

Lezione

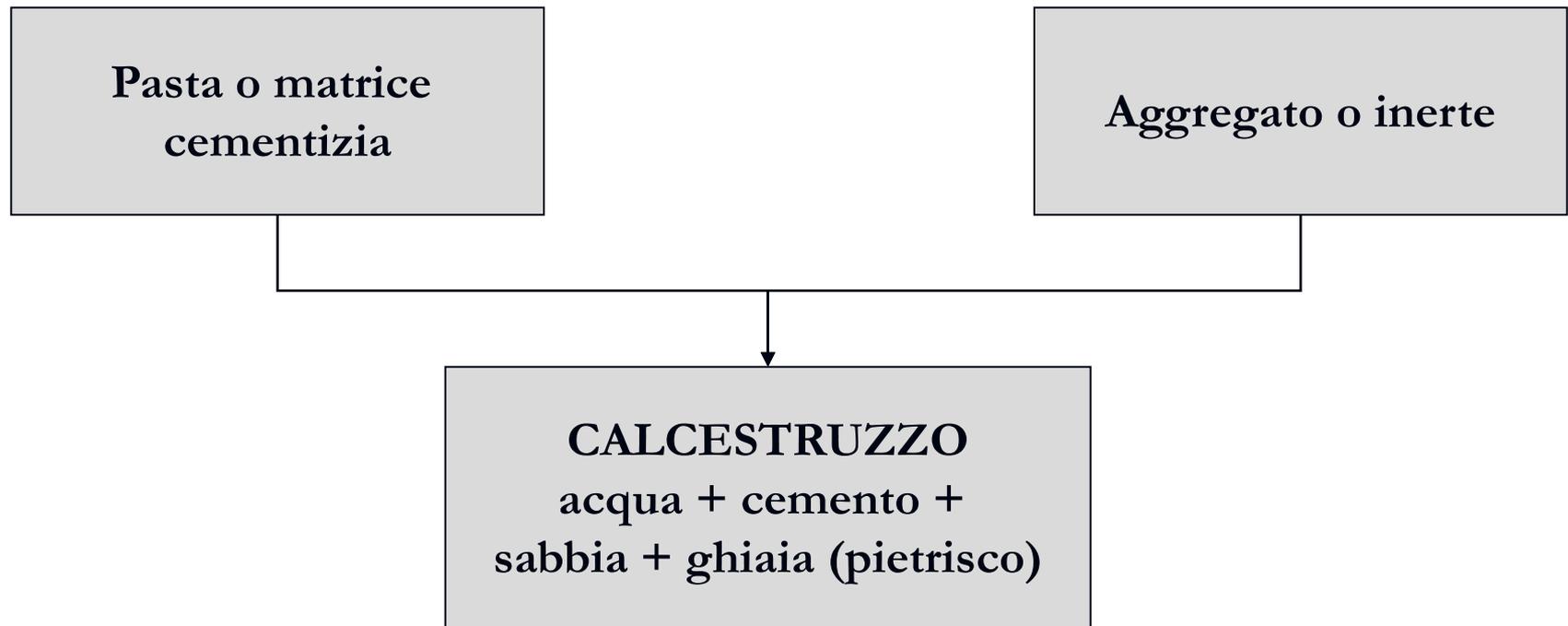
Progetto di Strutture

Materiali

Conglomerato cementizio armato

Conglomerato cementizio

Composizione



Cementi

Composizione

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

Composizione

Se nel mulino, oltre al regolatore della presa e del 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

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

UNI-EN 197/1

Tipi	Denominazione	Sigla	Clinker	Loppa d'altoforno	Micro silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare	Costituenti secondari	
			K	S	D	Naturale P	Industriale Q	Silicica V	Calcica W	T	L		
I	Cemento Portland	I	95-100									0-5	
II	Cem. Portland alla loppa	II-A/S	80-94	6-20								0-5	
		II-B/S	65-79	21-35								0-5	
	Cem. Portland alla microsilice	II-A/D	90-94		6-10							0-5	
	Cem. Portland alla Pozzolana	II-A/P	80-94			6-20							0-5
		II-B/P	65-79			21-35							0-5
		II-A/Q	80-94				6-20						0-5
		II-B/Q	65-79				21-35						0-5
	Cemento Portland alla cenere volante	II-A/V	80-94						6-20				0-5
		II-B/V	65-79						21-35				0-5
		II-A/W	80-94							6-20			0-5
II-B/W		65-79							21-35			0-5	
Cem. Portland scisto calcinato	II-A/T	80-94								6-20			
	II-B/T	65-79								21-35			
Cem. Portland al calcare	II-A/L	80-94									6-20		
	II-B/L	65-79									21-35		
Cem. Portland composito	II-A/M	80-94										← 6-20 →	
	II-B/M	65-79										← 21-35 →	

Cementi

UNI-EN 197/1

Tipi	Denominazione	Sigla	Clinker	Loppa d'altoforno	Micro silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare	Costituenti secondari
			K	S	D	Naturale P	Industriale Q	Silicica V	Calcica W	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 μm , e quindi capaci di allocarsi negli interstizi tra i granuli di cemento (1-50 μm). 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

Conglomerato cementizio

Composizione

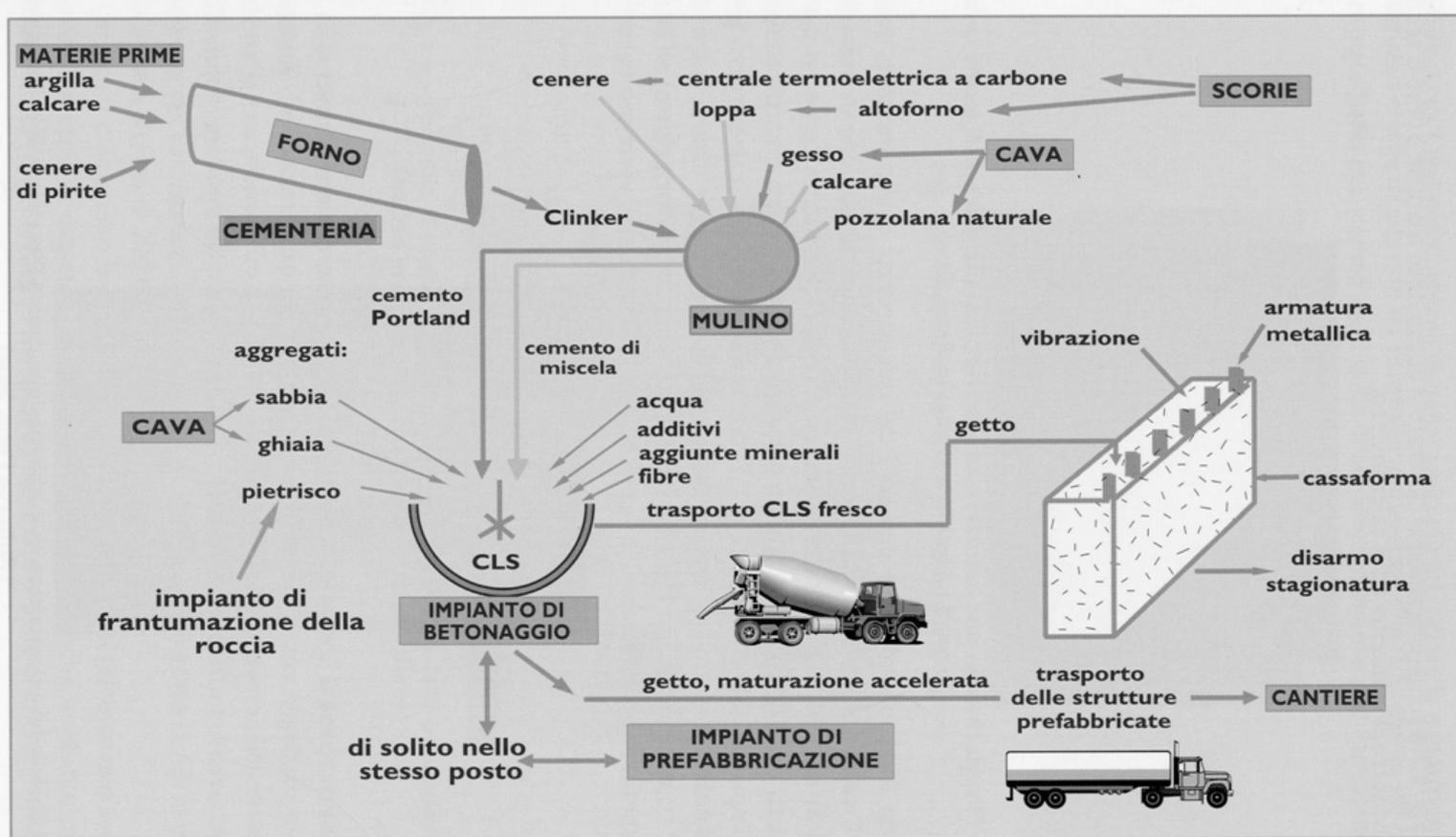
Oltre agli ingredienti principali – acqua, cemento, sabbia, aggregato grosso – nella produzione del calcestruzzo vengono impiegati altri ingredienti minori (per quantità ma non per importanza) che includono

- **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

Realizzazione



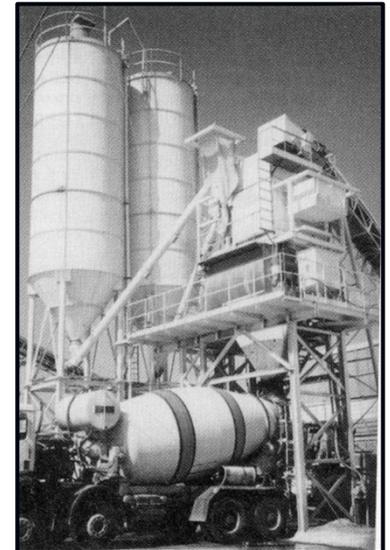
Opere in conglomerato cementizio

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

Conglomerato cementizio

Lavorabilità

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

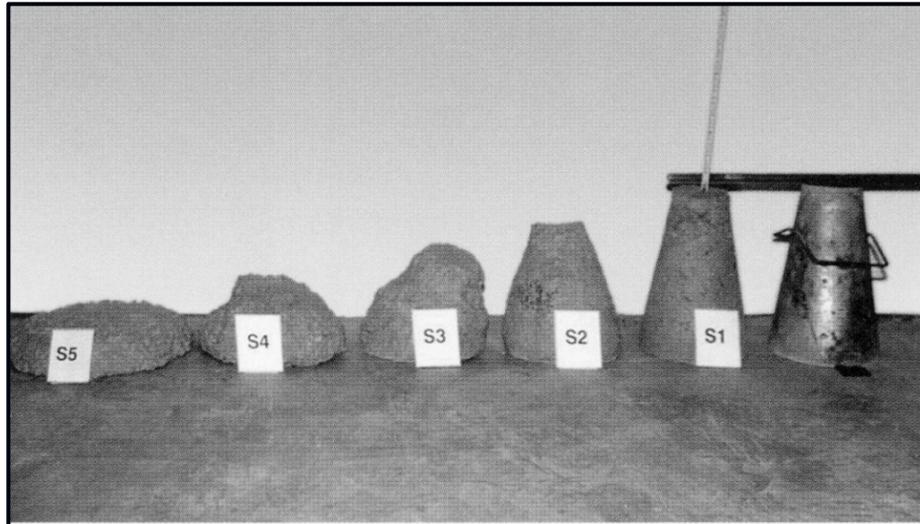
La mobilità del calcestruzzo è importante per facilitare il trasporto, il getto e l'avvolgimento dei ferri d'armatura all'interno delle cassaforme.

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

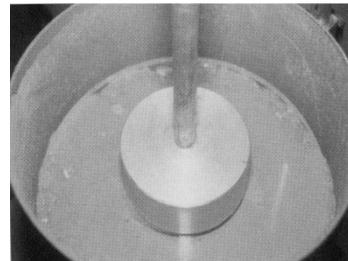
La classe di consistenza, identificata da un codice (da S1 a S5), corrisponde ad un intervallo di lavorabilità espressa attraverso la misura dello slump.

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

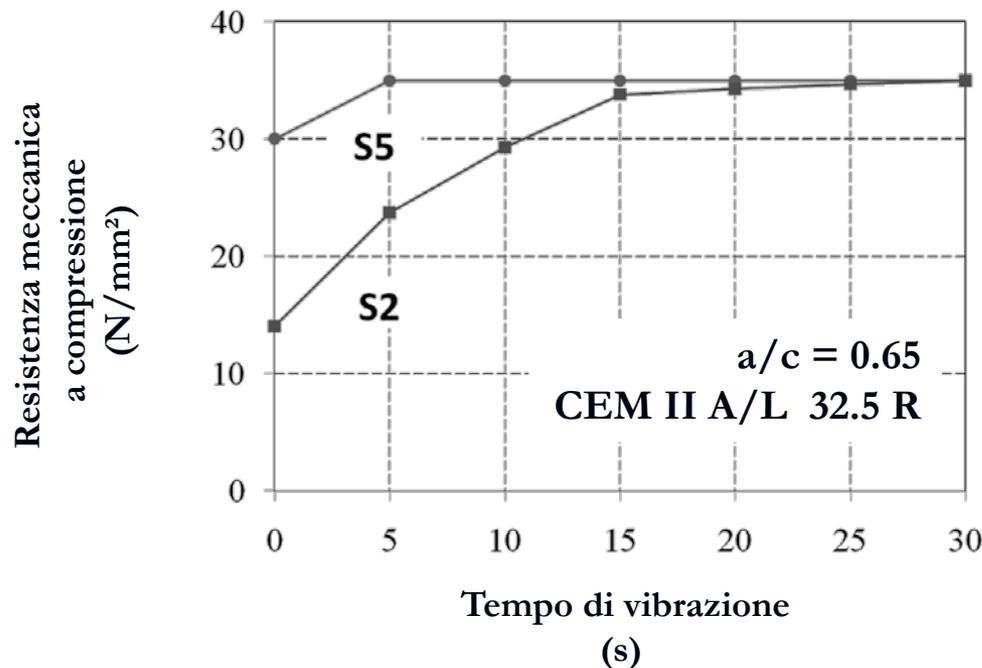
Un altro metodo per misurare la lavorabilità è il cosiddetto metodo Vebè, particolarmente adatto per calcestruzzi asciutti. Il calcestruzzo è versato in un cono di Abrams; viene quindi ricoperto con un disco trasparente e sottoposto a vibrazione su un tavolo vibrante standard; la vibrazione viene arrestata 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

Vibrazione

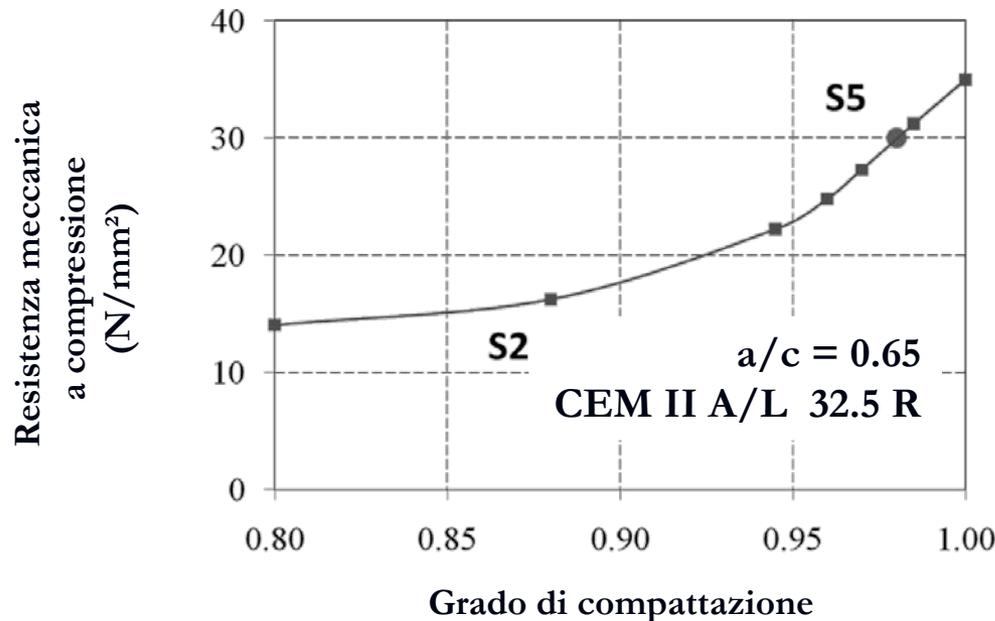
Un calcestruzzo più lavorabile è anche meno dipendente dalla efficacia della compattazione in opera, cioè dalla qualità della manodopera sul cantiere.



Conglomerato cementizio

Vibrazione

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.



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 ₃ S
Silicato bicalcico (belite)	Ca_2SiO_2	2CaO SiO ₂	C ₂ S
Alluminato tricalcico (fase alluminosa)	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	3CaO Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferro-alluminato tetracalcico (fase ferrica)	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	4CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Simboli sintetici:

C=CaO

S=SiO₂

A=Al₂O₃

F=Fe₂O₃

H=H₂O

N=Na₂O

K=K₂O

C=CO₂

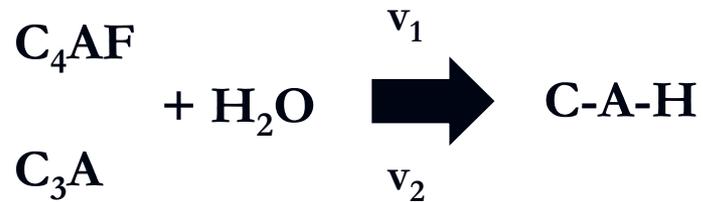
S=SO₃

M=MgO

Cementi

Chimica del clinker

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

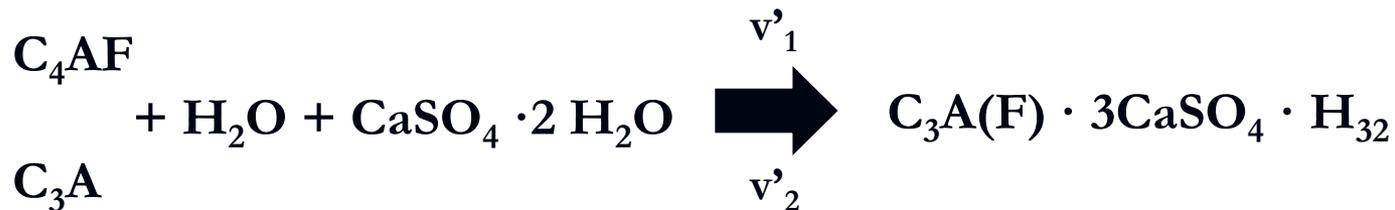


Il C_4AF e soprattutto il C_3A reagiscono rapidamente con l'acqua senza tuttavia contribuire significativamente allo sviluppo della resistenza meccanica se si eccettua un rapido ma piccolo incremento durante le prime ore.

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

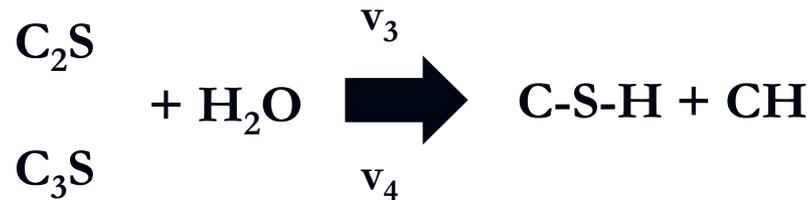
Idratazione dei silicati

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 C₃S e C₂S adiacenti, prima si toccano e poi si intrecciano tra loro.

Cementi

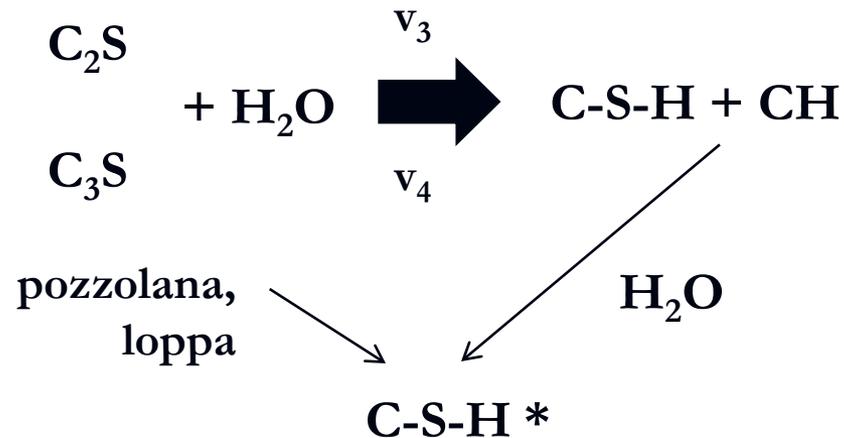
Ruolo della calce

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;
- é presente sempre una piccola quantità di calce sufficiente a saturare la soluzione acquosa che riempie i pori capillari.

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.

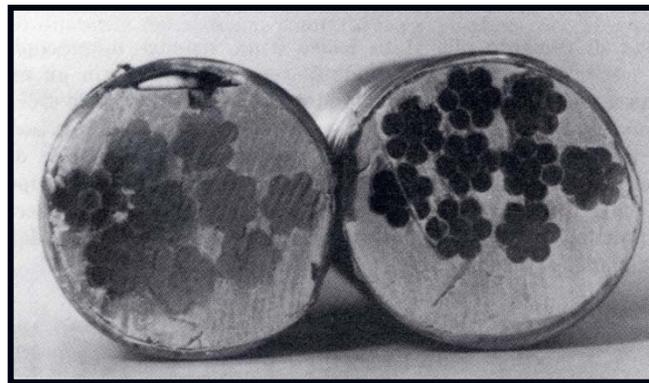
Il bleeding è sempre accompagnato dalla **sedimentazione** sul fondo del contenitore degli elementi solidi più grossi e più pesanti.

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.

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.

Conglomerato cementizio

Porosità capillare e durabilità

La relazione tra la porosità e la durabilità e 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.

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

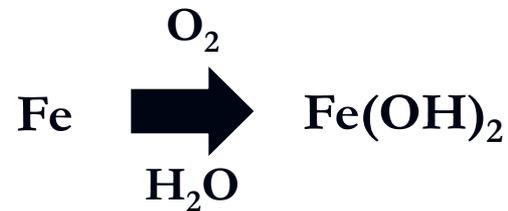
DILAVAMENTO DELLA SUPERIFICIE

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

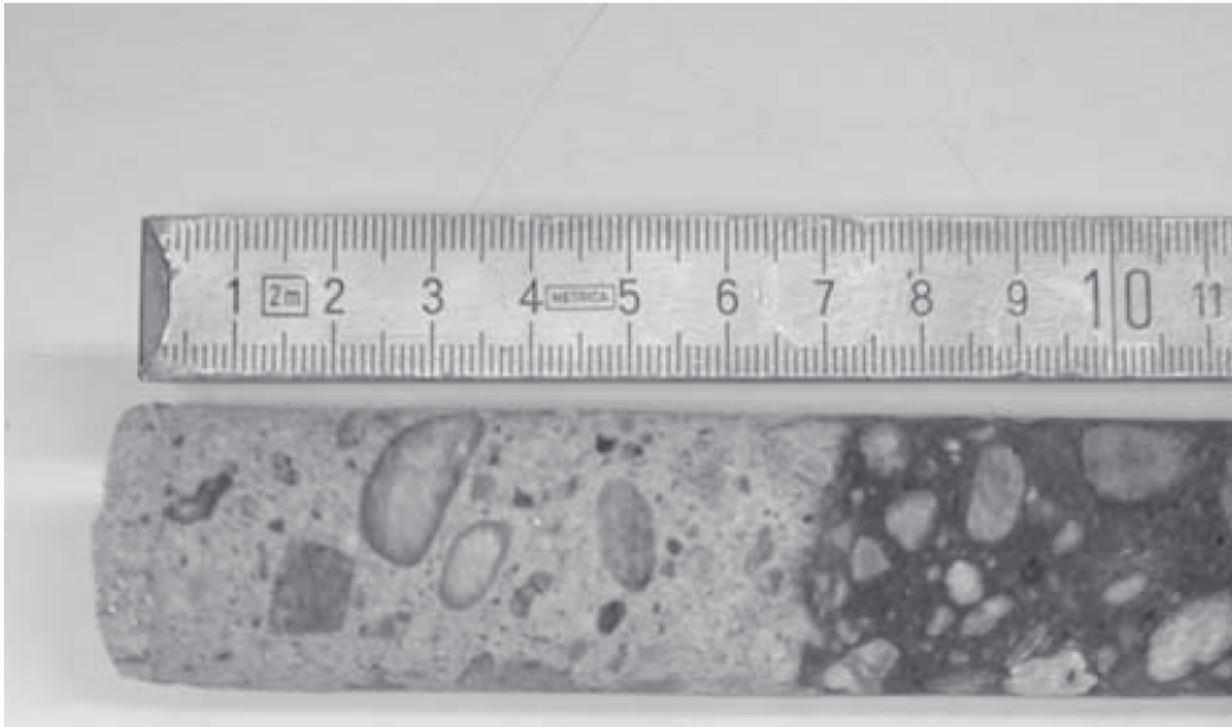
A seguito della neutralizzazione della calce, il pH scende a valori di circa 9 ed il ferro, già a valori di pH minori di 11, perde la sua passività. In sostanza, il film di ossido inizialmente protettivo diventa poroso ed incoerente se il pH scende sotto 11 e non è più in grado di bloccare l'accesso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

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.

Aumentando lo spessore del copriferro

Conglomerato cementizio

Corrosione delle armature metalliche

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.

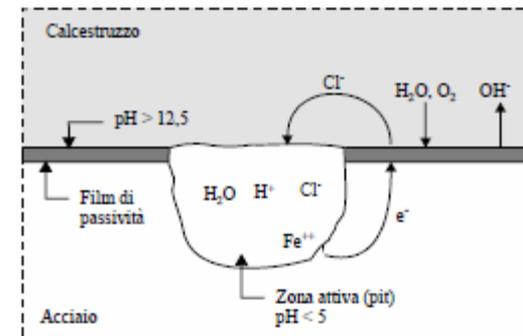
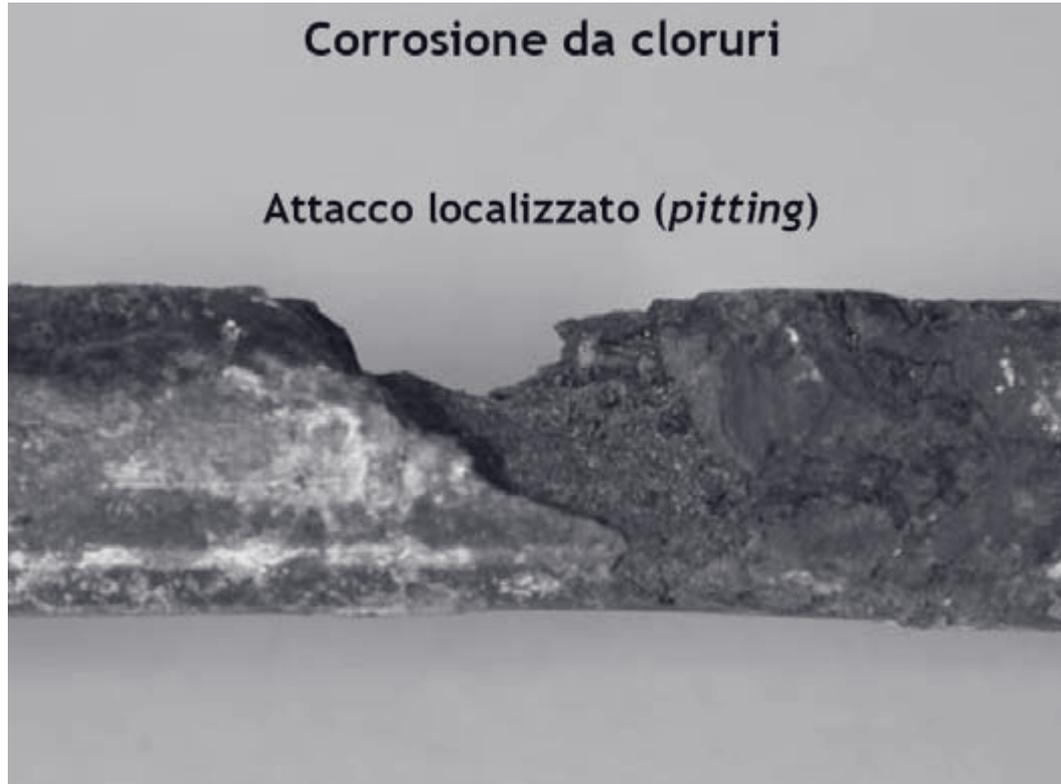
DIFFUSIONE. Il cloruro si diffonde attraverso il calcestruzzo nei pori capillari saturi di acqua. In questo caso l'acqua ristagna nei pori e il cloruro si muove lungo la direzione ortogonale alla superficie del calcestruzzo sotto la spinta di un gradiente di concentrazione.

Conglomerato cementizio

Pitting

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).

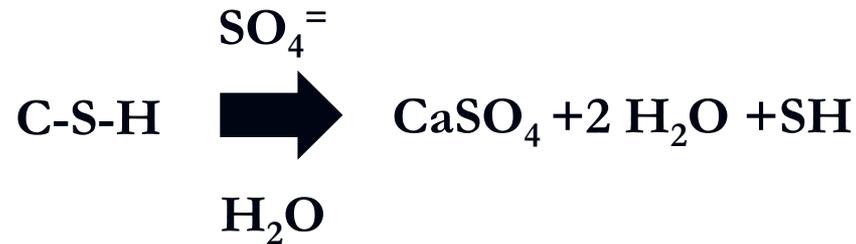
La prima azione dello ione è quella di interagire con la $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e/o C-S-H per produrre il gesso



Conglomerato cementizio

Attacco solfatico esterno

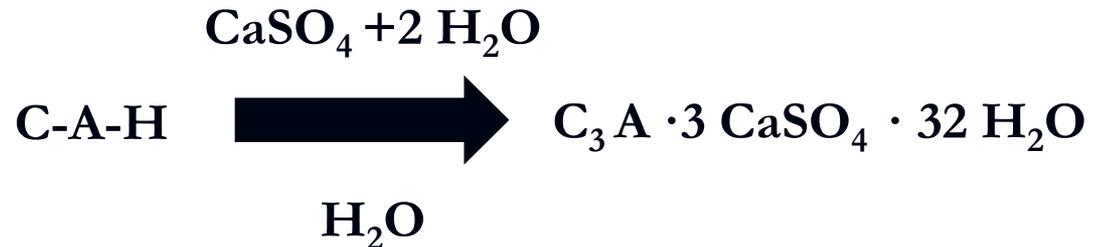
La reazione provoca fenomeni di rigonfiamento e delaminazione superficiale per la trasformazione di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nel più voluminoso gesso. L'attacco solfatico può anche provocare un calo di resistenza meccanica e di adesione a causa del processo di decalcificazione che, dopo la calce, coinvolge 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

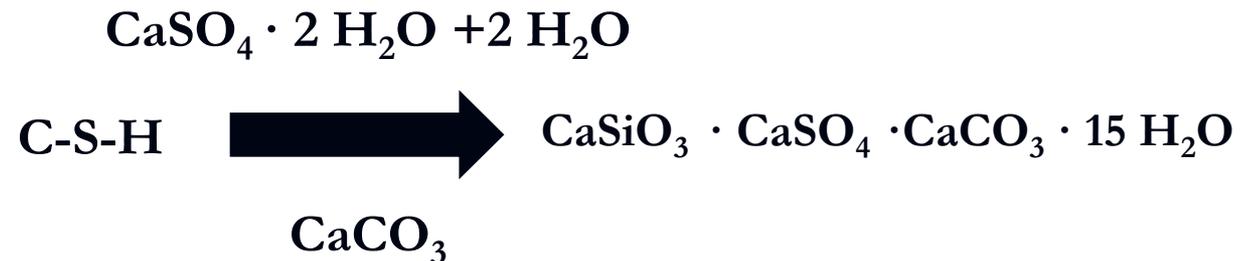


La formazione di ettringite provoca rigonfiamenti, delaminazioni, fessurazioni e distacchi per l'aumento di volume associato alla reazione. Questo tipo di ettringite si chiama secondaria per distinguerla da quella che si forma per reazione degli alluminati anidri con l'acqua ed il gesso aggiunto per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

Conglomerato cementizio

Attacco solfatico esterno

In particolari condizioni climatiche (frede 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;

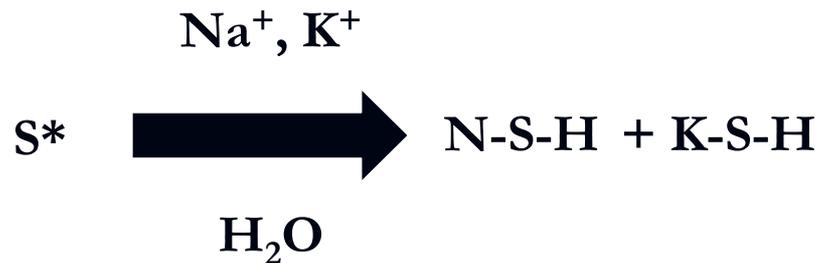
Applicazione di carichi dinamici in servizio che generano localmente tensioni di trazione superiori alla resistenza del calcestruzzo;

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.

Caratteristiche del calcestruzzo

Additivi chimici

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

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.

Controlli di qualità del calcestruzzo

Valutazione preliminare della resistenza

Serve a determinare, prima dell'inizio della costruzione delle opere , la miscela per produrre il calcestruzzo con la resistenza caratteristica di progetto

Controllo della produzione

Riguarda il controllo da eseguire sul calcestruzzo durante la produzione del calcestruzzo stesso.

Controllo di accettazione

Riguarda il controllo da eseguire sul calcestruzzo prodotto durante l'esecuzione dell'opera, con prelievo effettuato contestualmente al getto dei relativi elementi strutturali.

Prove complementari

Sono prove che vengono eseguite, ove necessario, a complemento delle prove di accettazione.

Controllo di accettazione

Il Direttore dei Lavori ha l'obbligo di eseguire controlli sistematici in corso d'opera per verificare la conformità delle caratteristiche del calcestruzzo messo in opera rispetto a quello stabilito dal progetto e sperimentalmente verificato in sede di valutazione preliminare. Il controllo di accettazione va eseguito su miscele omogenee e si configura, in funzione del quantitativo di calcestruzzo in accettazione, nel:

- CONTROLLO DI TIPO A
- CONTROLLO DI TIPO B

Prelievo

Entrambi i controlli sono eseguiti sulle Resistenze di Prelievi.

Un prelievo consiste nel prelevare dagli impasti, al momento della posa in opera ed alla presenza del Direttore dei Lavori o di persona di sua fiducia, il calcestruzzo necessario per la confezione di un gruppo di due provini.

La media delle resistenze a compressione dei due provini di un prelievo rappresenta la “Resistenza di prelievo” che costituisce il valore mediante il quale vengono eseguiti i controlli del calcestruzzo.

È obbligo del Direttore dei Lavori prescrivere ulteriori prelievi rispetto al numero minimo, di cui ai successivi paragrafi, tutte le volte che variazioni di qualità e/o provenienza dei costituenti dell'impasto possano far presumere una variazione di qualità del calcestruzzo stesso, tale da non poter più essere considerato omogeneo.

Prelievo

Riempimento delle casseforme e compattazione del calcestruzzo

Il calcestruzzo deve essere versato in casseforme a tenuta stagna e non assorbenti. I provini devono essere compattati in almeno due strati, di spessore non superiore a 100 mm. Il calcestruzzo deve essere compattato in modo da produrre una completa compattazione del calcestruzzo senza una eccessiva segregazione o comparsa di acqua superficiale.

Ciascuno strato può essere compattato con vibrazione meccanica o manuale.

Prelievo

Compattazione con vibrazione meccanica

Usando la vibrazione meccanica una completa compattazione è ottenuta quando non si osserva più la comparsa di grosse bolle d'aria sulla superficie del calcestruzzo e la superficie diventa relativamente piana con aspetto vetroso, senza eccessiva segregazione.

Compattazione con vibrazione manuale

Compattazione con il pestello o la barra per compattazione. Distribuire i colpi del pestello o della barra per compattazione in modo uniforme su tutta la superficie della cassaforma.

Assicurarsi che il pestello o la barra per compattazione non colpiscano il fondo della cassaforma mentre si compatta il primo strato e che non penetrino significativamente negli strati precedenti. Sottoporre il calcestruzzo ad almeno 25 colpi per strato. Al fine di rimuovere sacche d'aria aggiunta ma non l'aria introdotta, dopo la compattazione di ogni strato dare qualche colpo di mazzuola sulle pareti della cassaforma fino a che non si osserva più la comparsa di grandi bolle d'aria e scompaiono le impronte lasciate del pestello o dalla barra di compattazione.

Prelievo

Marcatura

I provini devono essere contrassegnati in modo chiaro ed indelebile senza danneggiarli. Devono essere conservate le registrazioni che assicurano la rintracciabilità del campione dal campionamento fino alla prova.

Conservazione dei provini

Lasciare i provini nella cassaforma per almeno 16 h, ma non oltre 3 giorni, proteggendoli da urti, vibrazioni e disidratazione, alla temperatura di $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ [oppure $(25 \pm 5) ^\circ\text{C}$ nei climi caldi].

Una volta rimossi dalla cassaforma conservare i provini fino al momento della prova in acqua alla temperatura di $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$, oppure in ambiente a $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ ed umidità relativa $\geq 95\%$.

Verbale di prelievo

VERBALE DI PRELIEVO DI CAMPIONI DI CALCESTRUZZO

Verbale n°

Lavori di:	
Cantiere di:	
Impresa esecutrice:	
Direttore dei Lavori:	
Responsabile di cantiere:	

Oggi alle ore in località
alla presenza di:

Per la Direzione dei Lavori:	
Per il Committente:	
Per l'Impresa esecutrice:	

Si procede ad eseguire n° prelievi per un totale di (un prelievo = 2 cubetti) n° cubetti delle dimensioni di: 15*15*15 n°

prelevati:	all'impianto di betonaggio	n°	cubetti
	all'autobetoniera con D.D.T. n°	n°	cubetti
	al momento del getto	n°	cubetti

	Rck	Tipo cemento	Dosaggio	A/C	Slump
Il calcestruzzo previsto è:					

	Struttura (Fond., Solaio, ecc.)	Zona / Piano	n° prelievo / contrassegno provini
Il calcestruzzo prelevato viene utilizzato per la costruzione di:			

Il prelievo viene eseguito secondo quanto previsto dal D.M.14/01/2008 in base alle norme UNI EN 12390:2002

La stagionatura sarà curata dall'Impresa appaltatrice.

Letto firmato e sottoscritto

Per il Committente:	
Per l'Impresa:	

Il presente verbale viene redatto in triplice copia.

Per la Direzione dei Lavori:	
------------------------------	--

Controllo di tipo A

Il controllo di tipo A è riferito ad un quantitativo di miscela omogenea non maggiore di 300 m³. Ogni controllo di accettazione di tipo A è rappresentato da tre prelievi, ciascuno dei quali eseguito su un massimo di 100 m³ di getto di miscela omogenea. Risulta quindi un controllo di accettazione ogni 300 m³ massimo di getto. Per ogni giorno di getto va comunque effettuato almeno un prelievo.

Nelle costruzioni con meno di 100 m³ di getto di miscela omogenea, fermo restando l'obbligo di almeno 3 prelievi e del rispetto delle limitazioni di cui sopra, è consentito derogare dall'obbligo di prelievo giornaliero.

Controllo di tipo B

Nella realizzazione di opere strutturali che richiedano l'impiego di più di 1500 m³ di miscela omogenea è obbligatorio il controllo di accettazione di tipo statistico (tipo B). Il controllo è riferito ad una definita miscela omogenea e va eseguito con frequenza non minore di un controllo ogni 1500 m³ di calcestruzzo. Per ogni giorno di getto di miscela omogenea va effettuato almeno un prelievo, e complessivamente almeno 15 prelievi sui 1500 m³. Se si eseguono controlli statistici accurati, l'interpretazione dei risultati sperimentali può essere svolta con i metodi completi dell'analisi statistica assumendo anche distribuzioni diverse dalla normale. Si deve individuare la legge di distribuzione più corretta e il valor medio unitamente al coefficiente di variazione (rapporto tra deviazione standard e valore medio). In questo caso la resistenza minima di prelievo R_1 dovrà essere maggiore del valore corrispondente al frattile inferiore 1%.

Per calcestruzzi con coefficiente di variazione (s / R_m) superiore a 0,15 occorrono controlli più accurati. Non sono accettabili calcestruzzi con coefficiente di variazione superiore a 0,3.

Controllo di accettazione

Il controllo di accettazione è positivo ed il quantitativo di calcestruzzo accettato se risultano verificate le disuguaglianze di cui alla tabella seguente:

Controllo di tipo A	Controllo di tipo B
$R_1 \geq R_{ck} - 3.5$	
$R_m \geq R_{ck} + 3.5$ (N° prelievi : 3)	$R_m \geq R_{ck} + 1.4s$ (N° prelievi ≥ 15)

Controllo della resistenza del calcestruzzo in opera

Nel caso in cui le resistenze a compressione dei provini prelevati durante il getto non soddisfino i criteri di accettazione della classe di resistenza caratteristica prevista nel progetto, oppure sorgano dubbi sulla qualità e rispondenza del calcestruzzo ai valori di resistenza determinati nel corso della qualificazione della miscela, oppure si renda necessario valutare a posteriori le proprietà di un calcestruzzo precedentemente messo in opera, si può procedere ad una valutazione delle caratteristiche di resistenza attraverso una serie di prove sia distruttive che non distruttive. Tali prove non devono, in ogni caso, intendersi sostitutive dei controlli di accettazione. Il valor medio della resistenza del calcestruzzo in opera (definita come resistenza strutturale) è in genere inferiore al valor medio della resistenza dei prelievi in fase di getto maturati in condizioni di laboratorio (definita come resistenza potenziale).

È accettabile un valore medio della resistenza strutturale, misurata con tecniche opportune (distruttive e non distruttive) e debitamente trasformata in resistenza cilindrica o cubica, non inferiore all'85% del valore medio definito in fase di progetto.

Caratteristiche del calcestruzzo

Resistenza a compressione

In sede di progetto si farà riferimento alla resistenza caratteristica a compressione su cubi R_{ck} . Dalla resistenza cubica si passerà a quella cilindrica da utilizzare nelle verifiche mediante l'espressione:

$$f_{ck} \geq 0.83 R_{ck}$$

Sempre in sede di previsioni progettuali, è possibile passare dal valore caratteristico al valor medio della resistenza cilindrica mediante l'espressione

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 8 \quad [\text{MPa}]$$

Caratteristiche del calcestruzzo

Resistenza a trazione

La resistenza a trazione del calcestruzzo può essere determinata a mezzo di diretta sperimentazione, condotta su provini appositamente confezionati per mezzo delle prove di seguito indicate:

- **prove di trazione diretta;**
- **prove di trazione indiretta;**
- **prove di trazione per flessione.**

In sede di progettazione si può assumere come resistenza media a trazione semplice (assiale) del calcestruzzo il valore (in N/mm²):

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

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

I valori caratteristici corrispondenti ai frattili 5% e 95% sono assunti, rispettivamente, pari a $0,7 f_{ctm}$ ed $1,3 f_{ctm}$. Il valore medio della resistenza a trazione per flessione è assunto, in mancanza di sperimentazione diretta, pari a:

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

Caratteristiche del calcestruzzo

Modulo elastico e coeff. di Poisson

Per modulo elastico istantaneo del calcestruzzo va assunto quello secante tra la tensione nulla e $0,40 f_{cm}$, determinato sulla base di apposite prove.

In sede di progettazione si può assumere il valore:

$$E_{cm} = 22000 [f_{cm} / 10]^{0.3} \quad [\text{MPa}]$$

Tale formula non è applicabile ai calcestruzzi maturati a vapore. Essa non è da considerarsi vincolante nell'interpretazione dei controlli sperimentali delle strutture.

Per il coefficiente di *Poisson* può adottarsi, a seconda dello stato di sollecitazione, un valore compreso tra 0 (calcestruzzo fessurato) e 0,2 (calcestruzzo non fessurato).

Caratteristiche del calcestruzzo

Coeff. di dilatazione termica

Il coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo può essere determinato a mezzo di apposite prove.

In sede di progettazione, o in mancanza di una determinazione sperimentale diretta, per il coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo può assumersi un valor medio pari a $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, fermo restando che tale quantità dipende significativamente dal tipo di calcestruzzo considerato (rapporto inerti/legante, tipi di inerti, ecc.) e può assumere valori anche sensibilmente diversi da quello indicato.

Caratteristiche del calcestruzzo

Ritiro

La deformazione assiale per ritiro del calcestruzzo può essere determinata a mezzo di apposite prove. In sede di progettazione, e quando non si ricorra ad additivi speciali, il ritiro del calcestruzzo può essere valutato sulla base delle indicazioni di seguito fornite. La deformazione totale da ritiro si può esprimere come:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

dove:

ε_{cs} è la deformazione totale per ritiro

ε_{cd} è la deformazione per ritiro da essiccamento

ε_{ca} è la deformazione per ritiro autogeno.

Caratteristiche del calcestruzzo

Ritiro da essiccamento

Lo sviluppo nel tempo della deformazione ε_{cd} può essere valutato come:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t - t_s) \varepsilon_{cd,\infty}$$

dove la funzione di sviluppo temporale assume la forma

$$\beta_{ds}(t - t_s) = (t - t_s) / \left[(t - t_s) + 0.04 h_0^{3/2} \right]$$

in cui:

- t è l'età del calcestruzzo nel momento considerato (in giorni)
- t_s è l'età del calcestruzzo a partire dalla quale si considera l'effetto del ritiro da essiccamento (normalmente il termine della maturazione, espresso in giorni).
- h_0 è la dimensione fittizia (in mm) pari al rapporto $2A_c / u$ essendo
- A_c è l'area della sezione in calcestruzzo
- u è il perimetro della sezione in calcestruzzo esposto all'aria

Caratteristiche del calcestruzzo

Ritiro da essiccamento

Il valore medio a tempo infinito della deformazione per ritiro da essiccamento:

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \varepsilon_{c0}$$

può essere valutato mediante i valori di tabelle in funzione della resistenza caratteristica a compressione, dell'umidità relativa e del parametro h_0 :

f_{ck}	Deformazione da ritiro per essiccamento (in ‰)					
	Umidità relativa (in ‰)					
	20	40	60	80	90	100
20	-0.62	-0.58	-0.49	-0.30	-0.17	+0.00
40	-0.48	-0.46	-0.38	-0.24	-0.13	+0.00
60	-0.38	-0.36	-0.30	-0.19	-0.10	+0.00
80	-0.30	-0.28	-0.24	-0.15	-0.07	+0.00

h_0 (mm)	k_h
100	1.0
200	0.85
300	0.75
≥ 500	0.70

Caratteristiche del calcestruzzo

Ritiro autogeno

Il valore medio a tempo infinito della deformazione per ritiro autogeno $\varepsilon_{ca,\infty}$ può essere valutato mediante l'espressione:

$$\varepsilon_{ca,\infty} = -2.5(f_{ck} - 10)10^{-6} \quad \text{con } f_{ck} \text{ in MPa}$$

Caratteristiche del calcestruzzo

Viscosita'

In sede di progettazione, se lo stato tensionale del calcestruzzo, al tempo $t_0 = j$ di messa in carico, non è superiore a $0,45 \times f_{ckj}$, il coefficiente di viscosità $f(\infty, t_0)$, a tempo infinito, a meno di valutazioni più precise, può essere dedotto dalle seguenti tabelle dove h_0 è la dimensione fittizia:

**Umidità-
relativa 75%**

t_0	$h_0 \leq 75$ mm	$h_0 = 150$ mm	$h_0 = 300$ mm	$H_0 = 600$ mm
3 giorni	3.5	3.2	3.0	2.8
≥ 60 giorni	2.0	1.8	1.7	1.6

**Umidità-
relativa 55%**

t_0	$h_0 \leq 75$ mm	$h_0 = 150$ mm	$h_0 = 300$ mm	$H_0 = 600$ mm
3 giorni	4.5	4.0	3.6	3.3
≥ 60 giorni	2.5	2.3	2.1	1.9

Nel caso in cui sia richiesta una valutazione in tempi diversi da $t = \infty$ del coefficiente di viscosità questo potrà essere valutato secondo modelli tratti da documenti di comprovata validità.

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

Durabilità

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.

Classi di esposizione

UNI EN 206

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

Caratteristiche del calcestruzzo

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	Ricopr.
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	15
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	25
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	25
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	30

Caratteristiche del calcestruzzo

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	Ricopr.
XD1	Moderatamente umido	Strutture raramente a diretto contatto superficiale di spruzzi di acqua (pavimenti esposti a spruzzi occasionali di salamoia)	0.55	35	320	45
XD2	Bagnato, raramente asciutto	Piscine natatorie; vasche di trattamento di acque industriali contenenti cloruro; parti di ponte	0.50	40	340	45
XD3	Ciclicamente asciutto e bagnato	Pavimenti esterni esposti occasionalmente ad acque salate; pavimenti e solai di parcheggi coperti	0.45	45	360	45

Caratteristiche del calcestruzzo

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	Ricopr.
XS1	Moderatamente umido	Strutture in prossimità delle coste esposte al trascinamento eolico dell'acqua (aerosol)	0.50	40	320	55
XS2	Bagnato, raramente asciutto	Strutture permanentemente e completamente sotto acqua di mare	0.45	45	340	55
XS3	Ciclicamente asciutto e bagnato	Strutture esposte discontinuamente all'acqua marina (alta-bassa marea)	0.45	45	340	55

Caratteristiche del calcestruzzo

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	Ricopr.
XF1	Moderata saturazione con acqua in assenza di sali disgelanti	Superfici verticali esposte alla pioggia ed al gelo	0.50	40	320	40
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	55
XF3	Elevata saturazione con acqua in assenza di sali disgelanti	Superfici orizzontali esposte alla pioggia ed al gelo	0.50	30	340	40
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	55

Caratteristiche del calcestruzzo

UNI EN 206 - UNI 11104

Denom. della classe	Acidità	SO ₄ (mg/Kg)	A/C	R _{ck}	Dosaggio	Ricopr.
XA1	>200	≥2000 ≤3000	0.55	35	320	25
XA2	----	>3000 ≤12000	0.50	40	340	25
XA3	----	>12000	0.45	45	360	25

FINE