

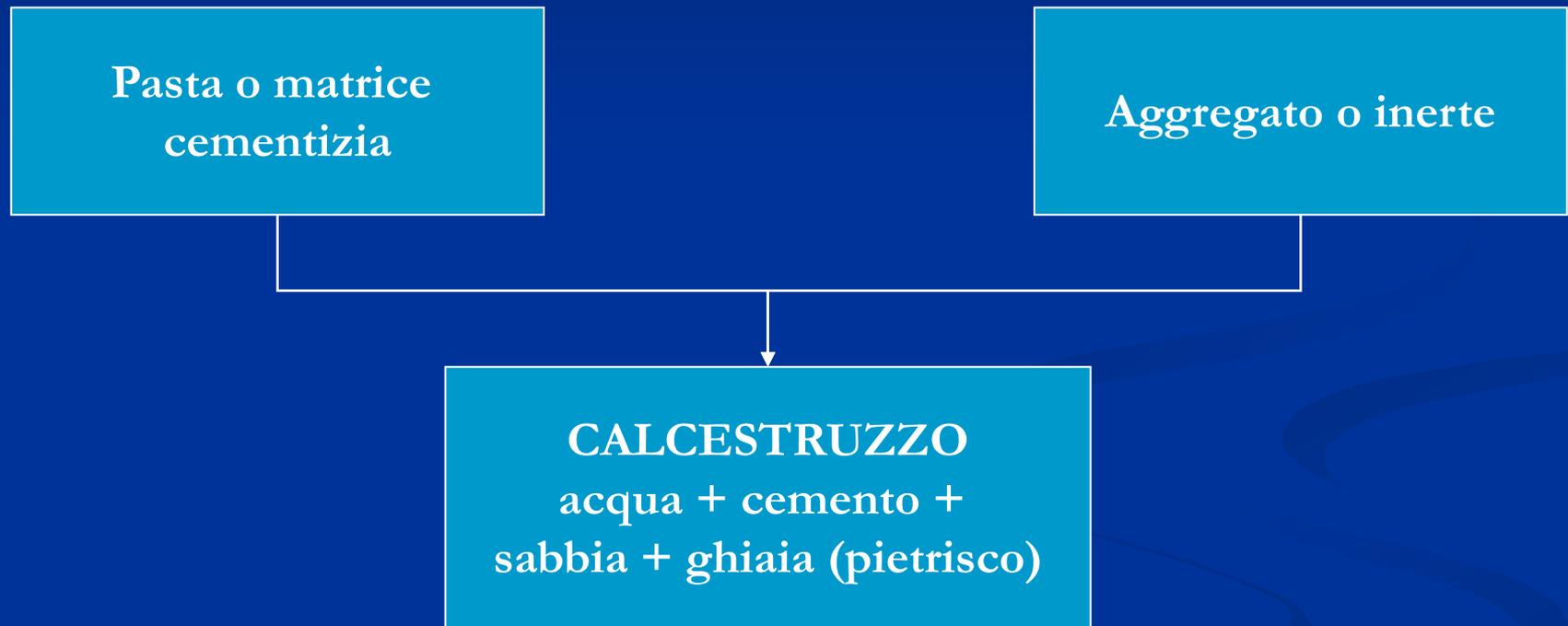
Lezione

Tecnica delle Costruzioni

Composizione del conglomerato cementizio

Conglomerato cementizio

Composizione



Il cemento

Cementi

Il cemento Portland

Il cemento portland, in forma di polvere grigia, è il prodotto di un processo industriale che consiste essenzialmente nella cottura in forno di terre naturali (clinker) e nella successiva macinazione in mulino in presenza di piccole quantità (4-8%) di gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o anidrite (CaSO_4).

Il prodotto così risultante è chiamato cemento Portland ed è in grado, mescolato con acqua (circa 30%) di formare una pasta facilmente modellabile che perde nel giro di qualche ora la sua iniziale plasticità (presa) e successivamente assume la consistenza rigida tipica delle pietre naturali (indurimento)

Se nel mulino non si aggiungesse gesso o anidrite, la polvere risultante perderebbe troppo rapidamente la sua iniziale plasticità per essere manipolato per un tempo sufficientemente lungo sul cantiere: per questo motivo il solfato di calcio prende il nome di regolatore della presa.

Cementi

Classi di resistenza

Classe di resistenza	Resistenza a compressione (N/mm ²) minima garantita a:		
	2 giorni	7 giorni	28 giorni
32.5 N	---	16	32.5
32.5 R	10	---	32.5
42.5 N	10	---	42.5
42.5 R	20	---	42.5
52.5 N	20	---	52.5
52.5 R	30	---	52.5

Cementi

Tipologie di cementi

Se nel mulino, oltre al regolatore della presa e al clinker, si introduce un'altra materia prima (pozzolana naturale, calcare) o una materia seconda proveniente dalle scorie di altre lavorazioni (cenere di carbone, loppa d'altoforno) il prodotto finale prende il nome di cemento Portland di miscela o cemento pozzolanico o cemento d'altoforno o cemento composito a seconda della composizione delle varie materie prime e seconde.

Cementi

Denominazione - UNI-EN 197/1

Tipi	Denominazione	Sigla	Clinker	Loppa d'altoforno	Micro silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare	Costituenti secondari
						Naturale P	Industriale Q	Silicica V	Calcica W			
			K	S	D					T	L	
III	Cemento d'altoforno	III-A	34-64	36-65								0-5
		III-B	20-34	66-80								
		III-C	5-19	81-95								
IV	Cemento pozzolanico	IV-A	65-89			← 11-35 →						0-5
		IV-B	45-64			← 36-55 →						0-5
V	Cemento composito	V-A	40-64	18-30		← 18-30 →						0-5
		V-C	20-39	31-50		← 31-50 →						

Pozzolana

La pozzolana da sola, ancorché finemente macinata, non indurisce al contatto con acqua. Essa non è quindi un legante idraulico. Tuttavia, in presenza di calce (almeno 20-30%) si comporta come un ottimo legante idraulico con prestazioni superiori rispetto alla sola calce.

Questo comportamento è dovuto ad un complesso di interazioni con la calce e con l'acqua di impasto. L'importanza della pozzolana è dovuta alla fortunata circostanza che il cemento Portland, a contatto con l'acqua d'impasto, libera progressivamente la calce e che quest'ultima diventa così disponibile per reagire con la pozzolana. Per tal motivo nella miscela di cemento Portland-pozzolana è indispensabile rispettare un certo proporzionamento tra i due ingredienti (almeno 40-50% di cemento Portland)

Pozzolana

Il successo del cemento pozzolanico è sostanzialmente basato sulle migliori prestazioni in alcune determinate circostanze:

- Minore sviluppo di calore apprezzato nei getti massivi (dighe, platee di fondazione di grosso spessore, ecc.) per effetto di ridotto quantitativo di clinker responsabile dell'effetto termico;
- Migliore resistenza all'attacco chimico dei solfati e delle acque marine;
- Mitigazione e talvolta l'eliminazione degli effetti legati alla reazione alcali-aggregato;
- Maggiore resistenza alla penetrazione dei cloruri apprezzata nelle opere in calcestruzzo armato destinate alle opere stradali esposte in inverno ai sali disgelanti contenenti cloruro.

Loppa d'altoforno

La loppa di origine industriale (scoria nella lavorazione dell'acciaio), purchè raffreddata rapidamente allo stato vetroso, presenta la peculiare caratteristica – rispetto alla pozzolana – di poter indurire sia pur lentamente, se finemente macinata e mescolata con acqua, anche in assenza di calce. In realtà, piccole aggiunte di cemento Portland ne accelerano l'indurimento, cosicché nella miscelazione della loppa con il cemento Portland è possibile far variare entro una percentuale molto ampia (da 6 a 95%) la percentuale della loppa nel legante.

Nota: è impossibile realizzare un cemento d'altoforno con 90% di loppa nelle classi di resistenza 42.5 R, 52.5 N e 52.5 R per la oggettiva difficoltà a raggiungere la resistenza meccanica a compressione di almeno 20 N/mm² in soli 2 giorni.

Altri ingredienti

- **Cenere volante** – residuo della combustione nelle centrali termiche a carbone

E' largamente impiegata nella produzione dei calcestruzzi autocompattanti e di quelli proiettati per via umida. Si presenta in forma di particelle pressoché sferiche (5-90 μm) piene o più spesso cave, capaci di fornire, proprio per la loro forma tondeggiante, la lavorabilità dei calcestruzzi, oltre che la pozzolanicità dei cementi. E' disponibile solitamente quella di tipo siliceo proveniente dalla combustione dei carboni bituminosi, mentre è di fatto disponibile solo in pochi paesi quella di tipo calcico residuo della combustione dei ligniti o dei carboni sub-bituminosi.

Altri ingredienti

- **Fumo di silice** – sottoprodotto del processo produttivo del silicio metallico o delle leghe metalliche ferro-silicio.

Si presenta in forma di microsfele con dimensioni prevalentemente al di sotto di $0.1\ \mu\text{m}$, e quindi capaci di allocarsi negli interstizi tra i granuli di cemento ($1\text{-}50\ \mu\text{m}$). La elevata finezza del fumo di silice non ne consente una percentuale d'impiego maggiore del 10% nel cemento per il conseguente aumento della richiesta d'acqua d'impasto. Quasi sempre abbinato ad un superfluidificante per compensare la eccessiva richiesta d'acqua – è per lo più impiegato come additivo in polvere per calcestruzzi speciali impermeabili ad alta resistenza meccanica a compressione, nei calcestruzzi proiettati per via umida e nei calcestruzzi autocompattanti.

Altri ingredienti

- **Pozzolana industriale** – scoria vetrosa delle lavorazioni di leghe metalliche non-ferrose
- **Scisto calcinato** – residuo della torrefazione di scisti argillosi impregnati di bitume
- **Calcare** – di origine naturale, unico ingrediente privo in realtà di caratteristiche pozzolaniche

La chimica del cemento

Cementi

Idratazione

Nel clinker sono presenti :

- SILICATI DI CALCIO (circa l'80%)
- ALLUMINATI DI CALCIO (circa il 20%)

In linea di massima, gli alluminati contribuiscono, per reazione con l'acqua, al fenomeno della resa mentre i silicati sono determinanti per l'indurimento.

Cementi

Chimica del clinker

Costituente mineralogico	Formula classica	Formula convenzionale nella chimica del cemento	Formula sintetica
Silicato tricalcico (alite)	Ca_3SiO_5	3CaO SiO_2	C_3S
Silicato bicalcico (belite)	Ca_2SiO_2	2CaO SiO_2	C_2S
Alluminato tricalcico (fase alluminosa)	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferro-alluminato tetracalcico (fase ferrica)	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	$4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Simboli sintetici:

C=CaO

S=SiO₂

A=Al₂O₃

F=Fe₂O₃

H=H₂O

N=Na₂O

K=K₂O

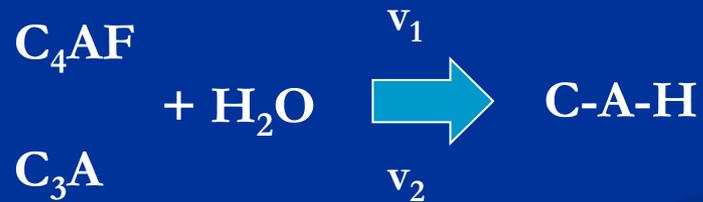
C=CO₂

M=MgO

Cementi

Chimica del clinker

Gli alluminati giocano un ruolo fondamentale nelle prime ore di reazione tra acqua e cemento:

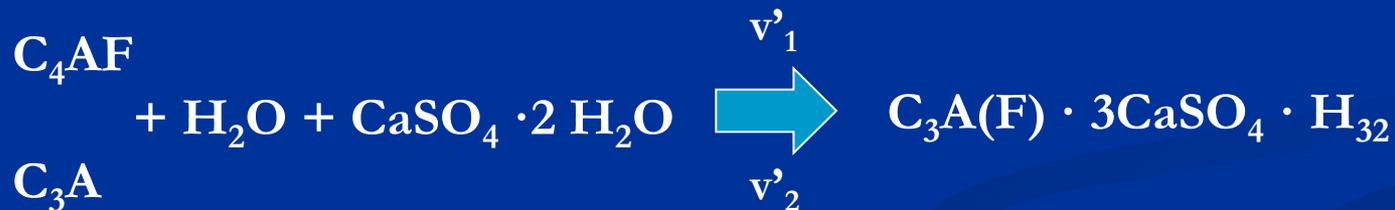


Il C_4AF e soprattutto il C_3A reagiscono rapidamente con l'acqua senza tuttavia contribuire significativamente allo sviluppo della resistenza meccanica se si eccettua un rapido ma piccolo incremento durante le prime ore.

Cementi

Il ruolo del gesso nella presa del cemento

Per ovviare all'inconveniente della presa rapida (< 60 min.) si ricorre all'aggiunta del gesso o dell'anidrite che hanno la specifica funzione di rallentare la velocità di idratazione degli alluminati.



La presenza di gesso o anidrite modifica non solo la velocità di reazione degli alluminati ($v'_1 < v_1$; $v'_2 < v_2$) ma anche il prodotto della reazione, ovvero l'ettringite anziché il C-A-H.

L'ettringite che si forma nelle prime ore di idratazione degli alluminati nel cemento si chiama “primaria”, per distinguerla da quella “secondaria” che si può formare successivamente in talune sfavorevoli circostanze.

Cementi

Il ruolo del gesso nella presa del cemento

La formazione dell'ettringite ritarda l'idratazione degli alluminati in quanto si deposita sulla superficie del C_3A e del C_4AF in forma di cristalli che impediscono temporaneamente il contatto dell'acqua con il C_3A e con il C_4AF .

La quantità di gesso è vincolata in tutte le normative del mondo da un limite superiore (3.5 -4 % come SO_3 a seconda dei cementi, pari a circa 7-8 % di gesso). Infatti, un eccesso di gesso – e quindi di ettringite- potrebbe provocare indesiderati fenomeni fessurativi per l'azione espansiva che accompagna la formazione di ettringite.

Cementi

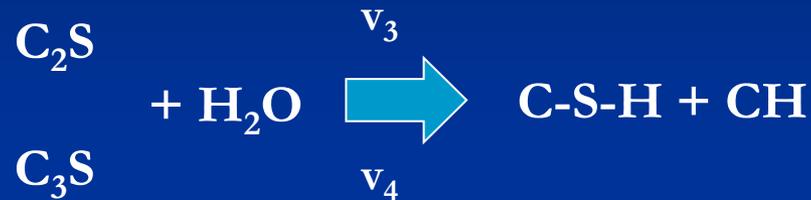
Idratazione dei silicati

Il C_3S è più rapido del C_2S sia nel reagire con l'acqua sia nello sviluppare la corrispondente resistenza meccanica. Tuttavia, per entrambi i silicati si registrano una reazione di idratazione ed una resistenza meccanica trascurabili durante le prime ore, così come si registra una pressoché identica resistenza meccanica elevata alle lunghissime stagionature (anni).

Il diverso comportamento del C_3S e del C_2S alle brevi stagionature (mesi) fa sì che in un cemento Portland la quantità di C_3S sia generalmente molto maggiore di quella del C_2S . Fanno eccezione i cementi belitici da utilizzarsi nei casi (per es. nelle dighe) in cui le prestazioni meccaniche ad 1 e 28 giorni non sono così importanti ed è da preferirsi un ridotto sviluppo di calore di idratazione.

Cementi

Idratazione dei silicati



Dei due prodotti solo il C-S-H è determinante per l'indurimento, mentre la calce contribuisce in modo trascurabile a questo processo. Il C-S-H, ancorché si presenti in forme particellari diverse, è di natura prevalentemente fibrosa. Con il progredire della reazione, le fibre del C-S-H formatesi sui granuli di C_3S e C_2S adiacenti, prima si toccano e poi si intrecciano tra loro.

Cementi

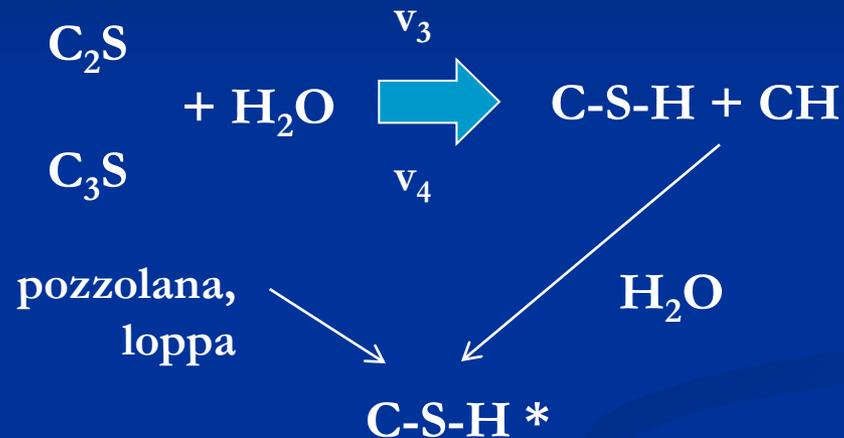
Ruolo della calce

Sebbene la calce, prodotta per idratazione dei silicati, non contribuisca di per sé allo sviluppo della resistenza meccanica per la sua morfologia non-fibrosa, essa gioca un ruolo altamente positivo in altri contesti:

- Produzione dei cementi pozzolanici e d'altoforno
- Protezione di armatura dalla corrosione

Cementi

Ruolo della calce nei cementi pozzolanici e d'altoforno



Il CSH formatosi per la reazione pozzolanica è cronologicamente secondario rispetto a quello primario che si produce direttamente per idratazione dei silicati. Esso si forma successivamente perché la reazione della pozzolana o della loppa con la calce è più lenta del processo di idratazione dei silicati e perché la sua formazione richiede che si accumuli un po' della calce attraverso la reazione di idratazione dei silicati. A seguito della formazione di CSH il sistema risulta più ricco in materiale fibroso e quindi meno poroso.

Cementi

Ruolo della calce nella protezione delle armature

In un ambiente basico, come quello che si produce nell'acqua satura di calce che riempie i pori capillari ($\text{pH} > 12.5$) l'armatura risulta ricoperta da un film di ossido ferrico denso e compatto che la protegge dalla corrosione. Quando per effetto della carbonatazione il CH è completamente trasformato in carbonato di calcio, il pH scende al di sotto di 9 e viene a mancare l'ambiente fortemente basico indispensabile alla condizione della passivazione dei ferri d'armatura.

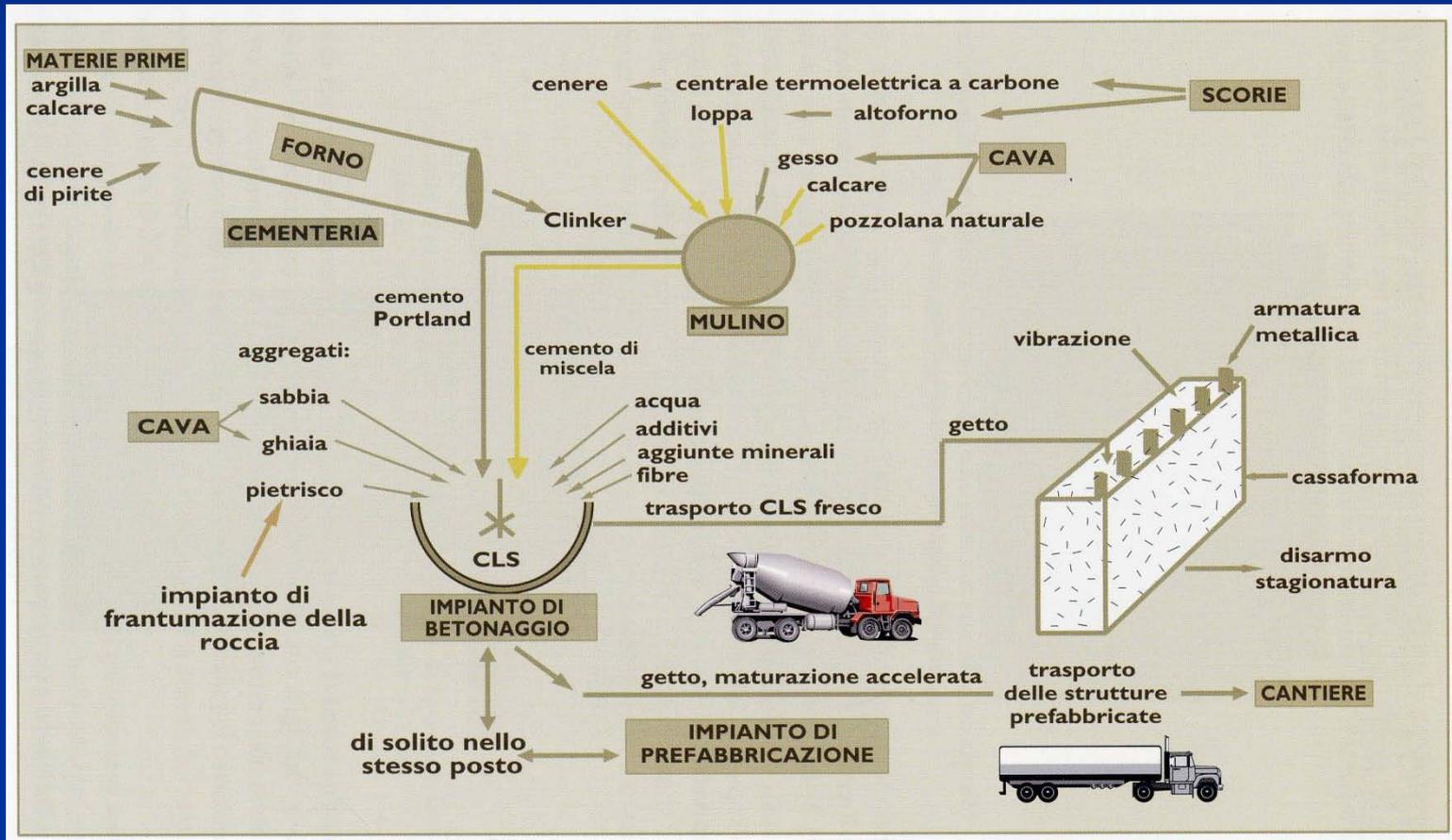
Da questo punto di vista, i cementi pozzolanici e d'altoforno sono potenzialmente più a rischio perché gli effetti della reazione pozzolanica si sommano a quelli della carbonatazione. Cionondimeno essi si comportano generalmente molto bene perché:

- la maggiore produzione di CSH favorisce la formazione di una matrice cementizia meno porosa e quindi meno penetrabile dall'anidride carbonica;
- è presente sempre una piccola quantità di calce sufficiente a saturare la soluzione acquosa che riempie i pori capillari.

Il processo produttivo del conglomerato cementizio

Conglomerato cementizio

Realizzazione



Conglomerato cementizio

Ingredienti minori

Oltre agli ingredienti principali – acqua, cemento, sabbia, aggregato grosso – nella produzione del calcestruzzo vengono impiegati altri ingredienti minori (per quantità ma non per importanza) che includono

- **additivi liquidi,**
- **aggiunte minerali in polvere,**
- **fibre metalliche e polimeriche,**

con l'obiettivo di migliorare le prestazioni rispetto a quelle del calcestruzzo ordinario o produrre calcestruzzi speciali

Conglomerato cementizio

Additivi chimici

- Acceleranti
- Ritardanti
- Aeranti
- Inibitori di corrosione
- Battericidi
- Idrofobizzanti
- Anti-ritiro
- Superfluidificanti (e fluidificanti)

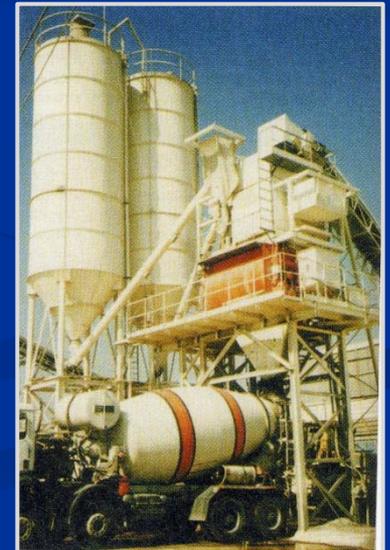
Opere in conglomerato cementizio

Processo produttivo

- Produzione del calcestruzzo fresco. Il calcestruzzo fresco può essere prodotto direttamente in cantiere o anche trasportato dall'impianto di betonaggio con autobetoniera (calcestruzzo preconfezionato),

Nelle centrali di betonaggio più attrezzate la produzione del calcestruzzo è organizzata con un controllo automatico che va dal carico dei vari ingredienti alla stampa della bolla di accompagnamento per l'autobetoniera.

- Getto (mediante pompaggio o caduta lungo una canaletta)
- Compattazione (mediante vibrazione) all'interno di cassaforme (contenitori in legno, acciaio o plastica)
- Sformatura
- Stagionatura



Opere in conglomerato cementizio

Ruoli e responsabilità

- Committente
- Progettista
- Direttore dei Lavori
- Collaudatore
- Laboratorio Ufficiale
- Appaltatore
- Produttore di calcestruzzo preconfezionato

Lavorabilità e compattabilità del conglomerato cementizio

Conglomerato cementizio

Lavorabilità

La lavorabilità è la caratteristica che indica la capacità del calcestruzzo a muoversi e compattarsi.

La mobilità del calcestruzzo è importante per facilitare il trasporto, il getto e l'avvolgimento dei ferri d'armatura all'interno delle cassaforme.

La compattabilità è importante per agevolare, per effetto della vibrazione, la fuoriuscita dell'aria intrappolata dal calcestruzzo fresco ed assicurare la massima densità possibile del materiale indurito, oltre che il massimo contatto superficiale tra ferri e calcestruzzo.

Conglomerato cementizio

Lavorabilità

La lavorabilità è in genere misurata attraverso lo slump test, ovvero attraverso la determinazione dell'abbassamento del calcestruzzo appena sformato da un tronco di cono metallico (cono di Abrams) rispetto all'altezza dello stesso calcestruzzo costipato in modo standardizzato all'interno del cono alto 300 mm .



Conglomerato cementizio

Lavorabilità

La classe di consistenza, identificata da un codice (da S1 a S5), corrisponde ad un intervallo di lavorabilità espressa attraverso la misura dello slump.

Classe di consistenza	Slump (mm)	Denominazione corrente	Applicazioni
S1	10-40	Terra umida	Pavimenti messi in opera con vibro-finitrice
S2	50-90	plastica	Strutture circolari (silos, ciminiere) messe in opera con casseri rampanti
S3	100-150	Semi-fluida	Strutture non armate o poco armate o con pendenza
S4	160-210	Fluida	Strutture mediamente armate
S5	>210	Super-fluida	Strutture fortemente armate, di ridotta sezione e/o complessa geometria

Conglomerato cementizio

Lavorabilità

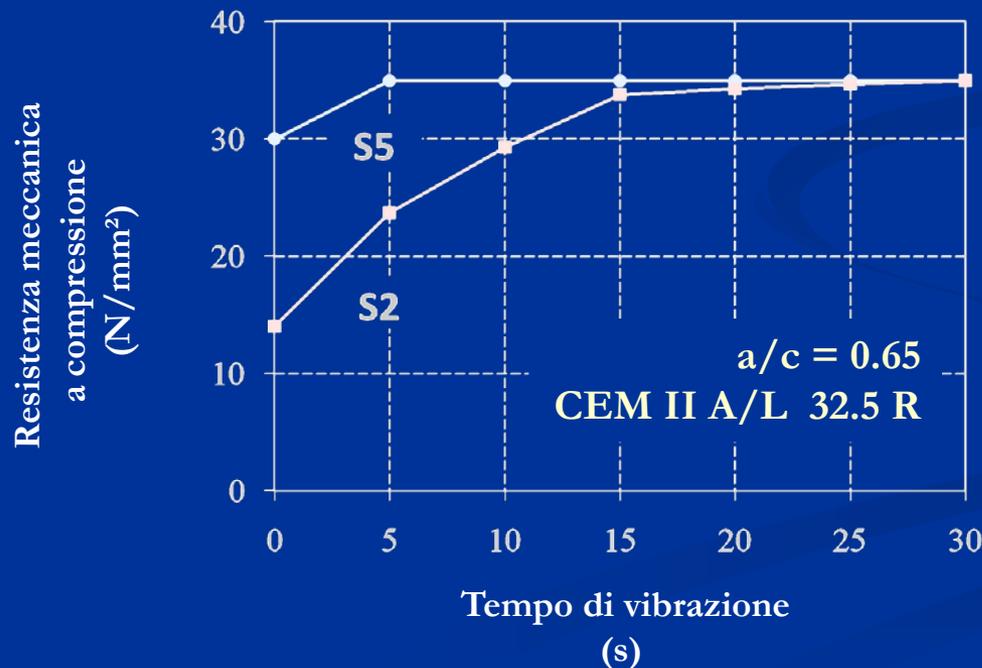
Un altro metodo per misurare la lavorabilità è il cosiddetto metodo Vebè, particolarmente adatto per calcestruzzi asciutti. Il calcestruzzo è versato in un cono di Abrams; viene quindi ricoperto con un disco trasparente e sottoposto a vibrazione su un tavolo vibrante standard; la vibrazione viene arrestata quando l'operatore osserva che il disco trasparente è tutto a contatto del calcestruzzo. Il tempo impiegato esprime la difficoltà di compattare il calcestruzzo.



Conglomerato cementizio

Compattazione e resistenza meccanica

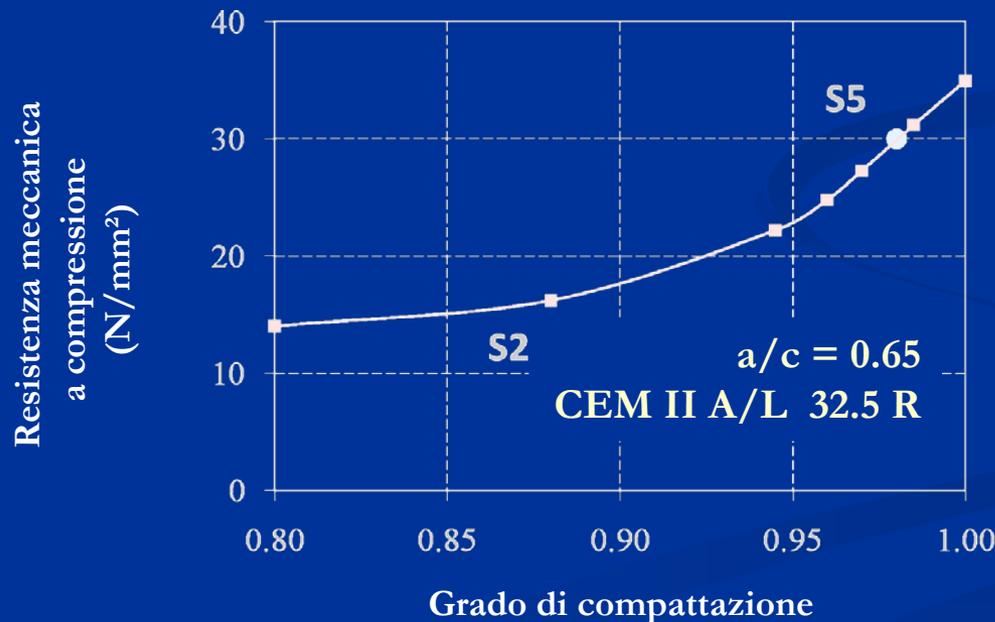
Un calcestruzzo più lavorabile è anche meno dipendente dalla efficacia della compattazione in opera, cioè dalla qualità della manodopera sul cantiere.



Conglomerato cementizio

Compattazione e resistenza meccanica

Per quantificare il grado di compattazione conseguito in un cls gettato in opera si può ricorrere molto semplicemente alla misura della massa volumica di una carota estratta dalla struttura e confrontarla con quella del corrispondente cls compattato a rifiuto di un provino confezionato in corso d'opera.



Porosità

Conglomerato cementizio

Porosità

Il calcestruzzo, almeno quello convenzionale, tradizionalmente impiegato nelle opere dell'architettura e dell'ingegneria civile, è un materiale poroso.

Come in tutti i materiali da costruzione, la porosità condiziona le proprietà del calcestruzzo ed in particolare:

- **La resistenza meccanica**
- **Il modulo elastico**
- **La permeabilità**
- **La durabilità**

Conglomerato cementizio

Tipi di porosità

1. dovuta alla insufficiente compattazione del conglomerato e quindi alla incompleta espulsione di aria intrappolata dal calcestruzzo fresco; si tratta di macrovuoti visibili ad occhio nudo da circa 1 mm a qualche decina di mm;
2. eventualmente presente all'interno degli aggregati lapidei per una massa volumica apparente inferiore a quella assoluta;
3. generata dall'inglobamento di aria, in forma di microbolle sferiche di circa 100-300 μm visibili al microscopio ottico, grazie alla presenza di additivi aeranti;
4. presente tra le particelle che compongono la pasta di cemento come pori di forma irregolare, con dimensione compresa tra 0.1 μm e 10 μm e visibili al microscopio elettronico (porosità capillare)
5. presente all'interno dei prodotti idratati solidi, ed in particolare del C-S-H. Nota con il nome di porosità del gel, ha dimensione di 1 – 10 μm . Non è visibile con il microscopio elettronico ma determinabile attraverso misure di adsorbimento di sostanze gassose.

Conglomerato cementizio

Porosità capillare e resistenza meccanica

La porosità del gel ammonta al 28% del volume occupato dalle particelle solide della pasta cementizia e non può essere sostanzialmente modificata. Al contrario, la porosità capillare può essere significativamente modificata attraverso il rapporto acqua-cemento (a/c) e/o il grado di saturazione α , cioè la frazione di cemento idratato.

La dipendenza della porosità capillare dai due fattori è stata quantificata con la teoria di Powers:

$$V_p = 100 a/c - 36.15 \alpha$$

dove V_p è il volume dei pori capillari in litri per ogni 100 kg di cemento.

Powers ha anche elaborato con un suo modello matematico la relazione che lega la resistenza meccanica del calcestruzzo, il rapporto a/c e il grado di saturazione.

$$R_c = K \left(\frac{0.6790\alpha}{0.3175\alpha + a/c} \right)$$

Conglomerato cementizio

Porosità capillare e durabilità

La relazione tra la porosità e la durabilità è funzione del tipo di porosità. In linea di massima si può affermare che la porosità continua nuoce alla durabilità mentre quella discontinua, purché distribuita in una matrice densa e poco porosa, è ininfluyente o giova poco alla durabilità.

- I macrovuoti, dovuti a difetti di compattazione del calcestruzzo fresco potrebbero collegare i ferri d'armatura con l'ambiente esterno e costituiscono, pertanto, un sistema di pori altamente pericolosi per l'integrità della struttura.
- La porosità capillare costituisce un altro tipo di porosità capace di favorire l'accesso di agenti ambientali aggressivi.
- La durabilità del calcestruzzo è invece indifferente al sistema di pori contenuti all'interno degli inerti.
- Infine, una porosità altamente benefica alla durabilità del calcestruzzo è rappresentata dalle microbolle d'aria non collegate tra loro e introdotte attraverso additivi aeranti.

Bleeding, sedimentazione e segregazione

Conglomerato cementizio

Bleeding, sedimentazione e segregazione

Il **bleeding** indica generalmente la raccolta d'acqua sulla superficie del calcestruzzo. In realtà a volte può comportare il deposito localizzato d'acqua all'interno di una struttura in calcestruzzo. Questo secondo aspetto, non manifesto e per questo più insidioso, comporta la formazione di punti deboli e più in generale di eterogeneità all'interno di una struttura in calcestruzzo.

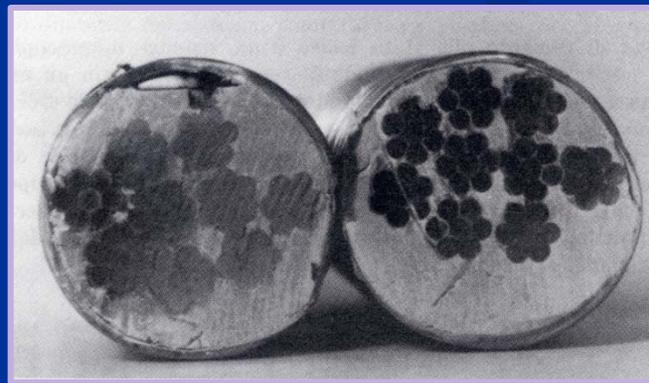
Il bleeding è sempre accompagnato dalla **sedimentazione** sul fondo del contenitore degli elementi solidi più grossi e più pesanti.

L'insieme dei due fenomeni (bleeding e sedimentazione) prende il nome di **segregazione**.

Conglomerato cementizio

Bleeding nelle malte cementizie

Le boiacche di cemento molto fluide (con rapporto acqua/cemento compreso tra 1 e 2) sono impiegate per il riempimento di vuoti all'interno di un sistema da consolidare. In queste applicazioni, il bleeding comporta ovviamente un incompleto riempimento del sistema da consolidare o proteggere. Infatti, a indurimento avvenuto l'acqua di bleeding rappresenta una porzione destinata a rimanere vuota per effetto della successiva evaporazione .



Sezioni di guaine con cavi post-tesi: a sinistra incompleto riempimento per effetto del bleeding e a destra perfetto riempimento. (tratto da "Il nuovo calcestruzzo", M. Collepardi - Edizioni Tintoretto)

Conglomerato cementizio

Bleeding nelle malte cementizie

Per la riduzione del bleeding si può agire su :

- **Finezza del cemento**
- **Aggiunte minerali**
Bentonite, Fumo di silice, Silice colloidale
- **Additivi chimici**
Superfluidificanti, Aeranti, Acceleranti, Addensanti o Modificatori di viscosità
- **Modalità di miscelazione**

Conglomerato cementizio

Bleeding e adesione ferro-calcestruzzo

L'acqua che risale per effetto del bleeding può trovare lungo il suo cammino verticale una serie di ostacoli: i ferri di armatura e gli aggregati lapidei.

In particolare, se parte dell'acqua di bleeding rimane intrappolata al di sotto dei ferri di armatura disposti ortogonalmente rispetto alla direzione di risalita, riduce la superficie di contatto tra ferri di armatura e calcestruzzo. In seguito, per l'evaporazione e la migrazione di quest'acqua, si crea di fatto un vuoto che corre lungo i ferri disposti orizzontalmente. L'aderenza tra ferro e calcestruzzo può essere ridotta e la protezione dalla corrosione delle armature metalliche può essere compromessa per il facile accesso degli agenti aggressivi.

Specifiche di progetto del conglomerato cementizio

Specifiche per il calcestruzzo

La prescrizione del calcestruzzo all'atto del progetto deve essere caratterizzata almeno mediante :

- CLASSE DI RESISTENZA
- CLASSE DI CONSISTENZA
- DIAMETRO MASSIMO DELL'AGGREGATO

Specifiche per il calcestruzzo

La classe di resistenza è contraddistinta dai valori caratteristici delle resistenze cubica R_{ck} e cilindrica f_{ck} a compressione uniassiale, misurate su provini normalizzati e cioè rispettivamente su

- cilindri di diametro 150 mm e di altezza 300 mm
- cubi di spigolo 150 mm

La resistenza caratteristica a compressione è definita come la resistenza per la quale si ha il 5% di probabilità di trovare valori inferiori. Nelle presenti norme la resistenza caratteristica designa quella dedotta da prove eseguite a 28 giorni di maturazione. Si dovrà tener conto degli effetti prodotti da eventuali processi accelerati di maturazione. In tal caso potranno essere indicati altri tempi di maturazione a cui riferire le misure di resistenza ed il corrispondente valore caratteristico.

Forme di degrado del conglomerato cementizio armato

Conglomerato cementizio

Degrado

➤ **CORROSIONE DELLE ARMATURE**

Corrosione promossa dalla carbonatazione

Corrosione promossa dal cloruro

➤ **ATTACCO SOLFATICO**

Attacco solfatico esterno

Attacco solfatico interno

➤ **REAZIONE ALCALI-SILICE**

➤ **FORMAZIONE DEL GHIACCIO**

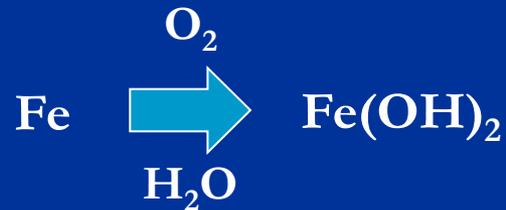
➤ **DILAVAMENTO DELLA SUPERFICIE**

➤ **MICROFESSURAZIONI DA VARIAZIONI IGRO-TERMICHE O CARICHI IN SERVIZIO**

Conglomerato cementizio

Corrosione delle armature metalliche

La corrosione delle armature metalliche consiste nella trasformazione dell'acciaio in ruggine formata da ossidi ferrici porosi, incoerenti e voluminosi



Il processo é alimentato dalla presenza di aria umida che contiene gli ingredienti necessari alla corrosione. Tuttavia, perché possa decorrere in modo apprezzabilmente pericoloso, il processo corrosivo deve essere attivato da uno dei seguenti meccanismi

- **CARBONATAZIONE DEL CALCESTRUZZO**
- **PENETRAZIONE DEL CLORURO**

Conglomerato cementizio

Corrosione delle armature metalliche

Per lo sviluppo di Ca(OH)_2 a seguito della idratazione del cemento, si stabiliscono nel calcestruzzo condizioni di forte basicità ($\text{pH} > 13$) particolarmente favorevoli alla buona conservazione delle armature metalliche; in queste condizioni, infatti, sul ferro si forma un film di ossido ferrico impermeabile ed adesivo al substrato metallico. In questa situazione la pellicola impermeabile di ossido impedisce all'ossigeno ed all'umidità di arrivare all'armatura che si trova sotto il film impermeabile e pertanto impedisce la formazione della ruggine.

Quando però la zona di calcestruzzo che protegge i ferri è completamente penetrata dall'anidride carbonica, la situazione cambia radicalmente. Infatti, l'anidride carbonica annulla la basicità a seguito del processo di carbonatazione che consiste nella trasformazione della calce in carbonato di calcio:



Conglomerato cementizio

Corrosione delle armature metalliche

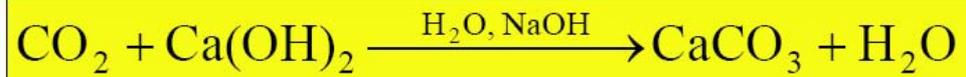
A seguito della neutralizzazione della calce, il pH scende a valori di circa 9 ed il ferro, già a valori di pH minori di 11, perde la sua passività. In sostanza, il film di ossido inizialmente protettivo diventa poroso ed incoerente se il pH scende sotto 11 e non è più in grado di bloccare l'accesso dell'ossigeno e dell'umidità al substrato metallico.

In queste condizioni, a seguito della trasformazione del ferro in ruggine (circa 6-7 volte più voluminosa del metallo), il copriferro viene prima fessurato e poi espulso.

La carbonatazione non danneggia il calcestruzzo e neppure danneggia direttamente i ferri di armatura. Essa crea solo le condizioni favorevoli al processo di corrosione da parte dell'ossigeno e dell'umidità, attraverso la diminuzione del pH e della conseguente perdita di impermeabilità del film di ossido ferrico sulla superficie delle barre di acciaio.

Conglomerato cementizio

Test con fenolftaleina



Conglomerato cementizio

Corrosione delle armature metalliche

Come ci si può difendere dalla corrosione promossa dalla carbonatazione ?

1. Riducendo il rapporto a/c , perché questa riduzione rende la matrice cementizia meno porosa, più compatta e quindi meno penetrabile dall'anidride carbonica, quanto dall'ossigeno e dall'acqua.
2. Aumentando lo spessore del copriferro

Conglomerato cementizio

Corrosione da cloruri

La depassivazione delle armature metalliche può avvenire anche per la presenza dello ione Cl^- sulla superficie dei ferri di armatura, a seguito della esposizione ai cloruri presenti nei sali disgelanti applicati d'inverno sulle pavimentazioni o nelle acque marine.

La penetrazione del cloruro dall'ambiente attraverso il copriferro può avvenire attraverso due distinti meccanismi:

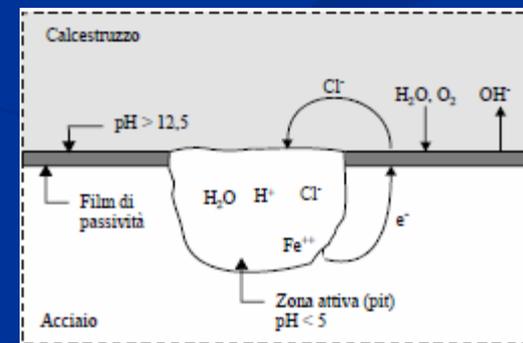
- **ASSORBIMENTO PER SUZIONE CAPILLARE.** L'acqua funge da veicolo per i sali in essa eventualmente disciolti; l'assorbimento avviene per contatto dell'acqua con il calcestruzzo asciutto, o comunque insaturo di umidità, e si esaurisce in un tempo relativamente breve.
- **DIFFUSIONE.** Il cloruro si diffonde attraverso il calcestruzzo nei pori capillari saturi di acqua. In questo caso l'acqua ristagna nei pori e il cloruro si muove lungo la direzione ortogonale alla superficie del calcestruzzo sotto la spinta di un gradiente di concentrazione.

Conglomerato cementizio

Corrosione da cloruri

Corrosione da cloruri

Attacco localizzato (*pitting*)



Conglomerato cementizio

Attacco solfatico esterno

Lo ione $\text{SO}_4^{=}$ può essere presente nei terreni e nelle acque a contatto con strutture in calcestruzzo (fondazioni, gallerie, pali, tubazioni interrato, vasche, piscine, ecc.) E' indispensabile, comunque, la presenza di acqua per il trasporto dello ione dal terreno all'interno del calcestruzzo attraverso i pori capillari o altri vuoti (microfessurazioni o macrovuoti).

La prima azione dello ione è quella di interagire con la $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e/o C-S-H per produrre il gesso



Conglomerato cementizio

Attacco solfatico esterno

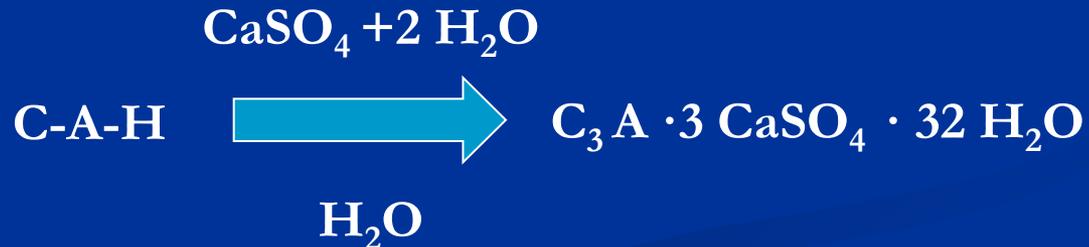
La reazione provoca fenomeni di rigonfiamento e delaminazione superficiale per la trasformazione di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nel più voluminoso gesso. L'attacco solfatico può anche provocare un calo di resistenza meccanica e di adesione a causa del processo di decalcificazione che, dopo la calce, coinvolge anche il C-S-H. La perdita di calcio del C-S-H comporta la perdita di resistenza meccanica per la trasformazione del C-S-H in S-H priva di capacità legante:



Conglomerato cementizio

Attacco solfatico esterno

Il gesso prodotto può reagire con gli alluminati idrati (C-A-H) e formare ettringite

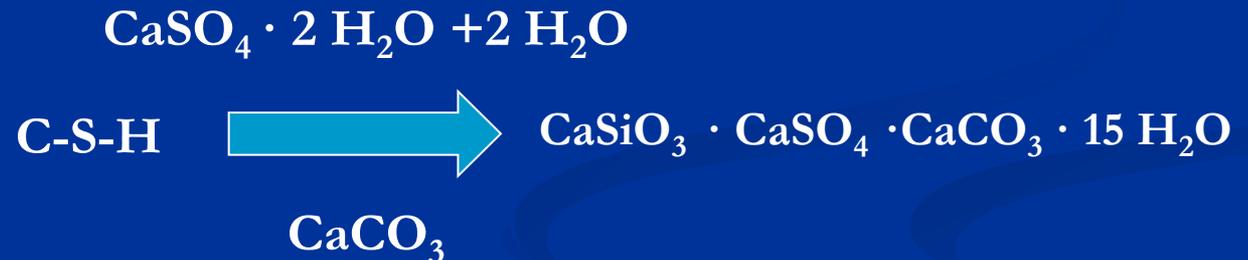


La formazione di ettringite provoca rigonfiamenti, delaminazioni, fessurazioni e distacchi per l'aumento di volume associato alla reazione. Questo tipo di ettringite si chiama secondaria per distinguerla da quella che si forma per reazione degli alluminati anidri con l'acqua ed il gesso aggiunto per regolare la presa del cemento.

Conglomerato cementizio

Attacco solfatico esterno

In particolari condizioni climatiche (fredde e umide sotto i 10° C con UR > 95%) e in presenza di CaCO₃ finemente disperso nella pasta cementizia, l'attacco solfatico si esplica attraverso la formazione della thaumasite:



La formazione di thaumasite è il più devastante tra tutti gli attacchi solfatici.

Conglomerato cementizio

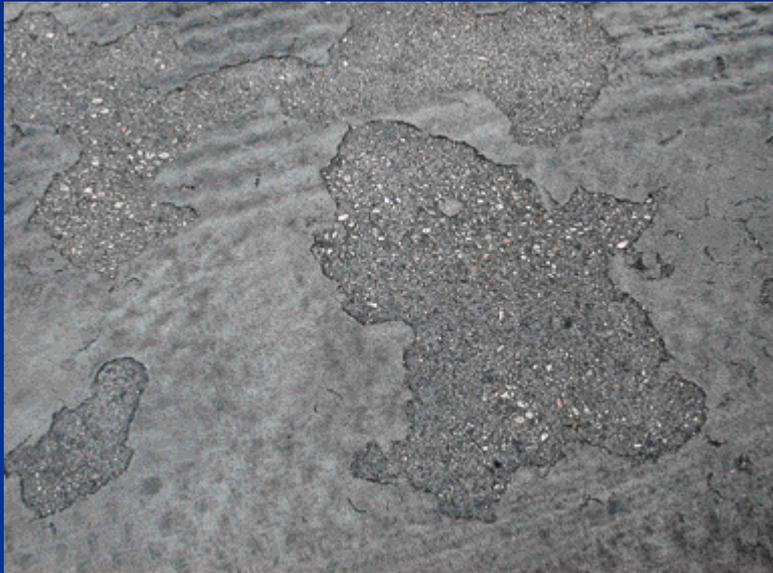
Attacco solfatico interno

Il solfato, oltre che come gesso nel cemento per la regolazione della presa, può essere presente nell'aggregato in forma di gesso o anidrite se impropriamente contaminato da impurità solfatiche naturali.

Il solfato dell'aggregato non è immediatamente disponibile. Il gesso dell'aggregato, a differenza di quello aggiunto al clinker come regolatore della presa, si presenta in forma di particelle relativamente grosse e quindi molto più lentamente solubili nella fase acquosa. Ne consegue che la maggior parte del gesso che contamina l'aggregato non è disponibile per la formazione immediata di ettringite primaria, ma può reagire successivamente per produrre ettringite secondaria la cui formazione avviene in una matrice rigida.

Conglomerato cementizio

Formazione di ghiaccio



Conglomerato cementizio

Dilavamento della superficie

Il dilavamento consiste nell'asportazione di materiale, generalmente della matrice cementizia, da parte di acqua corrente. Si tratta in sostanza di una asportazione da parte dell'acqua di prodotti idrosolubili associata ad un'azione meccanica.

Il dilavamento può essere aggravato da acque a carattere acido per la presenza di anidride carbonica aggressiva, di sostanze acide presenti in acque di scarico industriale o di acido solforico di origine organica.

Conglomerato cementizio

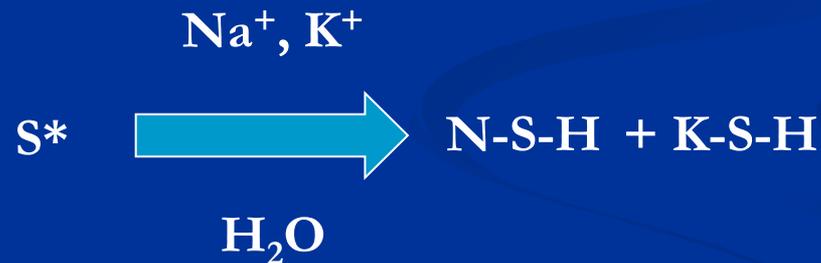
Microfessurazioni da variazioni igro-termiche o carichi di servizio

- Contrazioni da essiccamento per esposizione delle strutture in ambienti insaturi di umidità (ritiro igrometrico); se la zona corticale, esposta all'essiccamento tende a contrarsi rispetto al substrato ancora umido, e quindi dimensionalmente stabile, si generano delle tensioni di trazione sulla superficie;
- Contrazione termica per esposizione delle strutture in climi con escursioni termiche;
- Contrazione per raffreddamento dopo iniziale riscaldamento generato dal calore di idratazione; soprattutto nei getti massivi il nucleo centrale rimane più caldo rispetto allo strato corticale a contatto dell'aria e questa differenza di temperatura genera uno stato di trazione sulla superficie sulla quale si possono manifestare fessure a pochi giorni dal getto;
- Applicazione di carichi dinamici in servizio che generano localmente tensioni di trazione superiori alla resistenza del calcestruzzo;
- Applicazioni di carichi statici permanenti che generano tensioni e pressioni.

Conglomerato cementizio

Reazione alcali-silice

La reazione alcali-silice coinvolge essenzialmente gli aggregati che contengono una particolare forma di silice, capace di reagire con gli alcali, sodio e potassio - provenienti dal cemento o dall'ambiente esterno nelle opere esposte a salatura con NaCl nei periodi invernali - per produrre una reazione espansiva a carattere distruttivo.



dove S* rappresenta una silice mal cristallizzata o amorfa, e proprio per questo, dotata di capacità di reagire con gli alcali del cemento in presenza di acqua per produrre silicati di sodio e potassio idrati molto voluminosi.

Durabilità e classi di esposizione

Caratteristiche del calcestruzzo

Durabilità

Per garantire la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato ordinario o precompresso, esposte all'azione dell'ambiente, si devono adottare i provvedimenti atti a limitare gli effetti di degrado indotti dall'attacco chimico, fisico e derivante dalla corrosione delle armature e dai cicli di gelo e disgelo.

A tal fine in fase di progetto la prescrizione, valutate opportunamente le condizioni ambientali del sito ove sorgerà la costruzione o quelle di impiego, deve fissare le caratteristiche del calcestruzzo da impiegare (composizione e resistenza meccanica), i valori del copriferro e le regole di maturazione.

Caratteristiche del calcestruzzo

Durabilita'

Ai fini della valutazione della durabilità, nella formulazione delle prescrizioni sul calcestruzzo, si potranno prescrivere anche prove per la verifica della resistenza alla penetrazione agli agenti aggressivi, ad esempio si può tener conto del grado di impermeabilità del calcestruzzo. A tal fine può essere determinato il valore della profondità di penetrazione dell'acqua in pressione in mm. Per la prova di determinazione della profondità della penetrazione dell'acqua in pressione nel calcestruzzo indurito vale quanto indicato nella norma UNI EN 12390-8:2002.

Al fine di ottenere la prestazione richiesta in funzione delle condizioni ambientali, nonché per la definizione della relativa classe, si potrà fare utile riferimento alle indicazioni contenute nelle Linee Guida sul calcestruzzo strutturale edite dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ovvero alle norme UNI EN 206-1:2006 ed UNI 11104:2004.

ad esempio ...

Classi di esposizione

UNI EN 206 - UNI 11104

Classe di esposizione	Ambiente	Tipo di struttura	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

Classi di esposizione

UNI EN 206 - UNI 11104

Denom. della classe	Descrizione dell'ambiente	Esempi informativi di situazioni a cui possono applicarsi le classi di esposizione	A/C	R _{ck}	Dosaggio
XC1	Asciutto o permanentemente bagnato	Interni di edifici con umidità relativa bassa. Calcestruzzo armato ordinario o precompresso con le superfici all'interno di strutture con eccezione delle parti esposte a condensa immerse in acqua	0.60	30	300
XC2	Bagnato, raramente asciutto	Parti di strutture di contenimento liquidi, fondazioni. Calcestruzzo armato ordinario o precompresso prevalentemente immerso in acqua o terreno non aggressivo.	0.60	30	300
XC3	Umidità moderata	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in esterni con superfici esterne riparate dalla pioggia o in interni con umidità da moderata ad alta	0.55	35	320
XC4	Ciclicamente asciutto e bagnato	Calcestruzzo armato ordinario o precom. in esterni con superfici soggette ad alternanze di asciutto ed umido. Calcestruzzi a vista in ambienti urbani.	0.50	40	340

Classi di esposizione

UNI EN 206 - UNI 11104

Denom. della classe	Descrizione dell'ambiente	Esempi informativi di situazioni a cui possono applicarsi le classi di esposizione	A/C	R _{ck}	Dosaggio
XD1	Moderatamente umido	Strutture raramente a diretto contatto superficiale di spruzzi di acqua (pavimenti esposti a spruzzi occasionali di salamoia)	0.55	35	320
XD2	Bagnato, raramente asciutto	Piscine natatorie; vasche di trattamento di acque industriali contenenti cloruro; parti di ponte	0.50	40	340
XD3	Ciclicamente asciutto e bagnato	Pavimenti esterni esposti occasionalmente ad acque salate; pavimenti e solai di parcheggi coperti	0.45	45	360

Classi di esposizione

UNI EN 206 - UNI 11104

Denom. della classe	Descrizione dell'ambiente	Esempi informativi di situazioni a cui possono applicarsi le classi di esposizione	A/C	R _{ck}	Dosaggio
XS1	Moderatamente umido	Strutture in prossimità delle coste esposte al trascinamento eolico dell'acqua (aerosol)	0.50	40	320
XS2	Bagnato, raramente asciutto	Strutture permanentemente e completamente sotto acqua di mare	0.45	45	340
XS3	Ciclicamente asciutto e bagnato	Strutture esposte discontinuamente all'acqua marina (alta-bassa marea)	0.45	45	340

Classi di esposizione

UNI EN 206 - UNI 11104

Denom. della classe	Descrizione dell'ambiente	Esempi informativi di situazioni a cui possono applicarsi le classi di esposizione	A/C	R _{ck}	Dosaggio
XF1	Moderata saturazione con acqua in assenza di sali disgelanti	Superfici verticali esposte alla pioggia ed al gelo	0.50	40	320
XF2	Moderata saturazione con acqua in presenza di sali disgelanti	Superfici verticali di strutture stradali esposte al gelo e spruzzi contenenti sali disgelanti	0.50	30	340
XF3	Elevata saturazione con acqua in assenza di sali disgelanti	Superfici orizzontali esposte alla pioggia ed al gelo	0.50	30	340
XF4	Elevata saturazione con acqua in presenza di sali disgelanti	Superfici orizzontali e strutture verticali stradali esposte direttamente ai sali disgelanti	0.45	35	360

Classi di esposizione

UNI EN 206 - UNI 11104

Denom. della classe	Acidità	SO ₄ (mg/Kg)	A/C	R _{ck}	Dosaggio
XA1	>200	≥2000 ≤3000	0.55	35	320
XA2	----	>3000 ≤12000	0.50	40	340
XA3	----	>12000	0.45	45	360

e ...

**le Norme Tecniche per le Costruzioni
cosa altro dicono?**

Ricoprimento e copriferro

Definizione



Il valore r_{min} deve essere fissato in modo da garantire:

- La trasmissione delle tensioni d'aderenza
- La protezione delle barre dalla corrosione
- Un'adeguata resistenza al fuoco (EN 1992-1-2)

Il valore Δr deve essere fissato in funzione delle tolleranze di posa.

Condizioni ambientali

Le condizioni ambientali, ai fini della protezione contro la corrosione delle armature metalliche, possono essere suddivise in ordinarie, aggressive e molto aggressive con riferimento alle classi di esposizione definite nelle Linee Guida per il calcestruzzo strutturale emesse dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Condizioni ambientali	Classi di esposizione
Ordinarie	X0, XC1, XC2, XC3, XF1
Aggressive	XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3
Molto aggressive	XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4

Ricoprimento

Valori minimi (r_{\min})

Al fine della protezione delle armature dalla corrosione,
il valore r_{\min} deve essere maggiore o uguale ai valori sotto indicati

C_{\min}	C_o	Ambiente	Barre da c.a. elementi a piastra		Barre da c.a. altri elementi		Cavi da c.a.p. elementi a piastra		Cavi da c.a.p. altri elementi	
			$C \geq C_o$	$C_{\min} \leq C < C_o$	$C \geq C_o$	$C_{\min} \leq C < C_o$	$C \geq C_o$	$C_{\min} \leq C < C_o$	$C \geq C_o$	$C_{\min} \leq C < C_o$
C25/30	C35/45	Ordinario	15	20	20	25	25	30	30	35
C28/35	C40/50	Aggressivo	25	30	30	35	35	40	40	45
C35/45	C45/55	Molto aggressivo	35	40	40	45	45	50	50	50

Ricoprimento

Nota !

I valori di r_{\min} della Tabella si riferiscono a costruzioni con vita nominale di 50 anni. Per costruzioni con vita nominale di 100 anni detti valori vanno aumentati di 10 mm.

Inoltre:

- Per classi di resistenza del calcestruzzo inferiori a C_{\min} i valori della tabella sono da aumentare di 5 mm.
- Per produzioni di elementi sottoposte a controllo di qualità che preveda anche la verifica dei copriferrì (ad esempio elementi prefabbricati), i valori della tabella possono essere ridotti di 5 mm.

Per acciai inossidabili o in caso di adozione di altre misure protettive contro la corrosione e verso i vani interni chiusi di solai alleggeriti (alveolari, predalles, ecc.), i ricoprimenti potranno essere ridotti in base a documentazioni di comprovata validità.

Ricoprimento

Tolleranze di posa (Δr)

Ai valori di r_{\min} vanno aggiunte le tolleranze di posa Δr , pari a 10 mm o minore, secondo indicazioni di norme di comprovata validità.

Ricoprimento

Esempio solaio

Classe di esposizione XC1 (ambiente ordinario secondo Circolare 02/02/2009)

Calcestruzzo C25/30 (classe minima secondo UNI EN206-1)

Ricoprimento

$$r_{\min} = 20 \text{ mm}$$

$$\Delta r = 5 \text{ mm}$$

(se si utilizzano distanziatori)

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

Copriferro

$$c_{\text{nom}} = 25 \text{ mm} + \phi/2 =$$

$$= 32 \text{ mm} (\phi_{\text{max}} = 14 \text{ mm})$$

$$c_{\text{nom}} (\text{valore scelto}) = 35 \text{ mm}$$

C_{\min}	C_o	Ambiente	Barre da c.a. elementi a piastra		Barre da c.a. altri elementi	
			$C \geq C_o$	$C_{\min} \leq C < C_o$	$C \geq C_o$	$C_{\min} \leq C < C_o$
C25/30	C35/45	Ordinario	15	20	20	25
C28/35	C40/50	Aggressivo	25	30	30	35
C35/45	C45/55	Molto aggressivo	35	40	40	45

Ricoprimento

Esempio trave

Classe di esposizione XC3 (ambiente ordinario secondo Circolare 02/02/2009)

Calcestruzzo C28/35 (classe minima secondo UNI EN206-1)

Ricoprimento

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

$$\Delta r = 5 \text{ mm (con distanziatori)}$$

$$r_{\text{nom}} = 30 \text{ mm}$$

Copriferro

$$c_{\text{nom}} = 30 \text{ mm} + \phi_{\text{st}} + \phi_1/2$$

$$= 48 \text{ mm} (\phi_{\text{lmax}} = 20 \text{ mm})$$

$$(\phi_{\text{st}} = 8 \text{ mm})$$

$$c_{\text{nom}} (\text{valore scelto}) = 50 \text{ mm}$$

C_{\min}	C_o	Ambiente	Barre da c.a. elementi a piastra		Barre da c.a. altri elementi	
			$C \geq C_o$	$C_{\min} \leq C < C_o$	$C \geq C_o$	$C_{\min} \leq C < C_o$
C25/30	C35/45	Ordinario	15	20	20	25
C28/35	C40/50	Aggressivo	25	30	30	35
C35/45	C45/55	Molto aggressivo	35	40	40	45

FINE