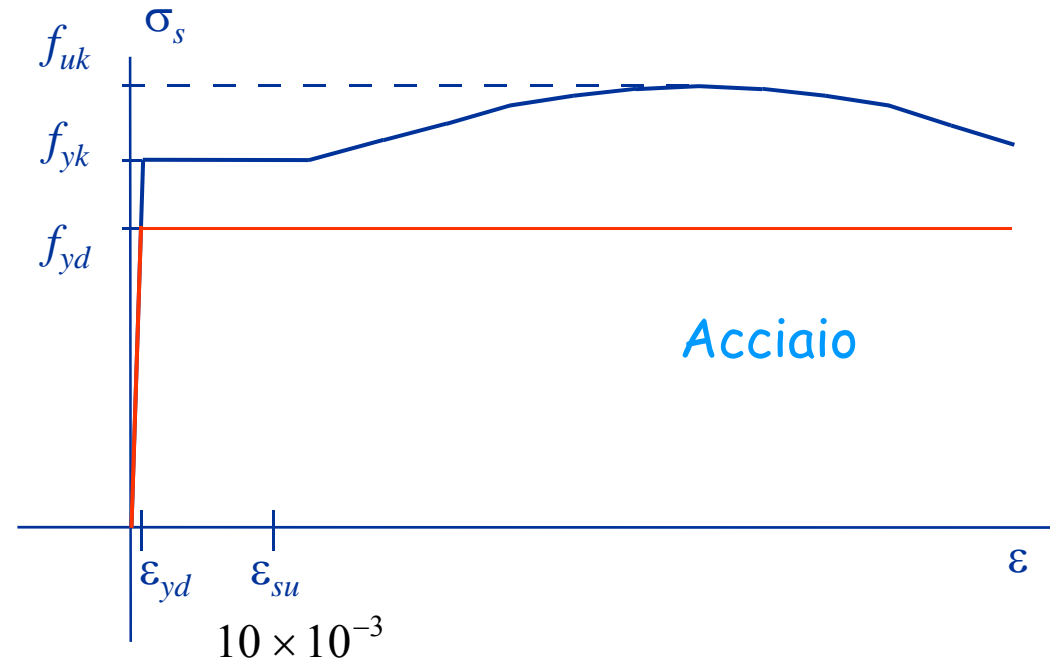
Legame costitutivo di calcolo dell'acciaio

Possibili alternative

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

2 - Legame elasto-plastico con incrudimento, con limite 10×10^{-3}

3 - Legame elastico-perfettamente plastico, senza limiti



In molti casi può semplificare la trattazione

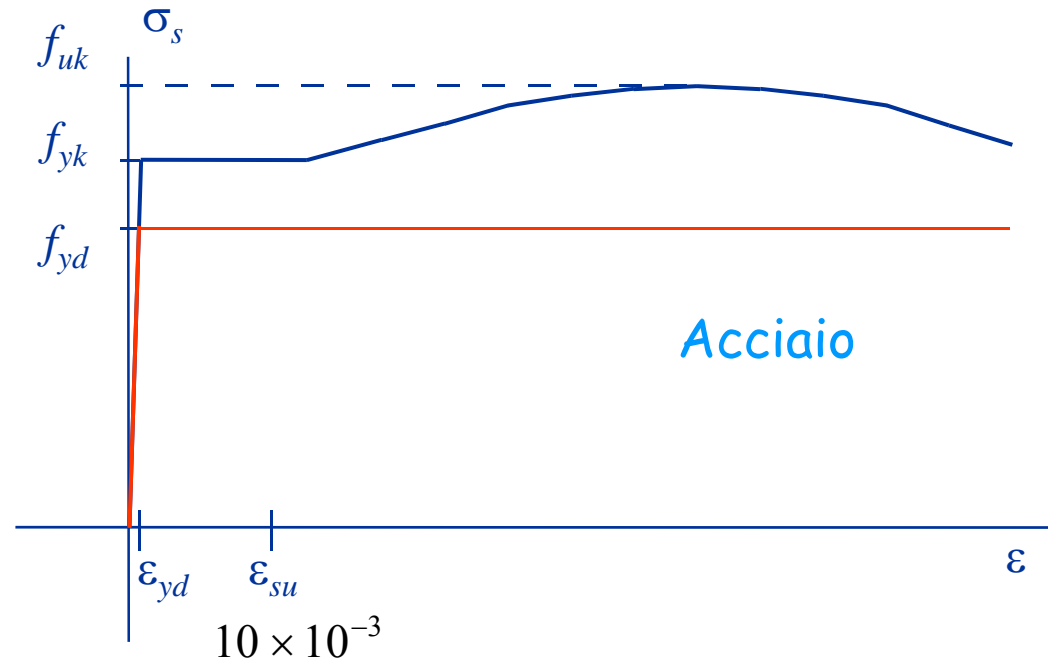
Legame costitutivo di calcolo dell'acciaio

Valore di calcolo della resistenza

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

con

$$\gamma_s = 1.15$$



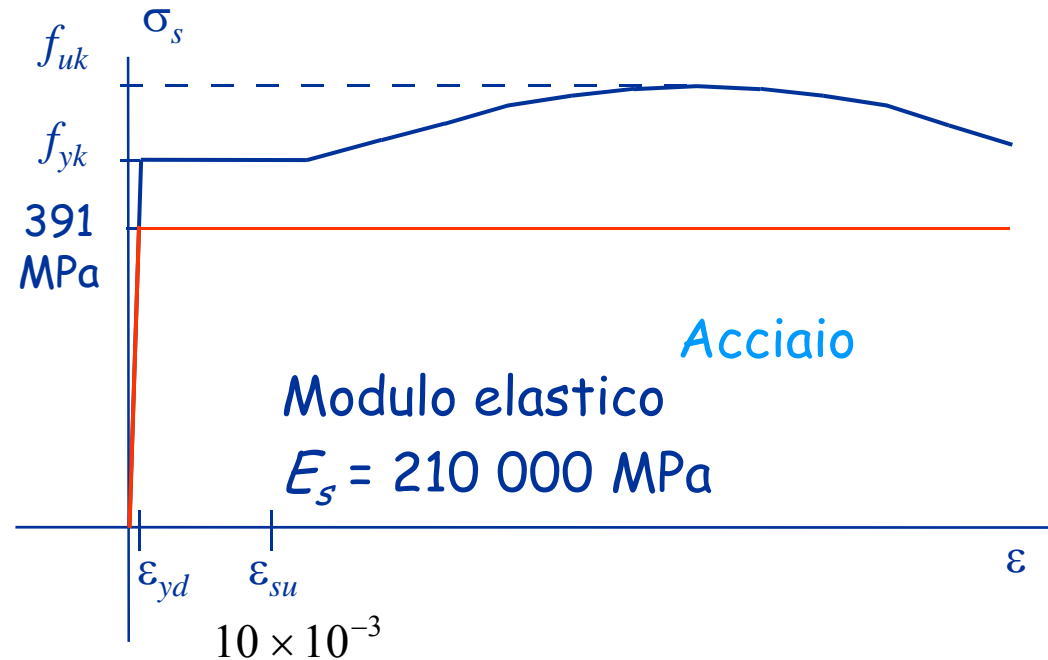
Legame costitutivo di calcolo dell'acciaio

Esempio

Acciaio B450C

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

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



Acciaio B450C

$$\varepsilon_{yd} = \frac{391.3}{210\,000} = 0.00186$$

Degrado del calcestruzzo armato e Durabilità

Cause del degrado

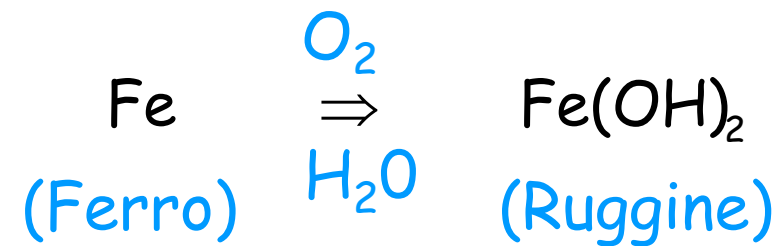
- 1 - Corrosione delle armature promossa da:
 - carbonatazione;
 - dal cloruro.

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

- 3 - Formazione di ghiaccio

Corrosione

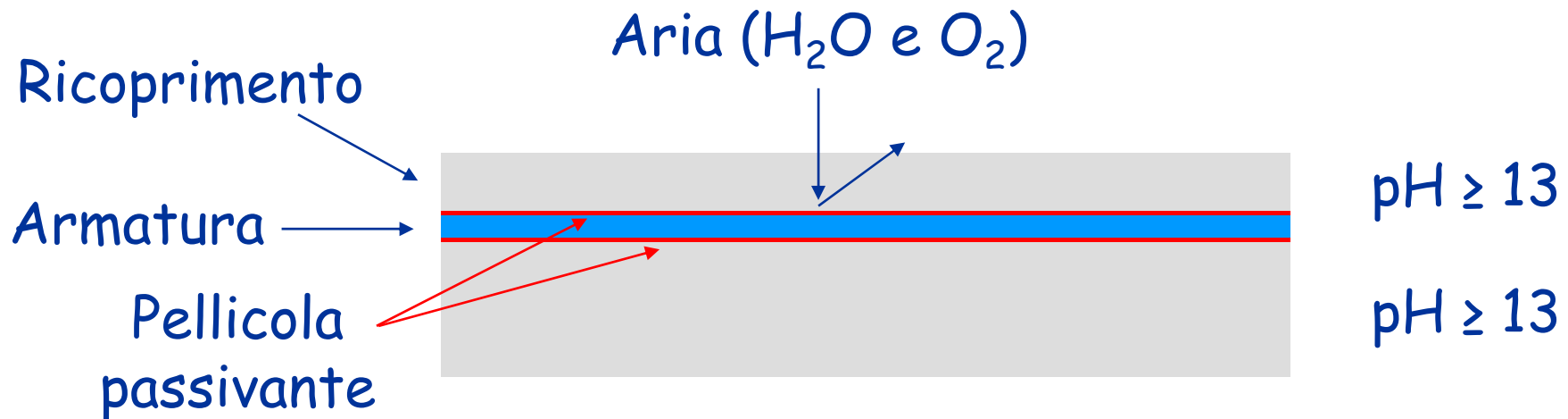
Consiste nella trasformazione dell'acciaio in ruggine (ossidi ferrici Fe(OH)_2 , Fe(OH)_3 , ecc.)



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

Passivazione dell'armatura

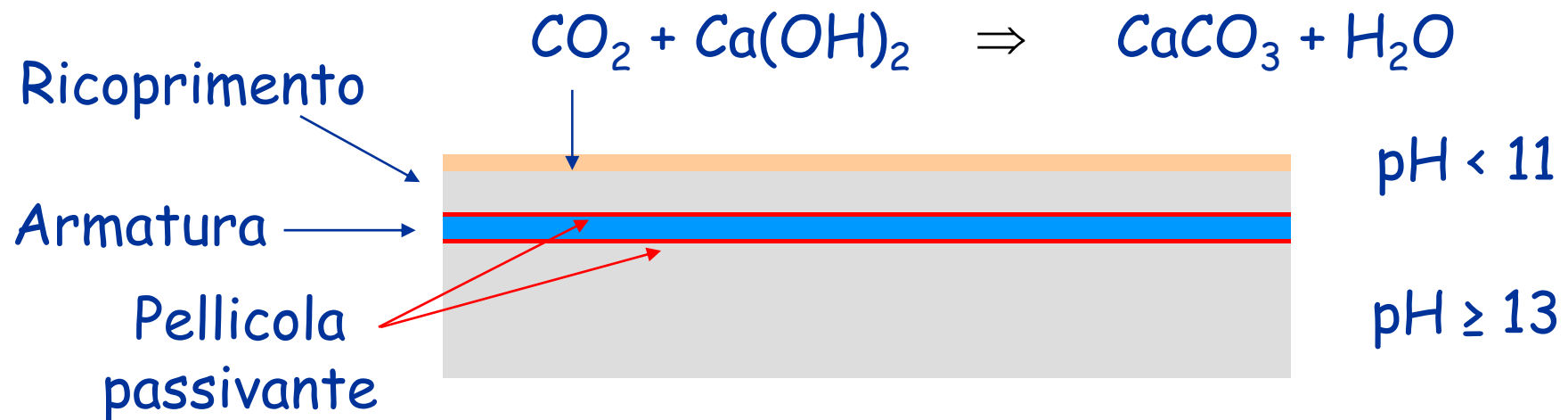
Durante l'idratazione del cemento si forma Ca(OH)_2 e si forma un ambiente fortemente basico



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

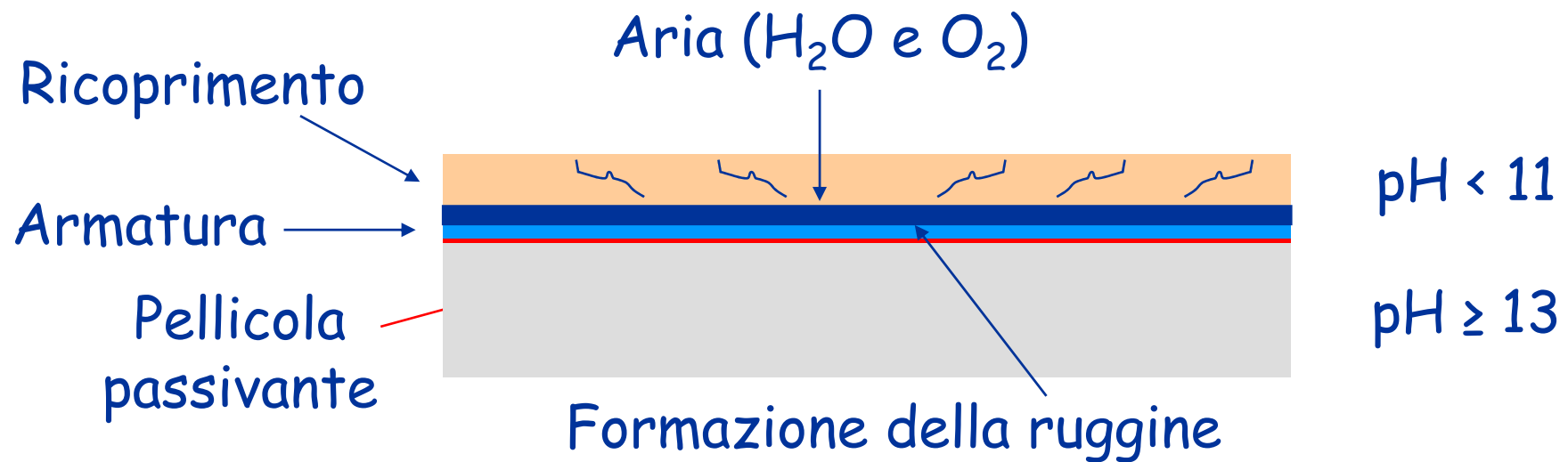
Carbonatazione

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



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 ridurre 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

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

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

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 ridurre 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

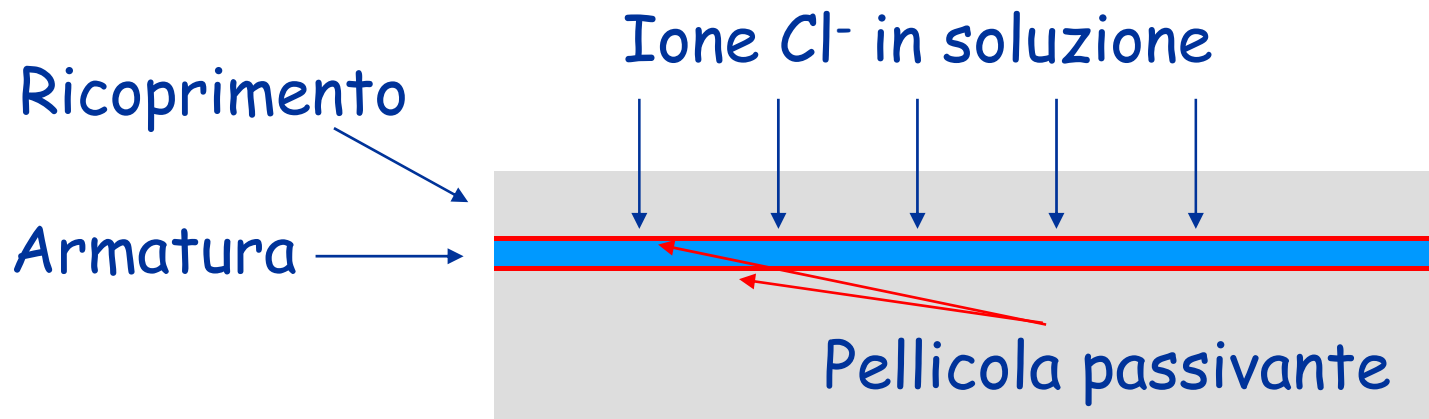
$$t = \frac{s_r^2}{k^2} = \frac{25^2}{12.3} = 12.8 \text{ anni}$$

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

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 clouro

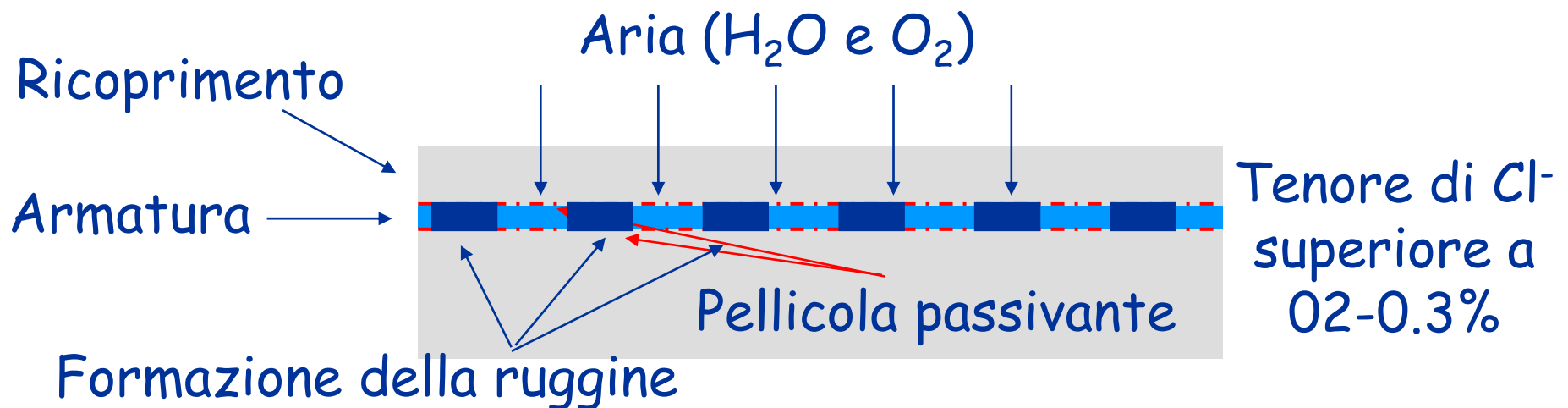
L'acqua penetra nel calcestruzzo trasportando lo ione cloruro Cl^-



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

Corrosione promossa dal clouro

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. Collepardi, Edizioni Tintoretto.

Come ridurre la penetrazione del cloruro?

1. Migliorando il grado di compattazione

Esempio:

Ricoprimento: 2.5 cm

Rapporto a/c: 0.5

Grado di compattazione: 0.95

Temperatura: 25° C

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?

2. Cambiando tipo di cemento

Esempio:

Ricoprimento: 2.5 cm

Rapporto a/c: 0.5

Grado di compattazione: 1.00

Temperatura: 25° C

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 ² /anno)	Anni
Portland CEM I	50	0.78
Pozzolánico CEM III	30	1.30

Come ridurre la penetrazione del cloruro?

3. Aumentando lo spessore del ricoprimento

Esempio:

Ricoprimento: 2.5 cm

Rapporto a/c: 0.5

Grado di compattazione: 1.00

Temperatura: 25° C

Cemento: Pozz. CEM III

Tempo di penetrazione
del ricoprimento

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

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

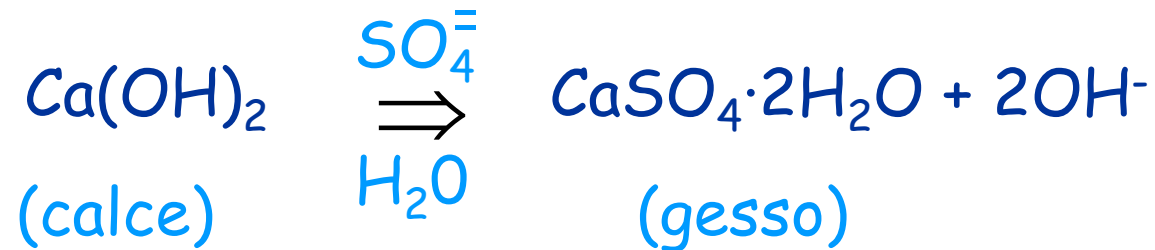
s_r (cm)	Anni
2.5	1.30
3.0	1.88
3.5	2.55
4.0	3.33
4.5	4.22

Come ridurre la penetrazione del cloruro?

4. Riducendo il rapporto acqua 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.



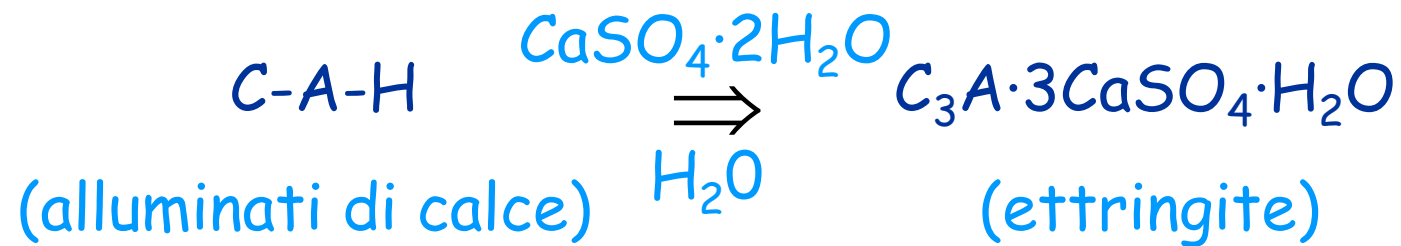
Lo ione solfato reagisce con la calce e l'acqua formando gesso.

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

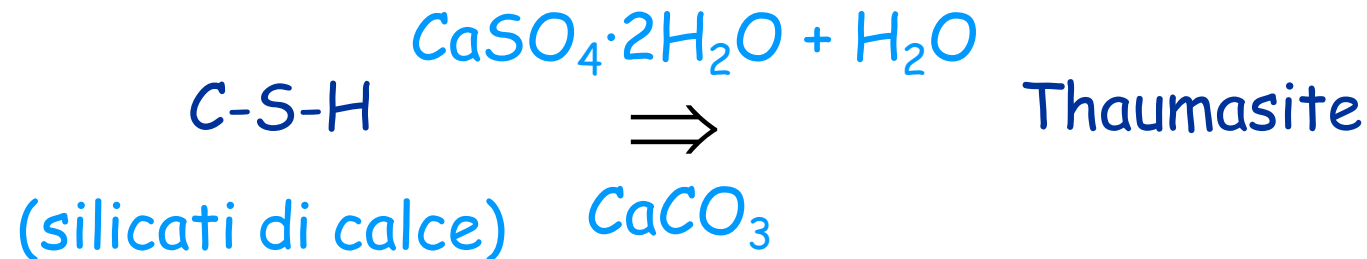


La formazione di ettringite avviene con aumento di volume e conseguente disgregamento del calcestruzzo.

Aggressione dello ione $\text{SO}_4^{=}$ (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 $< 10^\circ\text{C}$, 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

Aggressione dello ione $SO_4^{=}$?

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 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

Durabilità del calcestruzzo e classi di esposizione (norme UNI-EN 206 e UNI 11104-2004)

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

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

CLASSI DI ESPOSIZIONE XC (UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Ambiente	Esempi	Max a/c	Min R_{ck} (MPa)	Cemento (kg/m ³)	Ricoprim. (mm)
XC1	Asciutto	Interni di edifici con U.R. bassa	0.60	30	300	15
XC2	Bagnato raramente asciutto	Strutture idrauliche Strutture interrato	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. Collepari, Edizioni Tintoretto.

CLASSI DI ESPOSIZIONE XD

(UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Ambiente	Esempi	Max a/c	Min R_{ck} (MPa)	Cemento (kg/m ³)	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 solai 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_{ck} (MPa)	Cemento (kg/m ³)	Ricoprim. (mm)
XS1	Moderatamente 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. Collepari, Edizioni Tintoretto.

CLASSI DI ESPOSIZIONE XF

(UNI 11104-2004)

Classe di esp.	Ambiente	Esempi	aria	Max a/c	Min R_{ck} (MPa)	Cemento (kg/m ³)	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_{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.

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.