



Antonio Licciulli

Corso di scienza e tecnologia dei materiali

I materiali da costruzione



I leganti



- Definizione di **legante**: Materiale capace di legare insieme materiali “slegati. Nel campo dei materiali da costruzione i leganti sono raggruppati in due categorie:
 - **Leganti aerei**: che induriscono all’aria
 - **Leganti idraulici**: che induriscono anche in acqua e induriti resistono al contatto con l’acqua.
 - Definizione di **malta**: impasto acquoso di legante e inerti
 - Caratteristiche comuni:
 - Sono costituiti da polveri fini
 - Le polveri miscelate con acqua formano sospensioni plastiche e fluide
 - La massa solidificata mantiene la forma del getto originario
 - Nel processo di irrigidimento si distinguono due fasi:
 - **Presa**: la sospensione fluida si trasforma in massa rigida in grado di trattenere la forma iniziale, durata da pochi minute a decine di ore
 - **Indurimento**: miglioramento progressivo e indefinito nel tempo delle proprietà meccaniche
- 

I leganti idraulici

- I leganti idraulici sono **sistemi multifasici che a temperatura ambiente risultano instabili rispetto all'acqua**
- Le reazioni delle fasi solide in presenza di acqua sono chiamate **idratazione**
- Le reazioni possono avvenire per:
 - dissoluzione ionica in fase acquosa e successiva precipitazione dei composti idrati
 - reazione diretta tra composto anidro e acqua senza preventiva dissoluzione del primo



La calce

❑ Calce viva: CaO

❑ Calce spenta: Ca(OH)₂

❑ Spegnimento della calce viva:



❑ Utilizzando un eccesso di acqua si ottiene una massa plastica chiamata grassello

❑ Resa in grassello: **RG** = Volume del grassello/ Massa della calce viva
(dimensioni fisiche dell'inverso della densità: m³/ton)

❑ RG > 2,5 calci grasse

❑ Derivano da calci più pure a grana fine

❑ RG < 2,5 calci magre

❑ Derivano da calcari meno puri o a grana grossa

❑ Per evaporazione dell'acqua si ha un ritiro volumetrico del grassello accompagnato da crepe e fessurazioni

Produzione della calce

- Per cottura del calcare (CaCO_3) si ottiene la reazione:



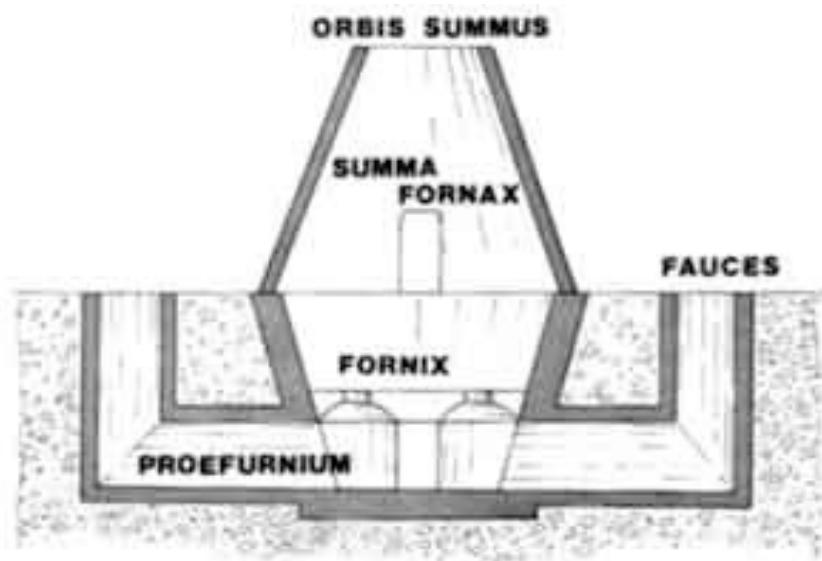
$$\Delta H = 42.500 \text{ cal/mol}$$

- Il processo è fortemente endotermico, per produrre 100kg di calce occorrono 20Kg di carbone

- Equilibrio eterogeneo con presenza di tre fasi, fattori fisici: temperatura e pressione, dalla regola delle fasi di Gibbs:

$$V = 2+2-3 = 1 \text{ (sistema monovariante)}$$

- La trasformazione completa del carbonato in calce avviene a 900°C, temperatura alla quale la tensione di vapore del CO_2 eguaglia quella atmosferica e non si crea sovrassaturazione di CO_2 nelle zone adiacenti al calcare in decomposizione



Forno romano per la produzione di calce viva

Fornace per la produzione di calce



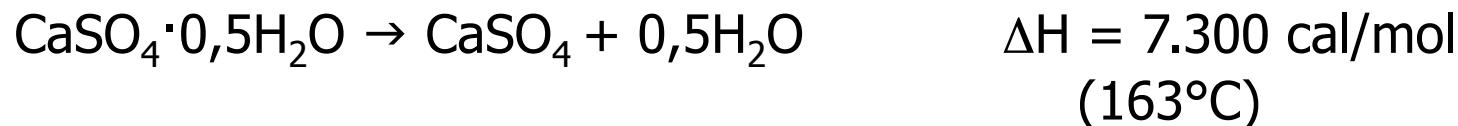
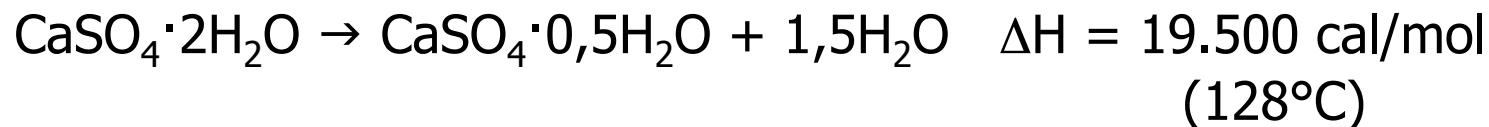
Malta di calce

- Calce idrata, acqua e sabbia i.e.
grassello (25%volume) + sabbia (75%) = malta di calce
- L'Anidride carbonica dell'aria reagisce con il $\text{Ca}(\text{OH})_2$
secondo la reazione
$$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$$
- Presa: evaporazione dell'acqua di impasto
- Indurimento: carbonatazione
- Il carbonato di calcio insolubile salda gli elementi della
malta che acquista notevole resistenza a compressione

Gesso

- ❑ Prodotto artificiale ottenuto dalla cottura di una roccia sedimentaria di composizione $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (saccaroide, selenite) e successiva macinazione

- ❑ Per riscaldamento il solfato di calcio biidrato si decompone secondo le reazioni:



- ❑ Esistono due forme del gesso:
 - ❑ α cristalli ben formati aghiformi o prismatici, ottenuto per disidratazione in ambiente umido o acqua
 - ❑ β microcristalli, ottenuto per disidratazione in ambiente secco, più pregiato
- ❑ La forma più reattiva è l'emiidrato pertanto la cottura della pietra da gesso avviene tra 128°C e 163°C

Messa in opera del gesso

- ❑ Impastato con una massa d'acqua pari a 2/3 del peso il gesso forma una massa plastica che indurisce rapidamente.
- ❑ Meccanismo di presa:
 - ❑ Il calcio emiidrato possiede solubilità in acqua >> del biidrato (10g/litro vis 2,5g/litro)
 - ❑ Impastato in acqua l'emiidrato si scioglie creando una soluzione sovrassatura in biidrato che precipita provocando lo scioglimento di altro emiidrato
 - ❑ I cristalli di $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, di forma allungata, precipitando si intrecciano fra di loro formando una massa compatta
- ❑ Nel corso della presa e indurimento il gesso subisce un leggero aumento di volume
 - ❑ Non sono necessari l'aggiunta di inerti
 - ❑ Il gesso può essere impiegato in rappezzì
- ❑ Tramite l'aggiunta di inerti refrattari quali allumina o silice il gesso può formare componenti refrattari quali stampi, crogiuoli etc.

Tipologie di gesso commerciale

Composizione chimica	Grado di purezza e macinazione	Aggiunta	Prodotto tecnico
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ β	Puro, finissimo		Gesso di Parigi
	puro, fine		Gesso da dentisti
			Gesso da modellatori
	Comune, finissimo		Gesso da forma
	Comune, fino		Gesso da stucco
	Comune grosso		Gesso da intonaci
		+ allume	Gesso allumato
		+ borace	Gesso al borace
		+ calce idrata	Gesso alla calce
		Silicati di K	Gesso al silicato
CaSO_4 α			Gesso comune
			Gesso da fabbrica

Il cemento idraulico

con il termine cemento, o più propriamente cemento idraulico, si intende una varietà di materiali da costruzione, noti come leganti idraulici, che miscelati con acqua sviluppano proprietà adesive

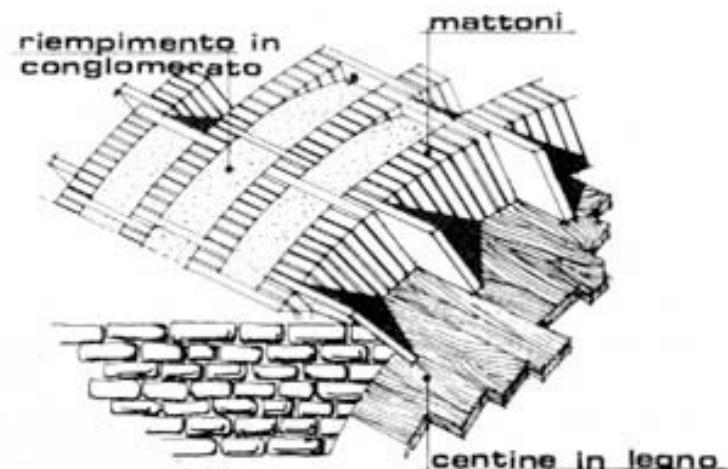
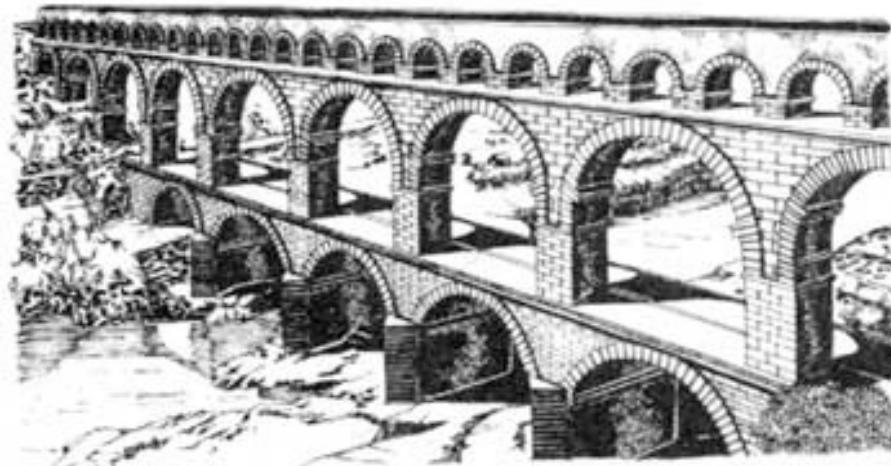
calcistrúzzo o **calcestrúzzo** comp. dal lat. CALX - genit. CÀLCIS - calce (v. *Calce* 2) e STRÙO - p. p. STRÙCTUS - ammassare, fabbricare (v. *Costruire*). — Mescolanza di calcina con altre materie, per accrescerle tenacità, che serve a murar condotti di acqua, conserve, vasche e simili.

ceménto CÆMENTUM per CÆD-MÈNTUM da CÆDERE *fendere, spezzare* perché propriamente significa *sasso, frammento di pietra per costruzione* (v. *Ceduo* e cfr. *Scindere*). — Mixture di calce viva spenta con acqua, di arena e talvolta anche di ghiaia, che serve a collegare fortemente le pietre e i mattoni e a fare smalto; *per estens.* Qualunque composizione di natura glutinosa o tenace atta a legare insieme più cose.

Deriv. *Cementare; Cementatorio; Cementazione.*

Malte idrauliche (o cementi)

- Intorno al 1000 a.C. i fenici formulano un legante idraulico mescolando calce spenta e polvere di laterizio cotto
- I Romani riuscirono a costruire opere imponenti per il consolidamento delle parti costruttive immerse sott'acqua usando malte idrauliche
- Pont du Gard presso Nimes



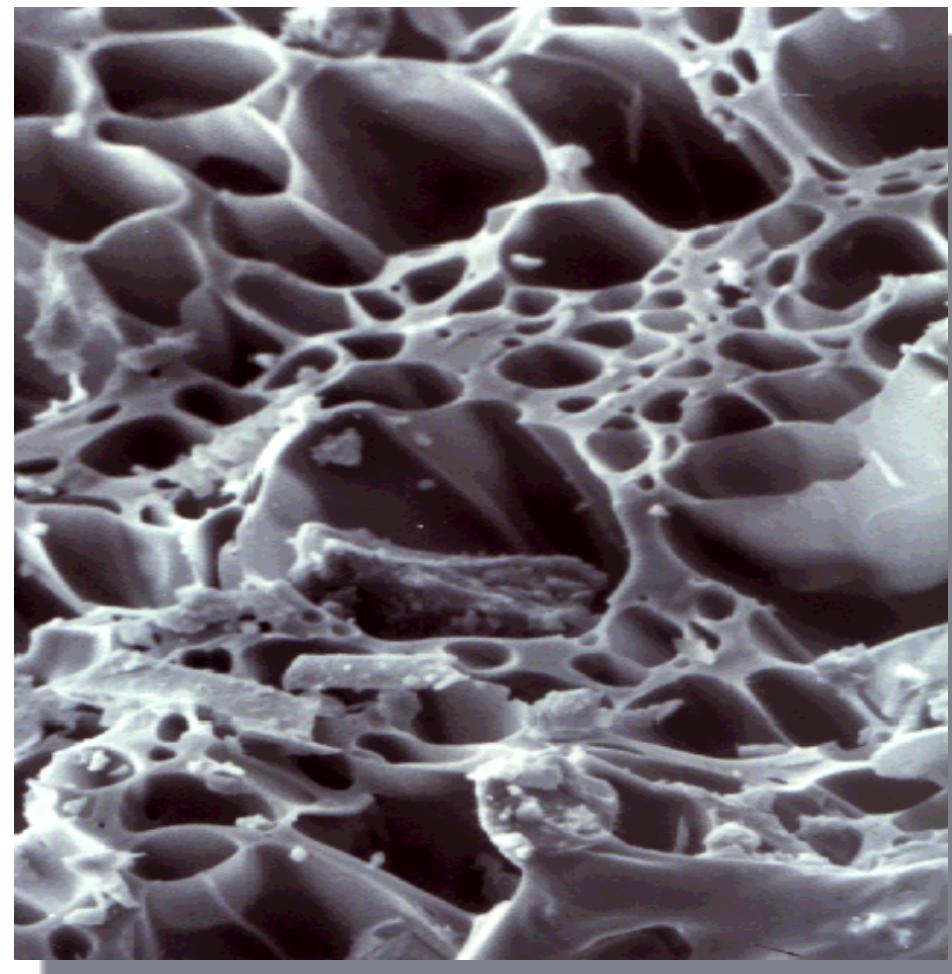
Nomenclatura tecnica

- ❑ Nella letteratura tecnica e scientifica del settore edile, per abbreviare, si sostituisce ad ogni ossido una lettera maiuscola:

$\text{SiO}_2 = \text{S}$	$\text{CaO} = \text{C}$	$\text{MgO} = \text{M}$
$\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$	$\text{K}_2\text{O} = \text{K}$	
$\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$	$\text{Na}_2\text{O} = \text{N}$	$\text{H}_2\text{O} = \text{H}$

La pozzolana

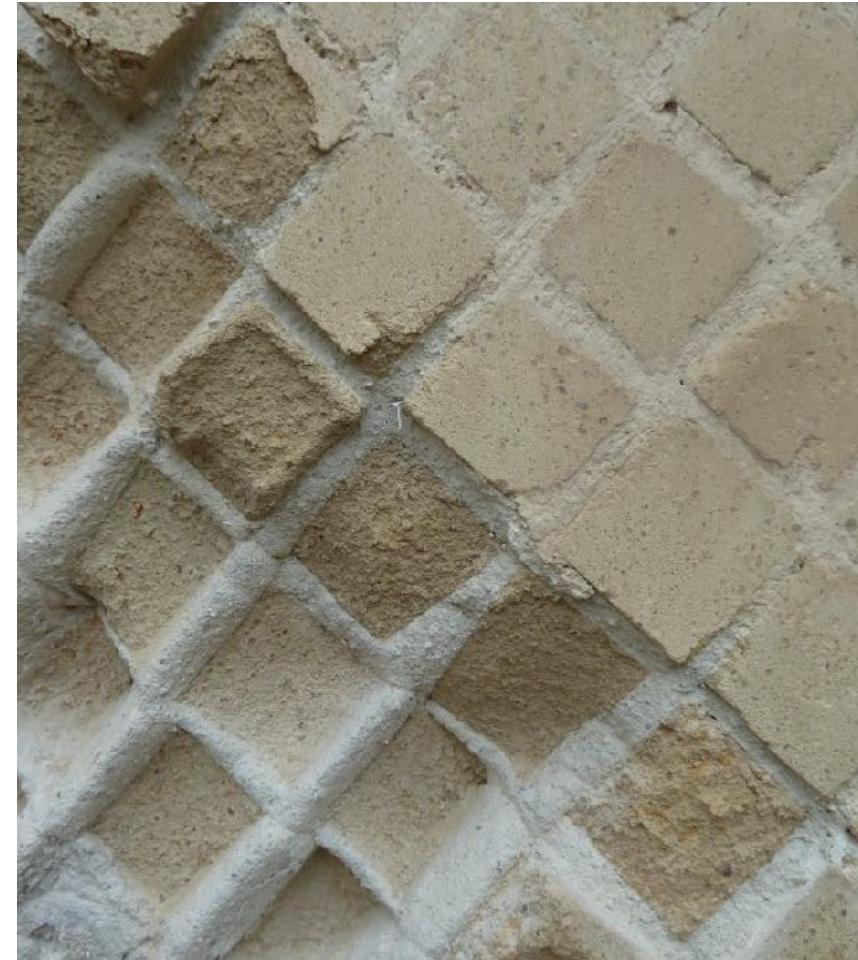
- ❑ materiale incoerente, essenzialmente vetroso, originatosi dal rapido raffreddamento della lava proiettata in aria durante una eruzione vulcanica (materiale vulcanoclastico), a base prevalentemente di SiO₂ e in quantità minori di Al₂O₃



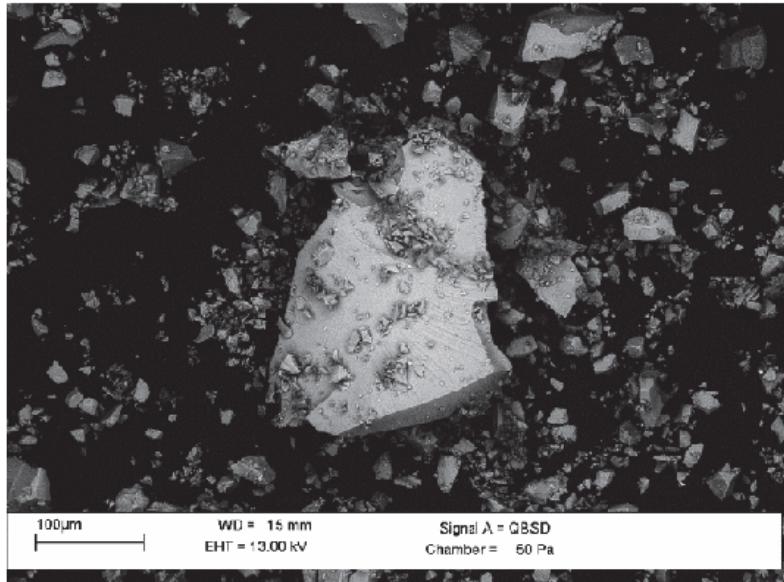
La pozzolana ed il cemento romano

□ “esiste una specie di polvere chiamata “pozzolana” (n.d.t. da Pozzuoli) che per natura possiede qualità straordinarie. Si trova nella Baia di Napoli e nelle terre circostanti il Vesuvio. Questa polvere, mescolata con calce e sabbia rende la muratura talmente stabile che questa indurisce non solo negli edifici normali, ma anche sotto l’acqua”

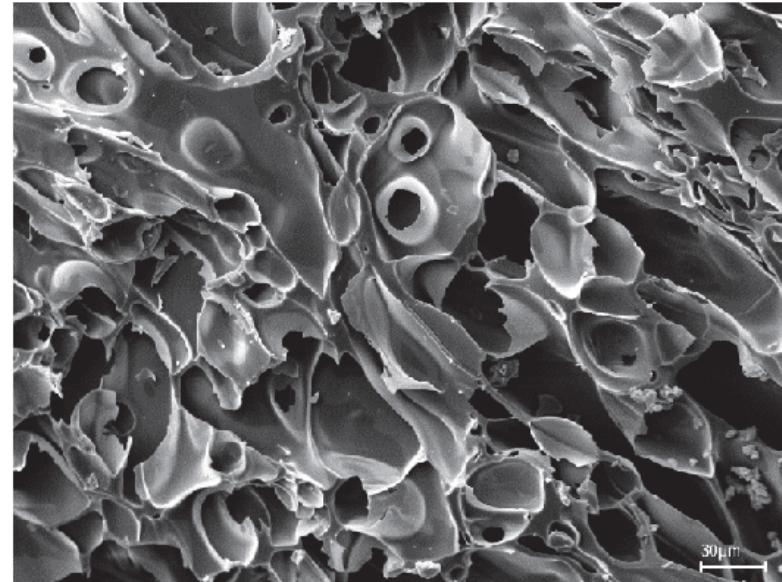
Marco Vitruvio Pollone
de architectura



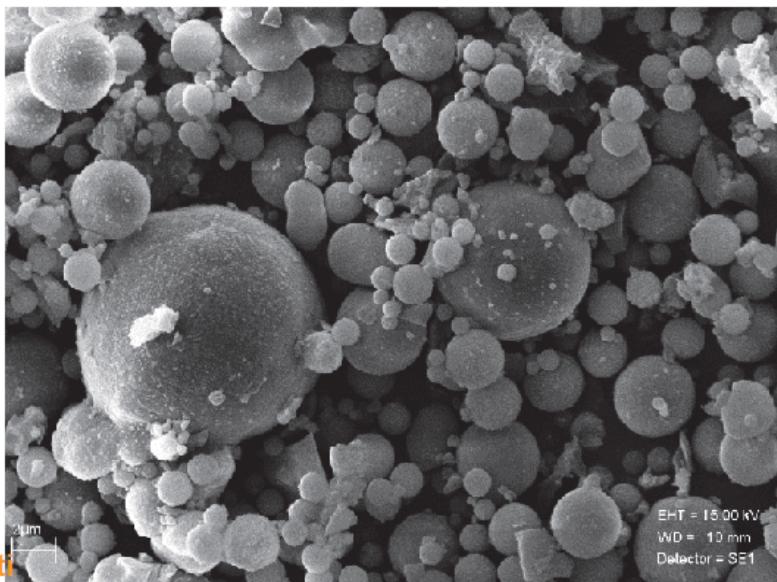
Materiali ad azione pozzolanica a confronto



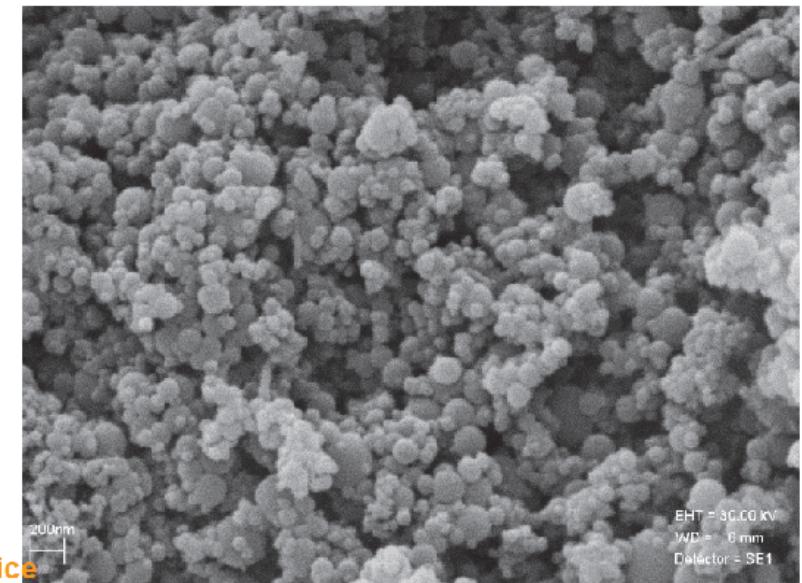
Loppa
d'altoforno



Pozzolana
naturale



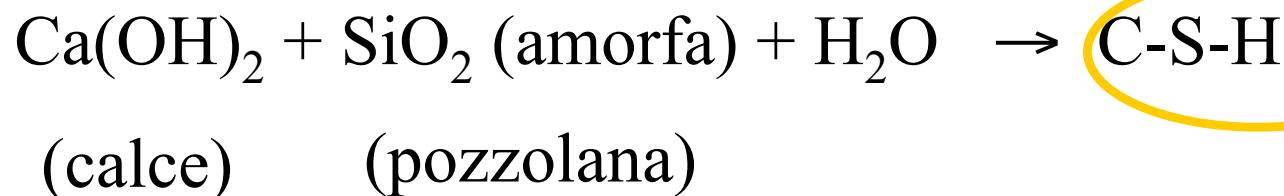
Ceneri volanti



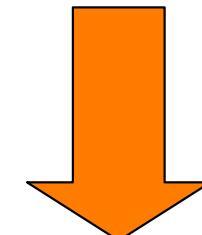
Fumi di silice

Le reazioni pozzoliche

a T ambiente



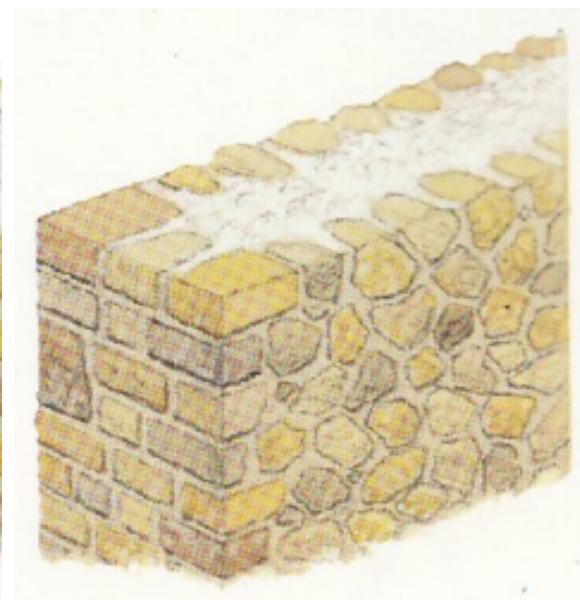
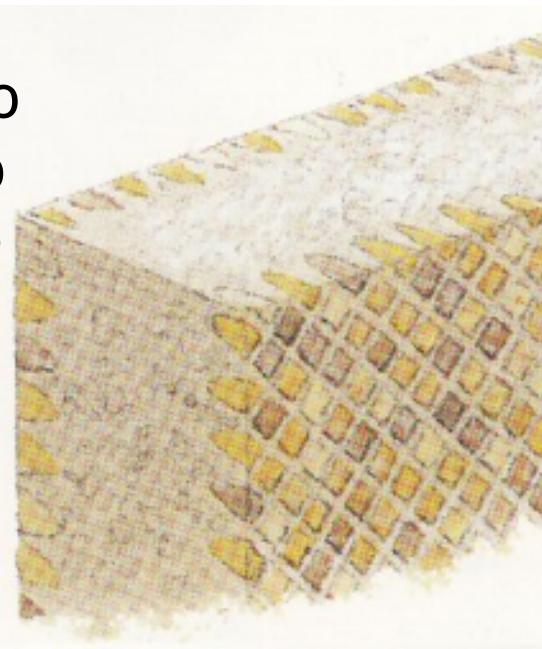
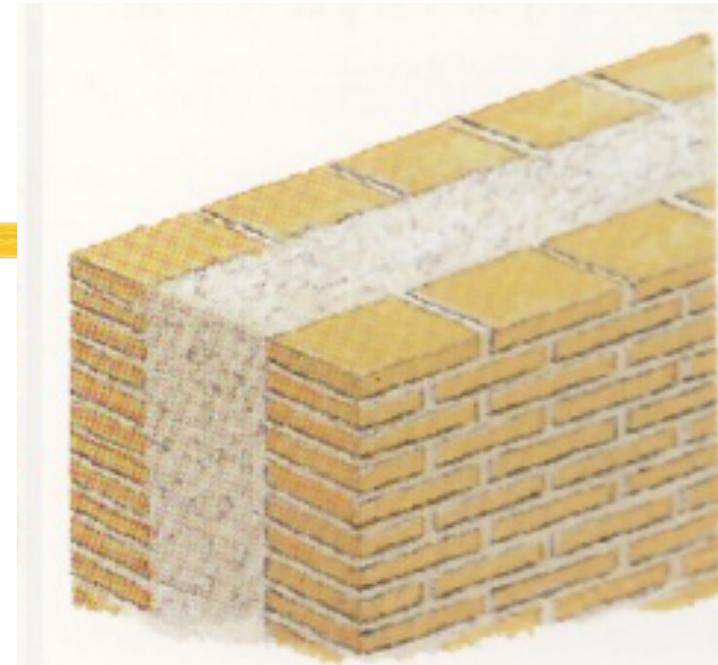
COMPOSTI
IDRAULICI



FORTEMENTE
INSOLUBILI IN
ACQUA

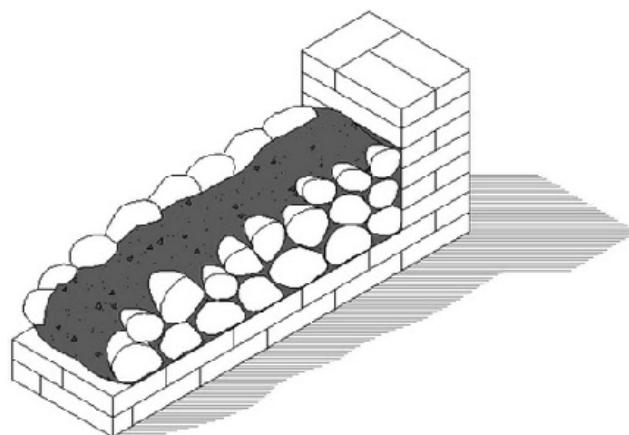
L'opus caementicum

- Le tecniche dell'opus incertum, dell'opus reticulatum e dell'opus caementicum sono descritte da Vitruvio nel suo De Architectura.
- L'opus caementicum consisteva nell'elevare muri deponendo strati sovrapposti di malta e materiali inerti.
- I paramenti esterni in mattoni o pietre squadrate, che fungevano da casseri permanenti, venivano rapidamente riempiti di malta, all'interno della quale erano conficcati rottami di pietra o mattone.

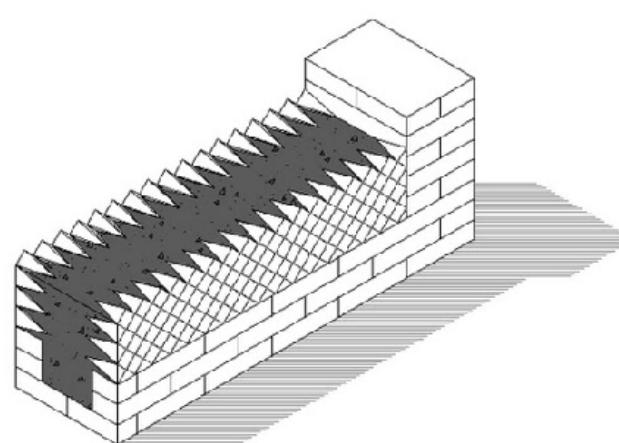


za e tecnologia dei materiali

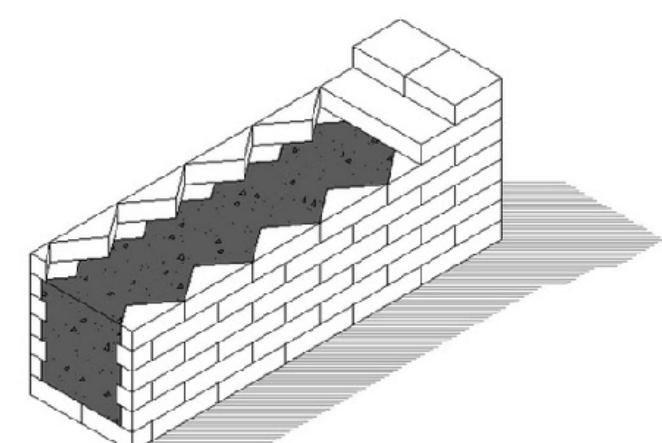
Opus caementicium



OPUS INCERTUM



OPUS RETICULATUM



OPUS LATERICUM

Opus reticulatum e lateritium presso l'anfiteatro di Pozzuoli

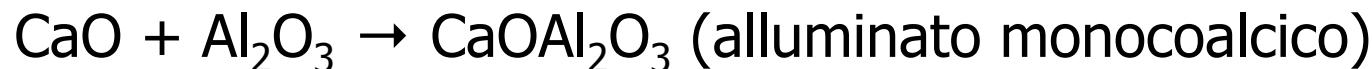


Malte idrauliche

- ❑ Le malte a base di calce aerea realizzate con grassello o calce idrata possono essere rese idrauliche aggiungendo, al momento dell'impasto, frazioni di pozzolana o di cocciopesto.
- ❑ La pozzolana,
 - ❑ inizialmente estratta dalle cave di Pozzuoli (lapilli), è un prodotto di origine vulcanica costituito prevalentemente da silicati idrati di allumina, da silice al 70%, ossido di ferro, potassio, sodio e magnesio. Hanno natura acida e reagiscono con l'ossido di calcio (basico) per dare silicati amorfì
- ❑ L'argilla cotta (cocciopesto),
 - ❑ inerte usata fin dall'antichità, è un'argilla composta da silicato di alluminio cotto e frantumato. Si può considerare una pozzolana artificiale, infatti veniva usata dai Romani per rendere idraulico il grassello di calce per realizzare interventi in presenza di acqua (Acquedotti, fogne, porti ecc) e come impermeabilizzante di coperture.
- ❑ La pozzolana ed il cocciopesto combinandosi con la calce e l'acqua danno origine a malte che hanno proprietà cementanti (idraulicità).
 - ❑ L'impiego sia della pozzolana che del cocciopesto, grazie alla loro composizione reattiva, consentono alla malta aerea di acquisire caratteristiche meccaniche superiori e di ridurre i tempi di indurimento che, normalmente, sono abbastanza lunghi.

La calce idraulica

- ❑ La calce idraulica è il prodotto della cottura (1000-1100°C) di calcari con presenza di argilla e silicio comprese tra il 10 ed il 20% del peso;
 - ❑ Il rapporto Calcare/argilla viene definito **indice di idraulicità**.
 - ❑ La denominazione di idraulica è relativa alla caratteristica di far presa nell'acqua, contrariamente alla calce aerea;
 - ❑ Ha la proprietà di non aumentare il volume a contatto con l'acqua e di non sviluppare calore con l'estinzione.



- ❑ Rispetto ai cementi il silicato tricalcico non si forma poiché la sua formazione si ha solo per temperature sopra i 1250 °C. La calce viva residua, subirà la stessa reazione di spegnimento che si ha per la calce aerea per produrre la calce spenta o idrossido di calcio (Ca(OH)_2)

Verso il cemento



- Andrea Palladio nel 1570 descrive, l'esistenza di una "**calce nigra**", ottenuta per cottura di una pietra calcarea originaria del padovano, contenente impurità argillose, con caratteristiche idrauliche
 - John Smeaton nel 1756, per la realizzazione del faro di Eddystone utilizzò la prima calce idraulica da lui ottenuta dalla cottura di calcare contenente una discreta quantità (circa 11%) di impurezze argillose.
 - James Parker nel 1796 fabbrica il primo cemento a presa rapida, cuocendo nei suoi forni da calce le concrezioni marnose contenute nelle argille del Tamigi
 - L. J. Vicat nel 1818, ingegnere francese, definisce la formula della calce idraulica artificiale. Unendo in cottura dei calcari puri e una porzione d'argilla
- 

E finalmente (?) il cemento portland

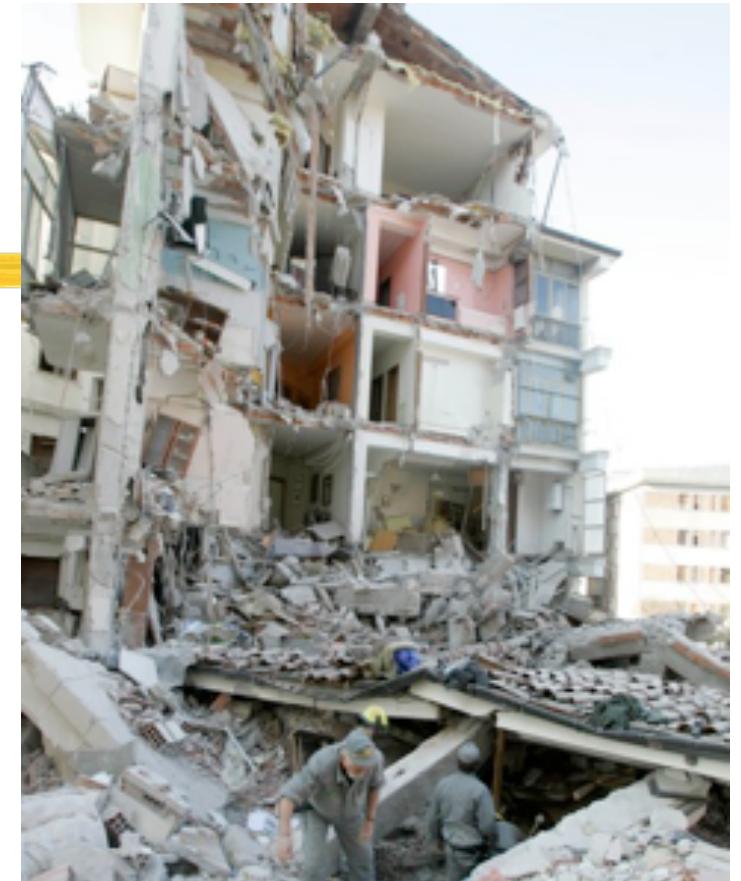


- Joseph Aspdin 1824, un fornaciaro di York, introdusse il nome di **cemento Portland**, per la somiglianza tra la malta e il conglomerato formati con quel cemento con un calcare compatto (pietra di Portland) dell'isola di Portland in Inghilterra.
 - J.C. Johnson nel 1844 mise in evidenza l'importanza dei **processi di cottura** ad alte temperature che portavano alla formazione del clinker: mentre per la cottura della calce idraulica si richiedono 600 - 700 °C, si devono raggiungere i **1600 °C** e più per ottenere i cementi a lenta presa, poiché deve prodursi un principio di vetrificazione.
 - Nel 1860 M. Chatelier stabilì la composizione chimica del cemento consentendo la produzione industrializzata del calcestruzzo
- 

Ma non era meglio prima??

- I Romani riuscirono a costruire opere imponenti che hanno resistito i millenni.
- Gli edifici in calcestruzzo armato sono progettati per durare 50 anni

- Anfiteatro di Pozzuoli



iali

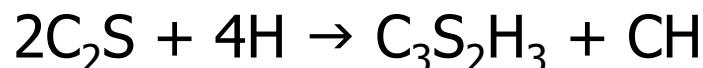
Idratazione dei silicati di calcio

- ❑ In prima approssimazione le reazioni possono essere descritte:



Rapporto ponderale

100	24	75	49
-----	----	----	----



Rapporto ponderale

100	21	99	22
-----	----	----	----

- ❑ Nella realtà si formano una serie di composti microcristallini intermedi
- ❑ La reale differenza tra C_2S e C_3S sta nella velocità di idratazione

I sistemi cementizi

Cemento

+ acqua

+ aria

+ additivi =

Pasta di cemento

+ sabbia =

Pasta cementizia

+ ghiaia o
pietrisco =

Calcestruzzo

+ armature in
acciaio =

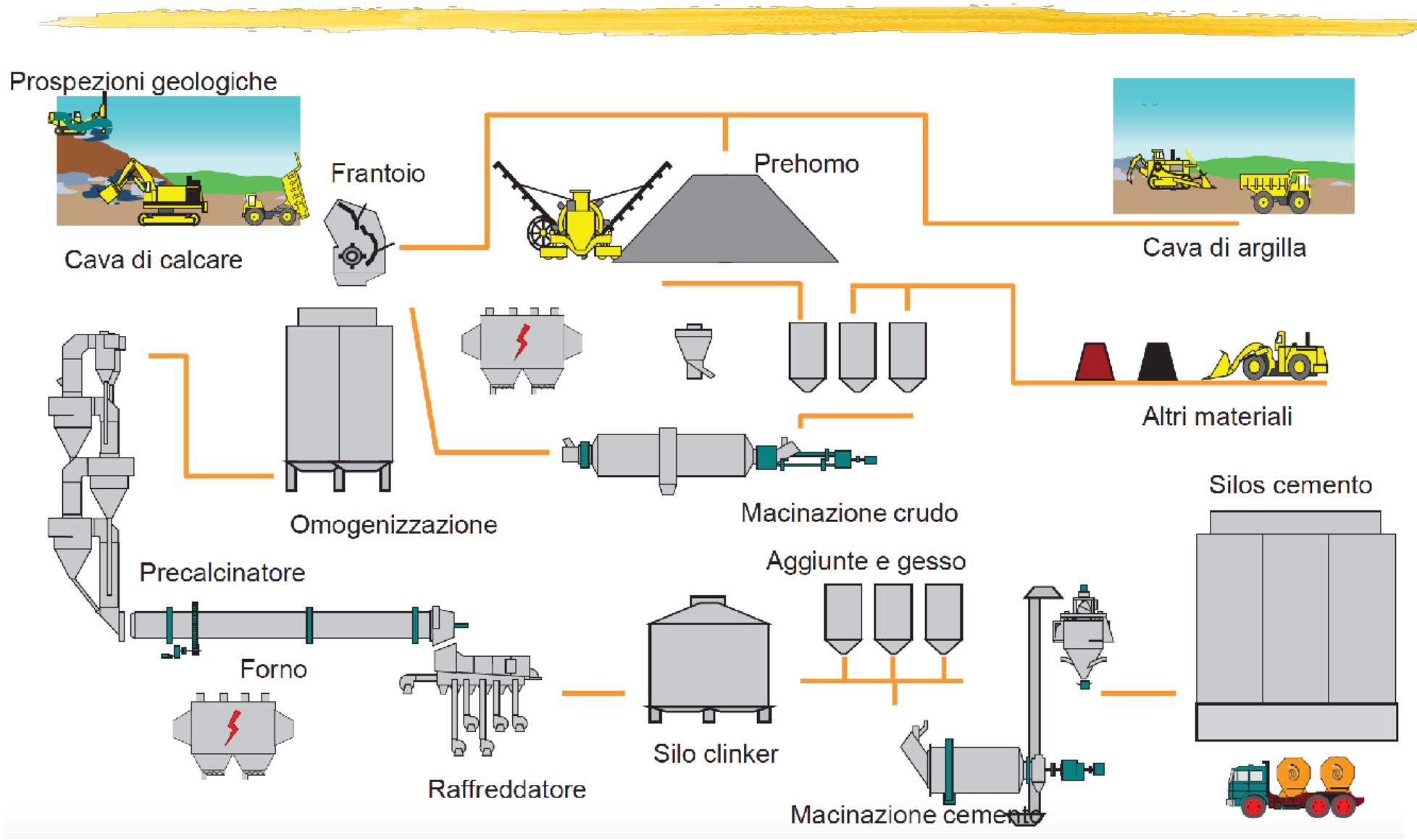
Calcestruzzo armato

Le materie prime del clinker

- ❑ Per l'ottenimento del clinker sono tipicamente necessari:
 - ❑ Calcare (CaCO_3 , fornisce l'ossido di calcio) 1.2 t
 - ❑ Argilla (fornisce silice allumina e ossido di ferro) 0.3 t
 - ❑ Gesso 0.05 t
 - ❑ Combustibile fossile (olio combustibile equivalente) 0.074 t
 - ❑ Energia elettrica 103 KWh
- ❑ Dalla cottura di questi materiali si ottiene in clinker di portland

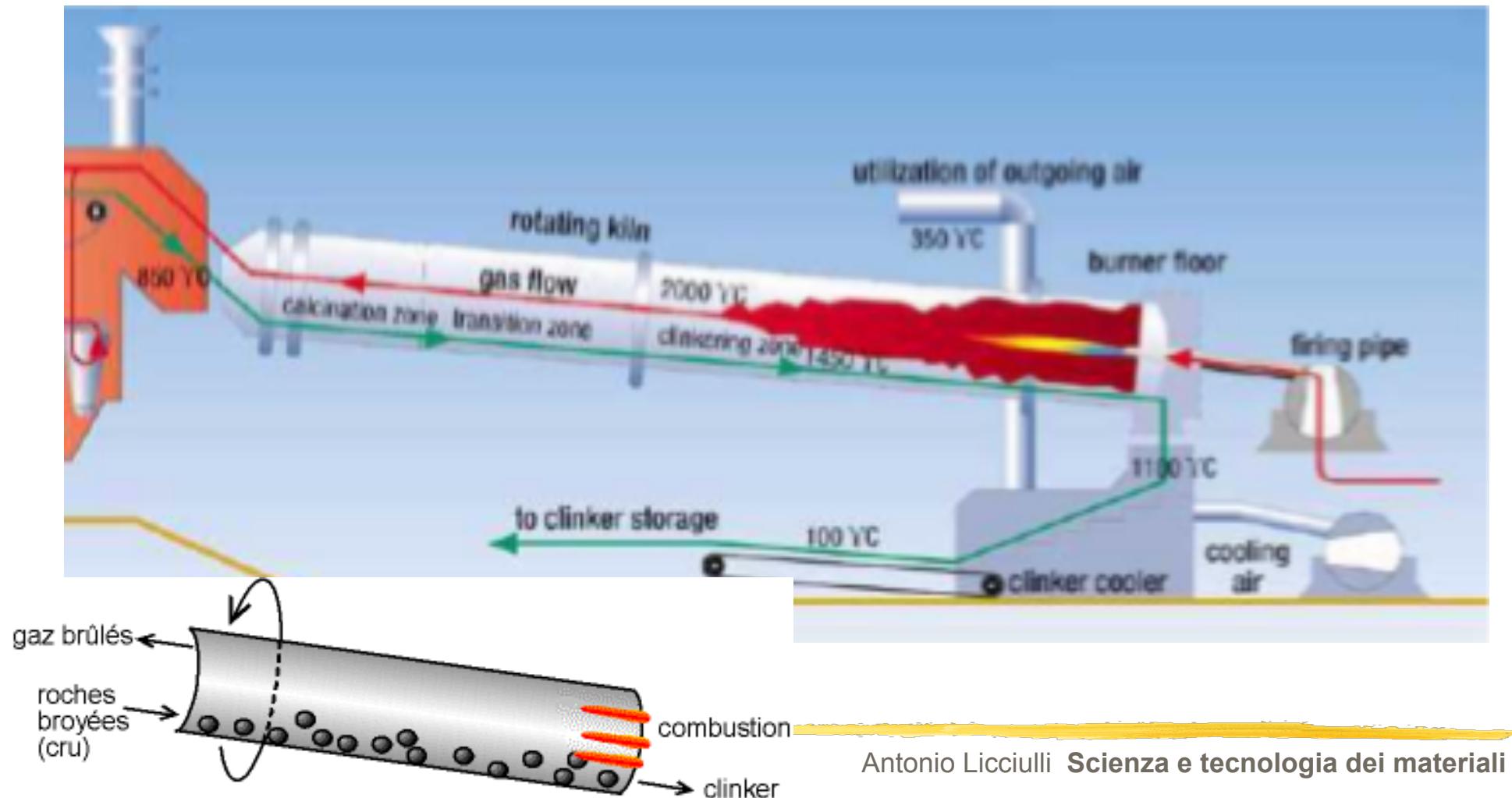


Dalla cava al silos di cemento

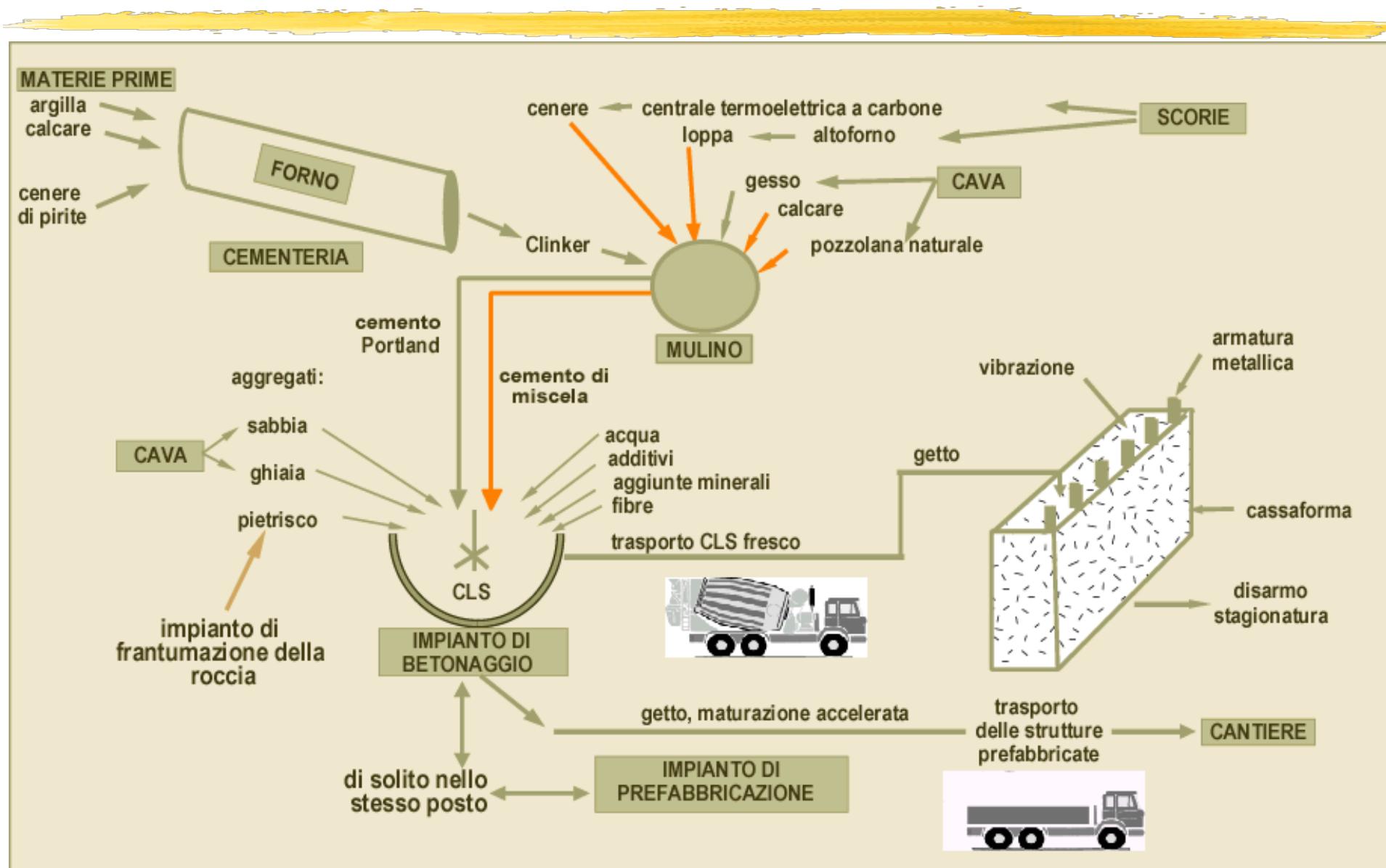


La produzione del clinker

- Schema di un impianto di produzione di clinker basato su un forno rotativo

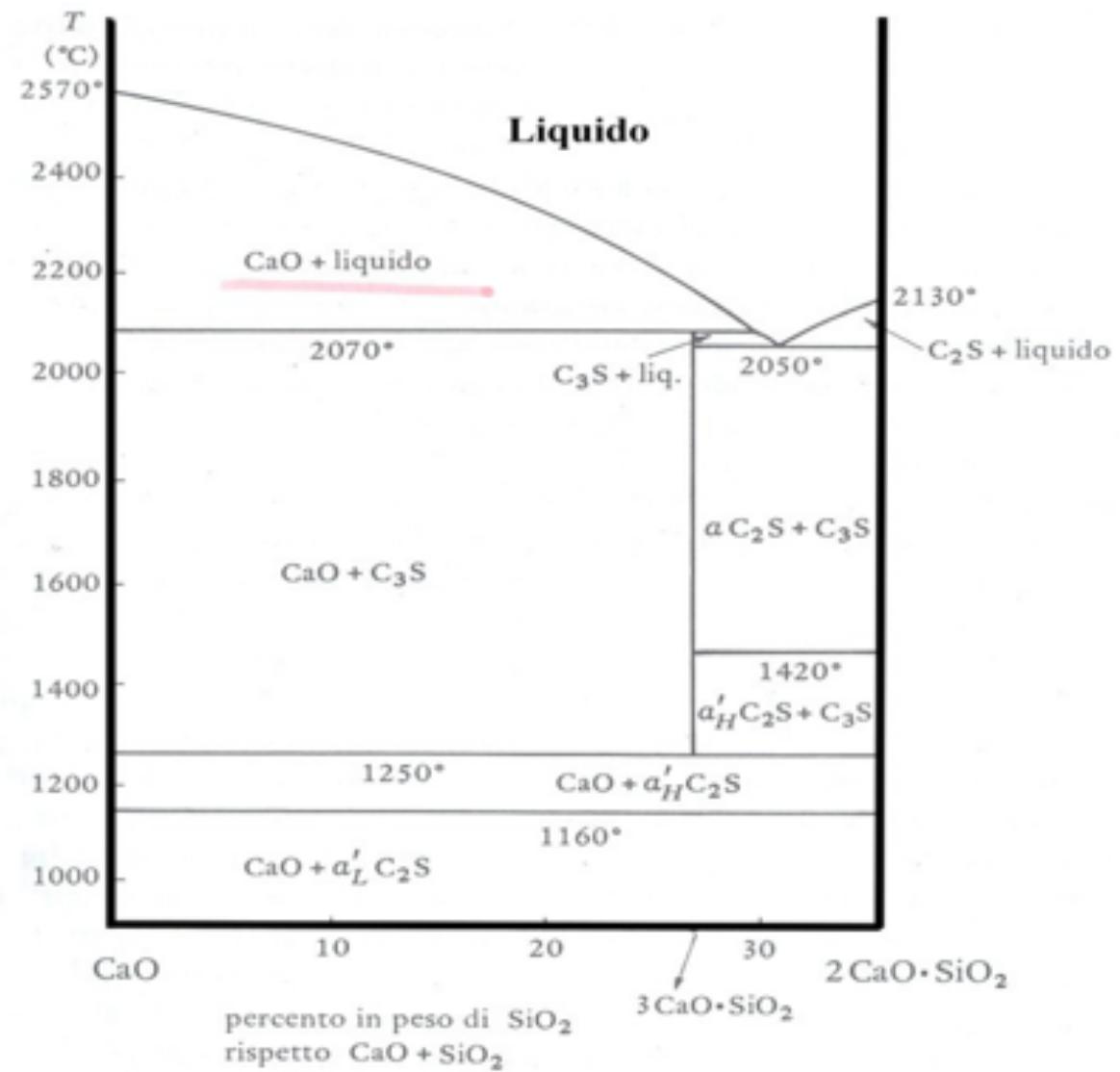


Ciclo di produzione del calcestruzzo

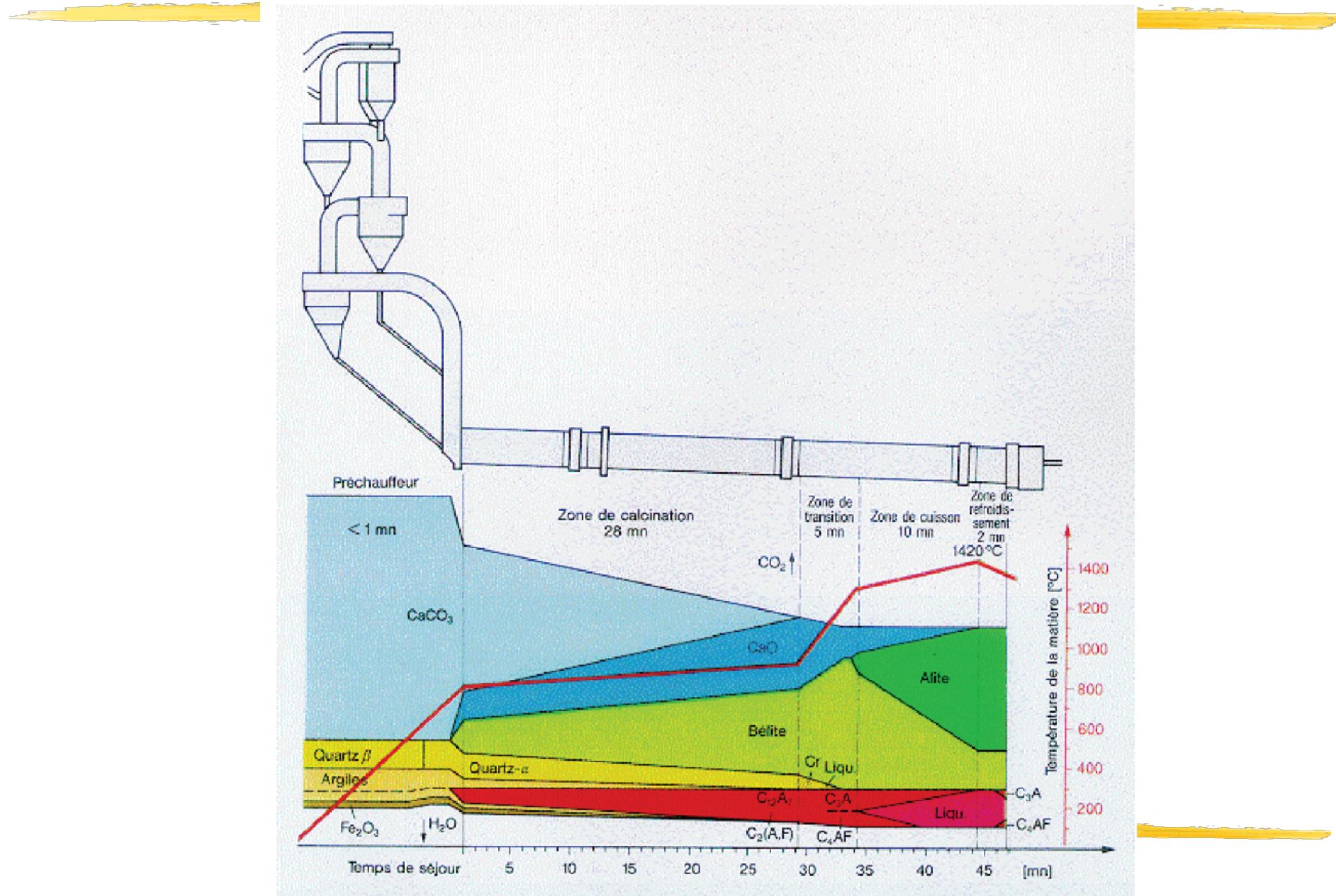


La storia termica del clinker

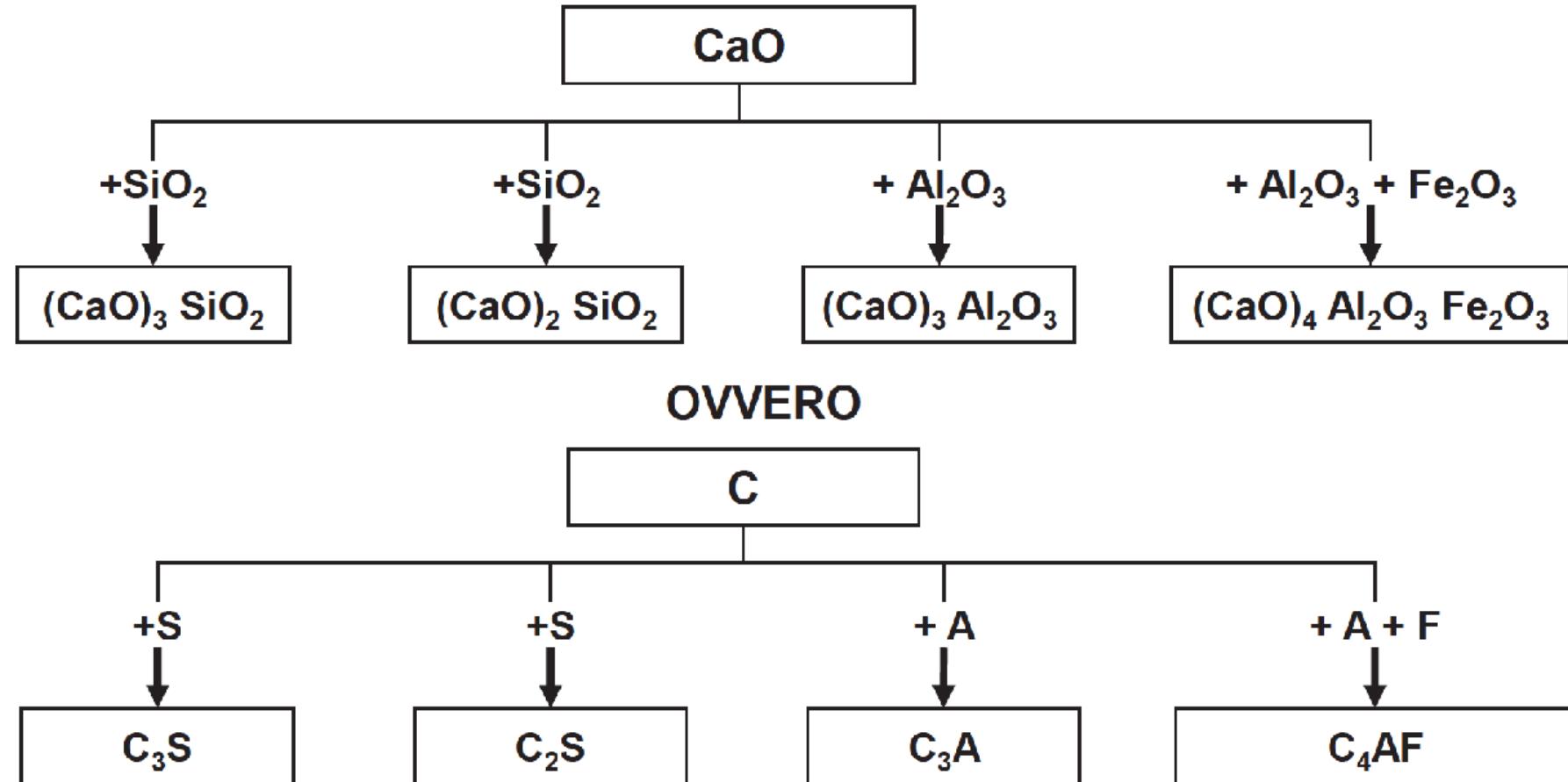
- $T < 500^\circ\text{C}$ perdita dell'acqua di impasto
- $T > 500^\circ\text{C}$ decomposizione delle argille in silice e allumina amorfe
- $T > 900^\circ\text{C}$ reazione degli ossidi e formazione di silicato bicalcico
- $T > 1250^\circ\text{C}$ formazione di una fase liquida e inizio della formazione del silicato tricalcico
- $T > 1450^\circ\text{C}$ è completa la reazione di formazione del silicato tricalcico
- Una volta che il C_3S si forma, può essere portato a $T < 1250^\circ\text{C}$ in condizione di metastabilità
- Raffreddando in forma metastabile a $T < 800^\circ\text{C}$ il C_3S esso rimane inalterato a tempi infiniti
- C_2S è invece stabile anche a T ambiente



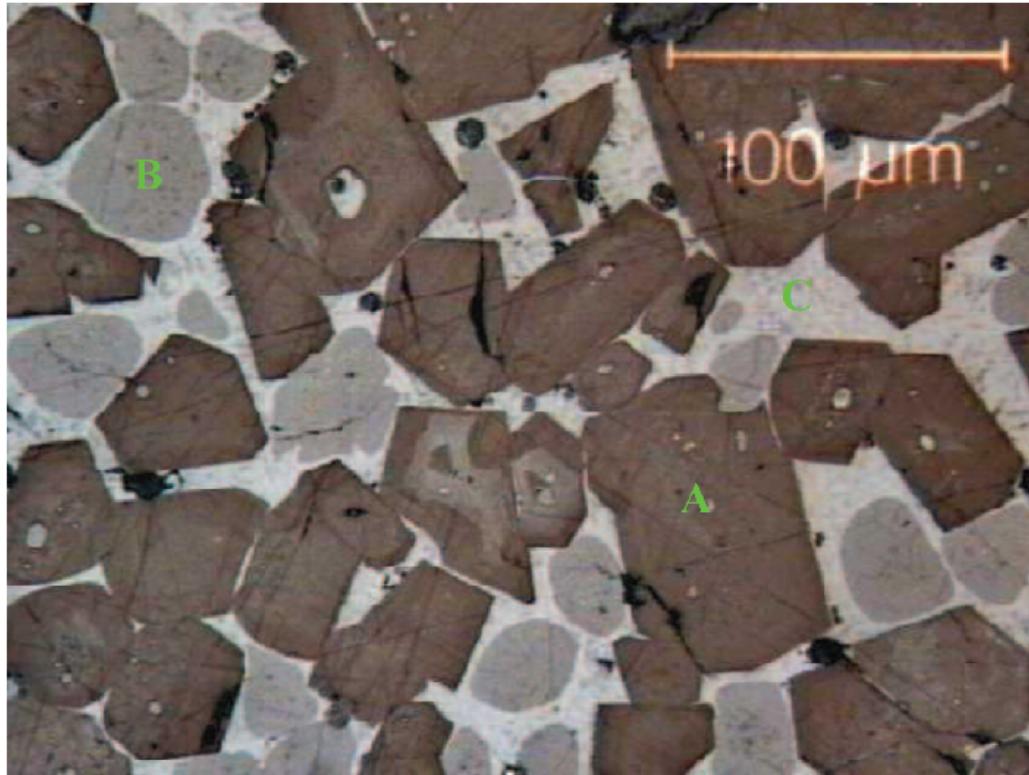
Reazioni chimiche nel forno



Rappresentazione delle reazioni chimiche nella formazione del clinker



Il clinker al microscopio



Micrografia del clinker

Minerali del clinker:

- ↳ A: alite poligonale (C_3S)
- ↳ B: belite tondeggiante (C_2S)
- ↳ C: massa interstiziale costituita

Suddivisione dei cementi secondo UNI EN 197-1

- **Tipo 1** cemento Portland con una percentuale di clinker pari ad almeno il 95%: sigla sottotipo: nessuna;
- **Tipo 2** cemento Portland composito (previsti 19 sottotipi) con una percentuale di clinker di almeno il 65%, il cemento Portland composito che ha le seguenti denominazioni in funzione della tipologia delle aggiunte:
 - Cemento Portland alla loppa (S): sigla sottotipi: II A/S, II B/S;
 - Cemento Portland ai fumi di silice (D): sigla sottotipi: II A/D;
 - Cemento Portland alla pozzolana: sigla sottotipi (P=naturali Q=calcinata): II A/P, II B/P, II A/Q, II B/Q;
 - Cemento Portland alle ceneri volanti (V=silicee; W=calcaree): sigla sottotipi: II A/V, II B/V, II A/W, II B/W;
 - Cemento Portland allo scisto calcinato (T): sigla sottotipi: II A/T, II B/T;
 - Cemento Portland al calcare : sigla sottotipi: II A/L, II B/L, II A/LL, II B/LL
 - Cemento Portland composito: sigla sottotipi: II A/M, II B/M;

Suddivisione dei cementi parte 2

- **Tipo 3:** cemento d'altoforno con una percentuale di loppa d'altoforno (S) dal 36 al 95% (previsti 3 sottotipi): sigla sottotipi: III A, III, B, III C
- **Tipo 4:** cemento pozzolanico con materiale pozzolanico (P e Q) dall'11 al 55% (previsti 2 sottotipi): sigla sottotipi: IV A, IV B
- **Tipo 5:** cemento composito ottenuto per simultanea aggiunta di clinker di cemento Portland (dal 20 al 64%), di loppa d'altoforno (dal 18 al 50%) e di materiale pozzolanico (dal 18% al 50%) (previsti 2 sottotipi): sigla sottotipi: V A, V B

Additivi per malte e calcestruzzi



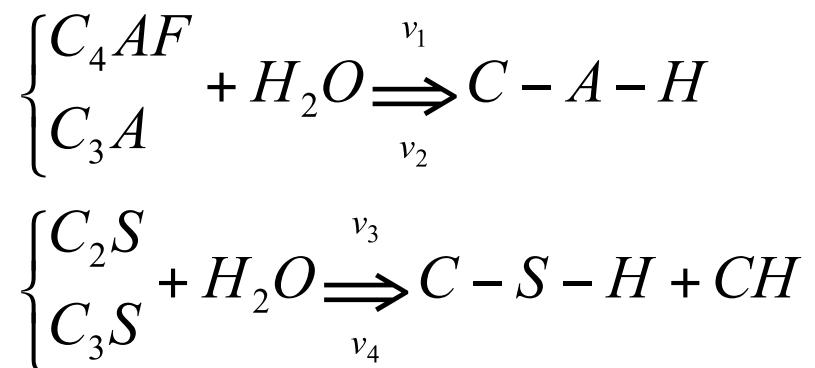
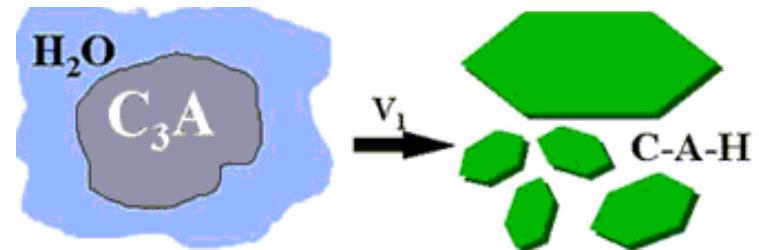
1. **PLASTIFICANTI**, CHE MIGLIORANO LA PLASTICITÀ E LAVORABILITÀ DELLA MALTA;
 2. **ESPANDENTI**, ELIMINANO IL RITIRO ED ESERCITANO UNA LIEVE AZIONE ESPANDENTE;
 3. **ACCELERANTI**, CHE ACCELERANO IL TEMPO DI PRESA DEI MALTA;
 4. **RITARDANTI**, CHE ALLUNGANO IL TEMPO DI PRESA DELLA MALTA;
 5. **ANTIGELO**, CHE ABBASSANO LA TEMPERATURA DI CONGELAMENTO DELLA MALTA;
 6. **ALLEGGERENTI**, CHE MIGLIORANO LE PRESTAZIONI TERMICHE DELLA MALTA;
 7. **INCREMENTATORI**, CHE AUMENTANO LA RESISTENZA A COMPRESSIONE ALLA MALTA;
 8. **IMPERMEABILIZZANTI**, CHE CONFERISCONO PROPRIETÀ IDROFUGHE ALLA MALTA.
- 

Idratazione del cemento

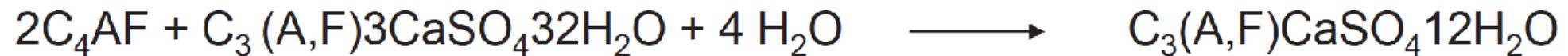
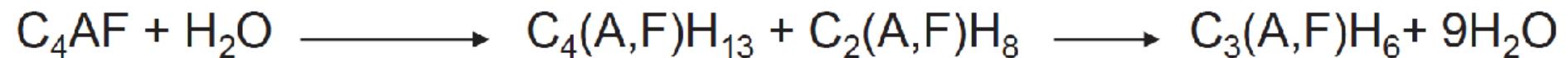
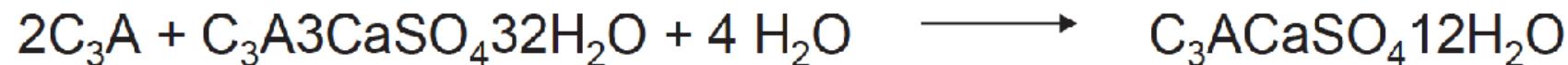
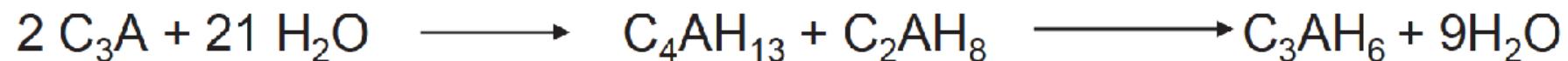
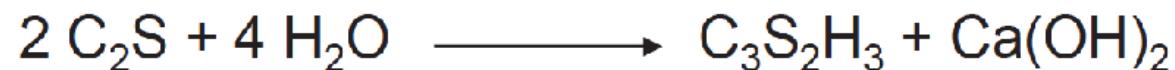
- **Idratazione:** Processo irreversibile di consolidamento che porta il cemento verso la sua forma di equilibrio (composti idrati) a partire dalla forma di non equilibrio (fase anidra)
- Si assume che **ogni costituente anidro reagisce indipendentemente** dalla presenza degli altri costituenti
- **La reazione** di idratazione **procede dalla superficie** della fase anidra verso l'interno creando sulla superficie una fase idrata.
- I prodotti idrati in superficie rallentano la diffusione di H_2O verso l'interno rallentando le successive reazioni di idratazione
- In termine di qualche mese **la diffusione dell'acqua diventa il parametro principale di controllo** della velocità di idratazione.
- Nel caso di manufatti cementizi in aria il grado di idratazione può risultare notevolmente inferiore rispetto alle opere sommerse, indicando la impossibilità di raggiungere lo stadio finale di equilibrio stabile

Reazioni chimiche nel processo di idratazione del cemento portland

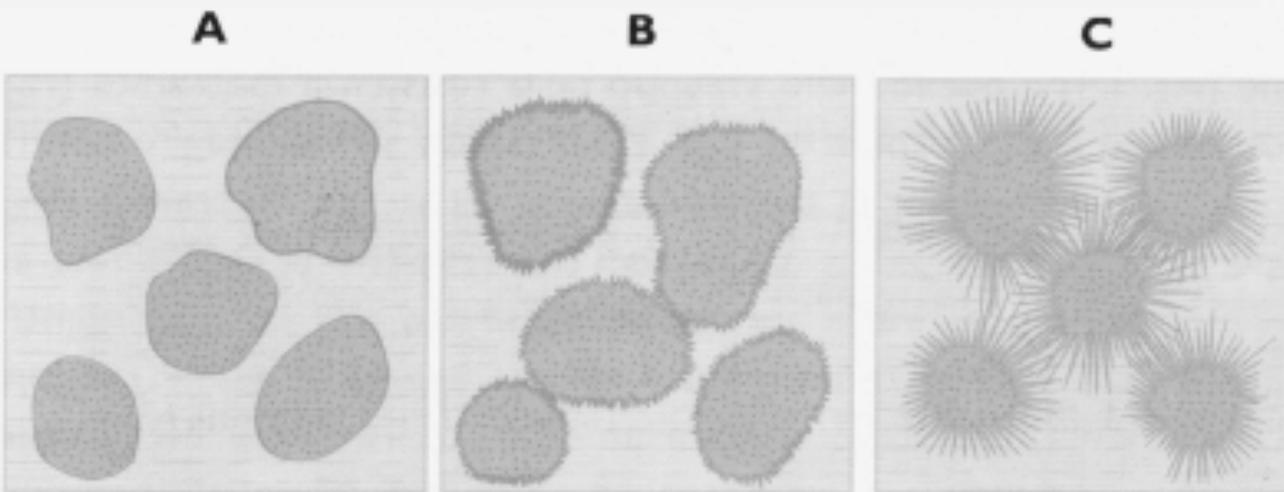
- Le formule C-S-H e C-A-H non indicano dei composti, ma piuttosto delle famiglie di ossidi, a composizione variabile
- Le reazioni di idratazione sono esotermiche
- La velocità delle reazioni dipende dalla superficie di contatto con l'acqua, e quindi dalla finezza delle particelle di clinker
- La reazione coinvolge prima gli alluminati e gli alluminoferriti, in seguito i silicati di calcio



Altre reazioni di idratazione del clinker



Schematizzazione del processo di reazione



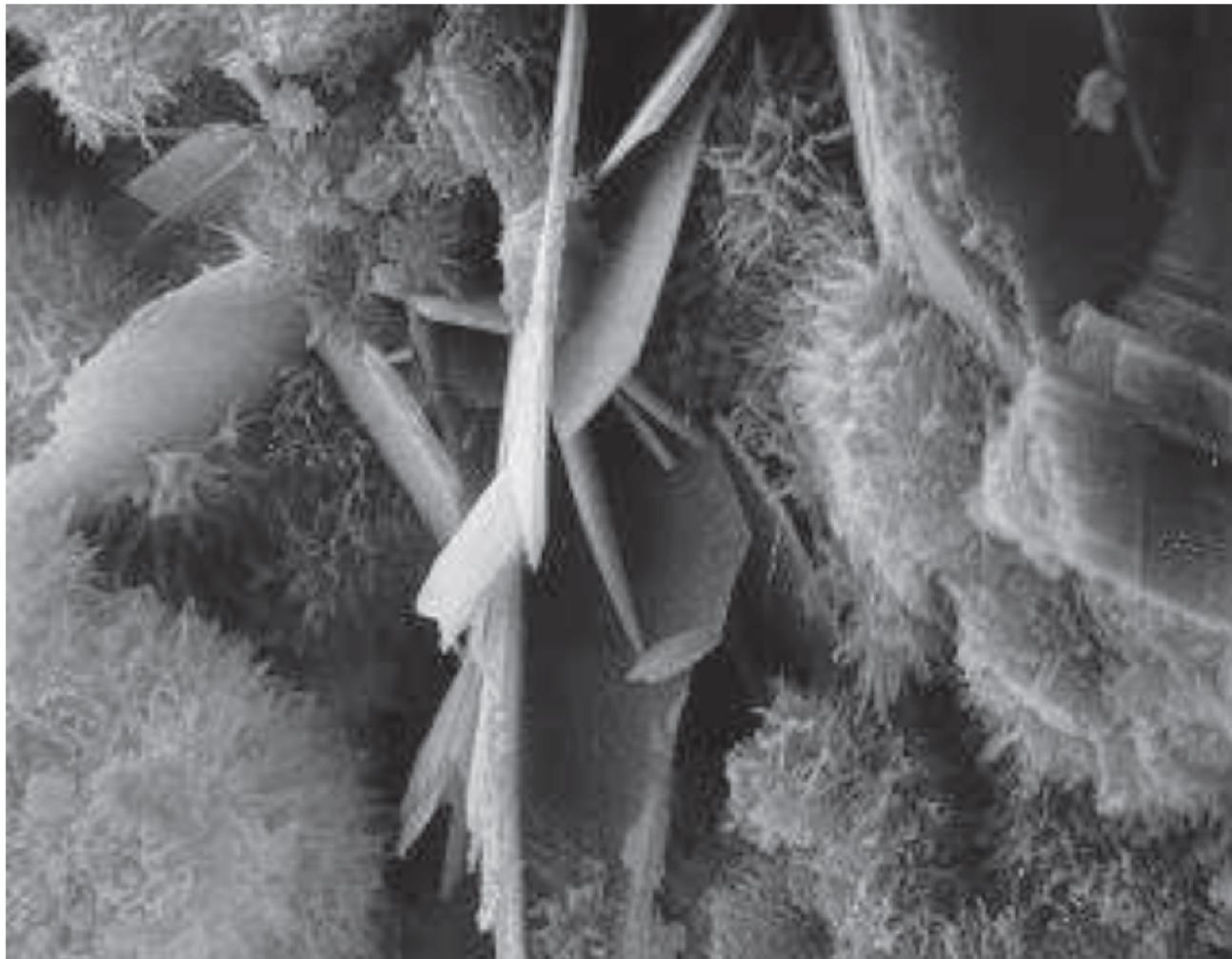
Idratazione schematica del C_3S o C_2S : subito dopo il mescolamento con acqua (A), inizio della presa (B) e durante l'indurimento (C).



B

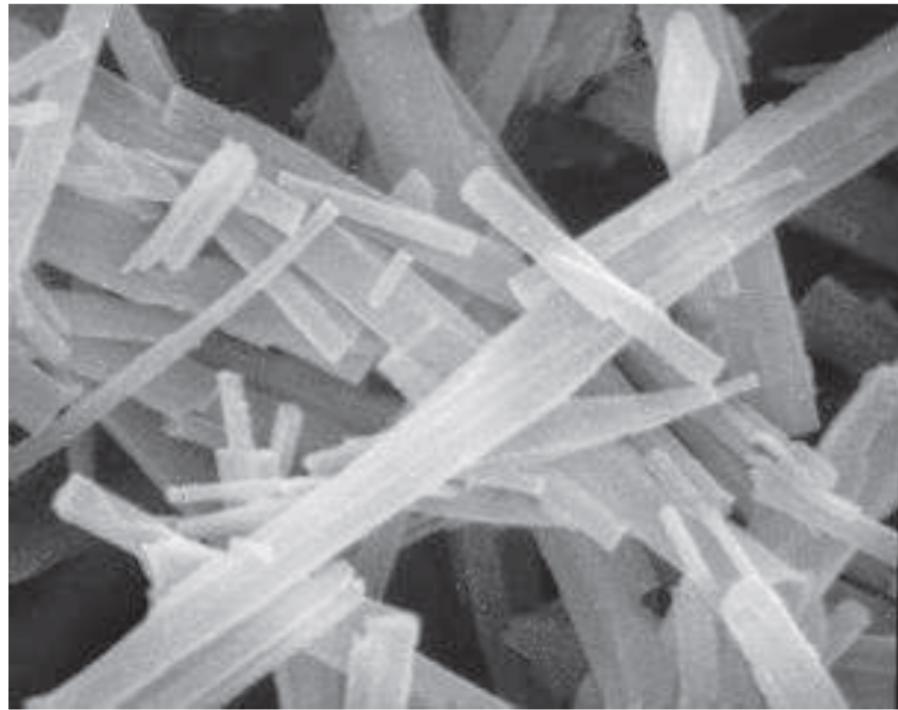
C

Microstruttura delle fasi idrate

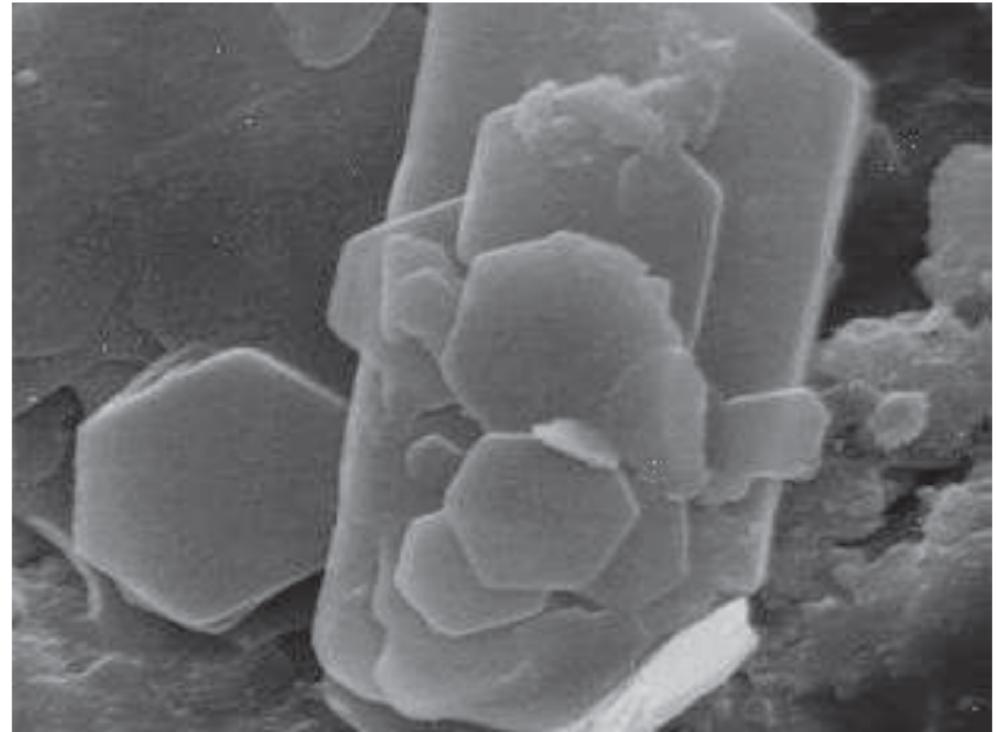


Neoformazioni fibrose di CSH in una pasta di cemento p.tl stagionata 7 giorni (SEM 1100 X)

Microstruttura delle fasi idrate

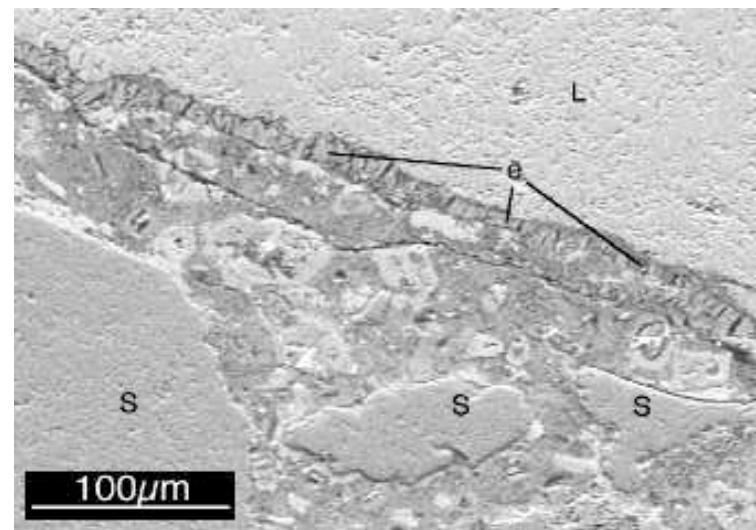
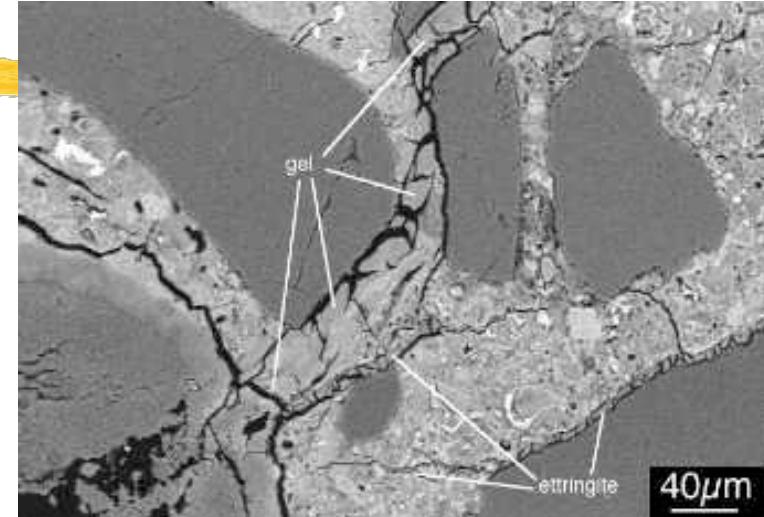


Morfologia ettringite (SEM 10000 X)



Cristalli di C4AH13 (SEM 10000 X)

La microstruttura del cemento dopo indurimento



Delayed ettringite formation: ettringite (e) surrounds the coarse limestone aggregate (L). Fine aggregate is silica sand (s).

Idratazione e consolidamento del cemento

- Gli alluminati e gli alluminoferriti, reagendo per primi, sono responsabili delle resistenze del cemento ai tempi più brevi (presa)
- I silicati, reagendo in seguito, sono responsabili delle resistenze del cemento ai tempi più lunghi (indurimento)
- Le proprietà dei silicati idrati sono maggiori delle proprietà degli alluminati idrati

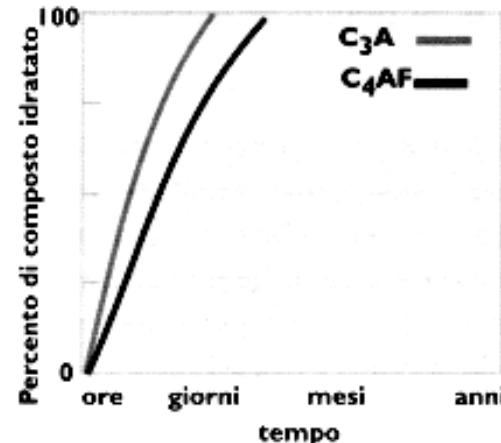


Fig. 3.1 - Andamento schematico del grado di idratazione degli alluminati in funzione del tempo.

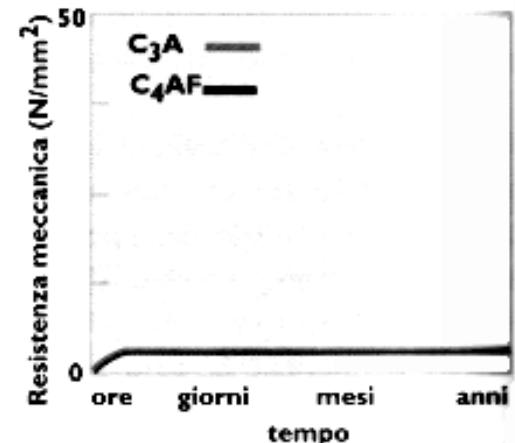


Fig. 3.2 - Andamento schematico della resistenza meccanica a compressione degli alluminati in funzione del tempo.

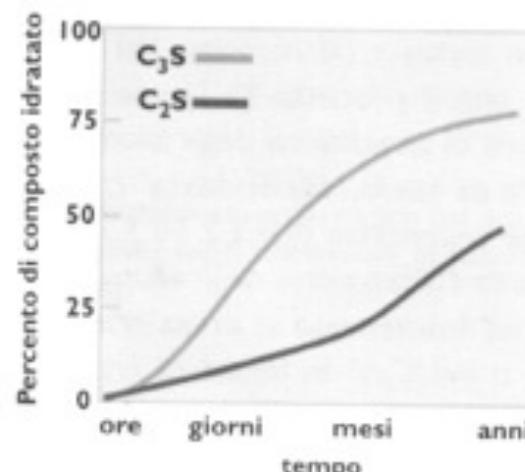


Fig. 3.4 - Andamento schematico del grado di idratazione dei silicati in funzione del tempo.

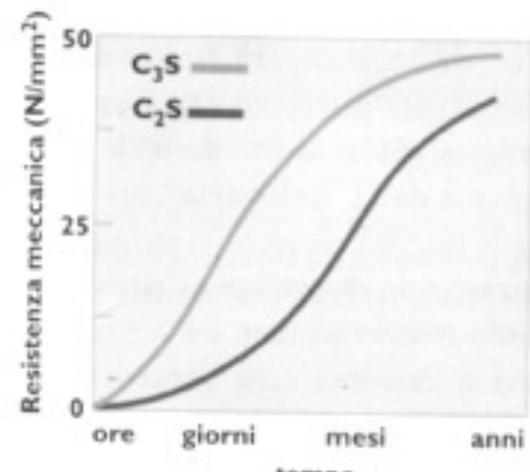


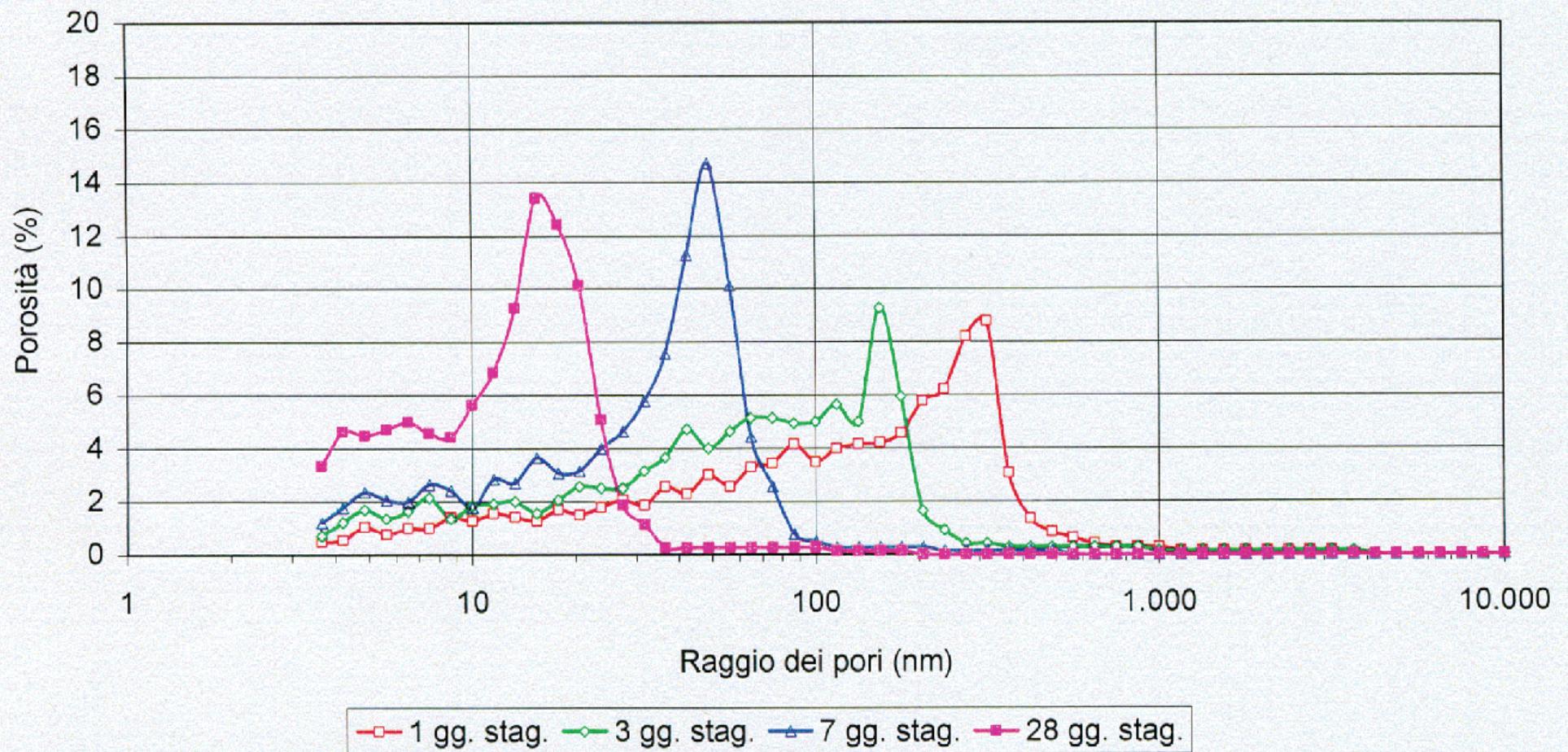
Fig. 3.5 - Andamento schematico della resistenza meccanica a compressione dei silicati in funzione del tempo.

Regolazione della presa

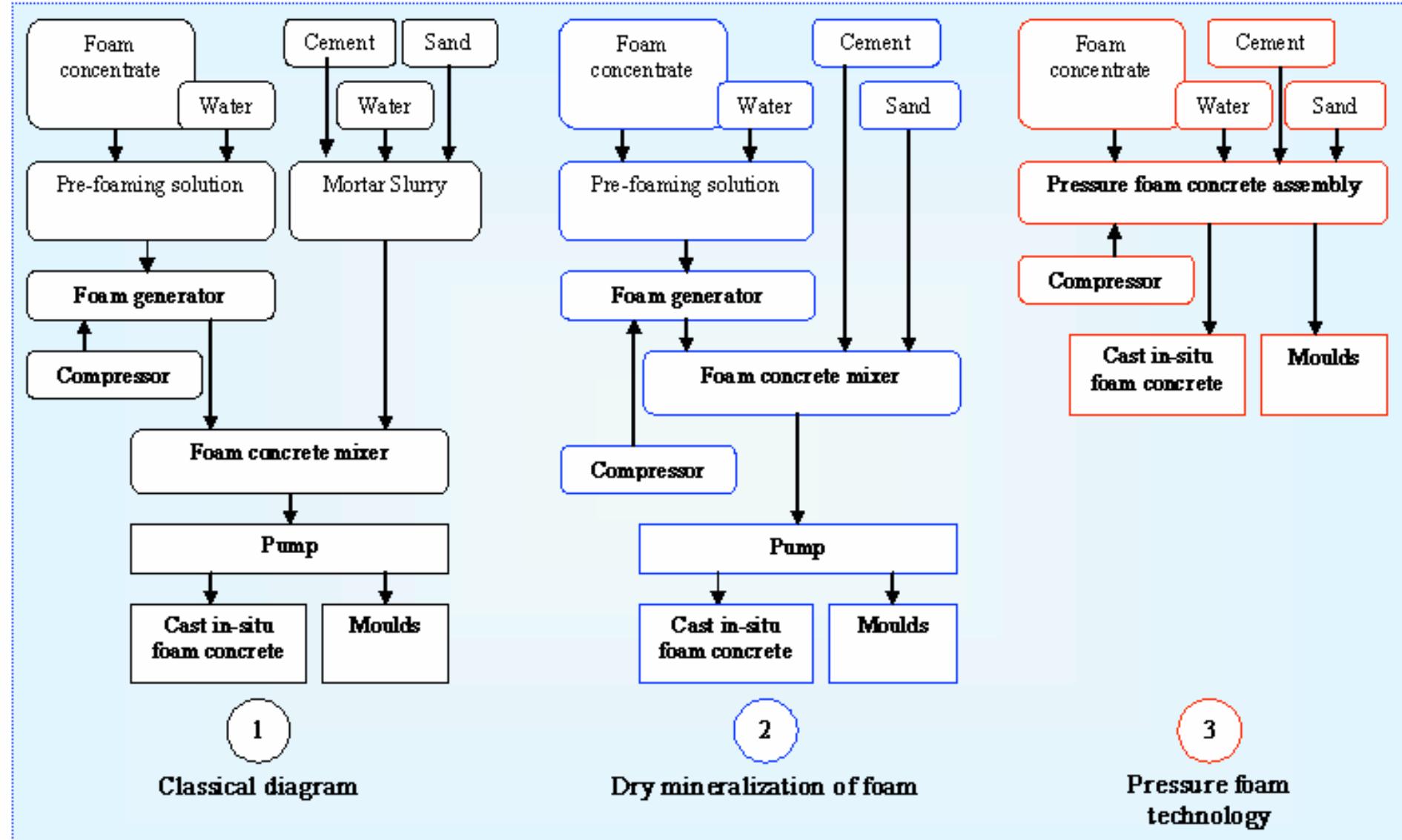


- **Presa rapida:** dovuta ad un'alta velocit. di idratazione degli alluminati e ferriti con formazione di AFm, nel caso in cui il gesso sia presente ma non sufficiente per formare AFt, o C4AH13 in assenza di gesso. Tali cristalli di forma esagonale piatta ostacolano i normali moti visco-plastici di una pasta di cemento.
 - **Falsa presa:** si ottiene nel caso in cui il solfato di calcio sia velocemente disponibile in soluzione. Tale gesso secondario ricristallizza sotto forma di cristalli aciculari che bloccano la fluidità del sistema. Nel caso in cui si riagitri l'impasto si tale gesso si ridiscioglie ed agisce da normale regolatore di presa.
- 

Effetto della stagionatura sulla distribuzione dei pori nella malta cementizia



Cemento schiumato



Classical diagram

Dry mineralization of foam

Pressure foam
technology

Composizione del calcestruzzo

Componente	Percento in volume
Aggregato	60-78
Acqua	14-22
Cemento	7-14
Aria	1-6
Eventuali additivi o prodotti speciali	

Categorie di inerti

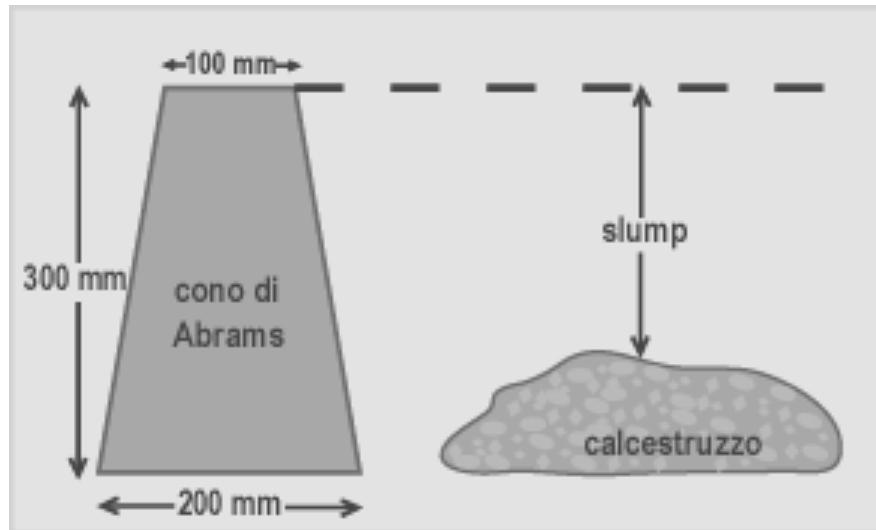
- **Inerti selezionati con vaglio:**
 - **ghiaietto** con granulometria in mm. 3/6 - 6/12 utilizzato per rinzaffi, zoccolature e bugnati.
 - **ghiaione** con granulometria in mm. 6/12 - 12/25 - 25/35 utilizzato per getti, riempimenti, solai.
 - ghiaione con granulometria in mm. 35/100 utilizzato per riempimenti, vespaie e sottofondi.

- **Inerti ottenuti dalla lavorazione con mezzi meccanici:**
 - **polvere di frantoio** risultante dalla tritazione dei sassi con granulometria in mm. 1/3 utilizzata per fondi, posa pietre, pavimenti ecc..
 - **pietrisco** risultante dalla tritazione di sassi con granulometria in mm. 3/6 - 8/12 - 10/20 - 15/30 - 20/40 -30/50 -40/70 utilizzato per getti, riempimenti, vespaie.

- **Miscele**, composte da sabbia e sassi di piccola granulometria:
 - sassi misti con sabbia grossa con granulometria in mm. 3/6 - 6/12- 25/35 utilizzati per rinzaffi ad alto spessore getti.

- **Compatto o compattato**, ossia miscela costituita dall'unione di sassi di diverse granulometrie e da polvere di frantoio:
 - polvere di frantoio o sabbia e sasso spaccato con granulometria in mm. 0/20 - 0/40 - 0/70 utilizzate per riempimenti e sottofondi.

Slump



- ❑ Misura della fluidità del materiale
- ❑ Più il materiale è fluido, più il cono si abbassa
- ❑ Più il materiale è fluido, più veloce è la colata, e si possono riempire forme complesse



Classi di consistenza del calcestruzzo

□ La lavorabilità del calcestruzzo fresco, designata con il termine consistenza, è indice delle proprietà e del comportamento del calcestruzzo nell'intervallo di tempo tra la produzione e la compattazione dell'impasto in situ nella cassaforma.



□ Classi di consistenza mediante abbassamento al cono di Abrams:

S1 - consistenza umida: abbassamento (slump) da 10 a 40 mm

S2 - consistenza plastica: abbassamento (slump) da 50 a 90 mm

S3 - consistenza semifluida:
abbassamento (slump) da 100 a 150 mm

S4 - consistenza fluida: abbassamento (slump) da 160 a 210 mm

S5 - consistenza superfluida:
abbassamento (slump) ≥ 220 mm.

Classi di spandimento

□ Classi di consistenza mediante la misura dello spandimento

F1 (diametro spandimento: ≤ 340 mm)

F2 - da 350 a 410 mm

F3 - da 420 a 480 mm

F4 - da 490 a 550 mm

F5 - da 560 a 620 mm

F6 - ≥ 630 mm



□ Con riferimento alle classi di abbassamento al cono:

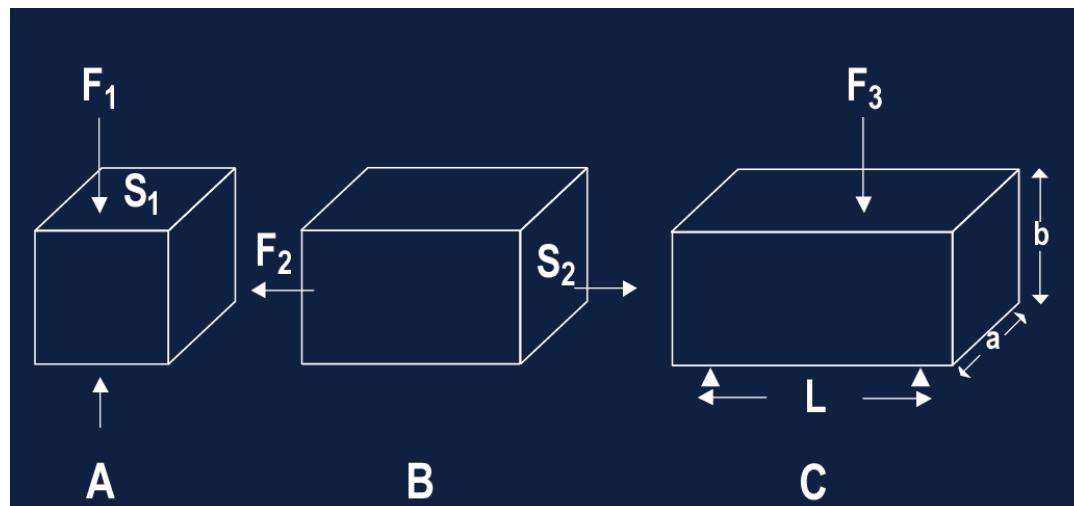
□ Per realizzare una diga o una pavimentazione con vibrofinitrice è d'obbligo un calcestruzzo a consistenza S1;

□ Per ciminiere, serbatoi pensili, ecc., con la tecnica dei casserri rampanti si prescrive un calcestruzzo a consistenza S2 o al massimo S3;

□ in tutti gli altri casi si dovrà utilizzare un calcestruzzo S4 o S5

Proprietà meccaniche

- Proprietà meccaniche:
 - **A** Resistenza a compressione
 - **B** Resistenza a trazione
 - **C** Resistenza a flessione



Classi di resistenza del calcestruzzo

- ❑ Il calcestruzzo è classificato in classi di resistenza in base alla resistenza a compressione, espressa come resistenza caratteristica R_{ck} oppure f_{ck} .
- ❑ R_{ck} è determinata su provini cubi (per questo chiamata resistenza caratteristica cubica) di 150 mm di lato ($H/D=1$), maturati 28 giorni;
- ❑ f_{ck} su provini cilindrici (da cui il nome resistenza caratteristica cilindrica) di 150 mm di diametro e 300 mm di altezza ($H/D=2$)[6].
- ❑ Tra i due valori esiste la seguente relazione:

$$f_{ck} = 0,83 R_{ck}$$

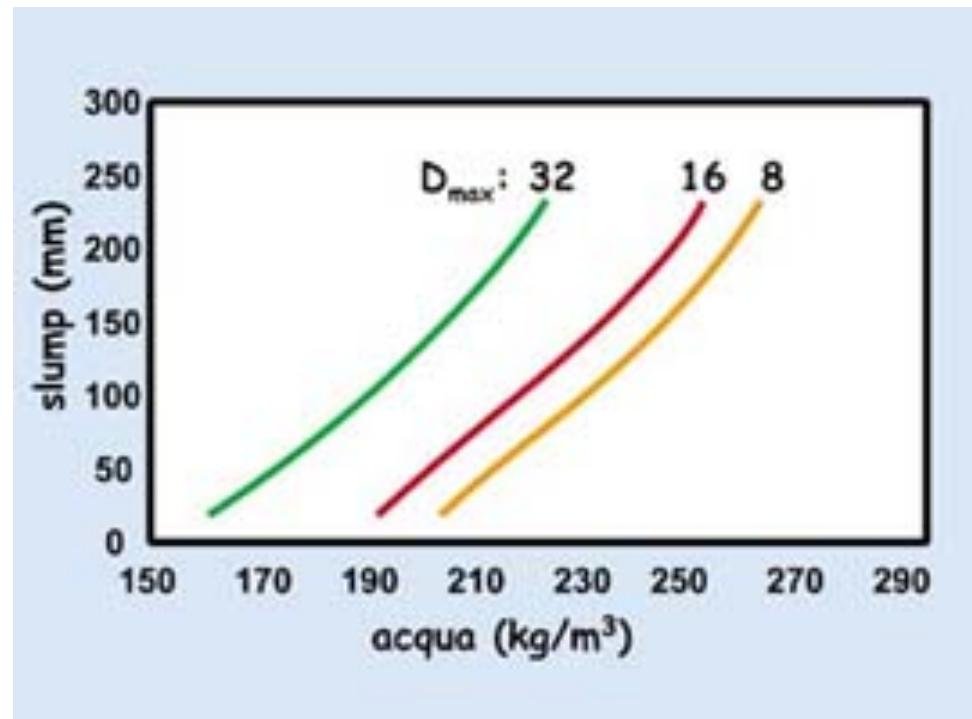


Classe di resistenza dei leganti cementizi

CLASSE DI RESISTENZA (SIGLA)	RESISTENZA A COMPRESSIONE (N/MM ²) MINIMA GARANTITA A:		
	2 GIORNI	7 GIORNI	28 GIORNI
32.5	---	16	32.5
32.5R	10	---	32.5
42.5	10	---	42.5
42.5R	20	---	42.5
52.5	20	---	52.5
52.5R	30	---	52.5

Acqua inerte e lavorabilità

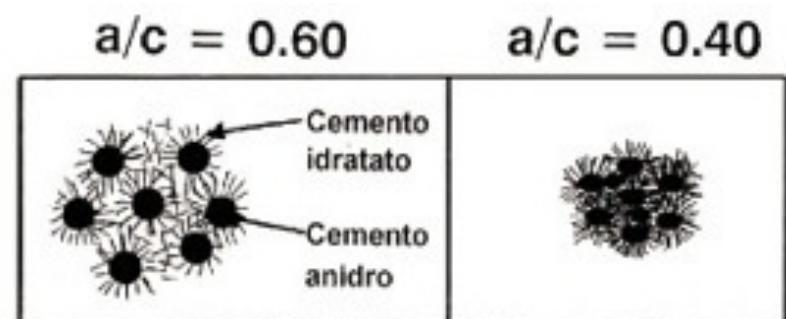
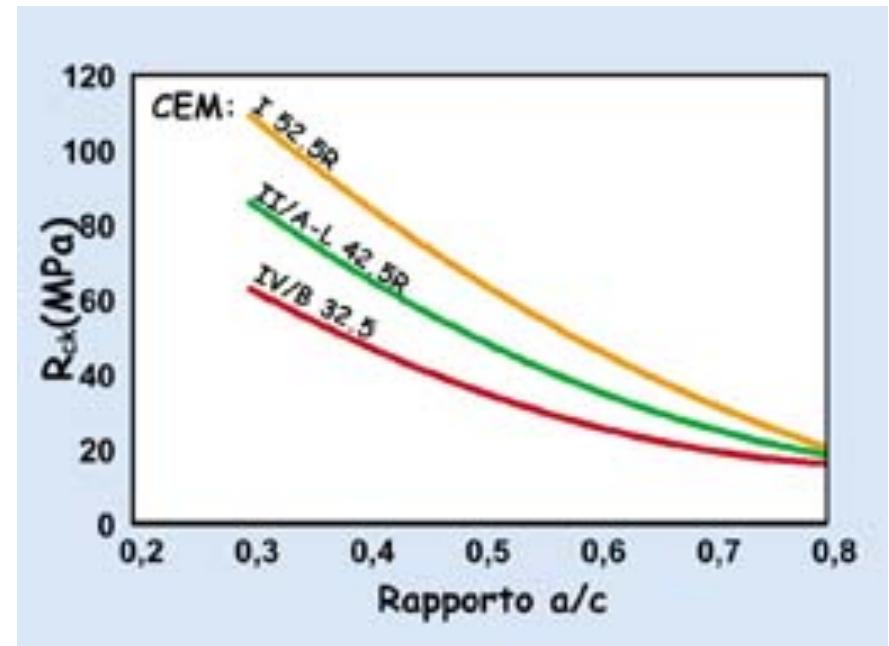
- Per aumentare la lavorabilità (in termini di slump) occorre aumentare il quantitativo di acqua di impasto (a).
- La quantità d'acqua occorrente dipende dalle dimensioni e geometrie dell'inerte:
 - aumentando il diametro massimo (D_{max}), si riduce l'area superficiale specifica dell'inerte e quindi l'acqua necessaria per bagnare la superficie
 - a parità di D_{max} , la quantità d'acqua che occorre impiegare per confezionare un calcestruzzo con un determinato slump, è maggiore se si utilizza un inerte frantumato
 - a parità di dimensione, un inerte dal contorno irregolare, presenta un attrito maggiore e richiede un maggior quantitativo di acqua per conseguire la stessa lavorabilità



- le correlazioni tra slump ed acqua, a seconda del diametro massimo.

Acqua VS Resistenza caratteristica

- la resistenza caratteristica R_{ck} aumenta al diminuire del rapporto a/c
- la correlazione R_{ck} - a/c (ricavata sperimentalmente misurando la resistenza meccanica media di calcestruzzi con rapporto a/c noto) dipende anche dal tipo e soprattutto dalla classe del cemento impiegato
- Nota la R_{ck} richiesta, ed il tipo di cemento da utilizzare, si determina il valore di a/c massimo, $(a/c)^*$



Mix design

Scelta del proporzionamento degli ingredienti

A) scelta del quantitativo di acqua in kg/m³:

- Influenza la lavorabilità del conglomerato fresco, insieme con il tipo di inerte (tondeggiate o frantumato), e con la presenza di additivi (riduttori di acqua e aeranti);

B) scelta del rapporto tra il quantitativo di acqua e quello di cemento (a/c):

- Influenza la resistenza meccanica del conglomerato indurito (R_{ck}), la durabilità del conglomerato indurito in relazione al grado di aggressione ambientale C)

C) scelta del contenuto di inerte:

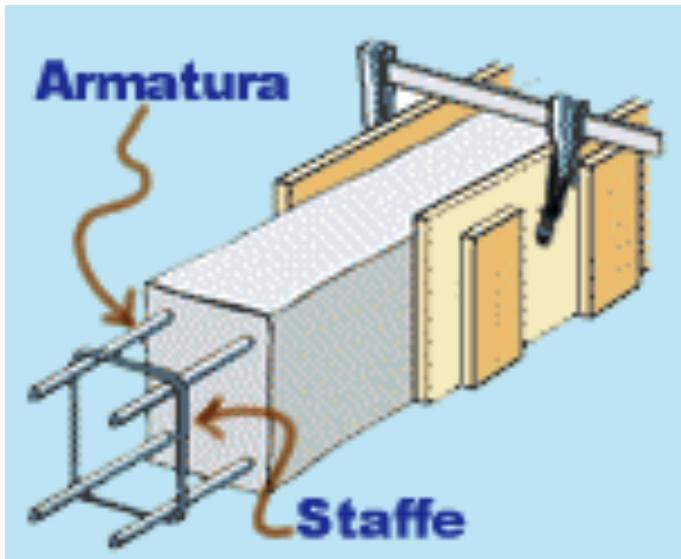
- noto il valore di **a** e calcolato il valore di **c** si calcola il volume di inerte V_i per differenza attraverso un bilancio di volume sottraendo al volume del calcestruzzo V_{cls} , quelli degli altri ingredienti V_a , V_c e V_a' , (rispettivamente i volumi di acqua, cemento ed aria;

D) scelta dell'assortimento granulometrico

- il volume V_i dell'inerte totale viene ripartito in quello dei singoli inerti (per esempio sabbia e ghiaia) in base alle curve granulometriche di questi ultimi rispetto alla curva ottimale prescelta (Fuller, Bolomey, ecc.).

Il calcestruzzo armato

- Il cemento è molto fragile nella sollecitazioni a trazione
- La fessurazione che si forma (cricca) si propaga molto velocemente
- In presenza di armatura metallica, lo sforzo di trazione viene propagato alla trave metallica, che regge il carico
- Non cambia molto il carico massimo, ma piuttosto la energia di frattura
- L'acciaio è invece l'anello debole nei problemi di durabilità

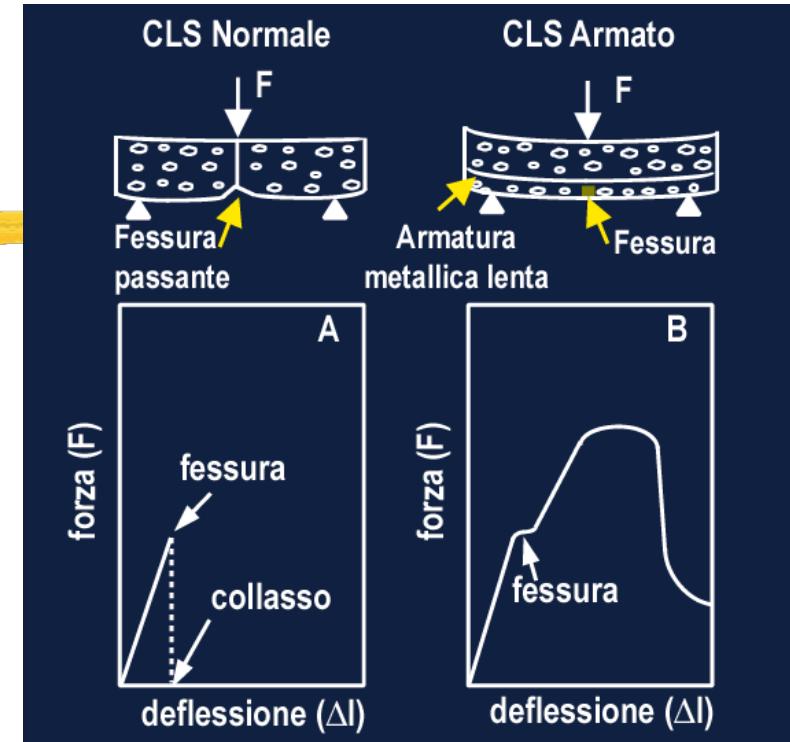


- **Copriferro:** distanza tra il ferro di armatura e la superficie esposta della gettata
- Distanza tra i ferri: influenza la qualità del cemento da utilizzare

Il cemento armato

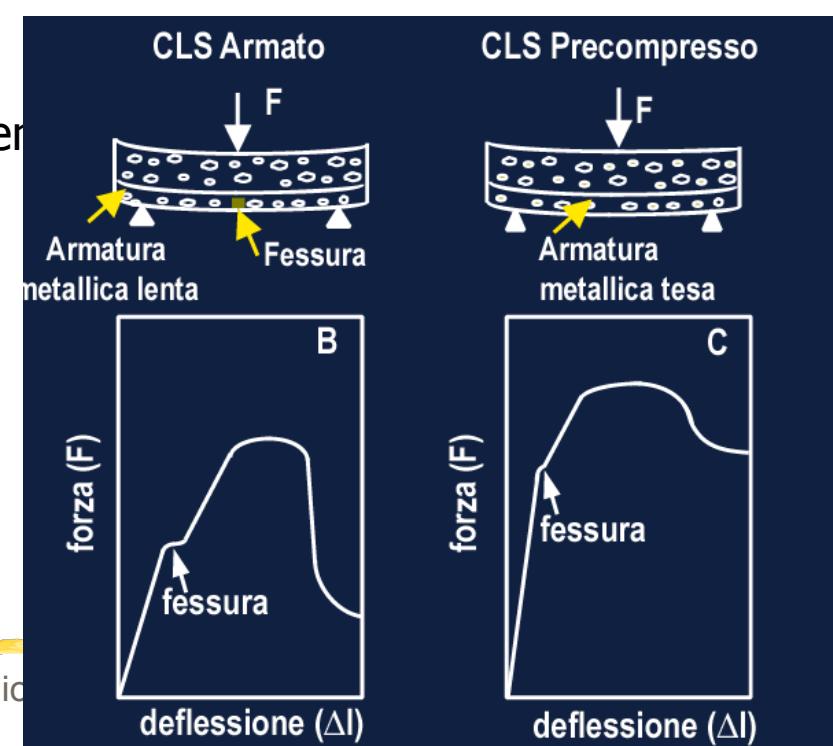
- Il calcestruzzo è un materiale fragile:

- Buona resistenza a compressione
- Scarsa resistenza a trazione
- Scarsa resistenza a flessione



- Cemento armato
 - Inserendo rinforzi metallici, si migliora la resistenza a trazione e flessione

- Cemento precompresso
 - Se le travi vengono precomprese, il cemento aumenta la resistenza a trazione ed il modulo elastico



I materiali pozzolanici

- Definizione di **materiale pozzolanico**: materiale dotato della proprietà di combinarsi alla temperatura ambiente ed in presenza di acqua, con l'idrossido di calcio per formare composti cementanti insolubili
- La pozzolana è una roccia sedimentaria piroclastica formatasi con l'accumulo e la parziale cementificazione di particelle, ceneri, lapilli emesse nel corso di eruzioni vulcaniche, consiste di silicati e silicoalluminati semiamorfi ad alta porosità e area specifica
- Le pozzolane artificiali:
 - Ceneri di carbone (Fly ash)
 - Prodotti nelle centrali termiche, costituiscono il residuo solido della combustione del carbone, prevalentemente composto da silice amorfa
 - Argille torrefatte
 - Argille calcinate a 600-800°C con decomposizione dei silicati e formazione di fasi amorfe)
 - Fumo di silice (silica fumèd)
 - Pirolisi di SiCl_4 in ossigeno

Il cemento pozzolanico

- ❑ Cemento pozzolanico: Mescola di clinker di Portland, pozzolana e piccole quantità di gesso
 - ❑ La quantità di pozzolana nelle miscele è tipicamente 30-40%
- ❑ Messa in opera:
 - ❑ Idratazione del Clinker (come nel Portland)
 - ❑ Gli idrossidi di calcio reagiscono con la pozzolana originando silicati e alluminati idrati
- ❑ Caratteristiche:
 - ❑ La reazione tra calce e pozzolana è + lenta, quindi si hanno inizialmente resistenze meccaniche inferiori
 - ❑ Minore calore di reazione e quindi ideale per i climi caldi
 - ❑ A lunghe scadenze 6-12 mesi le resistenze si egualano
 - ❑ Ridotte quantità di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (pochi % o assente) resa inattiva dall'incapsulamento in pozzolana

Classificazione delle malte

CL	TIPO DI MALTA	COMPOSIZIONE (PARTI PER VOLUME)				
		CEMENTO	CALCE AEREA	CALCE IDRAULICA	SABBIA	POZZOLANA
M4	IDRAULICA	-	-	1	3	-
M4	POZZOLANICA	-	1	-	-	3
M4	BASTARDA	1	-	2	9	-
M3	BASTARDA	1	-	1	5	-
M2	CEMENTIZIA	1	-	0,5	4	-
M1	CEMENTIZIA	1	-	-	3	-

Intonaci

- ❑ Rivestimento per murature ottenuto mediante strati multipli di malte

Primo strato: **rinzaffo**

secondo strato: **arriccio**

terzo strato: **velo**

- ❑ A seconda che siano presenti o meno tutti e tre si ottengono:

1.intonaco finito (tre strati)

2.grezzo (primi due)

3.rustico (solo il primo)



La degradazione del cemento



Chimica	Fisica	Meccanica
Solfati e sulfuri	Gelo –disgelo	Urto scoppio
Anidride carbonica	Ritiro	Erosione, abrasione
Cloruri	Incendio	Sisma Vibrazioni
Alcali	Calore di idratazione	



Attacchi chimici

❑ Dilavamento

- ❑ Le acque piovane contengono alti tenori di CO₂ che le rende acide per la presenza di acido carbonico (H₂CO₃)
- ❑ L'acido carbonico determina la trasformazione da carbonato di calcio in bicarbonato più solubile e quindi facilmente dilavabile

❑ Sali disgelanti (e.g. NaCl)

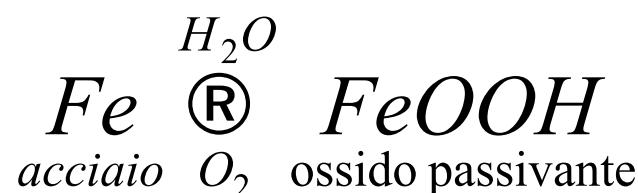
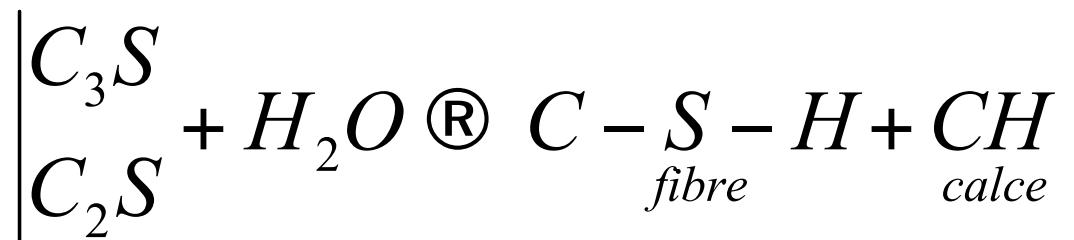
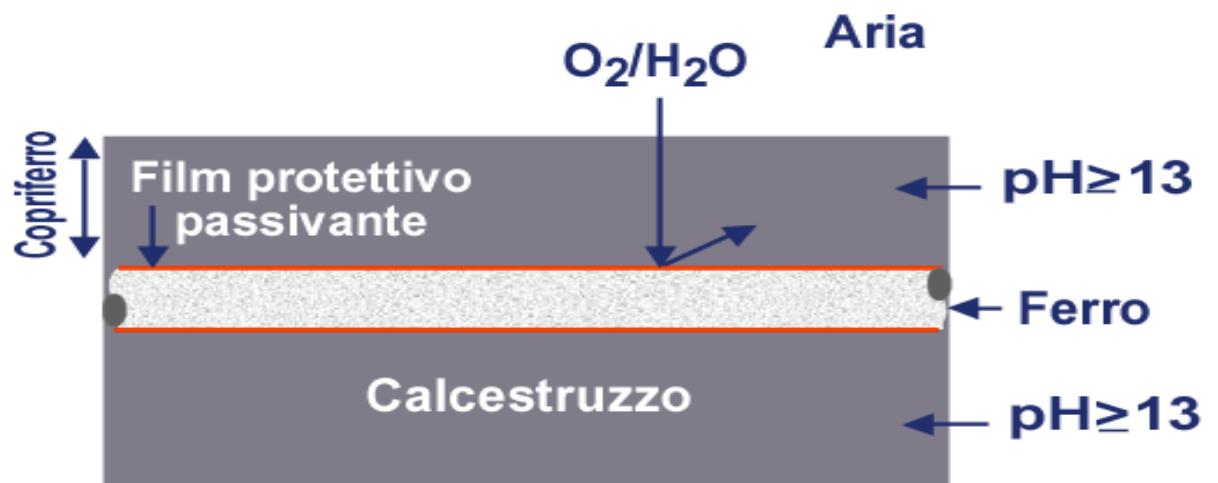
- ❑ Azione aggressiva nei confronti del calcestruzzo e dell'armatura
- ❑ La formazione dell'ossicloruro è accompagnata da un aumento di volume con effetto dirompente sulla matrice

❑ Attacco solfatico si esplica attraverso tre meccanismi distruttivi:

- ❑ Formazione di gesso con aumento di volume
- ❑ Formazione di ettringite
- ❑ Formazione di thaumasite
 - ❑ Le ultime due reazioni provocano la distruzione del componente silicato idrato che costituisce l'elemento legante più significativo

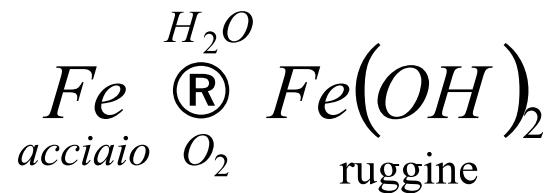
Corrosione

- Se il pH del cemento è maggiore di 11.5-12, si forma uno strato protettivo di ossido sulla superficie dell'armatura di acciaio
- Questa è la situazione più comune nei cementi
- Per la presenza di calce pH=13



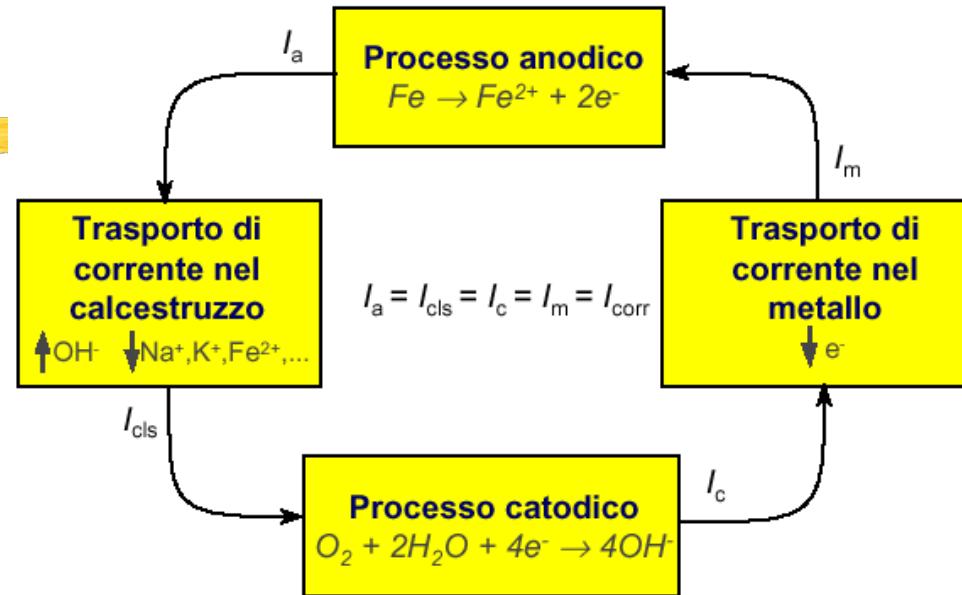
Corrosione

- Una volta che il pH è sceso ad un valore inferiore a 11.5, il metallo va incontro a corrosione
- L'aria umida trasporta ossigeno e acqua, che causano la corrosione

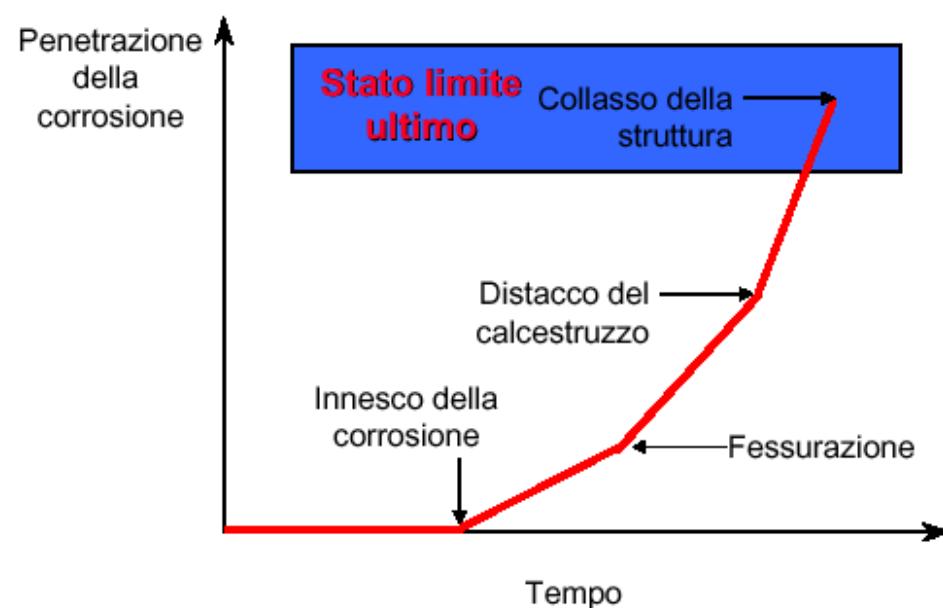


- La ruggine è 5-6 volte più voluminosa del ferro di partenza
- Il copriferro viene prima fessurato e poi espulso

Meccanismo eletrochimico

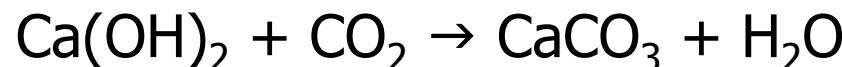


Stati limite per la corrosione



La carbonatazione

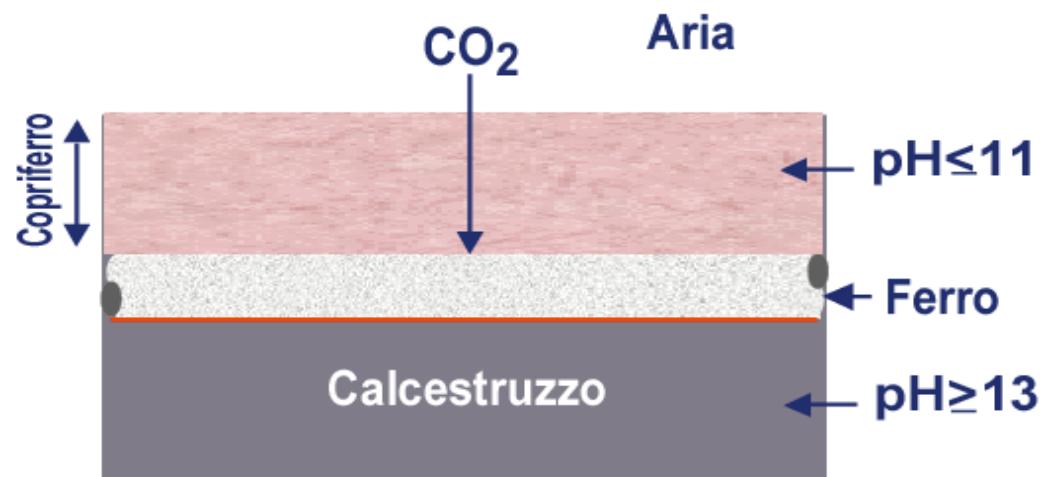
- ❑ Consiste nell'ingresso di CO₂ nella porosità del calcestruzzo con conseguente neutralizzazione della calce proveniente dall'idratazione dei silicati:



- ❑ La reazione ha come effetto la diminuzione del pH e dunque la creazione di condizioni per il processo di corrosione dell'acciaio
- ❑ La carbonatazione è innocua per il calcestruzzo ma determina la cessazione dell'azione protettiva della matrice cementizia sul ferro di armatura
- ❑ Rimedi:
 - ❑ diminuire la porosità ad esempio minimizzando la quantità di acqua di impasto
 - ❑ Proteggere l'armatura con coprigerro o con tecniche elettrochimiche

Depassivazione

- ❑ La perdita di passività si può ricondurre ad attacchi di agenti esterni
- ❑ Se il pH scende a valori inferiori a 11.5, lo strato di film si rompe
- ❑ La diminuzione del tenore di calce porta ad un abbassamento del pH
- ❑ Depassivazione per carbonatazione

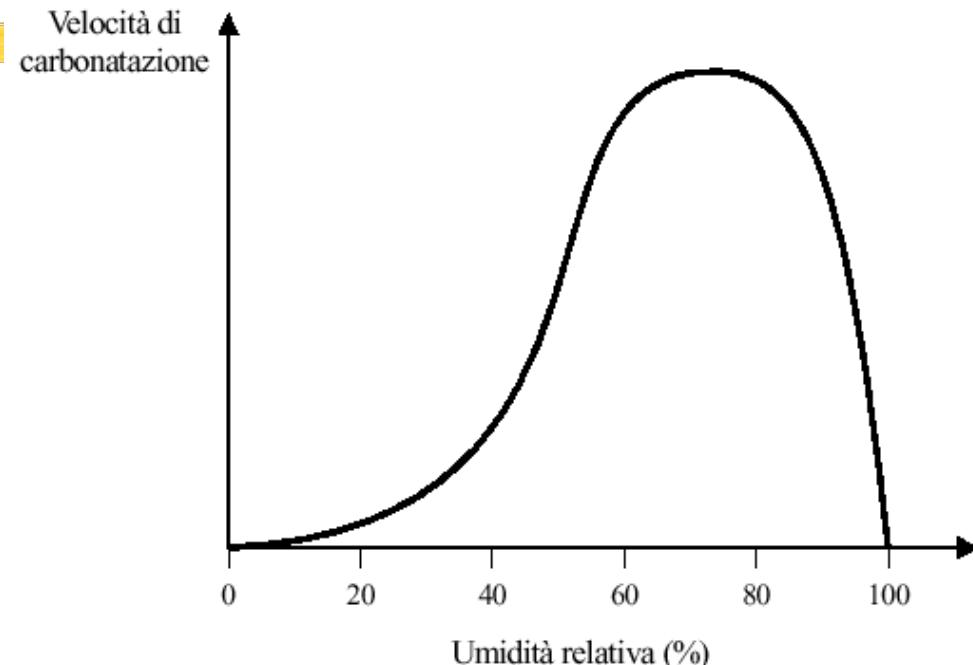


- I cloruri agiscono nello stesso modo verso la depassivazione

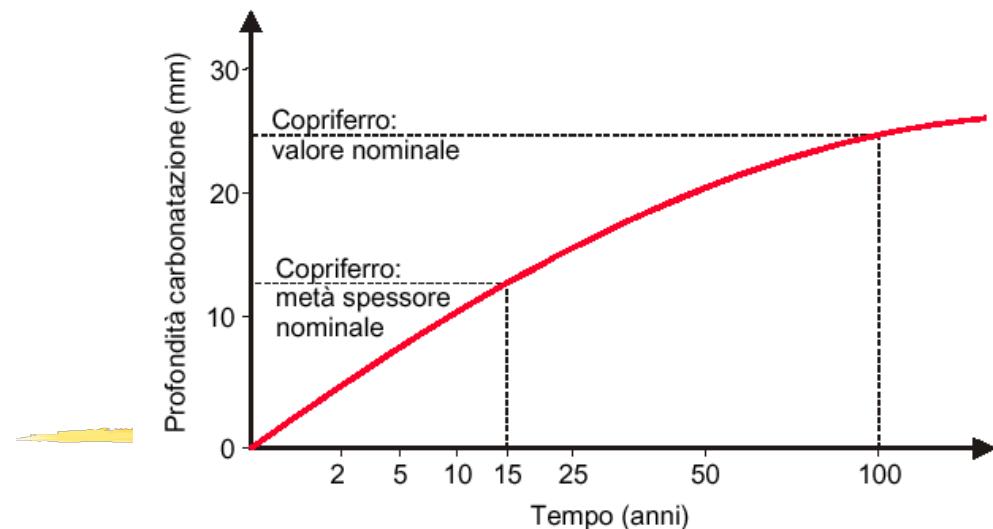


Carbonatazione

- ❑ La velocità di carbonatazione dipende dalle condizioni ambientali e dalle proprietà del cemento
- ❑ Lo strato depassivato è $x=Kt^{1/2}$
- ❑ K aumenta all'aumentare del rapporto a/c e dell'umidità relativa



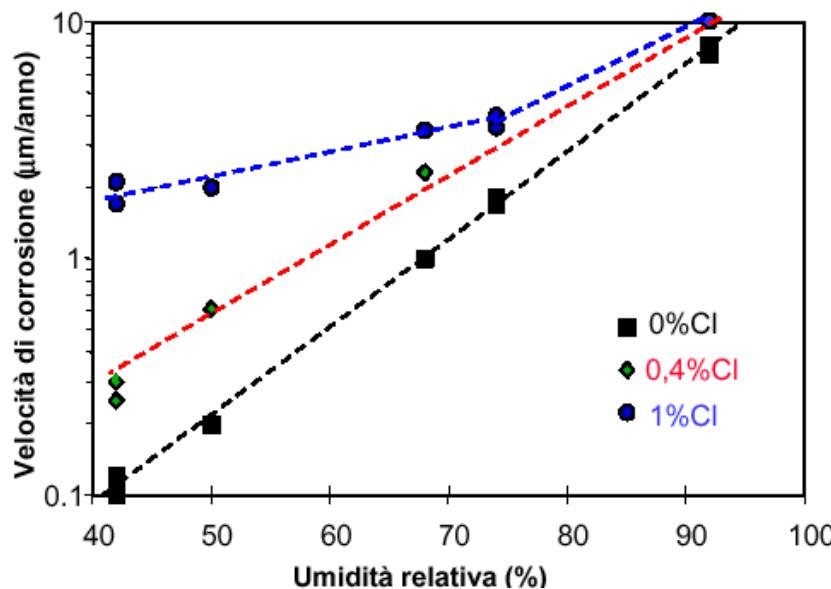
Spessore di copriferro



Corrosione da carbonatazione

- La vita utile è data dalla somma dei tempi di innesco e di propagazione fino alla penetrazione limite che causa la perdita di resistenza

Propagazione della corrosione (carbonatazione + Cl⁻)



tempo di innesco (t_i):

- penetrazione carbonatazione (K)
- spessore copriferro (x)

$$t_i = \left(\frac{x}{K} \right)^2$$

tempo di propagazione (t_p)

- velocità di corrosione (I_{corr})
- penetrazione limite (P_{lim})

$$t_p = \frac{P_{lim}}{I_{corr}}$$

$$t = t_i + t_p = \left(\frac{x}{K} \right)^2 + \frac{P_{lim}}{I_{corr}}$$

Corrosione da cloruri

- Nel caso della corrosione da cloruri la velocità di corrosione è tanto elevata che il tempo di propagazione si assume nullo, e la vita utile coincide con il tempo di innescamento
- Il coefficiente di diffusione D diminuisce:
 - Al diminuire di a/c (minore porosità)
 - All'aumentare del grado di compattazione
 - Passando dal cemento portland al pozzolanico

Penetrazione dei cloruri

diffusione non stazionaria (II legge di Fick)

$$\frac{dc}{dt} = -D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

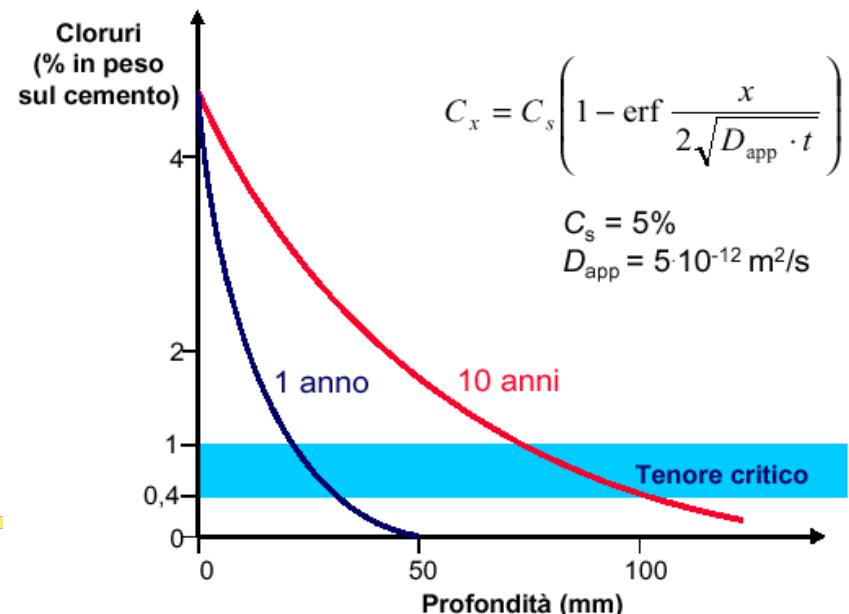
$$c = C_s \text{ per } x = 0$$

$$c = 0 \text{ per } t = 0 \text{ e } x > 0$$

C_s e D costanti nel tempo

$$c(x,t) = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

Penetrazione dei cloruri



Ettringite

- ❑ Ettringite esacalcio alluminato trisolfato
 $(\text{CaO})_6(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{SO}_4)_3 \cdot 32 \text{ H}_2\text{O}$,
- ❑ La formula dei cementisti C₆A₃S₃H₃₂;
- ❑ Si trova nel cemento Portland come risultato della reazione di alluminato di calcio con solfato di calcio (gesso)
- ❑ Nel cemento è importante il rapporto tra solfato e alluminato
- ❑ Ettringite da Ettringen, Germany, il posto dove fu scoperta per la prima volta.



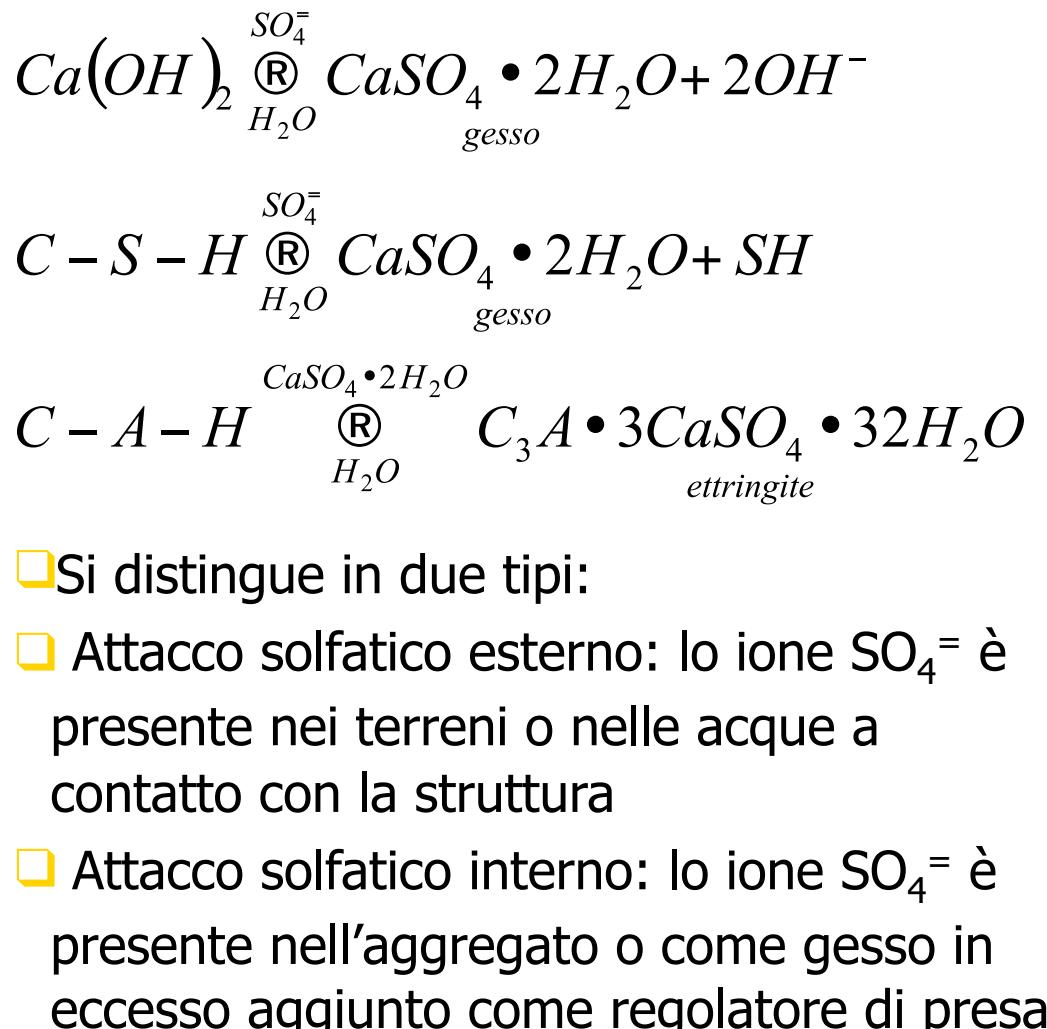
Il gesso



- ❑ Il gesso nel cemento viene spesso introdotto in dosi controllate
 - ❑ Reagendo con i prodotti di idratazione del cemento, rallenta l'indurimento del cemento. Viene detto regolatore di presa
 - ❑ L'ettringite che si forma in questo caso è detta primaria (EEF, early ettringite formation)
 - ❑ L'ettringite primaria si forma quando il cemento è allo stato fluido, a bassissimo modulo elastico (si generano bassissime tensioni)
 - ❑ L'ettringite da solfati si forma in una seconda fase (DEF, delayed ettringite formation), quando il getto è indurito e ad alto modulo. Le tensioni possono essere molto alte
 - ❑ Le cause sono principalmente 2:
 - ❑ Le particelle di inerte possono avere al loro interno del gesso, che impiega un certo tempo per venire a contatto con i prodotti di idratazione
 - ❑ La distribuzione del gesso non è uniforme, lo stato tensionale è eterogeneo
- 

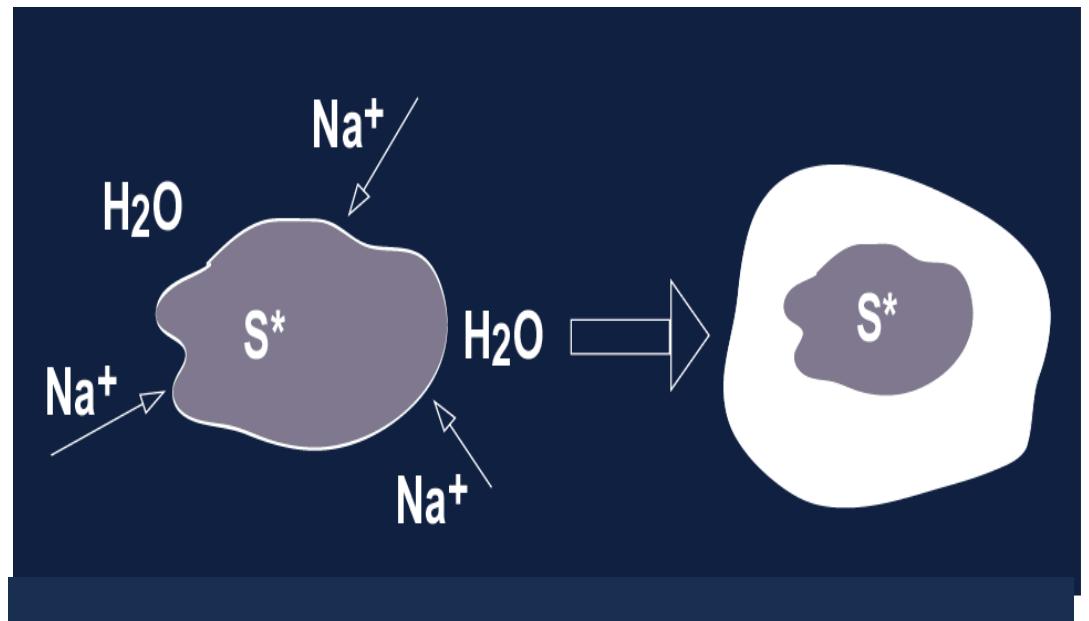
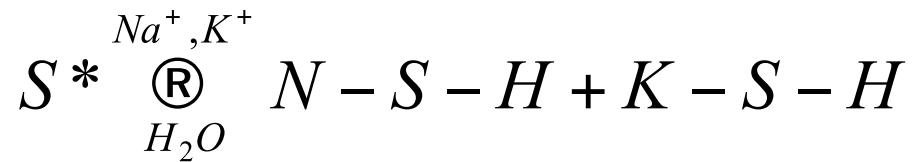
Attacco solfatico

- L'ettringite è molto più voluminosa dei composti di partenza
- Se la formazione di ettringite avviene quando la pasta cementizia è indurita, si possono provocare fessurazioni all'interno della massa di cemento
- Si deve fare distinzione tra l'ettringite formatasi nei primi stadi dell'idratazione e quella che si forma negli stadi successivi



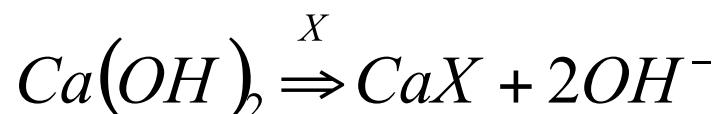
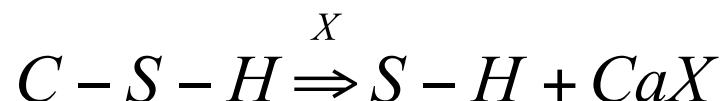
Reazioni alcali-silice

- ❑ L'effetto è dovuto alla presenza di silice amorfa molto reattiva
- ❑ Anche in questo caso, l'effetto espansivo può essere molto dannoso



Aggressione delle acque

- ❑ La decalcificazione consiste nella rimozione del calcio dal prodotto collante C-S-H, cui si deve l'effetto collante del cemento
- ❑ Il C-S-H si trasforma in specie via via meno collanti, fino a diventare nel caso di totale perdita di calcio, in S-H, silice amorfa totalmente priva di effetto legante
- ❑ La decalcificazione coinvolge anche $\text{Ca}(\text{OH})_2$, che però ha una debole azione legante, ed il risultato non è così dannoso come per la decalcificazione di C-S-H



Formazione di ghiaccio



- Il ghiaccio si forma solo se nei pori del calcestruzzo è presente acqua
- La formazione di ghiaccio è accompagnata da un'espansione pari a circa il 9%
- Questa espansione può portare a carichi di compressione eccessivi sul calcestruzzo
- Il calcestruzzo non si è sottoposto a compressioni se il grado di saturazione (volume di acqua/volume dei pori) è inferiore alla "saturazione critica"
- La durabilità rispetto alla formazione di ghiaccio si migliora:
 - Aumentando il rapporto a/c: si diminuisce la porosità capillare ($0.1\text{-}10\mu\text{m}$) e quindi l'ingresso di acqua piovana nei pori
 - Aumentando la frazione di pori a grande dimensione ($100\text{-}300\mu\text{m}$), che accolgono l'acqua gelata

Gelo disgelo

- Quando l'acqua liquida contenuta nei pori si trasforma in ghiaccio si verifica un aumento di volume del 9% circa che provoca un'azione dirompente

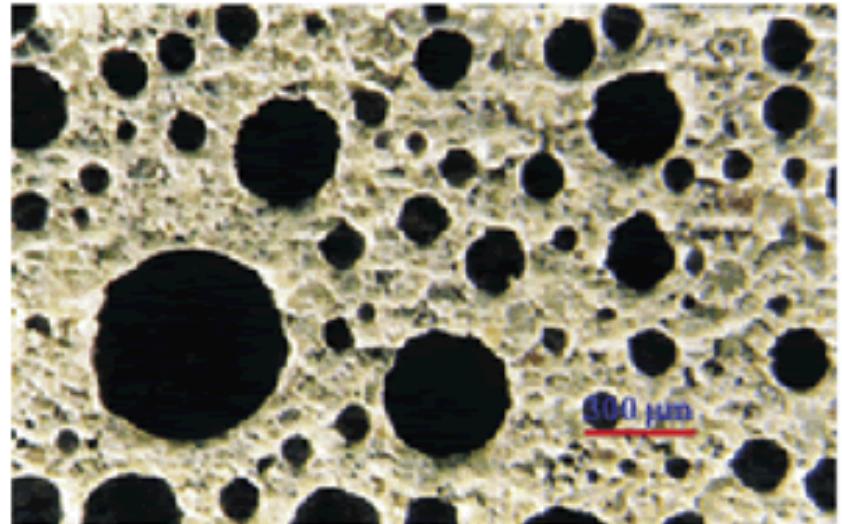


Fig. 1 – Distribuzione delle microbolle d'aria nella malta cementizia.

Rimedi:

- Riduzione della porosità tramite riduzione dell'acqua di impasto
- Inglobamento di un sistema di microbolle (300-400 micron) tramite tensioattivi (ma con conseguente impoverimento della resistenza meccanica)

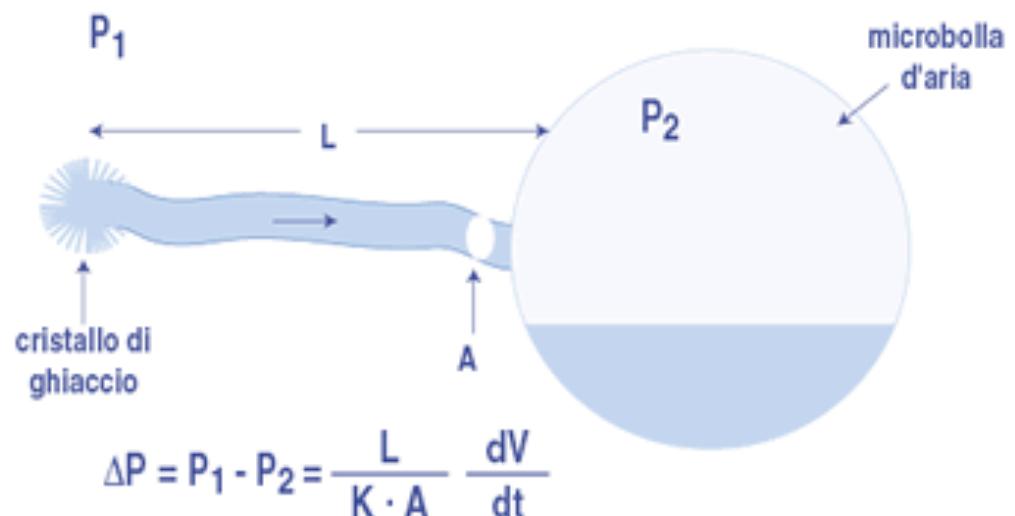
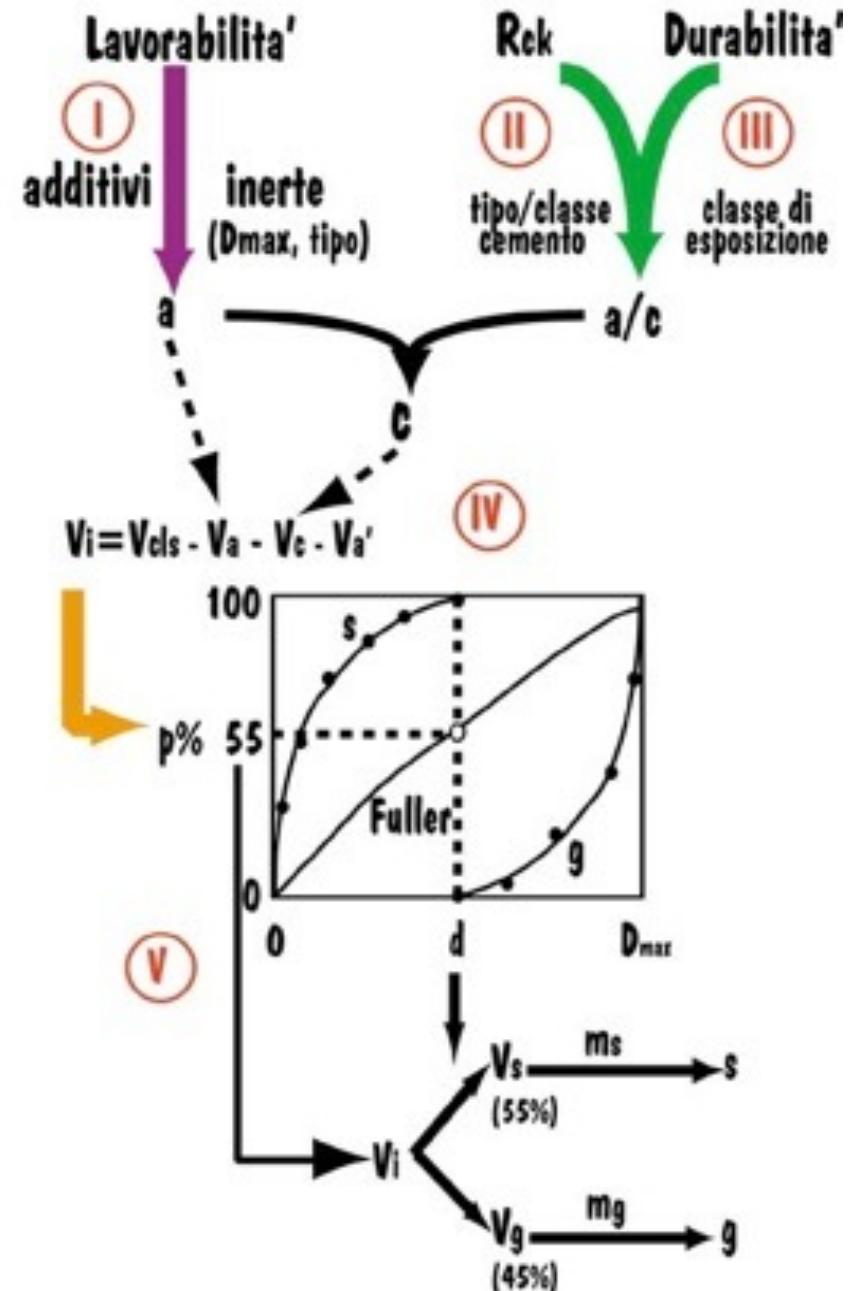


Fig. 4 – Flusso di acqua (dV/dt) attraverso la sezione A del poro che collega il punto dove si sta formando il ghiaccio alla pressione P_1 , alla microbolla d'aria alla pressione P_2 .

Qualità del calcestruzzo

- In base alle normative vigenti, la qualità del calcestruzzo è individuata dai seguenti parametri:
- **Classe di resistenza** ⇒ sollecitazione in servizio
- **Classe di esposizione** (durabilità) ⇒ ambiente
- **Classe di consistenza** (lavorabilità) ⇒ complessità del getto
- **Diametro massimo inerte** ⇒ copriferro, interferro



Classe di resistenza dei leganti cementizi

CLASSE DI RESISTENZA (SIGLA)	RESISTENZA A COMPRESSIONE (N/MM ²) MINIMA GARANTITA A:		
	2 GIORNI	7 GIORNI	28 GIORNI
32.5	---	16	32.5
32.5R	10	---	32.5
42.5	10	---	42.5
42.5R	20	---	42.5
52.5	20	---	52.5
52.5R	30	---	52.5

Le normative sui cementi

- Le nuove norme cercano di assicurare la durabilità dei cementi prescrivendo le composizioni ottimali in determinate condizioni di ambiente
- La seconda lettera indica il tipo di ambiente con cui il getto è a contatto durante l'esercizio

Classe di esposizione	Ambiente	Tipo di struttura	Numero di sottoclassi
XO	Nessun rischio di corrosione (interni di edifici con UR molto bassa)	Non armata e armata	1
XC	Corrosione delle armature promossa dalla carbonatazione	Armata	4
XD	Corrosione delle armature promossa dai 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-disgelo	Non armata e armata	4
XA	Attacco chimico del calcestruzzo (incluso quello promosso dall'acqua di mare)	Non armata e armata	3

- La classe di esposizione XO riguarda ambienti (interni di edifici molto asciutti) in cui non esiste nessun rischio di degrado indipendentemente dalla composizione
- Lo spessore del copriferro deve essere 15mm per strutture in c.a. e 20mm in c.a.p.

Corrosione da carbonatazione

- ❑ Sono presenti 4 sottoclassi
- ❑ Viene specificato il tipo di ambiente, gli esempi delle strutture in cui si riscontrano le condizioni, il massimo rapporto a/c, la resistenza, il dosaggio minimo di cemento, e lo spessore di copriferro

- Quando le condizioni diventano più severe, deve diminuire il rapporto a/c, aumentare la resistenza, il dosaggio di cemento, lo spessore di copriferro

Classe di esposizione	Ambiente	Esempi di strutture che si trovano nella classe di esposizione	Max a/c	R _{ck} a/c	Dosaggio minimo di cemento (kg/m ³)	Spessore di copriferro*(mm) c.a. c.a.p.
XC1	Asciutto	• Interni di edifici con U.R. bassa	0.65	25	280	15 25
XC2	Bagnato raramente asciutto	• Strutture idrauliche • Fondazioni e strutture interrate	0.60	30	280	25 35
XC3	Moderatamente umido	• Interni di edifici con umidità relativa moderata/alta • Strutture esterne protette dal contatto diretto con la pioggia	0.55	37	280	25 35
XC4	Ciclicamente asciutto e bagnato	• Strutture esterne esposte all'acqua piovana	0.50	37	320	30 40

Corrosione da cloruri di origine non marina

- ❑ Le condizioni bagnato/asciutto sono le più critiche, perché la corrosione avviene se acqua e aria arrivano alternativamente sul ferro
- ❑ Lo spessore del copriferro è maggiore rispetto al caso della carbonatazione, perché nella corrosione da cloruri il tempo di vita coincide con il tempo di innescio

Classe di esposizione	Ambiente	Esempi di strutture che si trovano nella classe di esposizione	Max a/c	R _{ck} a/c	Dosaggio minimo di cemento (kg/m ³)	Spessore di copriferro*(mm) c.a. c.a.p.
XD1	Moderatamente umido	<ul style="list-style-type: none">• Strutture raramente a diretto contatto superficiale di spruzzi di acqua (pavimenti esposti a spruzzi occasionali di salamoia)	0.55	37	300	45 55
XD2	Bagnato raramente asciutto	<ul style="list-style-type: none">• Piscine natatorie• Vasche di trattamento di acque industriali contenenti cloruro• Parti di ponte	0.50	37	300	45 55
XD3	Ciclicamente asciutto e bagnato	<ul style="list-style-type: none">• Pavimenti esterni esposti occasionalmente ad acque salate• Pavimenti e solai di parcheggi coperti	0.45	45	350	45 55

ei materiali

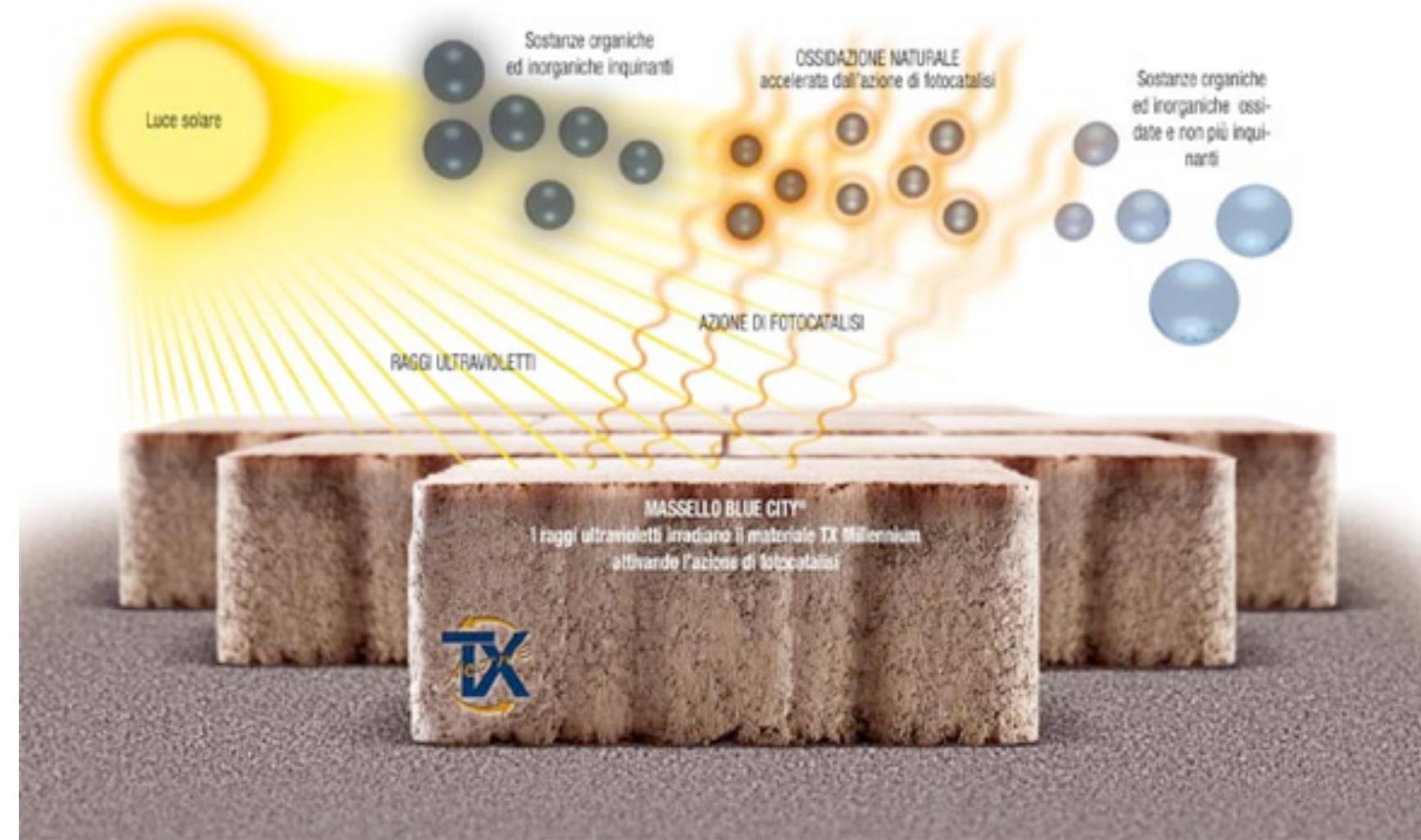
Strutture sottoposte a cicli gelo/disgelo

- Qui è previsto anche un tenore minimo di vuoti all'interno della struttura, che permetta di assorbire le variazioni dimensionali dei componenti
- Per quanto riguarda la XF₄, la presenza di sali disgelanti a base di cloruri (NaCl o CaCl₂) pone delle condizioni ancora più restrittive

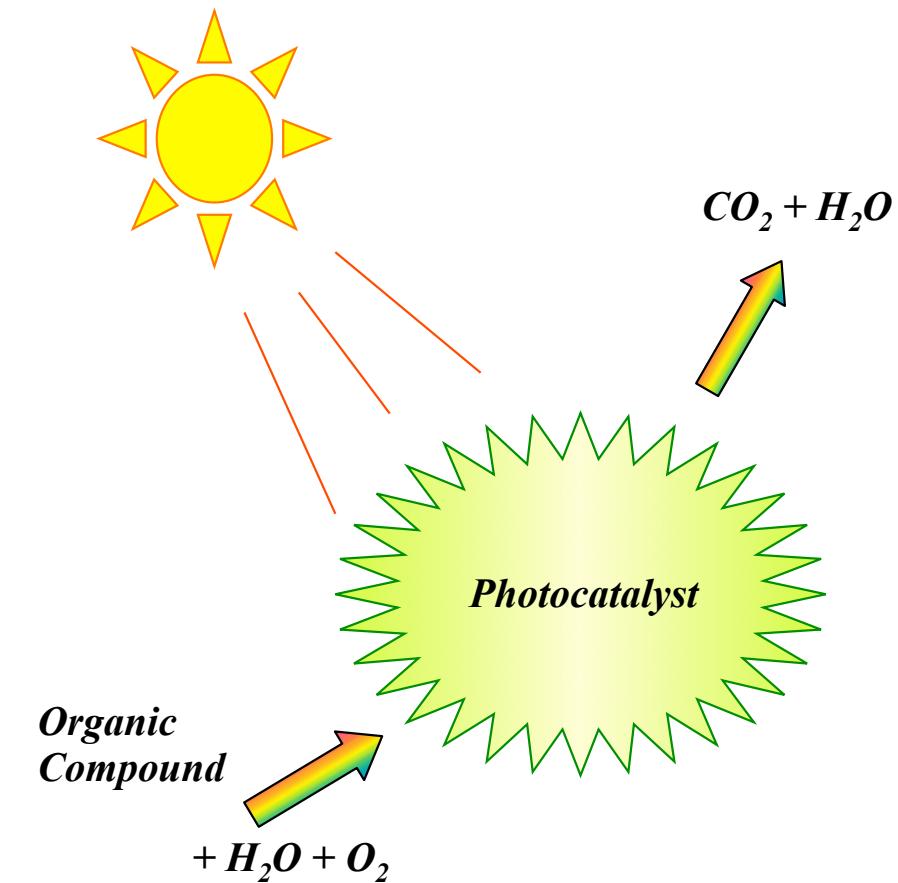
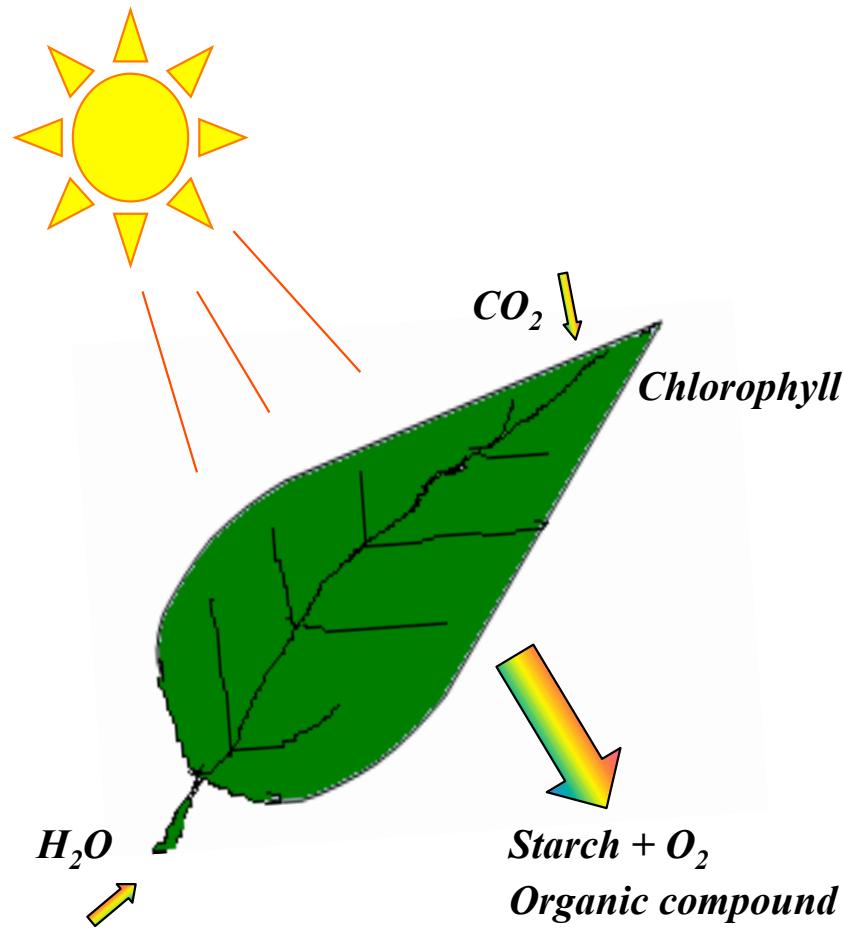
Classe di esposizione	Ambiente	Esempi di strutture che si trovano nella classe di esposizione	Minimo volume di aria (%)	Max a/c	R _{ck} a/c	Dosaggio minimo di cemento (kg/m ³)	Spessore di copriferro (mm) c.a.	Spessore di copriferro (mm) c.a.p.
XF1	Moderata saturazione con acqua in assenza di sali disgelanti	• Superfici verticali esposte alla pioggia ed al gelo	--	0,55	37	300	30	40
XF2	Moderata saturazione con acqua in presenza di sali disgelanti	• Superfici verticali di strutture stradali esposte a gelo e spruzzi contenenti sali disgelanti	4	0,55	30	300	45	55
XF3	Elevata saturazione con acqua in assenza di sali disgelanti	• Superfici orizzontali esposte alla pioggia ed al gelo	4	0,50	37	320	30	40
XF4	Elevata saturazione con acqua in presenza di sali disgelanti	• Superfici orizzontali e strutture verticali stradali esposte direttamente ai sali disgelanti	4	0,45	37	340	45	55

gia dei materiali

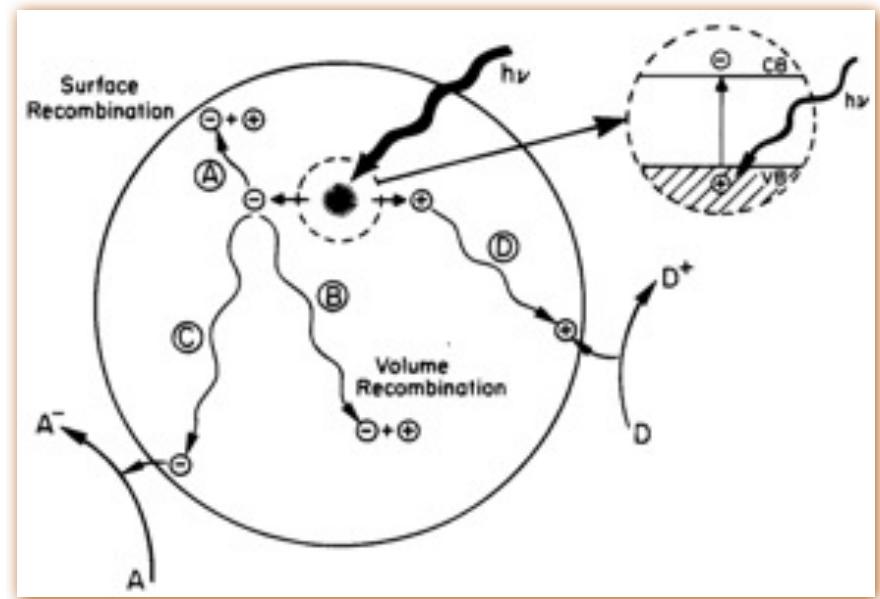
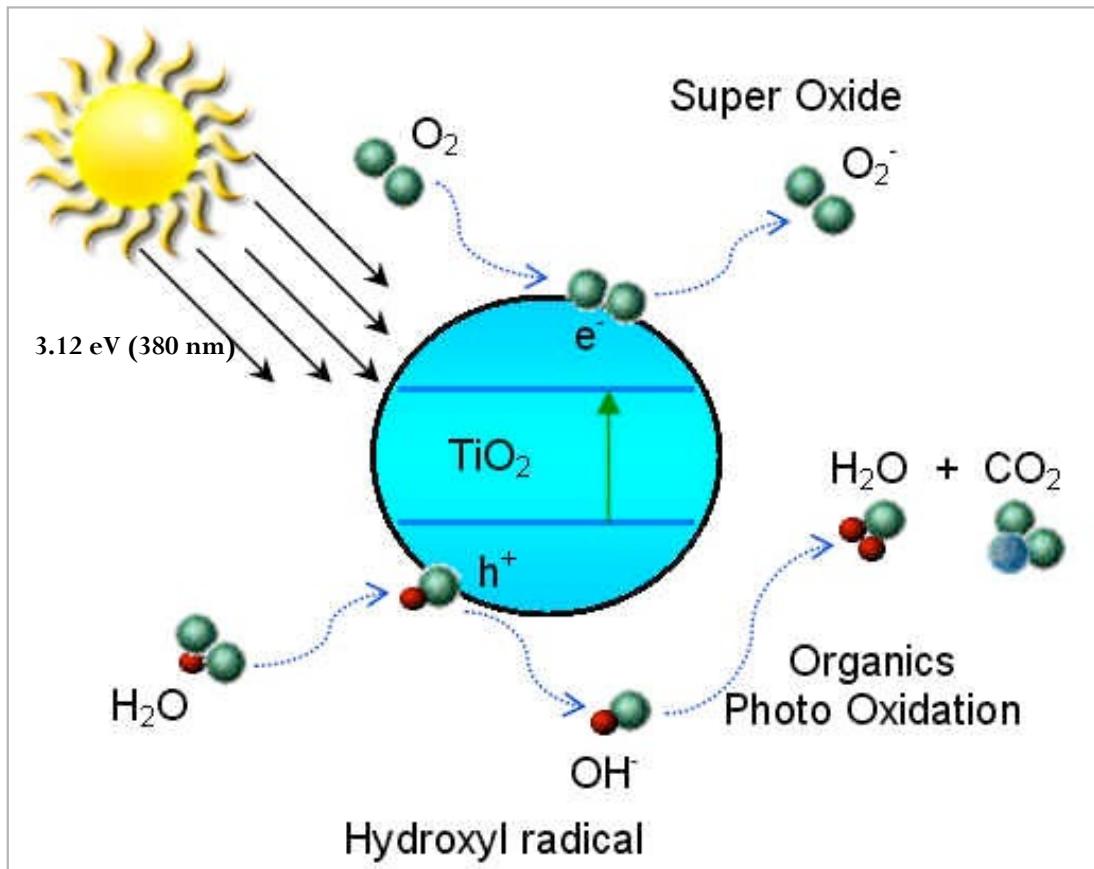
Il cemento photocatalitico TX di italcementi



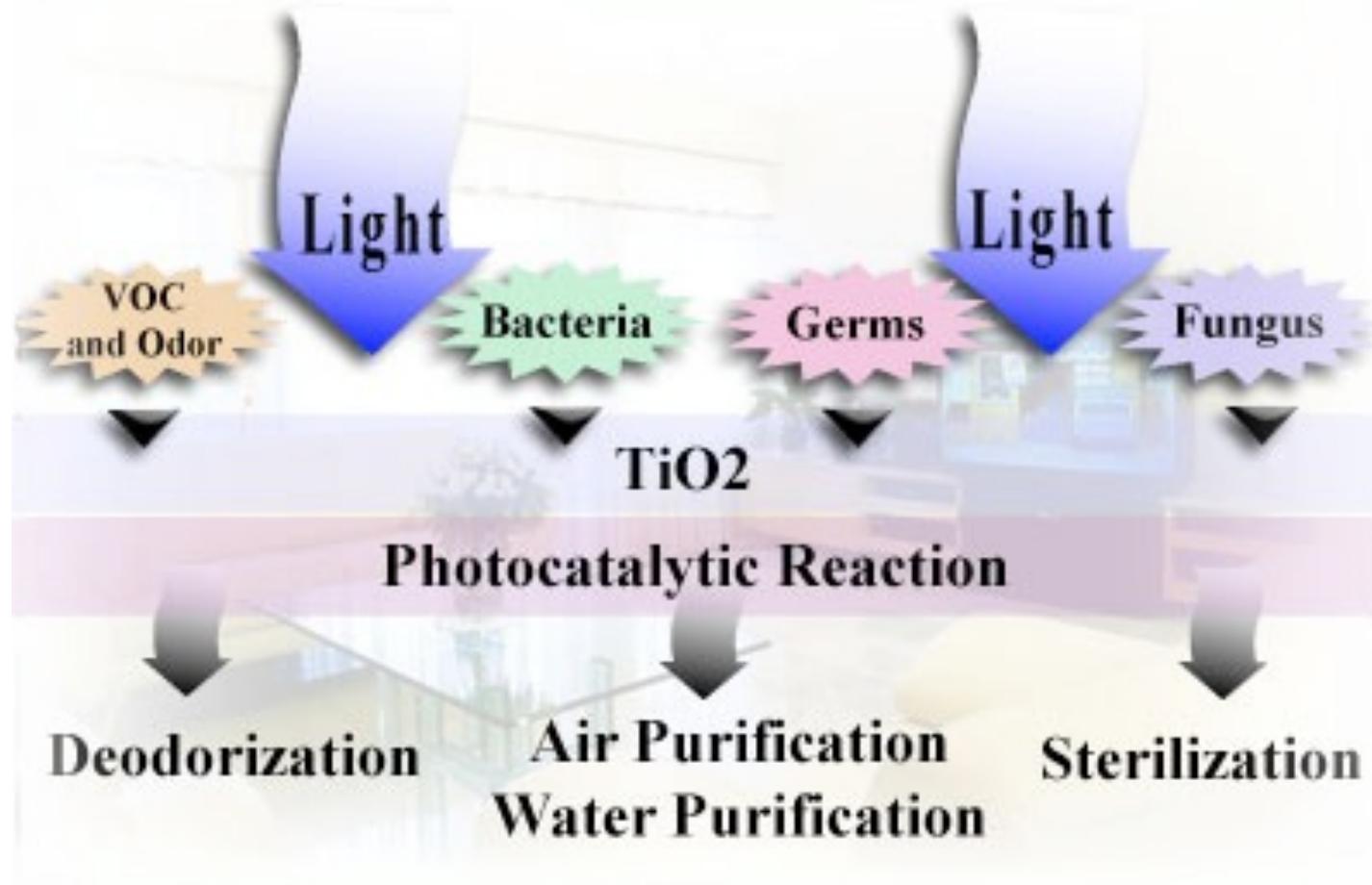
La fotocatalisi



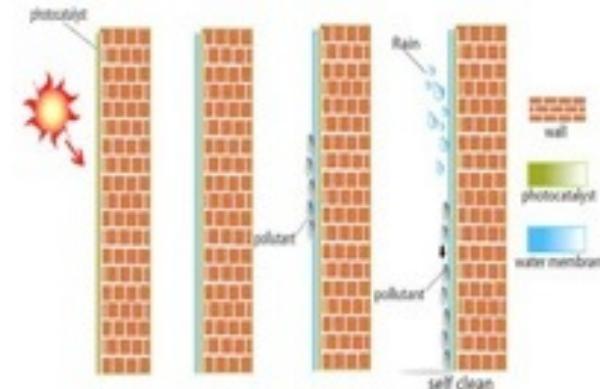
TiO₂ - Photocatalysis



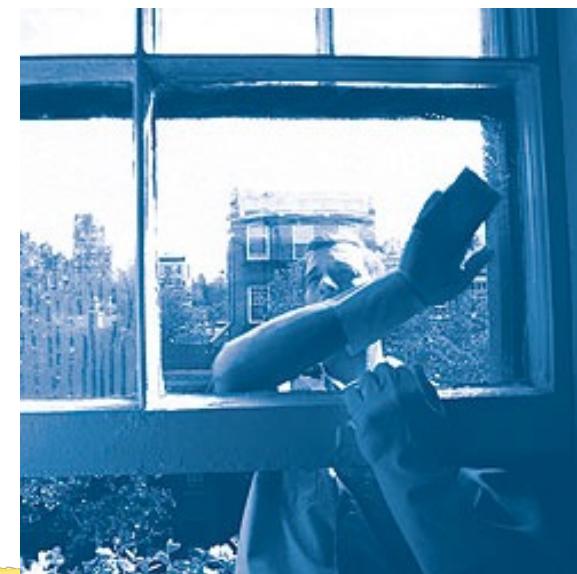
Possibili applicazioni della fotocatalisi



Effetto autopulente

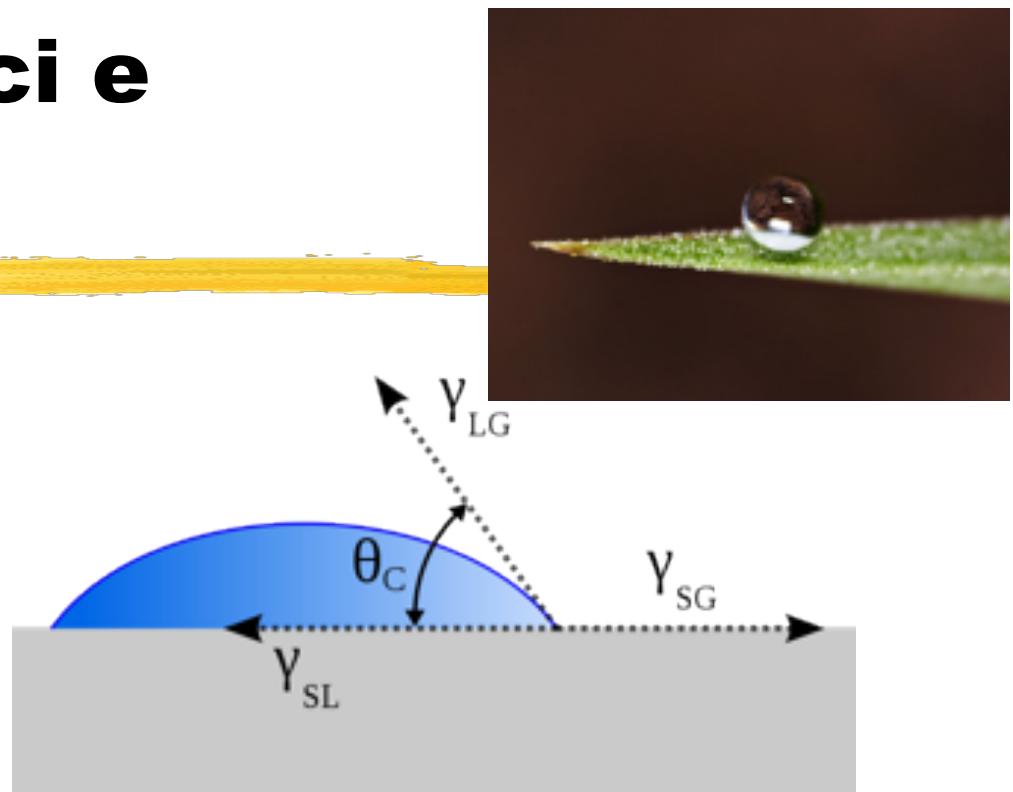


Exterior walls become self-cleaning and anti-soiling when coated with titanium dioxide photocatalyst. Dirt and pollutants cannot attach to the wall and washed away when rain.



Trattamenti idrofobici e idrofilici

L' angolo di contatto è una grandezza termodinamica descritta dall'angolo formato dall'incontro di un'interfaccia liquido-vapore con un'interfaccia liquido solido



Un basso angolo di contatto ($\theta < 90^\circ$) descrive una situazione in cui il solido è parzialmente bagnato dal liquido (idrofilicità, nel caso dell'acqua).
Un elevato angolo di contatto ($\theta > 90^\circ$) descrive una situazione in cui il solido è poco bagnato (idrofobicità, nel caso dell'acqua).

Bibliografia



- Il nuovo calcestruzzo, M. Collepardi, Tintoretto ed.
- M. Lucco Borlera, C. BRISI: "Tecnologia dei materiali e Chimica Applicata" Levrotto e Bella, Torino, 1992
- Portland Cement: Composition, Production and Properties di G.C. Bye, Hoepli, 1999
- wikipedia