



# L'ANALISI AMBIENTALE

---



# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1 - LE CAUSE DEL DEGRADO

### UNI 8981-1: Definizione ed elenco delle azioni aggressive

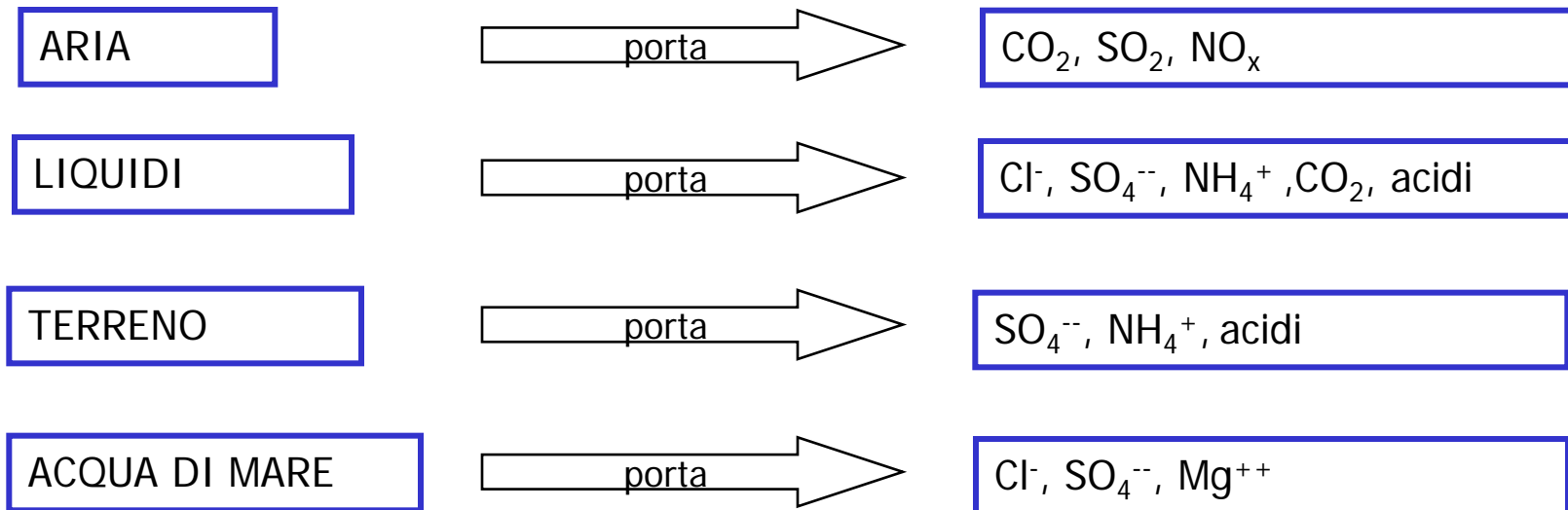
- attacco solfatico della matrice cementizia (UNI 8981-2/6)
- dilavamento della superficie del calcestruzzo da parte di acque acide (UNI 8981-3)
- formazione di ghiaccio nella matrice cementizia e negli inerti (UNI 8981-4)
- corrosione delle armature metalliche (UNI 8981-5/6)
- microfessurazione (ritiro igro-termico, sollecitazioni in servizio) (UNI 8981-7)
- reazione alcali del cemento-silice degli inerti (UNI 8981-8)



# L'ANALISI AMBIENTALE

---

Le strutture sono a contatto con:









# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.1 - AGGRESSIONE DA SOLFATI (UNI 8981-2/6)

Sono frequentemente presenti nei terreni e nelle acque sotto forma di:

-  Solfato di Calcio
-  Solfato di Magnesio
-  Solfato di Potassio
-  Solfato di Ammonio

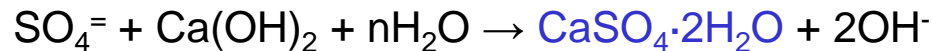
In ambienti **umidi e freddi** l'azione aggressiva dei solfati può risultare **molto severa**.



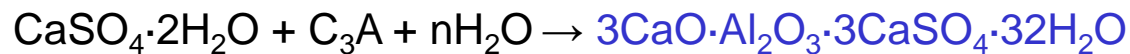
## L'ANALISI AMBIENTALE

---

Lo ione solfato ( $\text{SO}_4^{=}$ ) si combina con l'Idrossido di Calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), presente nella pasta di cemento, dando luogo alla formazione di **Gesso**:

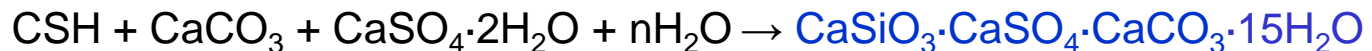


Il Gesso, a sua volta, reagisce con gli Alluminati di Calcio presenti nel cemento ( $\text{C}_3\text{A}$ ) formando **Ettringite**



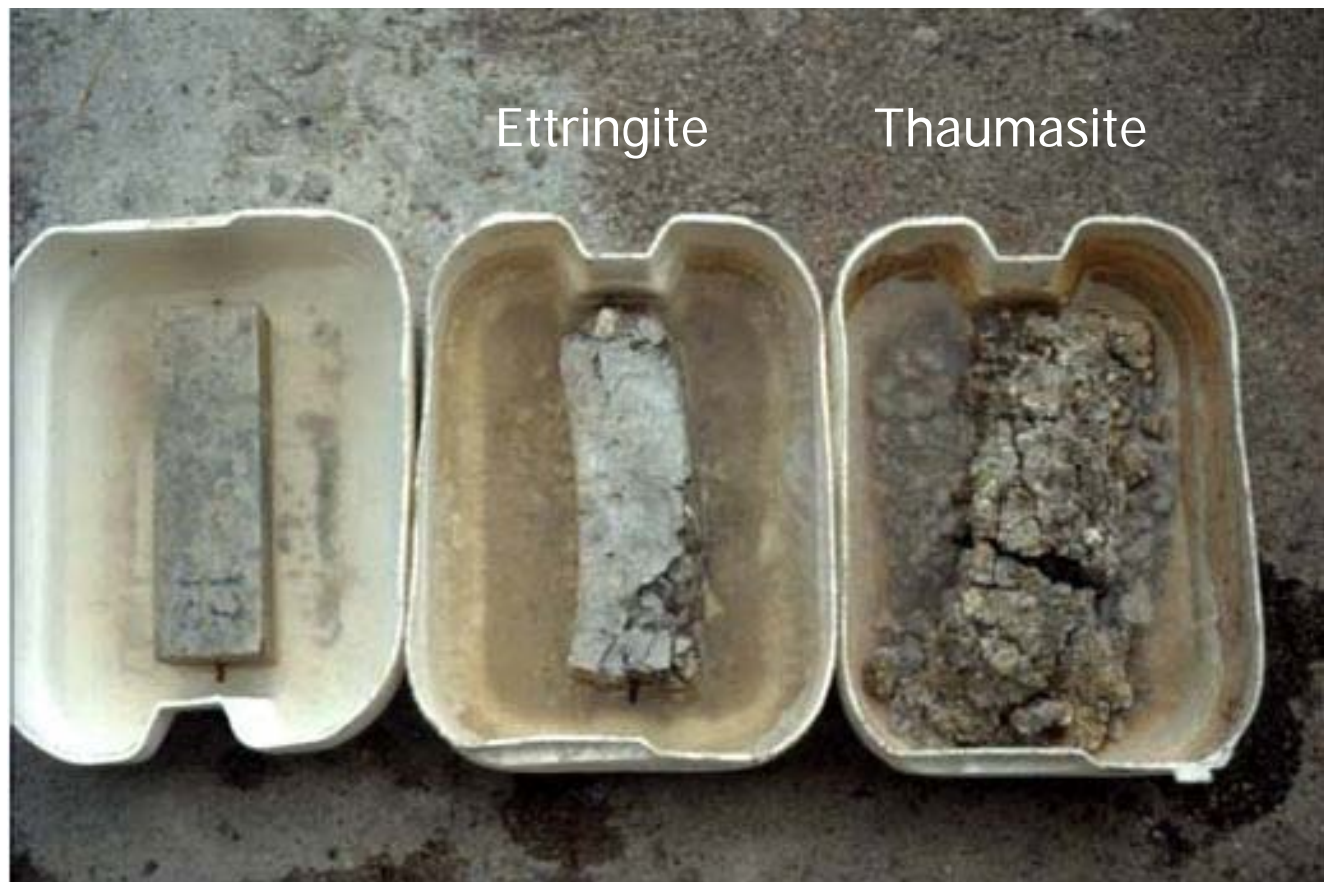
La formazione di Ettringite avviene con un **notevole aumento di volume** producendo gravi fenomeni di degradazione del calcestruzzo

Quando  $T = 0 \div 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , in presenza di acqua e  $\text{CaCO}_3$  si forma **Thaumasite**:



La reazione trasforma il CSH rendendo la matrice incoerente

# L'ANALISI AMBIENTALE





# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## Provvedimenti (UNI 8981-2/6):

- ☺ progettare un calcestruzzo compatto a bassa permeabilità
- ☺ a/c basso
- ☺ utilizzare cementi di miscela o resistenti ai solfati
- ☺ compattare il calcestruzzo in fase di messa in opera (S4-S5)
- ☺ stagionare le superfici



# L'ANALISI AMBIENTALE

prospetto 1

## Classi di resistenza ai solfati

Simbolo del cemento secondo UNI ENV 197-1	Classi di resistenza ai solfati		
	Moderata <sup>1)</sup>	Alta	Altissima
I II/A - S II/B - S II/A - D II/A - P III/A - V II/A - L II/B - L II/A - M II/A - W II/A - T	$C_3A \leq 8\%$ e $SO_3 \leq 3,5\%$ $C_3A \leq 10\%$ e $SO_3 \leq 3,0\%$	$C_3A \leq 3\%$ e $SO_3 \leq 3,5\%$ $C_3A \leq 5\%$ e $SO_3 \leq 3,0\%$	$C_3A = 0\%$ e $C_4AF$ o $(C_4AF + C_2F) \leq 20\%$
II/B - P II/B - V II/B - W II/B - T	Pozzolanicità <sup>2)</sup>	Pozzolanicità <sup>2)</sup> e $C_3A \leq 6\%$	Pozzolanicità <sup>2)</sup> e $C_3A \leq 3\%$
II/B - M	Pozzolanicità <sup>2)</sup> o $C_3A \leq 8\%$ e $SO_3 \leq 3,5\%$ $C_3A \leq 10\%$ e $SO_3 \leq 3,0\%$	Pozzolanicità <sup>2)</sup> e $C_3A \leq 3\%$ e $SO_3 \leq 3,5\%$ $C_3A \leq 5\%$ e $SO_3 \leq 3,0\%$	Pozzolanicità <sup>2)</sup> e $C_3A = 0\%$
III/A	Nessuna prescrizione	$C_3A \leq 3\%$ e $SO_3 \leq 3,5\%$ $C_3A \leq 5\%$ e $SO_3 \leq 3,0\%$	$C_3A = 0\%$ e $C_4AF$ o $(C_4AF + C_2F) \leq 20\%$
III/B III/C	Nessuna prescrizione	Nessuna prescrizione	$C_3A \leq 2\%$
IV/A	Nessuna prescrizione	$C_3A \leq 6\%$	$C_3A \leq 3,5\%$
IV/B	Nessuna prescrizione	Nessuna prescrizione	$C_3A \leq 3,5\%$
V/A	Nessuna prescrizione	$C_3A \leq 3\%$ e $SO_3 \leq 3,5\%$ $C_3A \leq 5\%$ e $SO_3 \leq 3,0\%$	Pozzolanicità <sup>2)</sup> e $C_3A \leq 3,0$
V/B	Nessuna prescrizione	Nessuna prescrizione	Pozzolanicità <sup>2)</sup> e $C_3A \leq 3,0$

1) La classe "moderata" di resistenza ai solfati comprende, in particolare, la resistenza all'acqua di mare.  
2) La pozzolanicità è positiva se il cemento soddisfa il saggio secondo quanto è riportato nella UNI EN 196-5.

### UNI 9156:

Cementi resistenti ai solfati

### UNI 8981-2:

Istruzioni per migliorare la resistenza ai solfati

### UNI 10595:

Determinazione della classe di resistenza ai solfati e al dilavamento dei cementi





# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.2 - AGGRESSIONE DA ACQUE DILAVANTI (UNI 8981-3)

Le acque dolci possono aggredire il calcestruzzo poiché quest'ultimo è un materiale eminentemente **basico**, ed è facilmente aggredibile dalle sostanze acide.

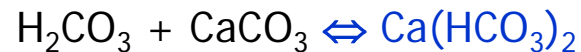
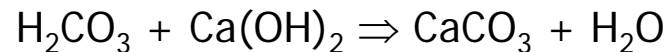
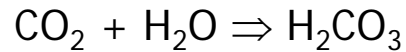
L'azione delle acque acide si esplica inizialmente mediante la reazione dell'**acido** in esse contenuto con l'**Idrossido di Calcio**  $\text{Ca(OH)}_2$ , prodotto dall'idratazione del cemento, il quale viene così solubilizzato ed asportato, accrescendo la **porosità** e la **permeabilità** del calcestruzzo.

Successivamente, l'acido attacca anche i silicati idrati (prodotti di idratazione del cemento), con dissoluzione della **struttura portante** del conglomerato cementizio.



## L'ANALISI AMBIENTALE

---



### ECCESSO DI CO<sub>2</sub> LIBERA

In eccesso di CO<sub>2</sub> si forma continuamente Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, **solubile** e quindi facilmente dilavato

### SCARSITA' DI CO<sub>2</sub> LIBERA

Quando la CO<sub>2</sub> libera è scarsa, l'equilibrio della reazione si sposta verso sinistra, si deposita CaCO<sub>3</sub> formando incrostazioni

# L'ANALISI AMBIENTALE

Dilavamento



marzo 2014



# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## Provvedimenti:

- ☺ giunti a tenuta idraulica
- ☺ precauzioni per ridurre le fessurazioni
- ☺ corretta realizzazione delle riprese di getto
- ☺ a/c basso
- ☺ utilizzare cementi III o IV
- ☺ utilizzare cementi resistenti al dilavamento (MRD o AARD)
- ☺ aggiunte dei fumi di silice
- ☺ evitare vespai e nidi di ghiaia (compattazione – S5)
- ☺ stagionare le superfici



# L'ANALISI AMBIENTALE

**UNI 9606:**  
Cementi  
resistenti alle  
acque dilavanti

**UNI 8981-3:**  
Istruzioni per  
ottenere la  
resistenza alle  
acque dilavanti

**UNI 10595:**  
Determinazione della  
classe di resistenza ai  
solfati e al  
dilavamento dei  
cementi

Simbolo del cemento secondo UNI ENV 197-1	Classi di resistenza al dilavamento		
	Moderata	Alta	Altissima
I II/A - S II/B - S II/A - L II/B - L II/A - M II/B - M	$C_3S \leq 40\%$	Non ammesso	Non ammesso
II/A - D II/A - P II/A - V II/A - W II/A - T	$C_3S \leq 40\%$	Pozzolanicità <sup>1)</sup> e $C_3S \leq 45\%$	Non ammesso
II/B - P II/B - V II/B - W II/B - T	Nessuna prescrizione	Pozzolanicità <sup>1)</sup> e $C_3S \leq 45\%$	Pozzolanicità <sup>1)</sup> e $C_3S \leq 37\%$
III/A	Nessuna prescrizione	$C_3S \leq 30\%$	$C_3S \leq 25\%$ e $RBC \geq 50\%$
III/B	Nessuna prescrizione	Nessuna prescrizione	$C_3S \leq 20\%$
III/C	Nessuna prescrizione	Nessuna prescrizione	Nessuna prescrizione
IV/A IV/B	Nessuna prescrizione	Nessuna prescrizione	$C_3S \leq 45\%$
V/A	Nessuna prescrizione	Pozzolanicità <sup>1)</sup> o $C_3S \leq 30\%$	Pozzolanicità <sup>1)</sup> e $C_3S \leq 30\%$
V/B	Nessuna prescrizione	Nessuna prescrizione	Pozzolanicità <sup>1)</sup>

1) La pozzolanicità è positiva se il cemento soddisfa il saggio secondo quanto riportato nella UNI EN 196-5.

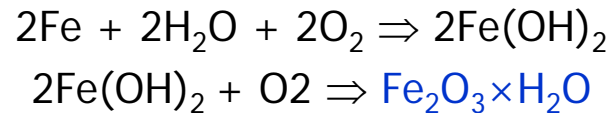


# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.4 – CORROSIONE DELLE ARMATURE METALLICHE (UNI 8981-5/6)

In presenza di umidità e ossigeno, le armature metalliche si trasformano in **ruggine**:



La formazione di ruggine ha come effetti:

- Riduzione della sezione delle armature
- Espulsione del copriferro (per aumento di volume pari a circa 6 volte)



# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.4 – CORROSIONE DELLE ARMATURE METALLICHE (UNI 8981-5/6)

Tuttavia, nel calcestruzzo, la presenza di  $\text{Ca(OH)}_2$ , NaOH, KOH, crea un ambiente fortemente basico ( $\text{pH} > 13$ ), che favorisce la **passivazione** delle armature

**Passivazione** = formazione di un **film protettivo** di ossido di ferro

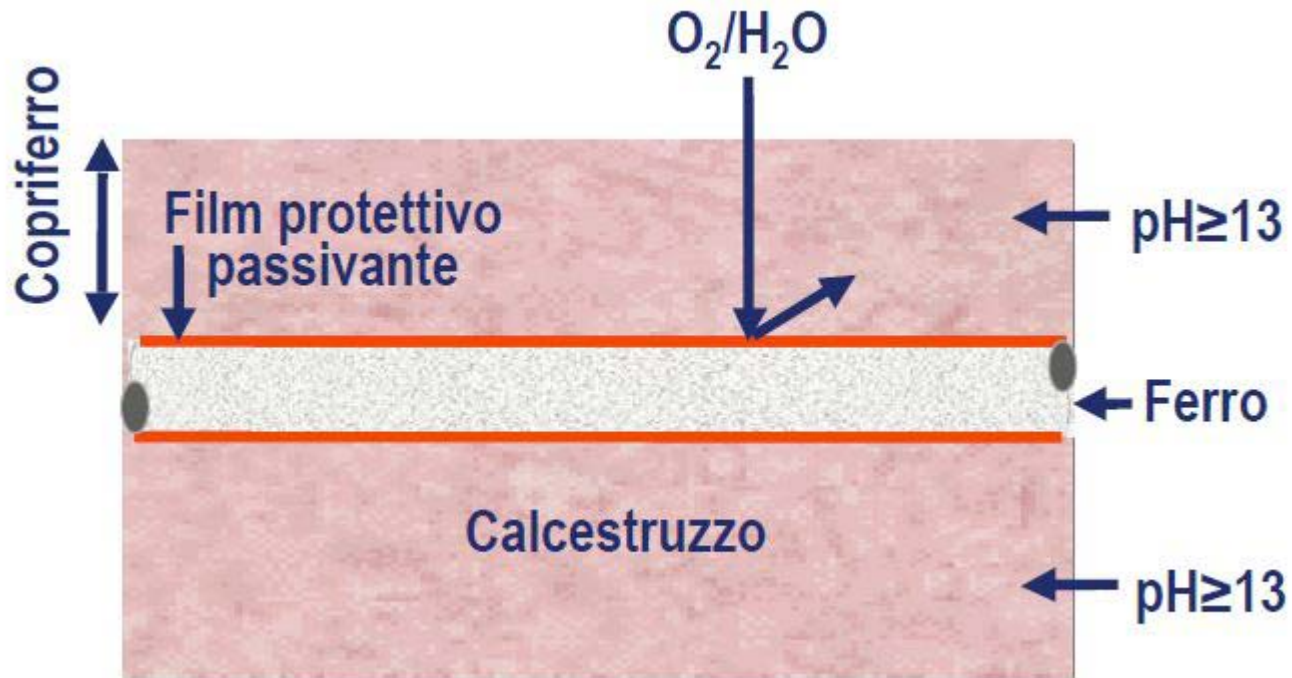
adesivo

compatto

impermeabile

# L'ANALISI AMBIENTALE

## 1.4 – CORROSIONE DELLE ARMATURE METALLICHE (UNI 8981-5/6)







## L'ANALISI AMBIENTALE

---

### 1.4 – CORROSIONE DELLE ARMATURE METALLICHE (UNI 8981-5/6)

Depassivazione = perdita del film protettivo

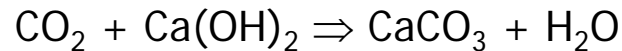
Avviene per:

$\text{pH} < 11,5$  (attacco per carbonatazione)

$\text{Cl}^- > 0,4\%$  sul cemento (attacco da cloruri)

## 1.4.1 – CARBONATAZIONE

In presenza di **anidride carbonica** la **calce di idrolisi** contenuta nel calcestruzzo si trasforma in carbonato di calcio:

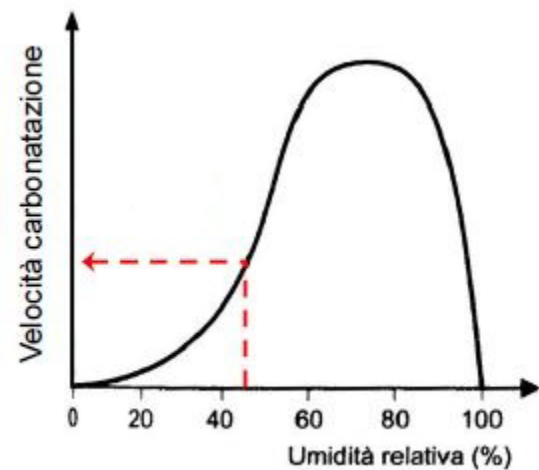


Questa trasformazione porta il calcestruzzo a **pH  $\cong$  9 (<11,5)**

Tali condizioni provocano la **depassivazione** delle armature (perdita dello strato protettivo di ossido) e la loro esposizione all'azione dell'umidità e dell'ossigeno: formazione di ruggine e conseguenti riduzione diffusa lungo la barra della sezione ed espulsione del copriferro.

# L'ANALISI AMBIENTALE

## 1.4.1 – CARBONATAZIONE



marzo 2014



# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.4.2 – AGGRESSIONE DA CLORURI

L'aggressione da cloruri si manifesta:

- **sulle armature** (depassivazione localizzata)
- **sul calcestruzzo** (reazione con la calce e reazione alkali-silice)

Cloruro di Calcio  $\text{CaCl}_2$

Cloruro di Sodio  $\text{NaCl}$



# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.4.2.1 - DEPASSIVAZIONE

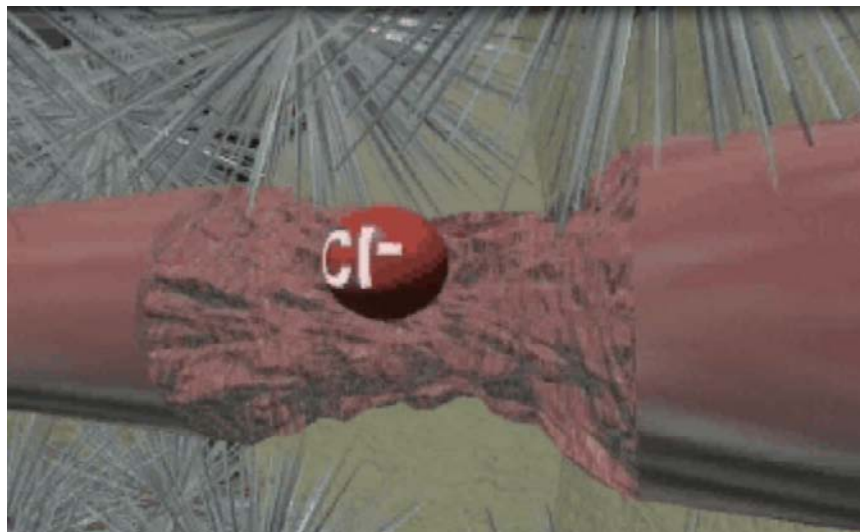
Quando la concentrazione dei cloruri supera la concentrazione soglia = 0,4%, la passività delle armature è compromessa.

Data la variabilità del calcestruzzo, la concentrazione dei cloruri sulla superficie delle armature può essere:

- omogenea (corrosione [diffusa](#))
- concentrata (cavitazione localizzata o [pitting](#))

# L'ANALISI AMBIENTALE

## 1.4.2.1 - DEPASSIVAZIONE





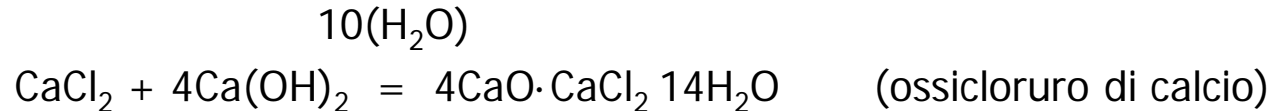
# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.4.2.2.a - REAZIONE DEL CLORURO CON LA CALCE

Il **Cloruro di Calcio**, a bassa temperatura, può distruggere la pasta di cemento.

Il degrado è dovuto alla reazione del Cloruro di Calcio con l'Idrossido di Calcio generato durante l'idratazione del cemento con formazione di Ossicloruro di Calcio che è **incoerente**: ne consegue la distruzione del calcestruzzo.



L'aggressione aumenta se:

- ☞ aumenta la concentrazione della soluzione
- ☞ diminuisce la temperatura
- ☞ **diminuisce a/c**

Il degrado si manifesta attraverso:

- ☹ la comparsa di fessure all'interfaccia pasta di cemento / aggregato
- ☹ la disintegrazione della pasta di cemento



## L'ANALISI AMBIENTALE

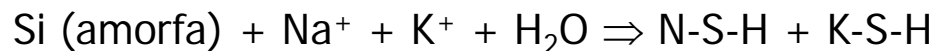
---

### 1.4.2.2.b - REAZIONE DEL CLORURO CON LA SILICE REATTIVA

Il **Cloruro di Sodio** può penetrare nel calcestruzzo sia perché spesso viene usato come sale disgelante, sia perché è uno dei sali presenti nell'acqua di mare e nella sabbia da esso estratta.

Il Cloruro di Sodio aumenta la concentrazione di alcali (Na equivalente) nel calcestruzzo.

In presenza di silice amorfa può innescare, in ambienti umidi, la reazione alcali-silice producendo un composto espansivo (Silicato di Sodio idrato) che porta il calcestruzzo alla degradazione.



Il degrado del calcestruzzo può manifestarsi come:

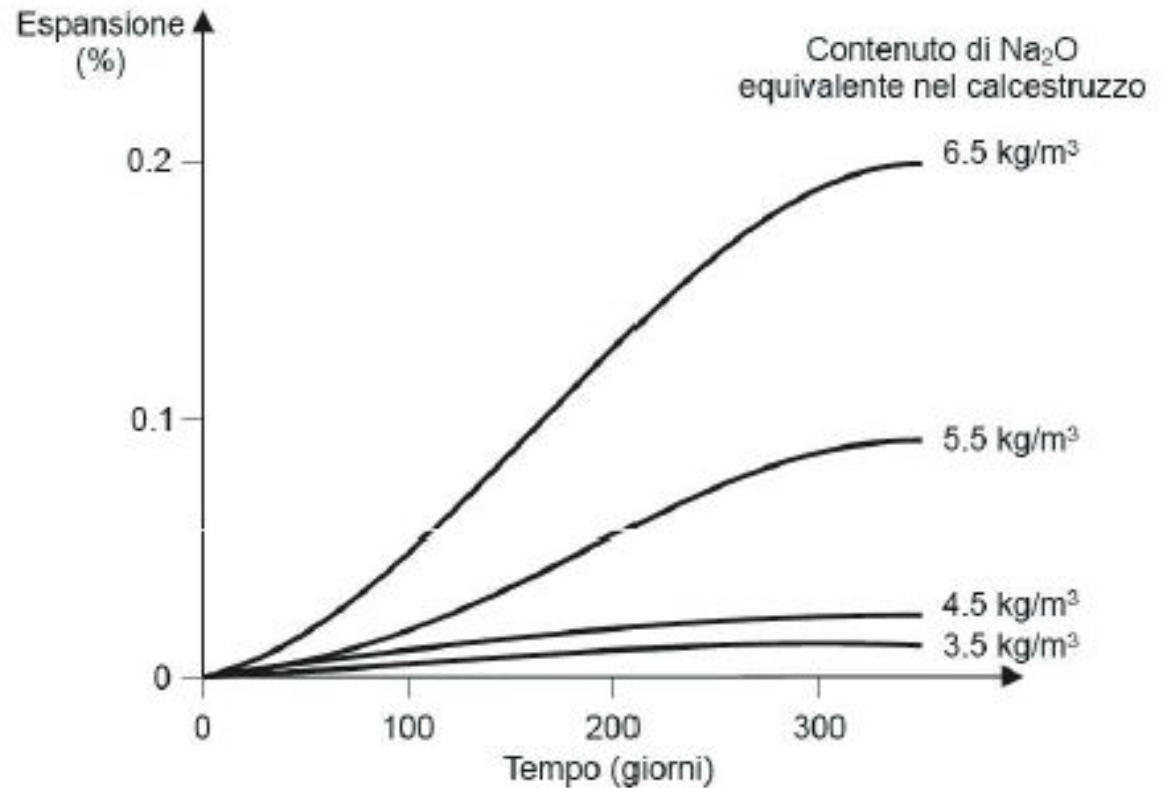
- ☹ un'espansione localizzata intorno all'aggregato reattivo
- ☹ coinvolgere tutta la massa del calcestruzzo.



# L'ANALISI AMBIENTALE

## 1.4.2.2.b - REAZIONE DEL CLORURO CON LA SILICE REATTIVA

Per concentrazioni di  $\text{NaO}_2$  eq <  $2 \text{ kg/m}^3$   
nessun rischio





## L'ANALISI AMBIENTALE

---

### 1.4.3 - Provvedimenti (UNI 8981-5/6):

- ☺ contenuto di Cl<sup>-</sup> ≤ 0,4% sulla massa del cemento
- ☺ progettare un calcestruzzo compatto
- ☺ permeabilità bassa
- ☺ a/c basso
- ☺ spessore copriferro elevato
- ☺ utilizzare CEM IV o CEM III
- ☺ compattare il calcestruzzo (S4-S5)
- ☺ stagionare le superfici



# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.5 AGGRESSIONE DA CICLI DI GELO-DISGELO (UNI 8981-4)

Passando dallo stato liquido allo stato solido l'acqua ha un aumento di volume pari al 9%.

Nel calcestruzzo la temperatura di congelamento  $T_c$  dipende dal diametro dei pori e si abbassa con il diminuire delle loro dimensioni.

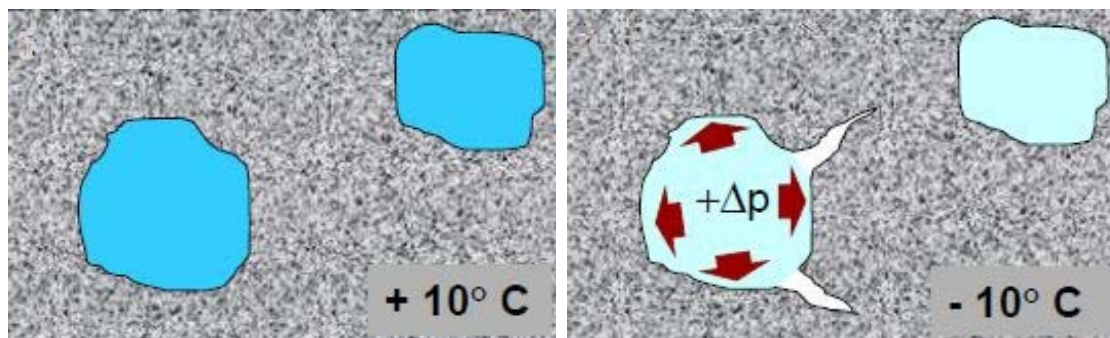
Quando il grado di saturazione dei pori supera il 91%, nel corso di un abbassamento di temperatura, l'acqua congela nei pori più grandi mentre in quelli più piccoli rimane fluida e intrappolata.

Diminuendo ulteriormente la temperatura la fase fluida è soggetta a pressioni tanto più alte quanto più  $T$  si abbassa e la quantità di acqua passata allo stato solido aumenta: la pressione è tale da superare la resistenza meccanica a trazione del calcestruzzo.

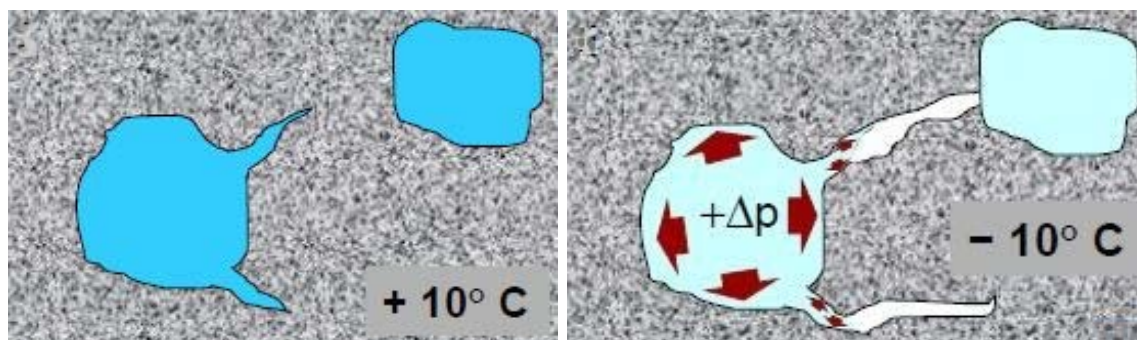
# L'ANALISI AMBIENTALE

## 1.5 AGGRESSIONE DA CICLI DI GELO-DISGELO

1° CICLO



2° CICLO

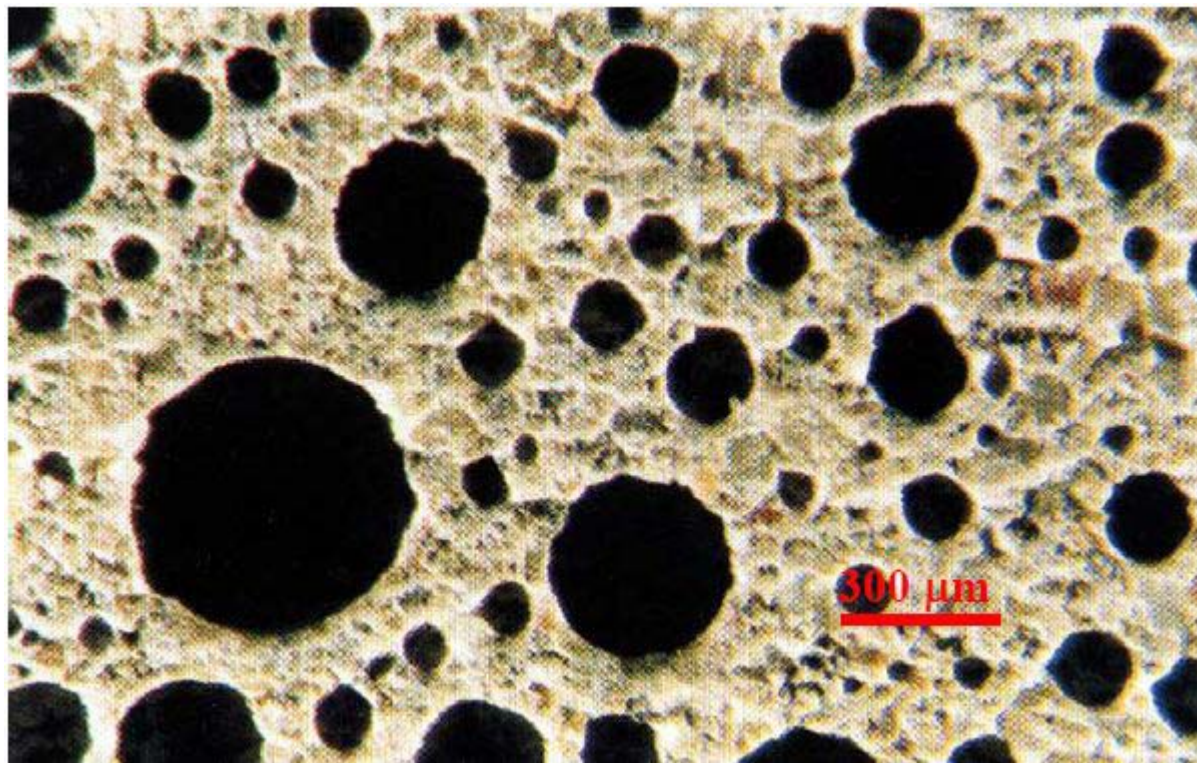




# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.5 AGGRESSIONE DA CICLI DI GELO-DISGELO





# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.5 AGGRESSIONE DA CICLI DI GELO-DISGELO

Il danno si manifesta con la **frantumazione degli aggregati e/o della pasta cementizia**, in particolare nella zona di transizione intorno agli aggregati.

L'**intensità** dell'ammaloramento aumenta con:

- ☞ l'aumentare del numero di cicli gelo-disgelo
- ☞ l'aumentare del grado di saturazione
- ☞ l'abbassarsi della temperatura
- ☞ l'abbassarsi della resistenza al gelo degli aggregati
- ☞ l'abbassarsi dell'aderenza pasta di cemento-aggregati





# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.5 AGGRESSIONE DA CICLI DI GELO-DISGELO





# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.5 AGGRESSIONE DA CICLI DI GELO-DISGELO

Provvedimenti (UNI 8981-4):

- ☺ realizzare un calcestruzzo ad elevata compattezza e bassa permeabilità
- ☺ a/c basso
- ☺ dosaggio di cemento alto
- ☺ utilizzo di aerante (aria aggiunta pari almeno al 3%)
- ☺ utilizzo di aggregati resistenti al gelo-disgelo
- ☺ consistenza al getto S4-S5
- ☺ soluzioni progettuali per proteggere e mantenere asciutto il calcestruzzo





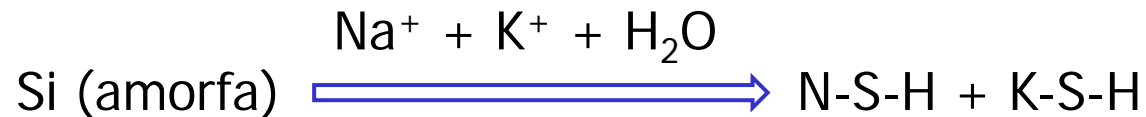
# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.6 – REAZIONE ALCALI-SILICE (ASR)

Nel calcestruzzo sono presenti  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{OH}^-$ , in ambiente basico con  $\text{pH}=13$  14.

In presenza di acqua, questi ioni possono migrare nella soluzione venendo a contatto con alcune forme di **silice reattiva**, quando questa è presente nell'aggregato.





## L'ANALISI AMBIENTALE

---

### 1.6 – REAZIONE ALCALI-SILICE (ASR)

Dalla reazione dei componenti si formano dei **silicati idrati**:

- in un primo momento appaiono in forma di **gel alcalino** (composto di  $\text{SiO}_2$ , Na, K,  $\text{H}_2\text{O}$  e povero di Ca)
- se il gel si disidrata diviene polverulento e di colore bianco

Le trasformazioni avvengono con **aumento di volume** e conseguente innesto di tensioni all'interfaccia tra pasta di cemento e aggregato.

Le tensioni sono di entità tale da poter rompere il calcestruzzo.

Il processo può essere molto lento e durare anche una decina di anni.



# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.6 – REAZIONE ALCALI-SILICE (ASR)

Le reazioni avvengono **solo se** si verificano contemporaneamente le seguenti condizioni:

- ① presenza di silice reattiva
- ② SET (Sodio Equivalente Efficace Totale)  $\geq 3,5 \text{ kg/m}^3$  di cls
- ③ presenza di acqua.



# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.6 – REAZIONE ALCALI-SILICE (ASR)

L'ammaloramento si manifesta come:

- ☹️ fratture diffuse
- ☹️ pop-out.



# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## POP – OUT IN UNA PAVIMENTAZIONE

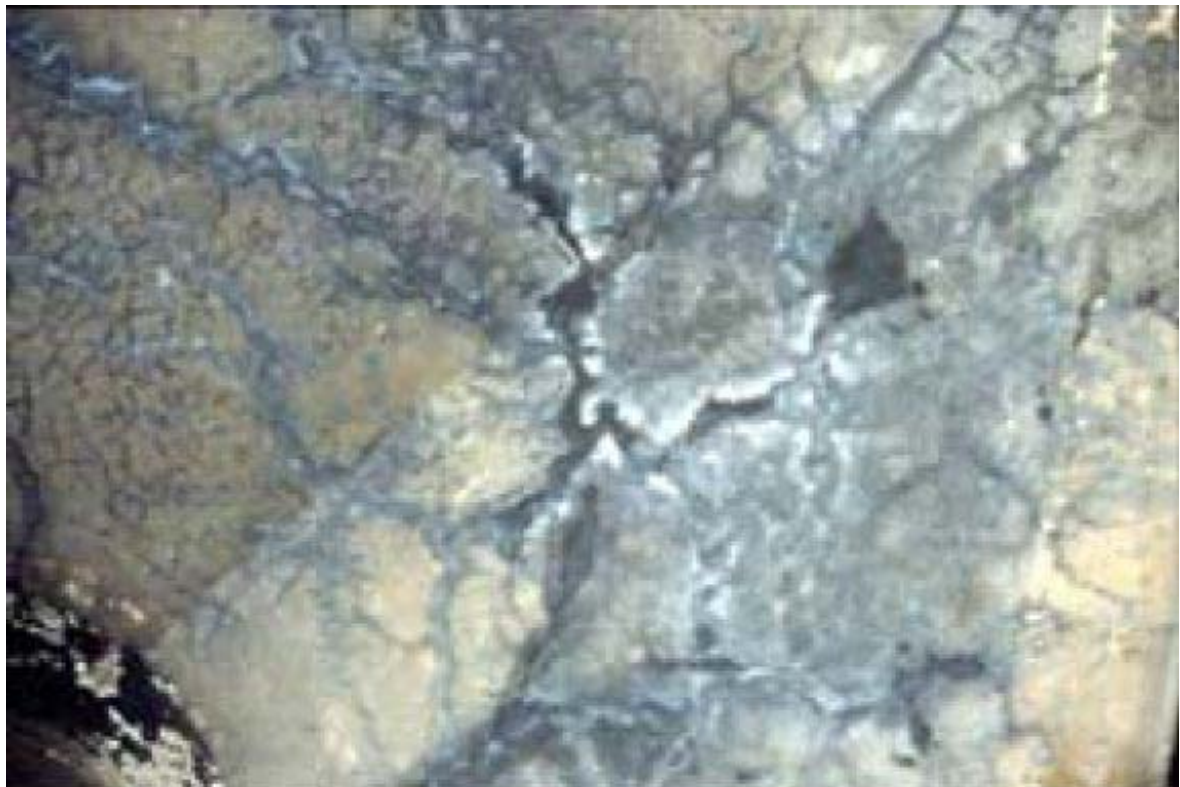




# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## FESSURAZIONE DA ASR





# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.6 – REAZIONE ALCALI-SILICE (ASR)

Provvedimenti (UNI 8981-8):

- ☺ utilizzare aggregati non reattivi
- ☺ studiare la composizione del calcestruzzo in modo da ridurre il SET
- ☺ utilizzare aggiunte tipo II
- ☺ utilizzare CEM III, CEM IV o CEM V
- ☺ tenere asciutta la struttura







# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.7 – FORMAZIONE DI FESSURAZIONI (UNI 8981-7)

Tutte le forme di aggressione viste possono trovare nella presenza di fessurazioni le condizioni particolarmente favorevoli a diffondersi.

Pertanto il **progettista**, dopo aver analizzato le diverse possibilità di aggressione e i relativi gradi di pericolosità (**classi di esposizione ambientale**), deve dare le **istruzioni** relative a:

-  provvedimenti progettuali per ridurre o eliminare il rischio
-  prescrizione del calcestruzzo
-  messa in opera del calcestruzzo
-  maturazione del calcestruzzo



# L'ANALISI AMBIENTALE

## 1.7.1 – FESSURAZIONI DA PERDITA D'UMIDITA

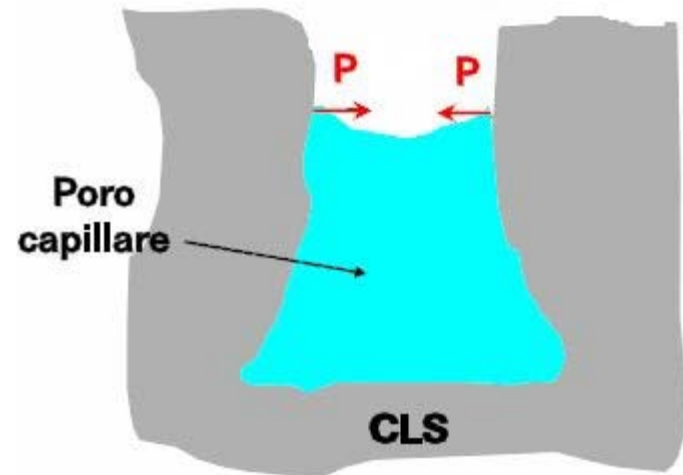
$$P = \frac{2 \times y}{r}$$

Dove:

P: pressione nei pori

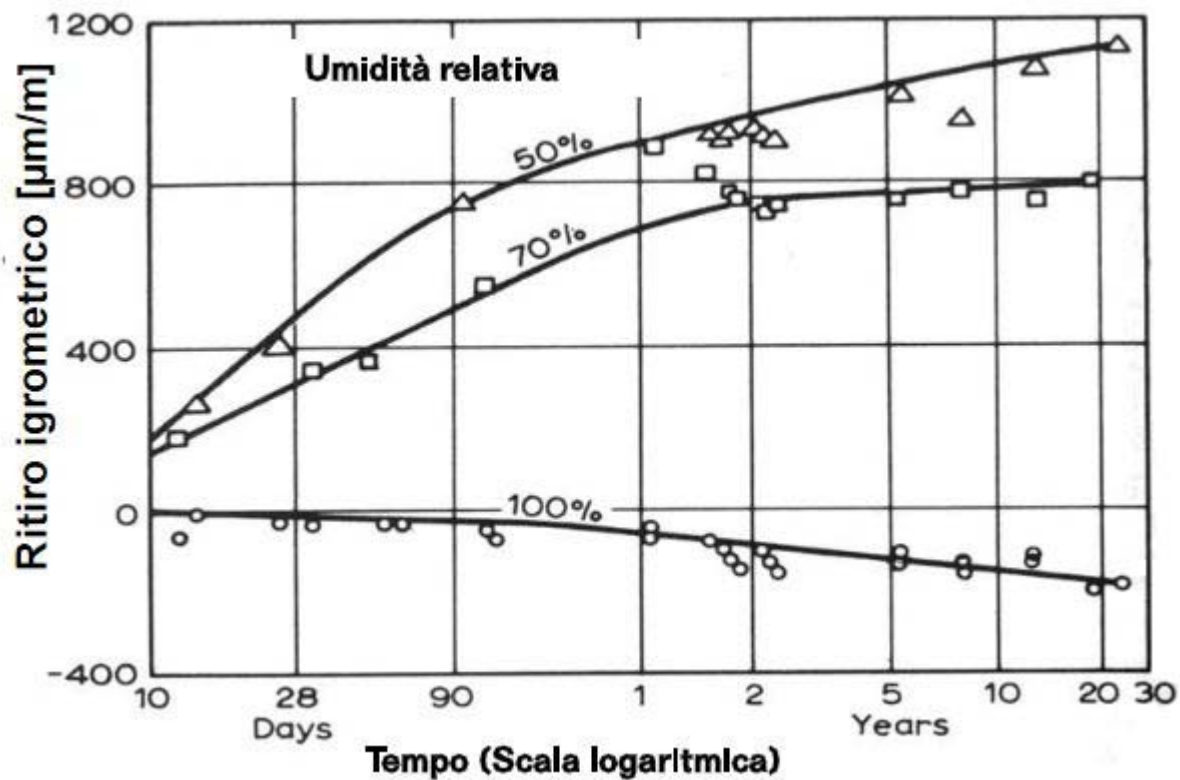
y: tensione superficiale del liquido

r: raggio di curvatura del menisco del liquido



# L'ANALISI AMBIENTALE

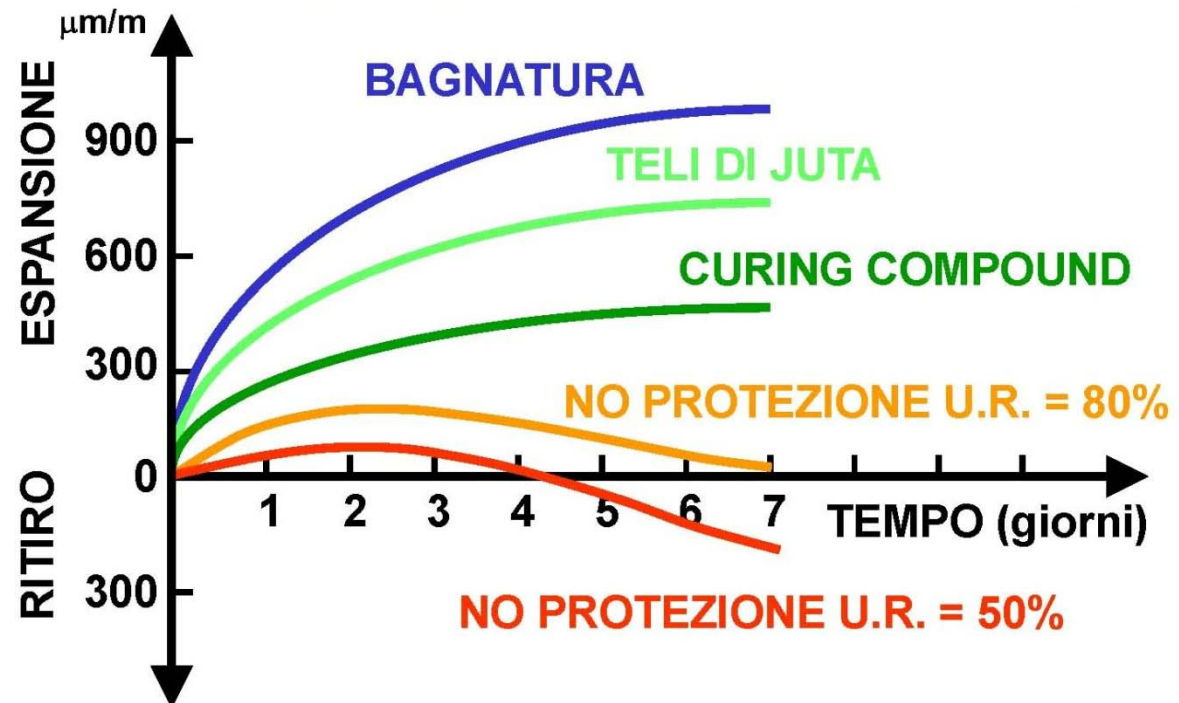
## 1.7.1 – FESSURAZIONI DA PERDITA D'UMIDITA'



# L'ANALISI AMBIENTALE

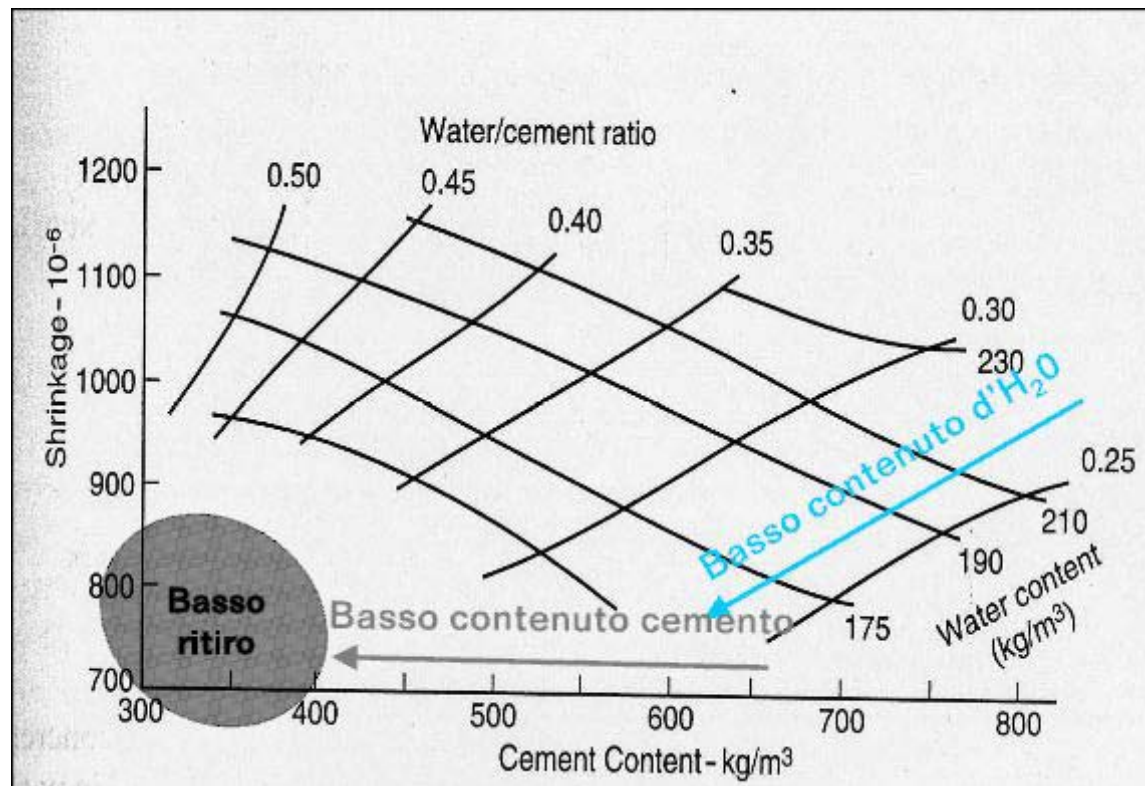
## 1.7.1 – FESSURAZIONI DA PERDITA D'UMIDITA'

### ESPANSIONE IN FUNZIONE DELLA STAGIONATURA



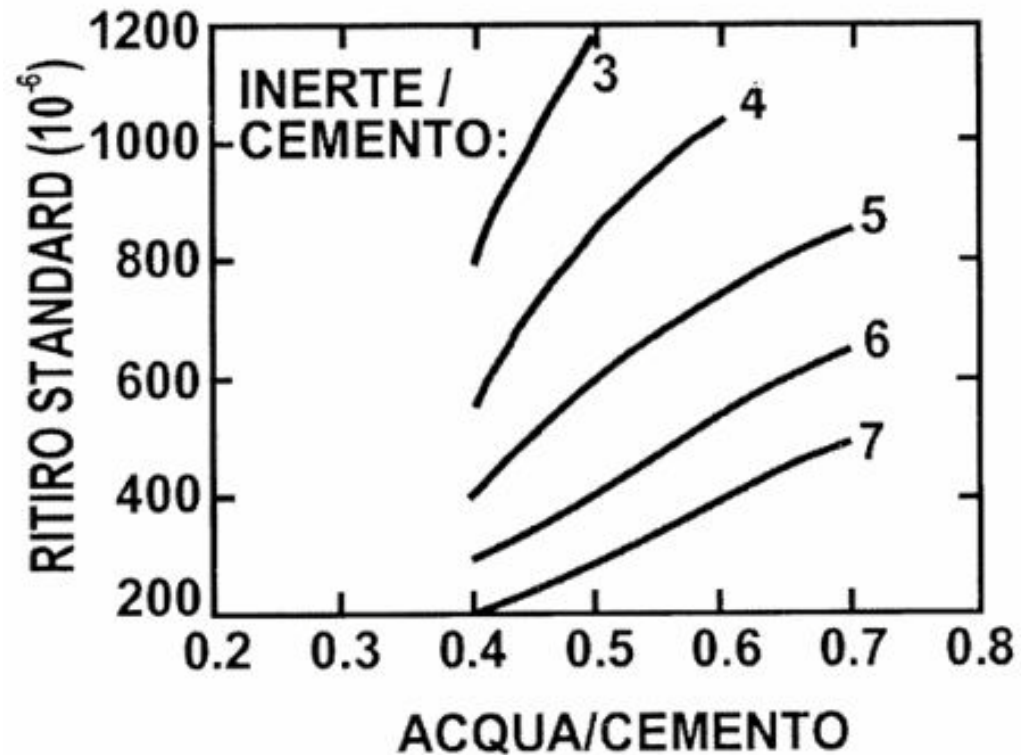
# L'ANALISI AMBIENTALE

## 1.7.1 – FESSURAZIONI DA PERDITA D'UMIDITA'



# L'ANALISI AMBIENTALE

## 1.7.1 – FESSURAZIONI DA PERDITA D'UMIDITA'





# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.7.1 – FORMAZIONE DI FESSURAZIONI: RITIRO PLASTICO



# L'ANALISI AMBIENTALE

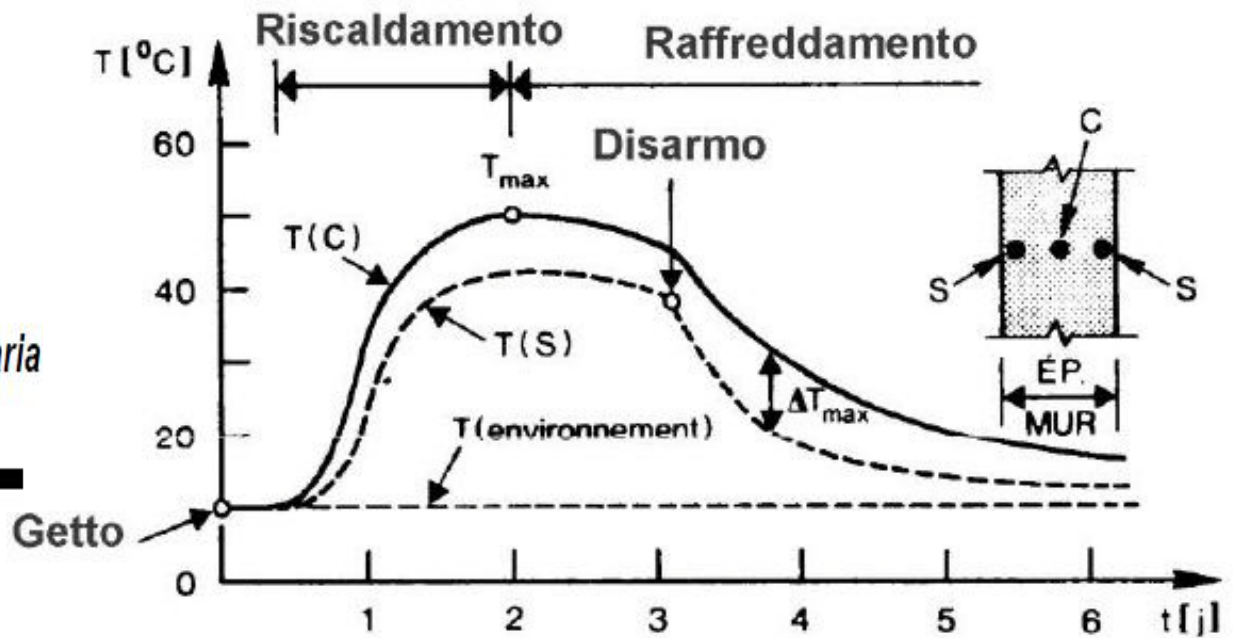
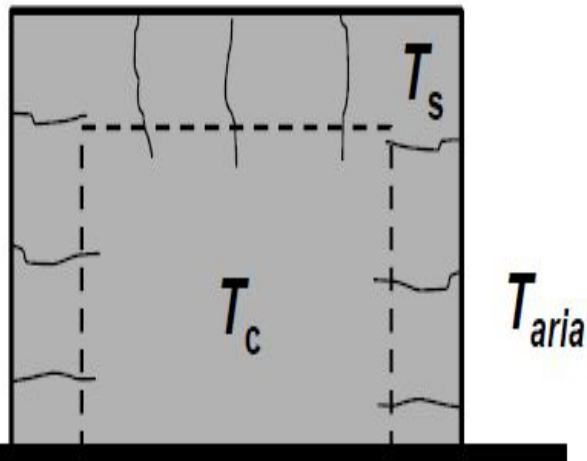
## 1.7.1 – FORMAZIONE DI FESSURAZIONI: RITIRO IGROMETRICO





# L'ANALISI AMBIENTALE

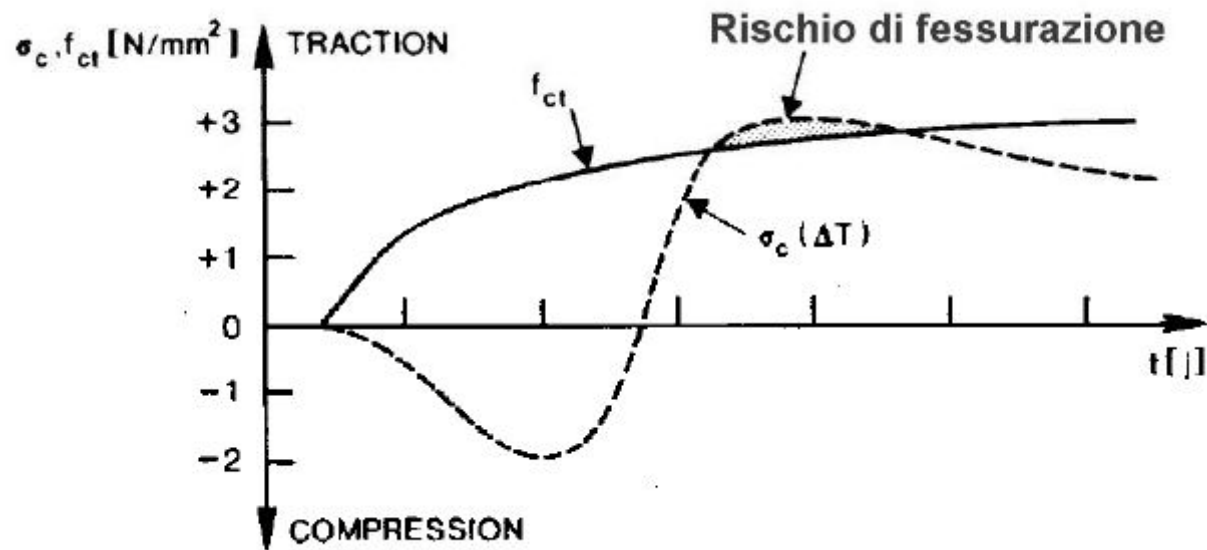
## 1.7.2 – FESSURAZIONE PER $\Delta T$





# L'ANALISI AMBIENTALE

## 1.7.2 – FESSURAZIONE PER $\Delta T$





# L'ANALISI AMBIENTALE

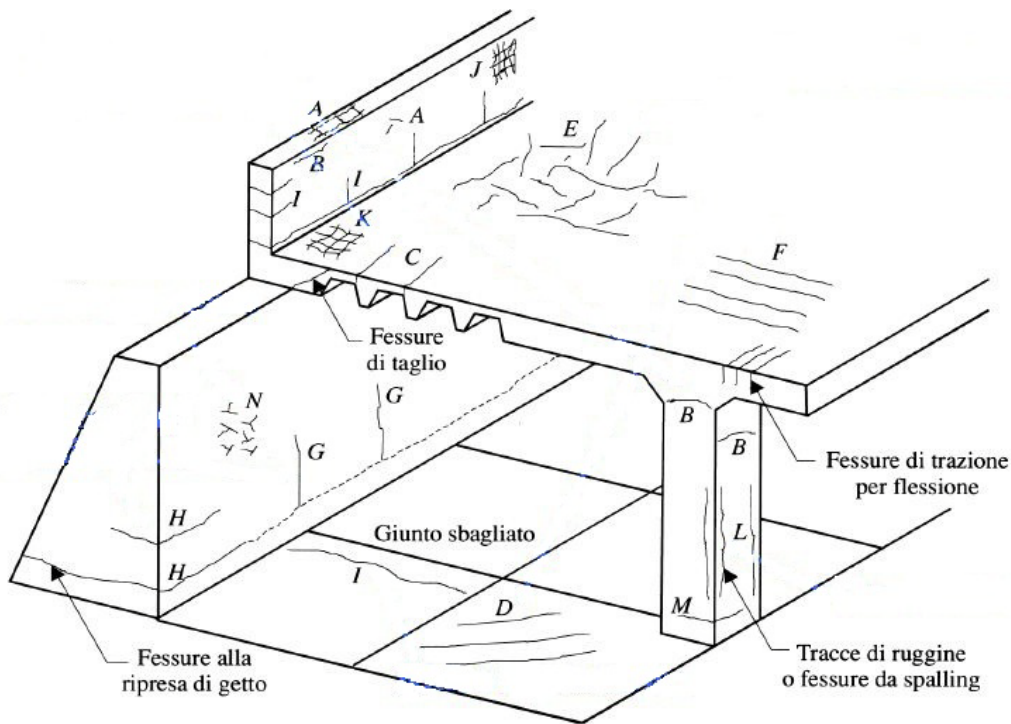
---

## 1.7 – FORMAZIONE DI FESSURAZIONI



# L'ANALISI AMBIENTALE

## 1.7 – FORMAZIONE DI FESSURAZIONI



### Assestamento plastico

- A) Armature
- B) Volte
- C) Variazione spessore

### Ritiro plastico

- D) Diagonali
- E) Casuali
- F) Armature

### Contrazioni termiche

- G) Vincoli esterni
- H) Vincoli interni

### Ritiro igrometrico

- I) Sezioni con spessori sottili

### Microfessure

- J) Contro la cassaforma
- K) Segregazione

### Corrosione delle armature

- L) Naturale
- M)  $\text{CaCl}_2$

### Reazione alcali - silice

- N) Luoghi umidi + SET elevato + Silice reattiva







# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.7 – FORMAZIONE DI FESSURAZIONI

Provvedimenti per ridurre o eliminare il rischio:

-  prescrizioni sul tipo di calcestruzzo
-  spessore copriferro
-  messa in opera del calcestruzzo
-  scelte delle protezioni








# L'ANALISI AMBIENTALE

---

## 1.7 – FORMAZIONE DI FESSURAZIONI

Prescrizione del calcestruzzo:

-  Classe di resistenza ( $R_{ck}$ )
-  Classe di consistenza
-   $D_{max}$  aggregati
-  dosaggio minimo cemento (a/c)
-  altre specifiche







# L'ANALISI AMBIENTALE



---

## 1.7 – FORMAZIONE DI FESSURAZIONI

Messa in opera del calcestruzzo:

-  consistenza
-  mezzi di costipamento
-  manutenzione dei casseri
-  entro 30' in clima caldo / entro 60' in clima freddo

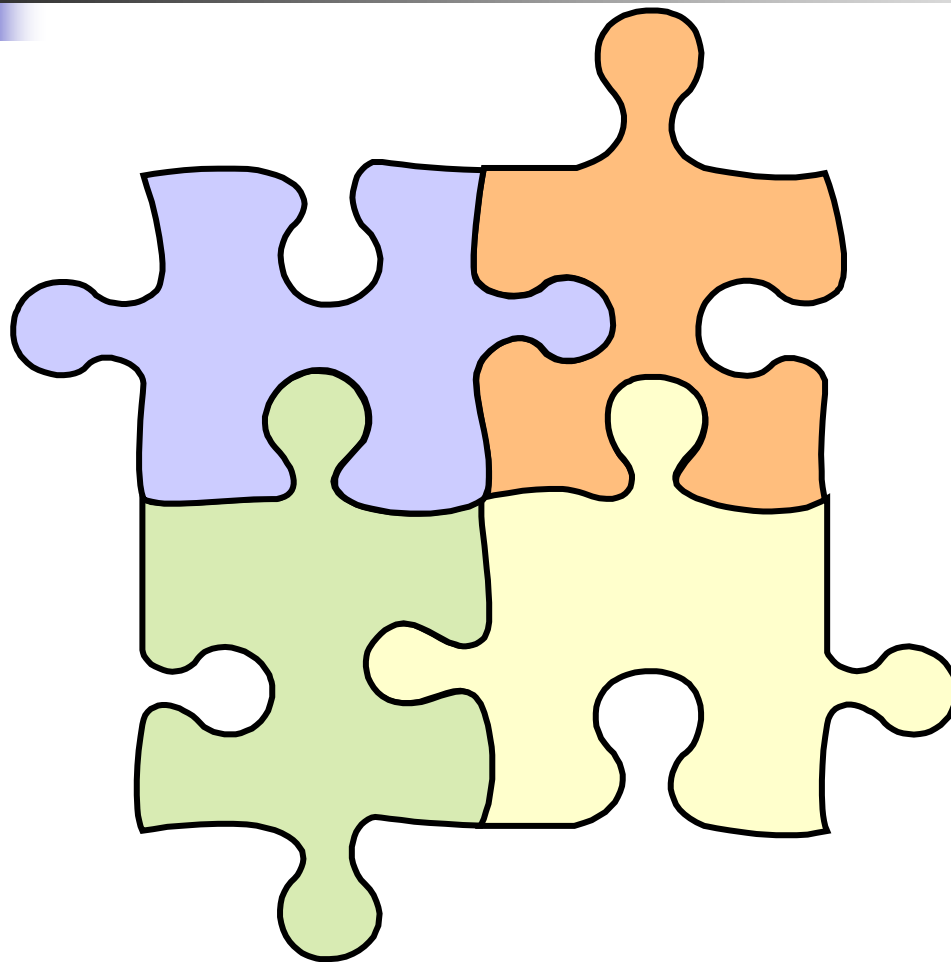
Maturazione del calcestruzzo:

-  evitare perdite di umidità
-  evitare  $\Delta$  termico ( $< 15 \div 20$  °C/m)



# Grazie per l'attenzione

---



Buona  
sinergia a  
tutti