

Università degli Studi di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura
A.A. 2019-2020

Corso di Laurea in Ingegneria Civile ed Ambientale
Corso di Chimica e Tecnologia dei Materiali

Modulo 2: Tecnologia dei Materiali

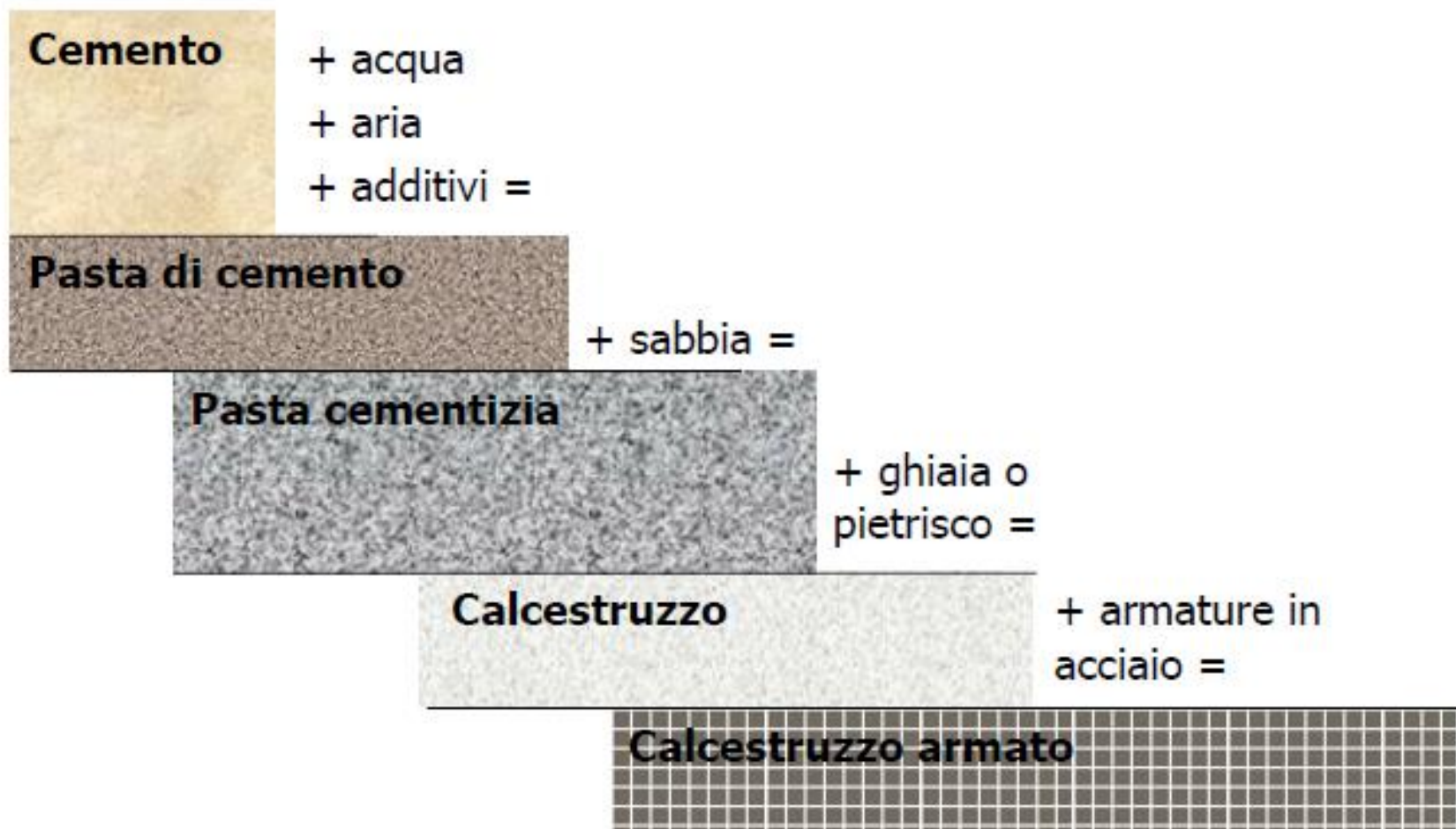
**- Lezione 10: Materiali da costruzione: il
calcestruzzo -**

Barbara Codan

bcodan@units.it

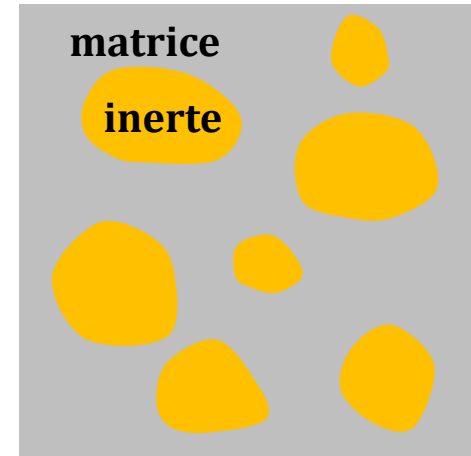
Dipartimento di Ingegneria e Architettura
Università degli Studi di Trieste

I sistemi cementizi



Il calcestruzzo

- Calcestruzzo: materiale composito:
 - Matrice: cemento (legante)
 - Rinforzo: inerte (aggregato)

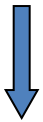


Matrice

Inerte

Ingredienti:

Acqua + cemento (legante)



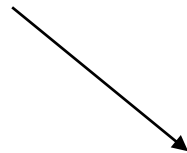
Matrice cementizia

Ingredienti:

Sabbia + ghiaia o pietrisco



Aggregato



Calcestruzzo

Acqua+ legante+inerte

Leganti

- Materiali capaci di legare insieme materiali “slegati”
- Inizialmente si produce una massa fluida più o meno lavorabile
- La massa fluida subisce nel tempo un **irrigidimento**
- Al termine del processo di indurimento, la massa raggiunge elevate resistenze meccaniche
- **Leganti aerei**: induriscono a contatto con aria
- **Leganti idraulici**: Possono indurire anche a contatto con acqua
- Caratteristiche comuni:
 - Sono costituiti da **polveri fini**
 - Le polveri miscelate con acqua formano sospensioni plastiche e fluide
 - La massa solidificata mantiene la forma del getto originario

Leganti aerei ed idraulici

- **Leganti aerei:**
 - Calci aeree, gesso, cemento magnesiaco
- **Leganti idraulici**
 - Calci idrauliche, cementi
- Si distinguono due fasi nel processo di irrigidimento:
 - ***Presa***: il materiale acquisisce proprietà tali da mantenere la forma impartita. La fase dura in genere poche ore
 - ***Indurimento***: il materiale acquisisce le proprietà finali. Può durare mesi o anni

Ingredienti del calcestruzzo

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

Cemento portland

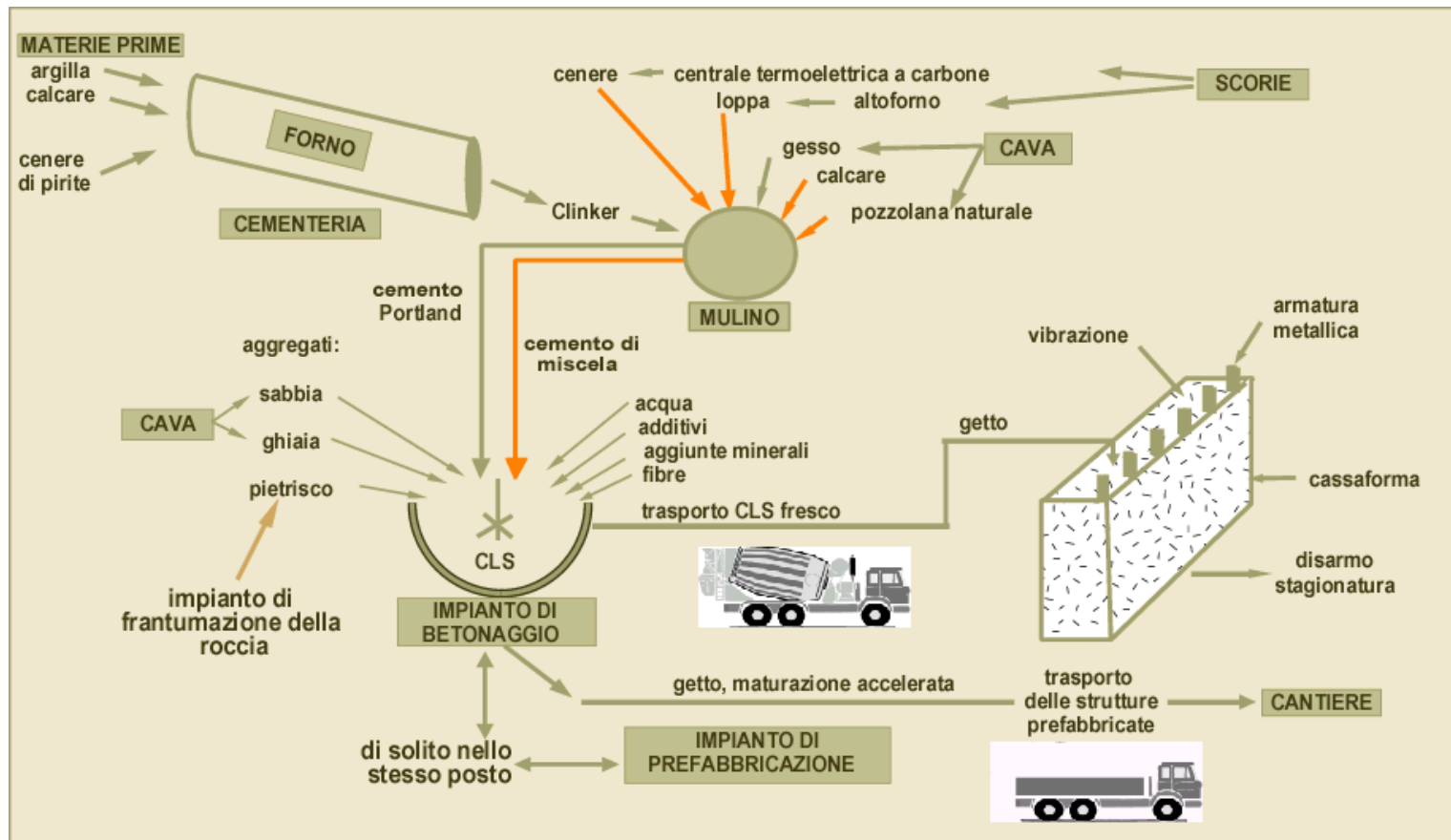
- Il cemento portland è il più importante dei cementi ed è il materiale di base per tutti i tipi di cementi
- Il cemento portland è ottenuto a partire da clinker e gesso (solfato di calcio bi-idrato $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) in proporzione circa 97:3
- Il clinker è ottenuto da:
 - Calcare (80% in peso)
 - Argilla (20% in peso)
- Durante il processo di cottura del clinker, calcare e argilla si dissociano e si ricombinano a dare degli ossidi misti di calcio, silicio, alluminio e ferro



Ciclo di produzione del cemento

Clinker + gesso $\Rightarrow$ cemento portland

Clinker + gesso + altri ingredienti $\Rightarrow$ cemento di miscela

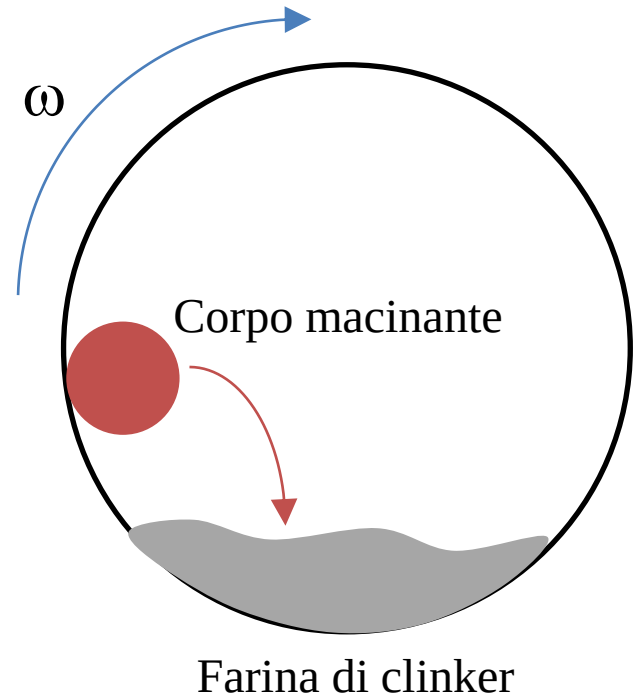


Fabbricazione del clinker

- Le materie di partenza sono **calcare** (ossido di calcio) e **argilla** (silice, allumina e ossido ferrico)
- Il processo di fabbricazione prevede le seguenti fasi:
 - **Macinazione** e miscelazione delle materie prime
 - **Cottura**
 - **Macinazione del clinker** ed aggiunta di gesso
- La macinazione avviene in **mulini a pale** (rotanti attorno al loro asse, e forniti di corpi macinanti)
- L'**omogeneizzazione** avviene in silos in cui viene insufflata aria
- La **farina di clinker** viene quindi miscelata con **acqua**, per avere granuli di dimensioni maggiori da usare nei forni
- Per la **cottura** si usano forni rotanti (cilindro in lamiera di acciaio lungo 70-120 m e diametro 3.5m)
- Il forno è inclinato e posto in lenta rotazione; il materiale esce dal forno a $T=1000^{\circ}\text{C}$, e riscalda l'aria che va al bruciatore

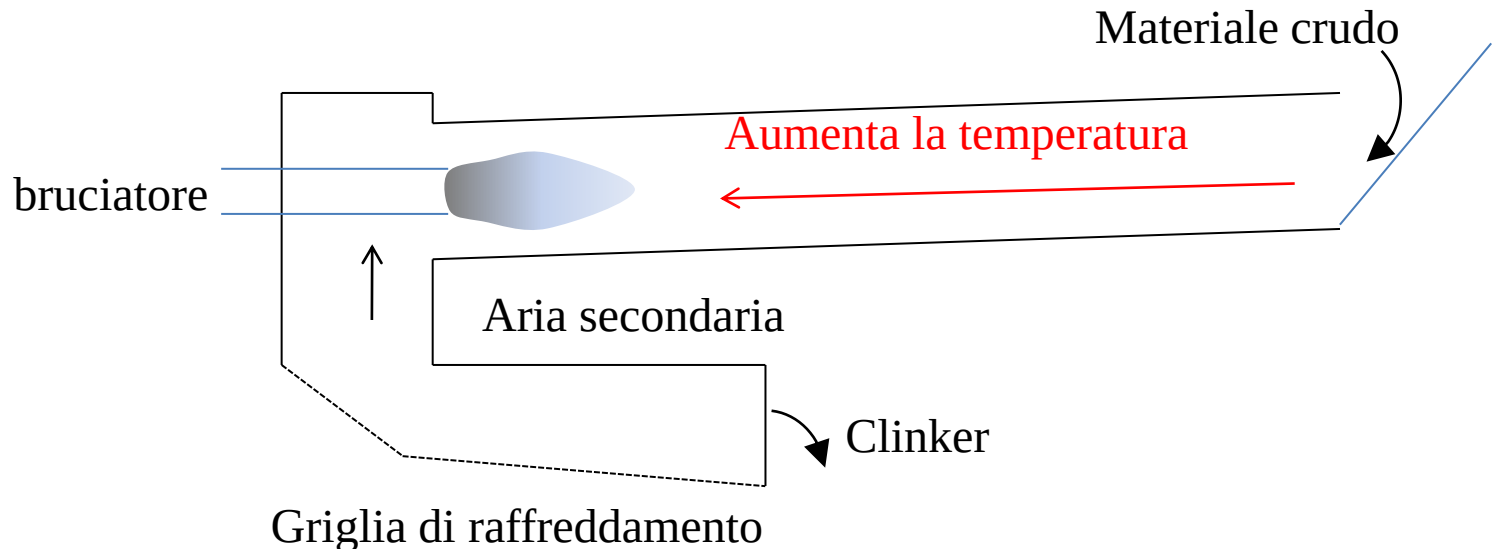
Macinazione e miscelazione

- La macinazione avviene in mulini a palle (rotanti attorno al loro asse, e forniti di corpi macinanti)
- La caduta delle palle provoca la macinazione della farina
- L'omogeneizzazione avviene in silos in cui viene insufflata aria
- La farina di clinker viene quindi miscelata con acqua, per avere granuli di dimensioni maggiori da usare nei forni



Cottura del clinker

- Per la cottura si usano forni rotanti (cilindro in lamiera di acciaio lungo 70-120 m e diametro 3.5m)
- Il forno è inclinato e posto in lenta rotazione. Il materiale esce dal forno a $T=1000^{\circ}\text{C}$, e riscalda l'aria che va al bruciatore



Cottura del clinker

- Appena entrate nel forno, le sferette di calcare e argilla perdono l'acqua di impasto
- Sopra i 500°C, i silicati idrati di alluminio dell'argilla si scindono in silice ed allumina amorfe
- A 700°C comincia la decomposizione del carbonato di calcio
- A 800°C i vari ossidi cominciano a reagire
- Si formano:
 - Silicato bicalcico (ca 800°C),
 - Silicato tricalcico (ca 1300°C)
 - Fusione degli alluminati (ca 1300°C)
 - Alluminato tricalcico e alluminoferrito tetracalcico (ca 1500°C)

Composizione del clinker

- Il **clinker di portland**, a fine cottura, è composto da **ossidi di vario tipo**, più altri ossidi derivanti da impurezze
- Durante la cottura si devono raggiungere delle temperature in cui le forme di ossidi di maggior interesse, i silicati di calcio, sono stabili
- Gli ossidi presenti a fine processo di cottura sono:

Ossido (formula bruta)	Notazione abbreviata	
CaO	C	64-68%
SiO ₂	S	20-23%
Al ₂ O ₃	A	3-8%
Fe ₂ O ₃	F	0.5-5%

- Tutti questi ossidi non sono presenti come ossidi puri, ma formano dei composti tra di loro (**ossidi misti**)

Macinazione del clinker

- Il clinker di portland viene sottoposto ad una ulteriore fase di macinazione, per ridurre le sue dimensioni caratteristiche
- Infatti, le reazioni che comportano l'indurimento del cemento avvengono sulla superficie delle particelle di cemento solido
- Più sono piccole le particelle, più è elevata la superficie
- Quindi le reazioni avvengono più rapidamente, ed si sviluppano più velocemente proprietà meccaniche

Diametro μm	% in peso
2-90	>90
<2	7-9
>90	0-4

Chimica del cemento portland

Costituenti principali

- Silicato tricalcico (alite) C_3S
- Silicato bicalcico (belite) C_2S
- Alluminato tricalcico, C_3A
- Alluminoferrito tetracalcico, C_4AF

Costituenti minori

- Ossido di calcio
- Ossido di magnesio
- Solfati
- Cloruri

Attenzione !!!

nella chimica del cemento

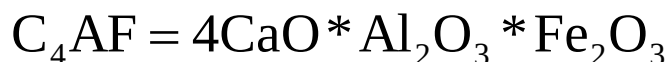
C = CaO (non carbonio, ma ossido di calcio)

S = SiO_2 (non zolfo, ma silice)

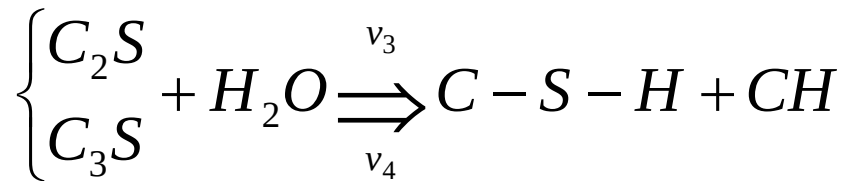
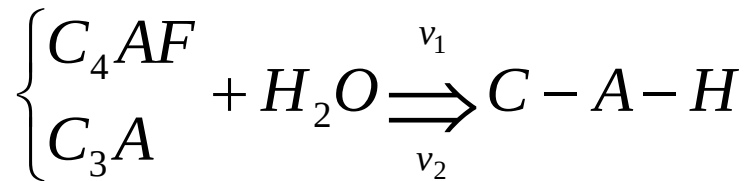
A = Al_2O_3

F = Fe_2O_3 (non fluoro, ma ossido di ferro)

L'idratazione dei componenti principali è responsabile della formazione di composti che conferiscono rigidità al materiale (legante idraulico)



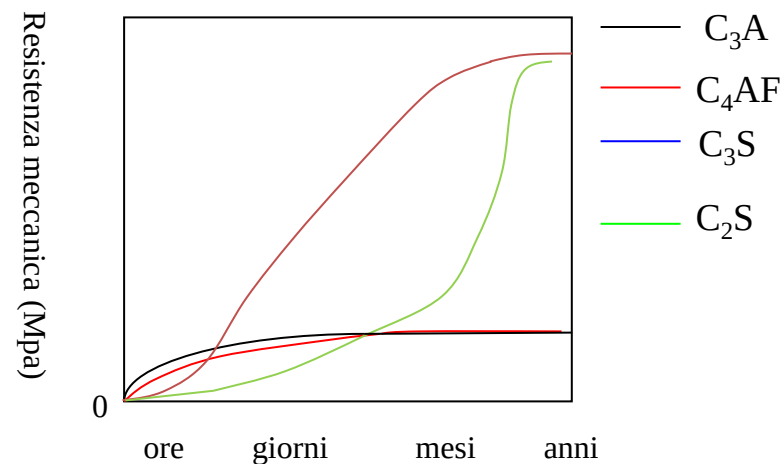
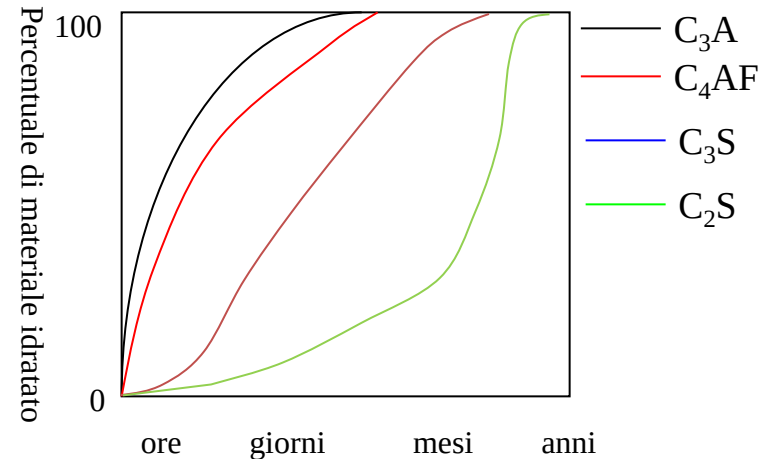
Idratazione del cemento portland



- Le reazioni di idratazione degli ossidi portano all' indurimento del cemento portland
- Le reazioni degli ossidi richiedono la presenza di acqua (legante idraulico)
- La reazione coinvolge prima gli alluminati e gli alluminoferriti, in seguito i silicati di calcio
- Le formule C-S-H e C-A-H non indicano dei composti, ma piuttosto delle famiglie di ossidi, a composizione variabile
- Le reazioni di idratazione sono fortemente esotermiche
- La velocità delle reazioni dipende dalla superficie di contatto con l'acqua, e quindi dalla finezza delle particelle di clinker

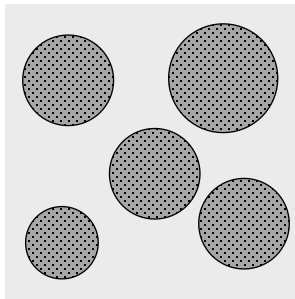
Presa ed indurimento

- Gli **alluminati e gli alluminoferriti**, reagendo **per primi**, sono responsabili delle resistenze del cemento ai tempi più brevi (presa)
- I **silicati**, reagendo in seguito, sono responsabili delle resistenze del cemento ai tempi più lunghi (indurimento)
- Le **proprietà dei silicati idrati sono maggiori delle proprietà degli alluminati idrati**
- Lo sviluppo delle proprietà meccaniche iniziali (presa del C3A) deve essere rallentato tramite l'aggiunta di gesso
- Lo sviluppo delle proprietà meccaniche a pochi giorni può essere aumentato aumentando il contenuto di C3S (a discapito di C2S)

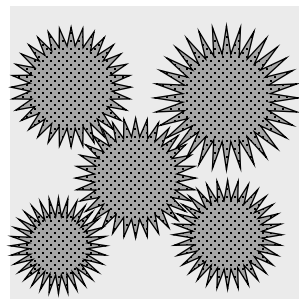


Meccanismi di presa ed indurimento

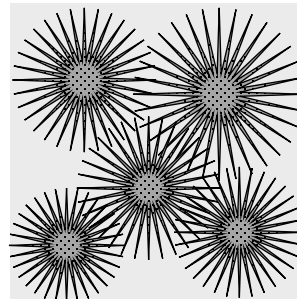
- Il cemento idratato è costituito da fibre (lunghe centinaia di nanometri e di spessore di pochi nanometri), che, intrecciandosi, conferiscono le proprietà di resistenza al getto



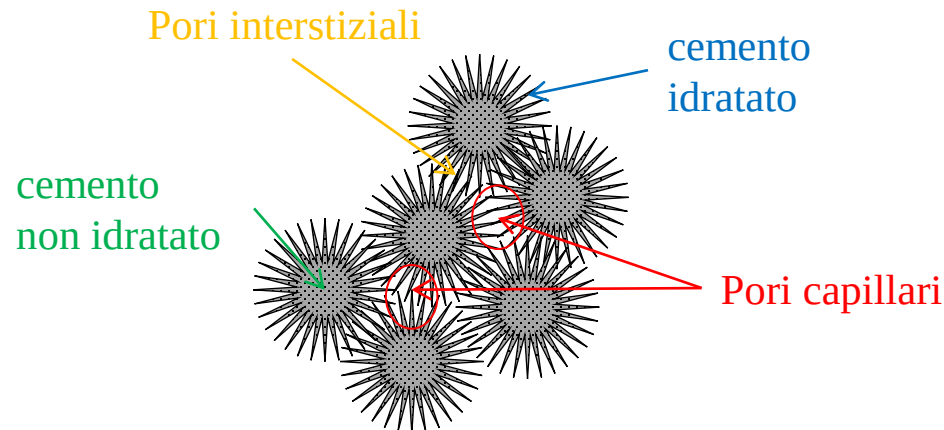
Mescolamento
con acqua



Inizio presa



indurimento



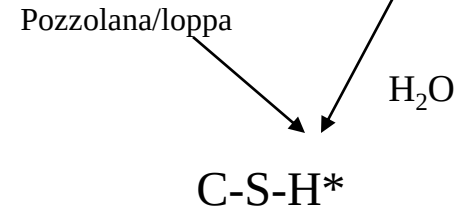
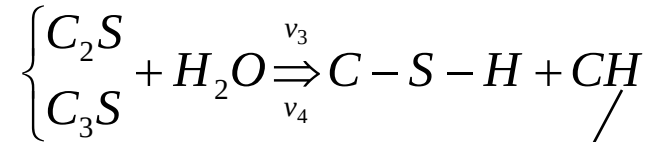
Reazione della pozzolana nei cementi

- La pozzolana (minerale a base di silice amorfa, silicati e silico-alluminati) non è di per se un legante
- Diventa un legante solo in presenza di calce, che si libera dalla reazione di C3S e C2S

Pozzolana + acqua → nessun indurimento

Pozzolana + acqua + calce → indurimento
per formazione di composti chimici
insolubili:

Silicati di calcio idrati (C-S-H)



Cemento Portland + acqua → C-A-H, C-S-H (silicati ed alluminati idrati primari), CH (calce di idrolisi)

Cemento Portland + pozzolana + acqua → C-S-H, C-A-H (silicati ed alluminati idrati primari del portland). C-S-H*, (silicati idrati secondari, derivanti dalla reazione della pozzolana)

Gli aggregati o inerti

- Sostanze minerali che vengono aggiunte al calcestruzzo con diverse finalità:
 - Migliorare le proprietà di rigidezza
 - Abbassare i costi
 - Ridurre i fenomeni di ritiro e riscaldamento
- Il loro contenuto può essere aumentato entro certi limiti
- Diversa natura:
 - Aggregati naturali: Rocce eruttive, Rocce sedimentarie, Rocce metamorfiche
 - Aggregati artificiali
 - Aggregati riciclati
- Dimensioni

Sabbia	$D \leq 4 \text{ mm}$	Aggregato fine
Ghiaia	$d \geq 4 \text{ mm}$	Aggregato grosso di cava
Pietrisco	$d \geq 4 \text{ mm}$	Aggregato grosso di frantumazione
Filler	$D < 0,063 \text{ mm}$	Aggregato finissimo
d = dimensione più piccola D = dimensione più grande		

Proprietà particellari dell'aggregato

- **FORMA** (fattore di sfericità, angolarità): in genere forme più regolari permettono di avere un maggiore riempimento del volume e migliore lavorabilità
- **TESSITURA SUPERFICIALE**: particelle più rugose hanno migliori proprietà meccaniche (aumenta l'aderenza con la matrice) ma richiedono più acqua per avere la stessa lavorabilità
- **DIMENSIONI ED ASSORTIMENTO DIMENSIONALE**
- **POROSITA'**: Determina l'assorbimento d'acqua del calcestruzzo, e quindi anche la sua resistenza ai cicli di gelo-disgelo
- **DENSITA'**: importante per il proporzionamento del calcestruzzo
- **CARATTERISTICHE MECCANICHE**
- **ASSORBIMENTO DI ACQUA**: determina il quantitativo di acqua da aggiungere alla miscela (parte dell'acqua viene assorbita dall'inerte)

Altre proprietà dell'aggregato

- **CARATTERISTICHE CHIMICO-MINERALOGICHE**

- Alcune sostanze devono essere mantenute entro certi limiti, perché riducono la durabilità del calcestruzzo. Le sostanze indesiderate possono:
- Rallentare le reazioni di idratazione (sostanze organiche)
- Depositarsi sulla superficie degli aggregati riducendo l'adesione alla matrice (argille)
- Avere scarse caratteristiche meccaniche (carbone, mica)
- Causare reazioni espansive (solfati o silici reattive ad alcali)
- Causare problemi di corrosione (cloruri)

- **CARATTERISTICHE TERMICHE** determinano l'innalzamento della temperatura durante le fasi di presa ed indurimento, e l'entità di sollecitazioni residue nel calcestruzzo (CTE diversi per cemento ed inerte)

- COEFFICIENTE DI DILATAZIONE TERMICA LINEARE (CTE)
- CALORE SPECIFICO
- CONDUCIBILITA' TERMICA

Umidità

- Un inerte ha al suo interno dei pori, sia aperti che chiusi
- Per le proprietà di lavorabilità sono molto importanti i pori aperti
- Un inerte può essere:
 - Asciutto o insaturo, se i suoi pori aperti sono completamente o parzialmente privi di acqua
 - Bagnato, se tutti i pori aperti sono pieni di acqua e la superficie è ricoperta di acqua
 - Saturo a superficie asciutta (ssa), se i suoi pori aperti sono completamente pieni di acqua, e la superficie è asciutta
 - Assorbimento: contenuto di umidità nell'inerte che determina la condizione di ssa

Aggregato secco

- Una parte dell'acqua aggiunta viene assorbita dall'inerte, riducendo la lavorabilità del calcestruzzo
- Assorbimento = 1%
 - $MC=300 \text{ kg/m}^3$, $Ma \text{ } 150 \text{ l/m}^3$, $Mi=2000 \text{ kg/m}^3$
 - Aggiungendo i quantitativi nominali, l'inerte assorbirà un quantitativo di acqua pari a:
 - $M_{aa}=0.01*2000=20 \text{ kg/m}^3$
 - Il calcestruzzo sarà composta da: $MC=300 \text{ kg/m}^3$, $Ma=150-20=130 \text{ l/m}^3$, $Mi=2000+20=2020 \text{ kg/m}^3$
- Perde in lavorabilità rispetto alle specifiche
- Allora bisogna ridurre il contenuto di inerte umido: di 20kg
 - I 20 Kg che verranno assorbiti dall'inerte devono essere aggiunti aumentando il contenuto di acqua
 - Il calcestruzzo sarà composta da: $MC=300 \text{ kg/m}^3$, $Ma=150+20=170 \text{ l/m}^3$, $Mi=2000-20=1980 \text{ kg/m}^3$
 - l'inerte assorbirà un quantitativo di acqua pari a $M_{aa}=0.01*1980=19.8 \text{ kg/m}^3$
 - Il calcestruzzo sarà composta da: $MC=300 \text{ kg/m}^3$, $Ma=170-19.8=150.2 \text{ l/m}^3$, $Mi=1980+19.8=1999.8 \text{ kg/m}^3$

Aggregato bagnato

- Oltre all'acqua aggiunta, altra acqua viene rilasciata dall'inerte, aumentando la porosità e riducendo le caratteristiche meccaniche e fisiche
- Assorbimento = 1%, umidità 3%
- Acqua rilasciata: 2%
- Aggiungendo i quantitativi nominali:
 - 200 Kg di inerte cederanno alla malta 40 Kg di acqua
 - $MC=300 \text{ kg/m}^3$, $Ma=150+40=190 \text{ l/m}^3$, $Mi=2000-40=1960 \text{ kg/m}^3$
- Aumento il rapporto a/c, diminuiscono le caratteristiche meccaniche
- Quindi bisogna ridurre il contenuto di acqua di circa 40 l
 - Il calcestruzzo sarà composto da: $MC=300 \text{ Kg/m}^3$, $Ma=150-40=110 \text{ l/m}^3$, $Mi=2000+40=2040 \text{ Kg/m}^3$
- L'inerte rilascerà: $0.02 \cdot 2040 = 40.8 \text{ Kg}$ di acqua
- E quindi la miscela sarà effettivamente costituita da:
 - $MC=300 \text{ kg/m}^3$, $Ma=150.8 \text{ l/m}^3$, $Mi=1999.2 \text{ kg/m}^3$

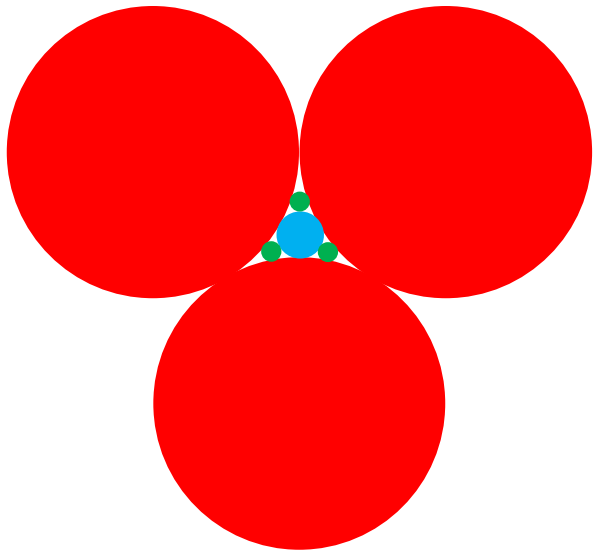
Aggregato SSA

- In questo caso se la ricetta del calcestruzzo prevede determinati valori del contenuto di acqua, cemento ed inerte, la malta deve essere realizzata aggiungendo esattamente i quantitativi previsti
- Situazione ideale!!!!

Assorbimento	Condizione inerte	Mc di progetto	Ma di progetto	Mi di progetto	Mc effettivi	Ma effettivi	Mi effettivi
		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	l/m ³	kg/m ³
1%	Ssa	300	150	2000	300	150	2000
	Completamente secco	300	150	2000	300	170	1980
	Umidità del 3%	300	150	2000	300	110	2040

Assortimento granulometrico dell'inerte

- L'inerte deve essere ben assortito: le diverse frazioni (pezzature), dalle più piccole alle più grandi, devono essere presenti nelle dovute proporzioni
 - Massimo impacchettamento
 - Migliore lavorabilità



Additivi

- Migliorano specifiche proprietà del getto in base a determinate esigenze

– Acceleranti

- **Migliorano lo sviluppo delle proprietà a tempi brevi.** Il genere, non hanno influenza sulle proprietà a lungo termine. Applicazioni tipiche: getti in clima freddo.
- **Acceleranti di presa:** è richiesto che il tempo di inizio presa a 5°C sia pari al massimo al 60% del cemento senza additivo. Il tempo di inizio presa a 20°C deve comunque essere maggiore di 30 minuti
- **Acceleranti di indurimento:** trietanolammina, formiato di calcio. La resistenza dopo 24 ore a 20°C deve essere il 20% in più rispetto al calcestruzzo senza additivo. Dopo 48 ore a 5°C deve essere il 30% in più. Dato che in genere la loro presenza comporta una riduzione della resistenza finale, si richiede che la resistenza dopo 28 giorni sia pari almeno al 90% del cemento senza additivo

– Ritardanti di presa

- Hanno funzione opposta rispetto agli acceleranti. Utilizzati per getti massivi o in clima caldo. Viene richiesto che il tempo di inizio e fine presa siano 90 minuti e 4 ore maggiori rispetto a quelli di un cemento senza additivo

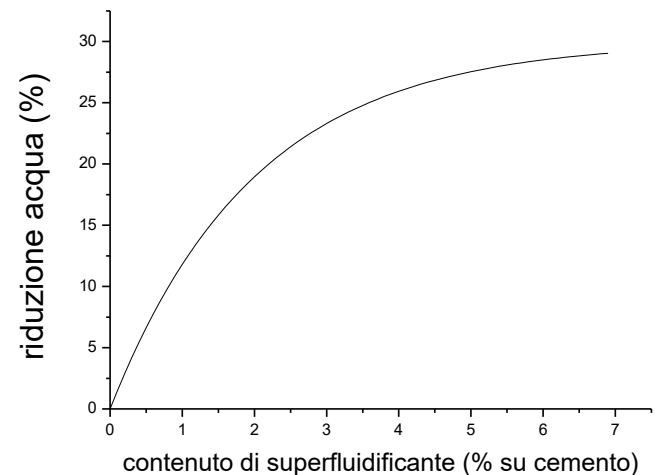
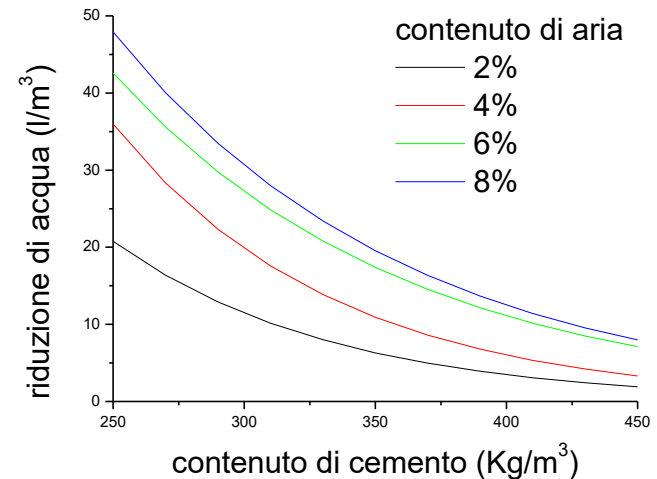
Additivi

- **Aeranti**

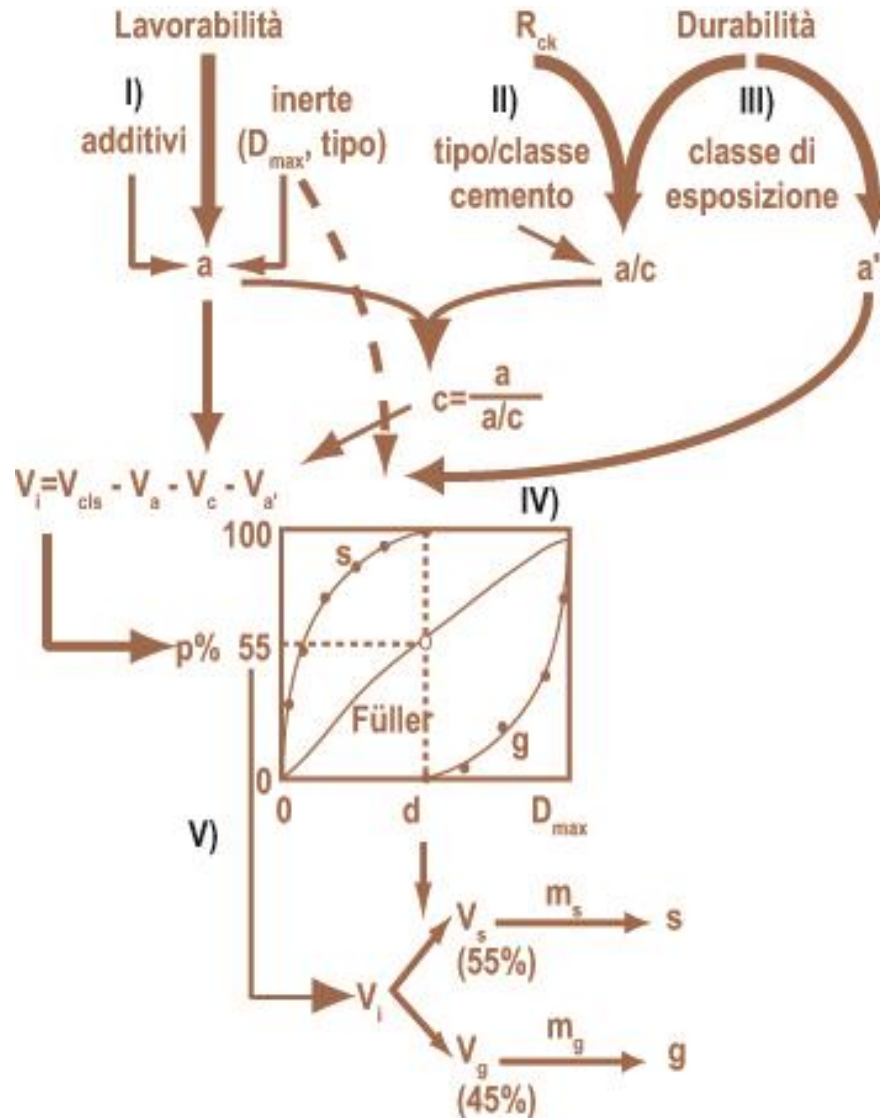
- Formano bolle d'aria all'interno della malta indurita, migliorando la resistenza ai cicli di gelo-disgelo
- La presenza di bolle d'aria favorisce la lavorabilità

- **Fluidificanti / superfluidificanti**

- A parità di contenuto di acqua, aumentano le proprietà di flusso del materiale
- A parità di lavorabilità, riducono il contenuto di acqua
- Diventano possibili anche getti di forme molto complesse e sezioni sottili
- Sono in genere polimeri, assorbiti sulla superficie delle particelle, aumentando le forze repulsive tra particelle, impedendone l'aggregazione



Mix design



Mix design

Il mix-design, letteralmente progetto della miscela, è il procedimento per il **calcolo della composizione del calcestruzzo** (in termini di quantità di cemento, di acqua e di inerti per m³ di calcestruzzo) a partire da:

- **proprietà del materiale indurito** (resistenza meccanica, modulo elastico, ritiro, scorrimento viscoso, durabilità, ecc.), in base all'esigenza del progetto dell'opera;
- **esigenze esecutive** (lavorabilità, organizzazione del cantiere, modalità di getto, ecc.);
- **materiali disponibili** (tipo di cemento, di inerti e di additivi).

Mix design

Il mix-design è il progetto della miscela e permette di **valutare il dosaggio dei singoli elementi** che costituiscono il calcestruzzo sulla base delle caratteristiche che quest'ultimo deve possedere per soddisfare, da un lato le necessità del progettista, dall' altro le esigenze dell'impresa.

Il mix design semplice è impostato su 4 parametri base indispensabili:

- resistenza caratteristica (R_{ck})
- tipo e classe di cemento
- classe di consistenza
- diametro massimo dell' aggregato (D_{max})

Il mix design complesso si ottiene aggiungendo almeno un altro parametro, ad esempio la durabilità.

Metodo dei volumi assoluti

La composizione del calcestruzzo è calcolata mediante il metodo dei **volumi assoluti dei singoli componenti**. Il **volume del calcestruzzo fresco** posto in opera è uguale alla **somma dei volumi assoluti dei singoli componenti** (compresa l'aria inglobata):

$$V_{cls} = V_c + V_a + V_{a'} + V_i$$

$$V_{cls} = 1000 \text{ l}$$

$$V_c = c/p_c$$

c = cemento

$$V_a = a$$

$$V_{a'} = 10 a'$$

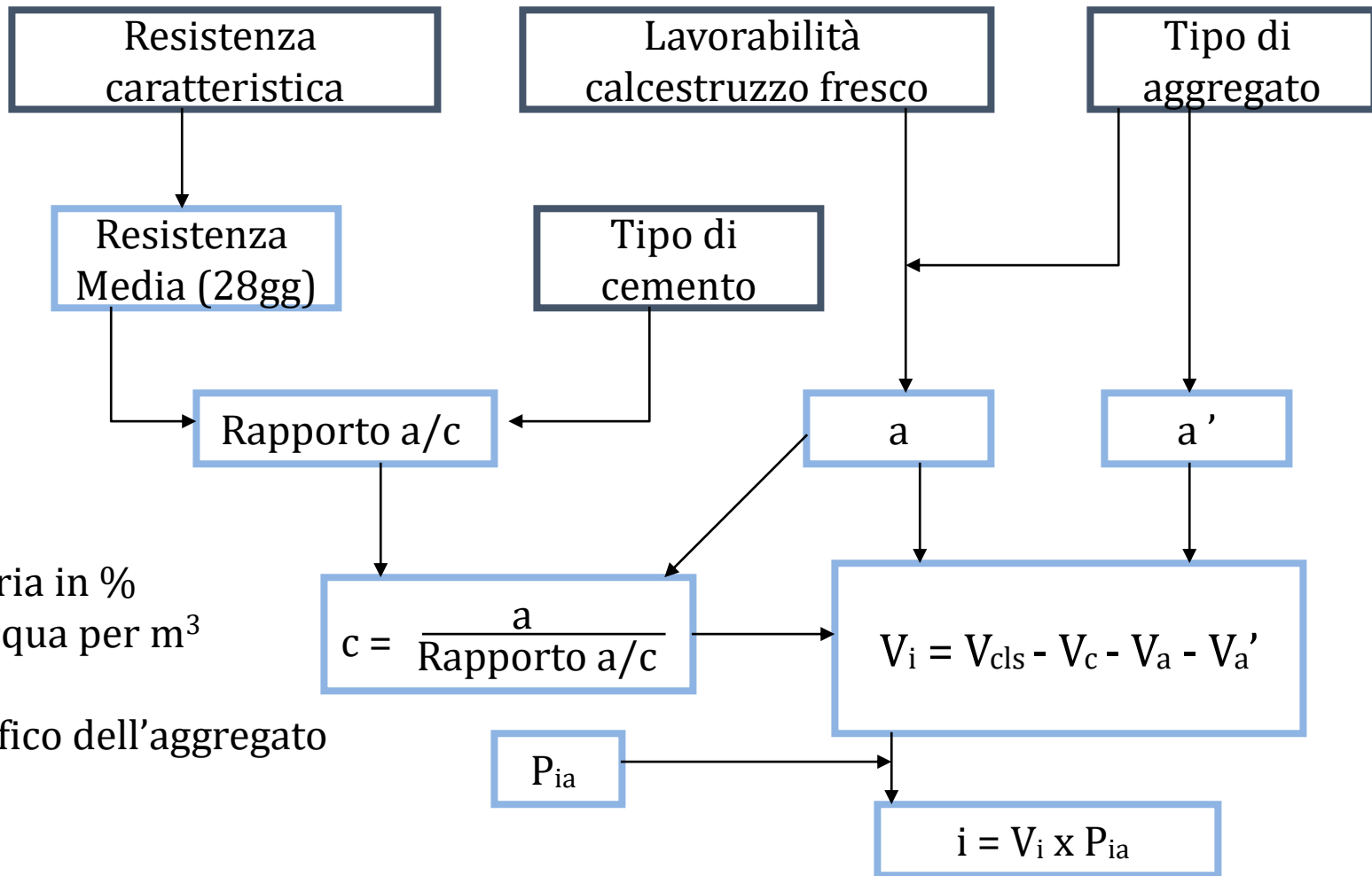
V_i = volume assoluto dell'aggregato misto

Qualora si ricorra all'impiego di additivi, dovranno anch'essi essere considerati ai fini del calcolo dei volumi

Regole fondamentali per il progetto della miscela

- **L'acqua (a)** in Kg/m³ dipende dalla lavorabilità del calcestruzzo fresco e dal tipo di inerti. (Regola di Lyse)
- Il rapporto **acqua/cemento (a/c)** dipende dalla resistenza caratteristica **R_{ck}** e dal **tipo di cemento**. (Legge di Abrams)
- Noto il rapporto **a/c** e il valore di **a** è possibile calcolare la quantità di **cemento c**
- Il **volume dell'inerte (V_i)** è ottenuto sottraendo al volume di calcestruzzo (**V_{cls}**), il volume di cemento (**V_c**), il volume di acqua (**V_a**) e il volume di aria (**V_{a'}**). Risulta quindi: **V_i = V_{cls} - V_c - V_a - V_{a'}**
- Il peso degli aggregati (**i**) in Kg è ottenuto moltiplicando il volume ottenuto per il peso specifico (**P_{ia}**). Quindi **i = V_i x P_{ia}**

Organigramma del mix - design



C = cemento

A' = volume d'aria in %

A = peso dell'acqua per m³ di cls

P_{ia} = peso specifico dell'aggregato

V_{cls} = 1000 l

V_c = c/pc

V_a = A

V_a' = 10A'

V_i = volume dell' aggregato misto

P_c = peso specifico del cemento

I “pilastri” del mix - design

Il MIX-DESIGN deve garantire:

- la lavorabilità
- la durabilità
- le proprietà meccaniche

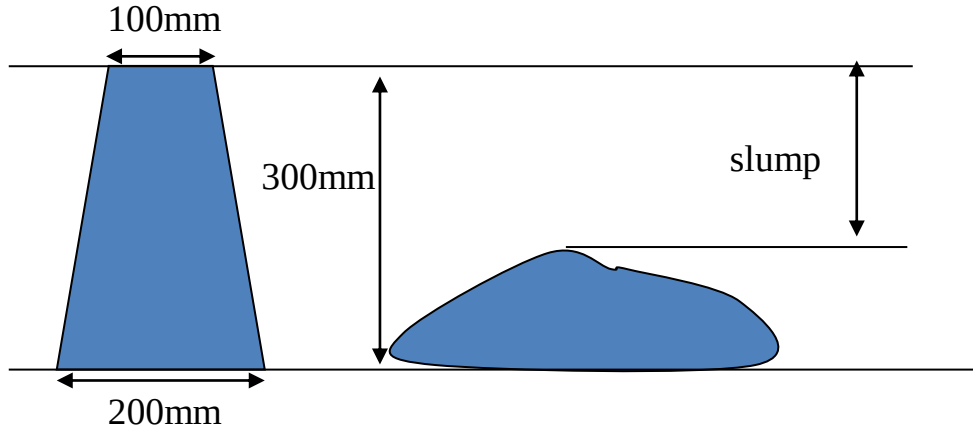
Per determinare l'esatta ricetta del calcestruzzo, si ricorre a due regole fondamentali che sono alla base del mix-design, entrambe legate alla quantità d'acqua necessaria per confezionare il calcestruzzo:

- la regola di Lyse
- la legge di Abrams



Lavorabilità

- E' la proprietà più importante del calcestruzzo fresco
- Definisce la capacità del calcestruzzo di fluire (viscosità)
- Si misura con la prova di abbassamento del cono di Abrams (di dimensioni e forma standard)
- Il cono si abbassa per effetto della gravità
- Le norme definiscono 5 classi di consistenza in funzione dello slump



Classe di consistenza	Slump (mm)	denominazione
S1	10-40	Terra umida
S2	50-90	Plastica
S3	100-150	Semi-fluida
S4	160-210	Fluida
S5	≥ 220	Super-fluida

L'acqua

- L'aggiunta di acqua è necessaria per le reazioni di idratazione del cemento
- L'acqua in eccesso rispetto al rapporto stechiometrico conferisce lavorabilità al cemento
- La lavorabilità aumenta all'aumentare del rapporto a/c (**legge di Lyse**)
- La resistenza diminuisce all'aumentare del rapporto a/c
- **Legge di Abrams**

$$R = \frac{k_1}{k_2^{a/c}}$$

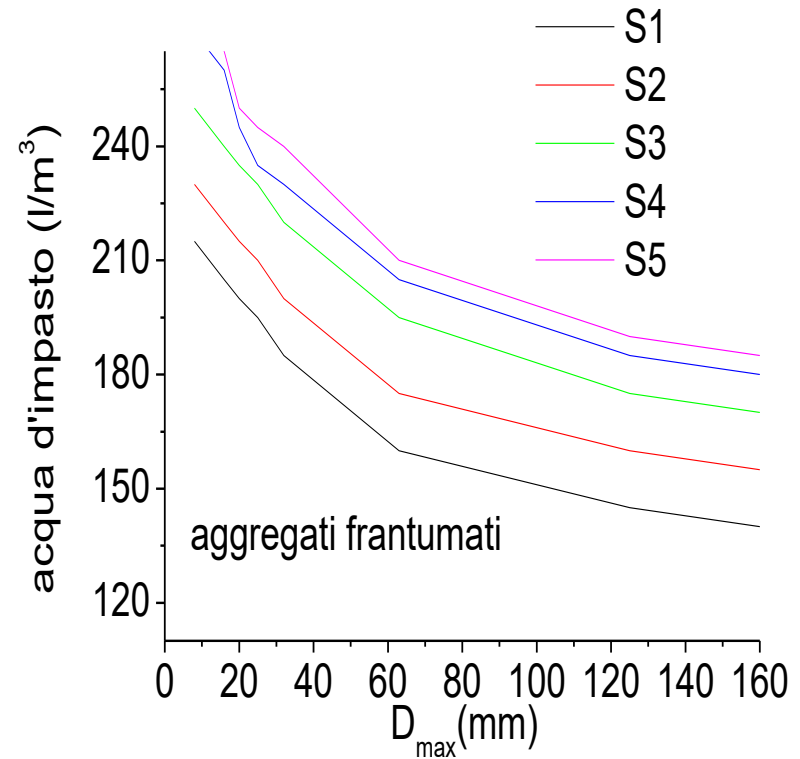
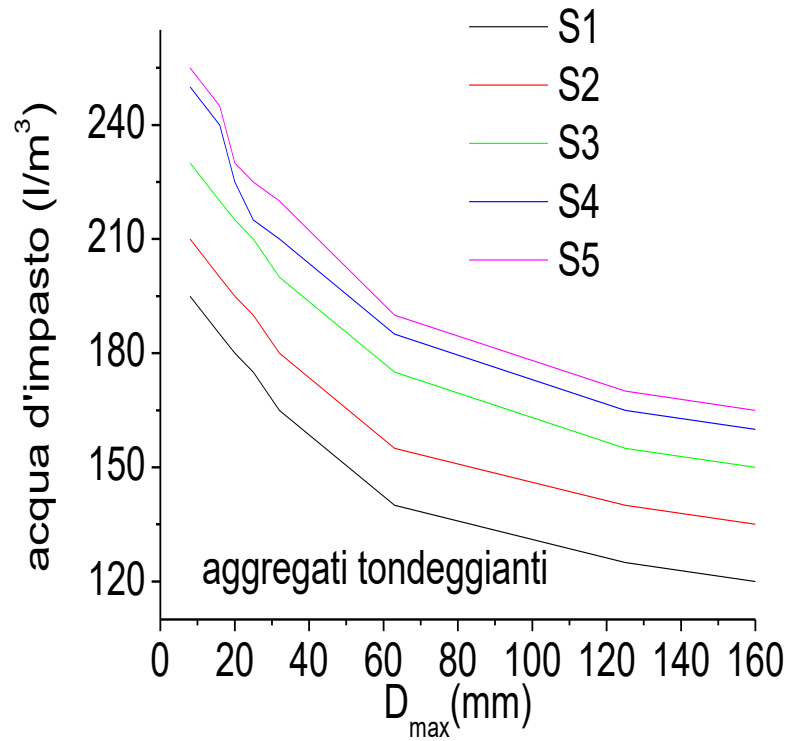
- K_1 e K_2 sono costanti dipendenti dal tempo e la temperatura di stagionatura, e dal tipo di cemento

Lavorabilità e acqua

- Un calcestruzzo più fluido richiede più acqua
- A parità di fluidità, è richiesto un contenuto di acqua maggiore per aggregati più fini (maggiore superficie di interfaccia e quindi maggiore attrito tra particelle)
- Per lo stesso motivo, a parità di fluidità, aggregati frantumanti richiedono un contenuto di acqua maggiore rispetto ad aggregati tondeggianti

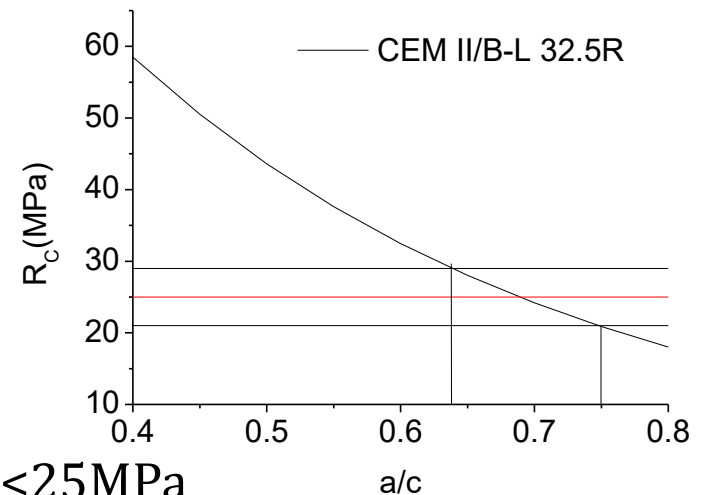
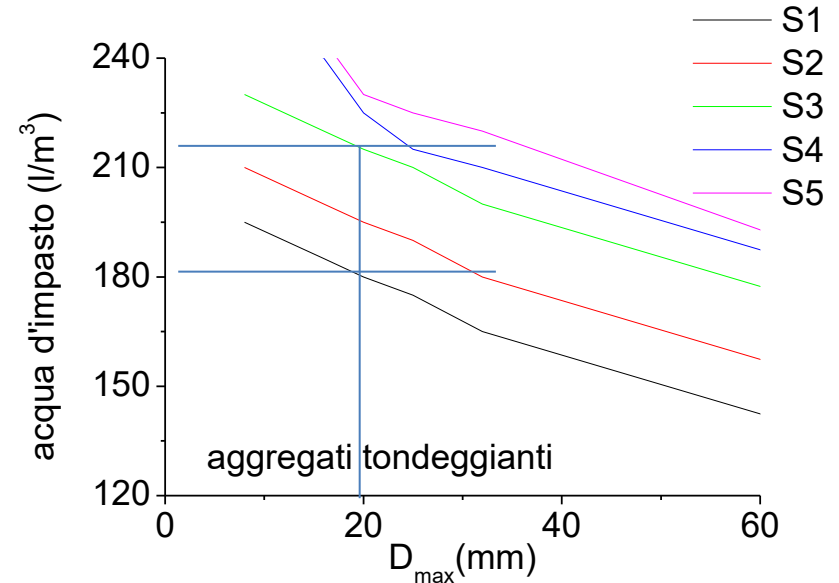
Diametro dell'inerte (mm)	Richiesta d'acqua (kg/m ³)					
	S1	S2	S3	S4	S5	
8	195	210	230	250	255	
16	185	200	220	240	245	
20	180	195	215	225	230	
25	175	190	210	215	225	
32	165	180	200	210	220	
63	140	155	175	185	190	
125	125	140	155	165	170	
160	120	135	150	160	165	

Lavorabilità e acqua



Importanza della lavorabilità

- Se viene prescritta solo la resistenza, si possono avere delle lavorabilità troppo basse durante la posa in opera
 - R=25 MPa dato progetto
 - Utilizzo una miscela dosata con:
 - MC=280 Kg/m³ Ma=180 l/m³
 - Mi=1900 Kg/m³ Dmax=20 mm
 - CEM II/B-L 32.5R
 - Rapporto a/c=0.64
- R=30 MPa resistenza effettiva della miscela (determinata sperimentalmente per quel cemento)
- Lavorabilità bassa!!! (S1)
- Allora aumento il contenuto di acqua per arrivare ad una classe di consistenza S3 (30 l/m³ in più)
- Rapporto a/c=0.75
- Diminuzione proprietà meccaniche a 21MPa<25MPa



1° regola: Regola di Lyse

La **regola di Lyse** permette di determinare la quantità d'acqua necessaria per confezionare un calcestruzzo in relazione alla classe di consistenza del cls stesso e del diametro massimo degli aggregati. Può essere enunciata in due modi diversi tra loro complementari:



- Per un dato diametro massimo dell'aggregato, maggiore è la classe di consistenza richiesta per il calcestruzzo fresco, maggiore deve essere la quantità di acqua nell'impasto
- Per una data classe di consistenza del calcestruzzo, maggiore è il diametro massimo dell'aggregato, minore è la richiesta d'acqua necessaria per ottenere la consistenza prefissata

Acqua efficace

Come enunciato nella regola di Lyse, si può osservare in che modo la richiesta d'acqua aumenti in funzione del diametro massimo dell'aggregato e della classe di consistenza richiesta



Diametro (mm)	Quantità di acqua in l / m ³				
	S1	S2	S3	S4	S5
8	195	210	230	250	255
16	185	200	220	240	245
20	180	195	215	225	230
25	175	190	210	215	225
32	165	180	200	210	220
63	140	155	175	185	190
125	125	140	155	165	170
160	120	135	150	160	165

I valori riportati in tabella subiscono variazioni a seconda che l'aggregato sia di derivazione alluvionale o di frantumazione

Classi di consistenza

La scelta della lavorabilità appropriata per l'opera da realizzare è funzione del tipo di struttura e della tecnica costruttiva che si intende applicare e viene espressa tramite lo “slump” cioè l'abbassamento al cono.

CLASSE DI CONSISTENZA	DENOMINAZIONE	SLUMP (mm)	APPLICAZIONI
S1	Terra umida	10-40	Pavimenti messi in opera con vibro-finitrice
S2	Plastica	50-90	Strutture messe in opera con casseri rampanti
S3	Semifluida	100-150	Strutture non armate o poco armate
S4	Fluida	160-210	Strutture mediamente armate come fondazioni, travi, pilastri, solai ecc..
S5	Superfluida	>210	Strutture fortemente armate di ridotta sezione e/o complessa geometria



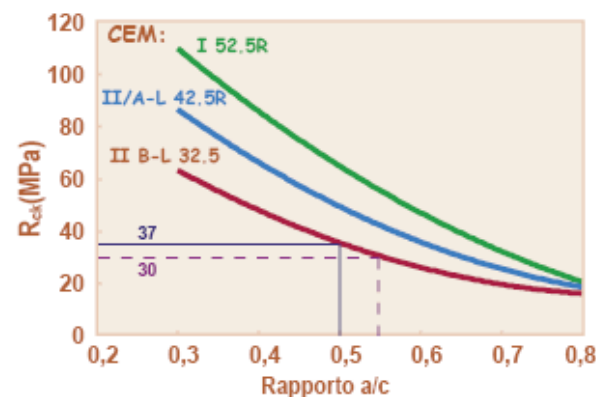
2° regola: la legge di Abrams

La legge di Abrams lega il rapporto acqua/cemento con la resistenza meccanica R secondo la relazione:

$$R = \frac{K_1}{K_2^{a/c}}$$

Dove K1 e K2 sono coefficienti dipendenti dal tipo di cemento e dalla stagionatura

Nelle applicazioni pratiche, le correlazioni R_c - rapporto a/c, vengono determinate sperimentalmente misurando la resistenza meccanica media su provini di calcestruzzo confezionati con rapporto a/c noto.



Correlazione della R_{ck} con il rapporto a/c per tre diversi cementi

Come si costruisce la curva

Qualifiche delle miscele

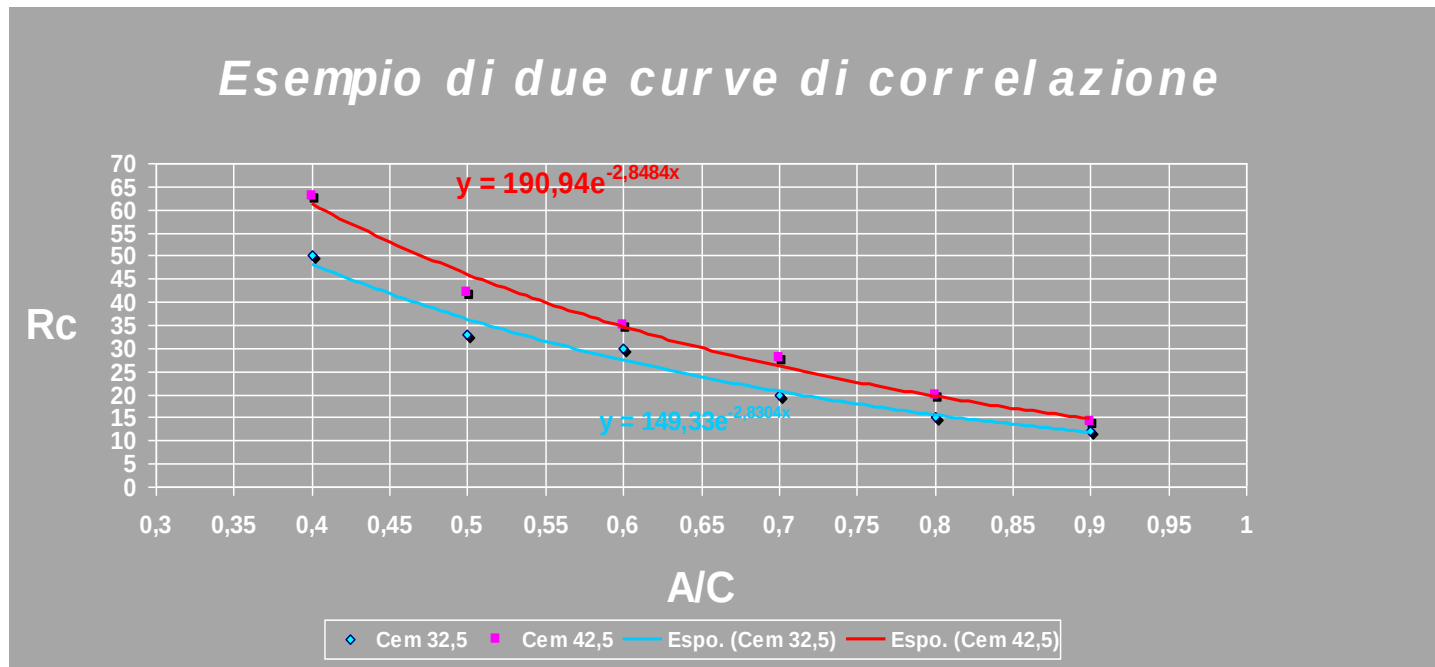
- Scelta dei materiali
 - Tipo e classe dei cementi
 - Aggregati
 - Tipo di additivo

Impasti di prova

- 200 kg di cemento
- 300 kg di cemento
- 400 kg di cemento

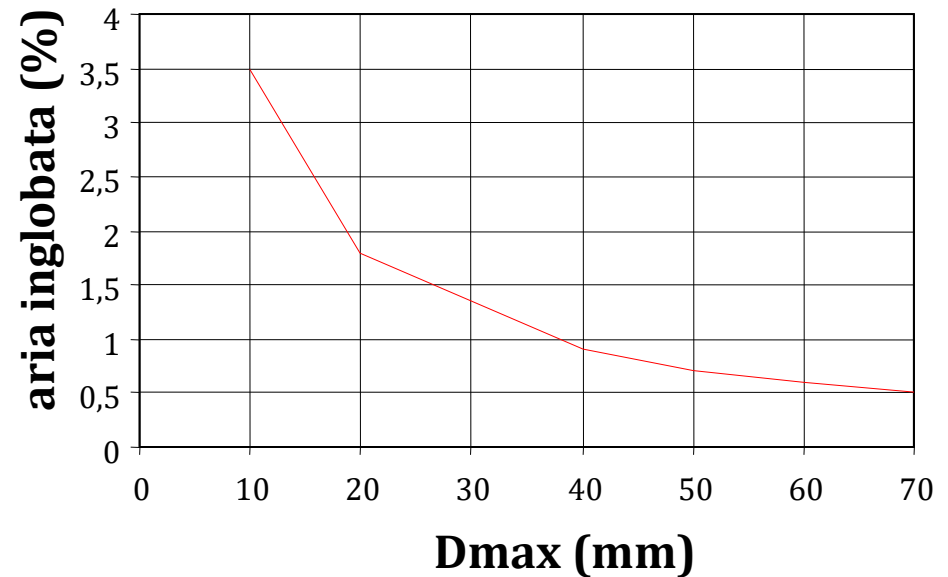
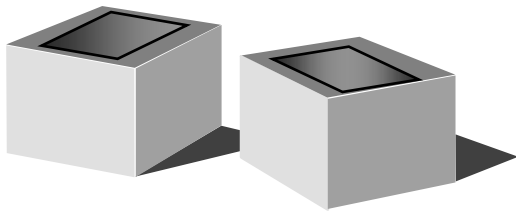
Calcolo del

- Rapporto a/c
- Resistenza media a 28 giorni



Determinazione del volume d'aria inglobata

La percentuale in volume di aria presente nel conglomerato (aria intrappolata) è deducibile dalla curva affianco riportata, la quale mostra la percentuale di aria intrappolata nel calcestruzzo, misurata sperimentalmente dopo compattazione in funzione del diametro massimo (D_{max}) dell'inerte scelto.



Lavorabilità e affidabilità

- La lavorabilità del calcestruzzo influenza non solo la capacità di riempire forme più o meno complesse, ma anche:
 - Affidabilità: capacità di assicurare buoni risultati nel calcestruzzo gettato indipendentemente dalla qualità della messa in opera
 - Compattabilità: espulsione dell'aria intrappolata dal calcestruzzo fresco per raggiungere la massima densità possibile
- Grado di compattazione:

$$g_c = \frac{m_v}{m_{v0}}$$

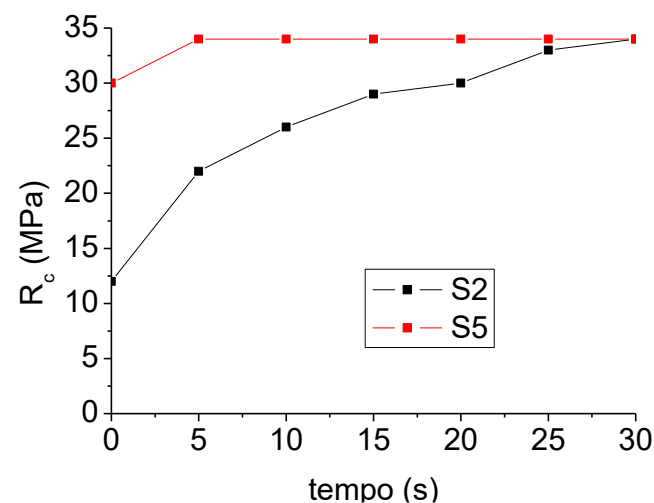
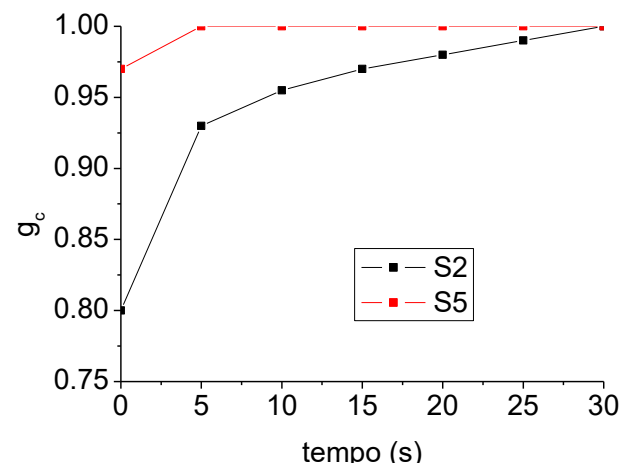
m_v = massa volumica della carota estratta dalla struttura

m_{v0} = massa volumica del provino compattato a rifiuto (massima massa volumica)

Lavorabilità e affidabilità

- Il materiale più fluido riesce a compattarsi in minore tempo
- Assicura migliori prestazioni già a tempi più brevi
- La qualità del calcestruzzo è meno dipendente dall'affidabilità della mano d'opera

Consistenza del cls	Classe di consistenza	Slump (mm)	(g_c) min-max
Plastica	S2	50-90	0,90-0,93
Semi-fluida	S3	100-150	0,93-0,95
Fluida	S4	160-200	0,95-0,97
Super-fluida	S5	> 210	0,97-0,98
Auto compattante	SCC	?	0,99-1,00

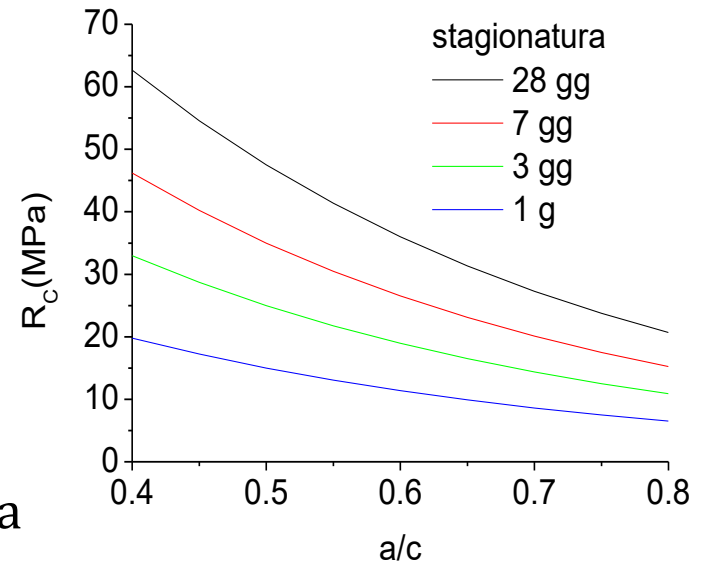


Proprietà meccaniche

- La proprietà più importante per i calcestruzzi è la resistenza a compressione R_c
- Il parametro che influenza in maniera più significativa la R_c è il rapporto a/c
- Legge di Abrams

$$R_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}}$$

- K_1 e K_2 sono costanti dipendenti dal tempo e la temperatura di stagionatura, e dal tipo di cemento
- Gli inerti hanno poca influenza sulla resistenza a compressione, dato che in genere il calcestruzzo si rompe in corrispondenza della fase cementizia (resistenza degli inerti maggiore di quella del cemento)



R = Resistenza media

Per il progetto della miscela si fa riferimento alla resistenza caratteristica R_{ck} valutata a partire dal criterio di accettazione tipo B, di conseguenza si utilizza la formula:

$$R_{ck} = R_m - k \cdot s$$

Dove:

s = scarto quadratico medio

K = coefficiente assunto pari a 1,48 (analisi statistica)

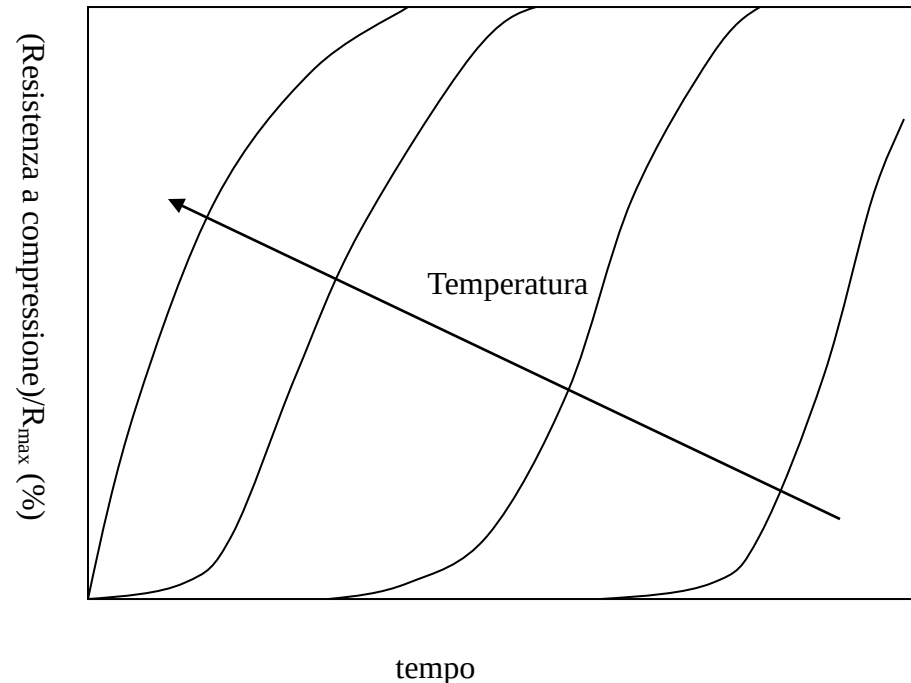


Stagionatura

- E' la fase di presa ed indurimento in cui temperatura ed umidità del cemento sono controllate, in modo da ottimizzare la proprietà meccaniche e fisiche del calcestruzzo
- Aumentando la T, aumenta la velocità della reazione di idratazione secondo una legge di tipo Arrhenius :
- $v = A \exp^{-Q/RT}$
- Insieme alle velocità aumentano i riscaldamenti del getto (problemi in fase di ritiro)

Le norme prescrivono 4 classi di stagionatura

- 1) 12 h
- 2) Viene raggiunto il 35% della resistenza a compressione caratteristica (misurata a 28 gg in condizioni standard)
- 3) Viene raggiunto il 50%
- 4) Viene raggiunto il 70%



Distribuzione granulometrica ottimale

Per realizzare un conglomerato con la massima densità possibile, cioè con il minor contenuto di vuoti interstiziali tra i singoli granuli, la curva granulometrica deve seguire l'equazione [1] proposta da Fuller:

$$P = 100 (d/D)^{1/2} [1]$$

dove **P** è la percentuale di materiale passante allo staccio con apertura **d**; **D** è il "diametro massimo" dell'elemento lapideo più grosso. Un calcestruzzo che soddisfa tale equazione, presenta il massimo impacchettamento possibile, e poichè tale situazione non coincide con un sistema che, miscelato con acqua, possa essere facilmente lavorabile, Bolomey suggerì di modificare leggermente la curva granulometrica ottimale introducendo un parametro **A** che tiene conto anche della lavorabilità richiesta e del tipo di aggregato disponibile (alluvionale o frantumato). L'equazione di Bolomey:

$$P = A + (100-A) \cdot (d/D)^{1/2} [2]$$

Il parametro **A** assume valori crescenti da 8 a 14 se aumenta la lavorabilità del calcestruzzo e se si passa da aggregati alluvionali tondeggianti ad aggregati di frantumazione di forma irregolare

Metodo di calcolo della distribuzione granulometrica ottimale

In pratica è difficile reperire aggregati che siano granulometricamente conformi alle equazioni viste, tuttavia combinando più aggregati reali purché granulometricamente assortiti, è possibile “costruire” un aggregato misto reale molto vicino a quello ideale.

La determinazione delle percentuali di impiego dei singoli aggregati può essere realizzata mediante l'applicazione del:

Modello informatico

le percentuali dei singoli aggregati vengono calcolate attraverso un programma informatico mirato ad ottimizzare la curva granulometrica del calcestruzzo

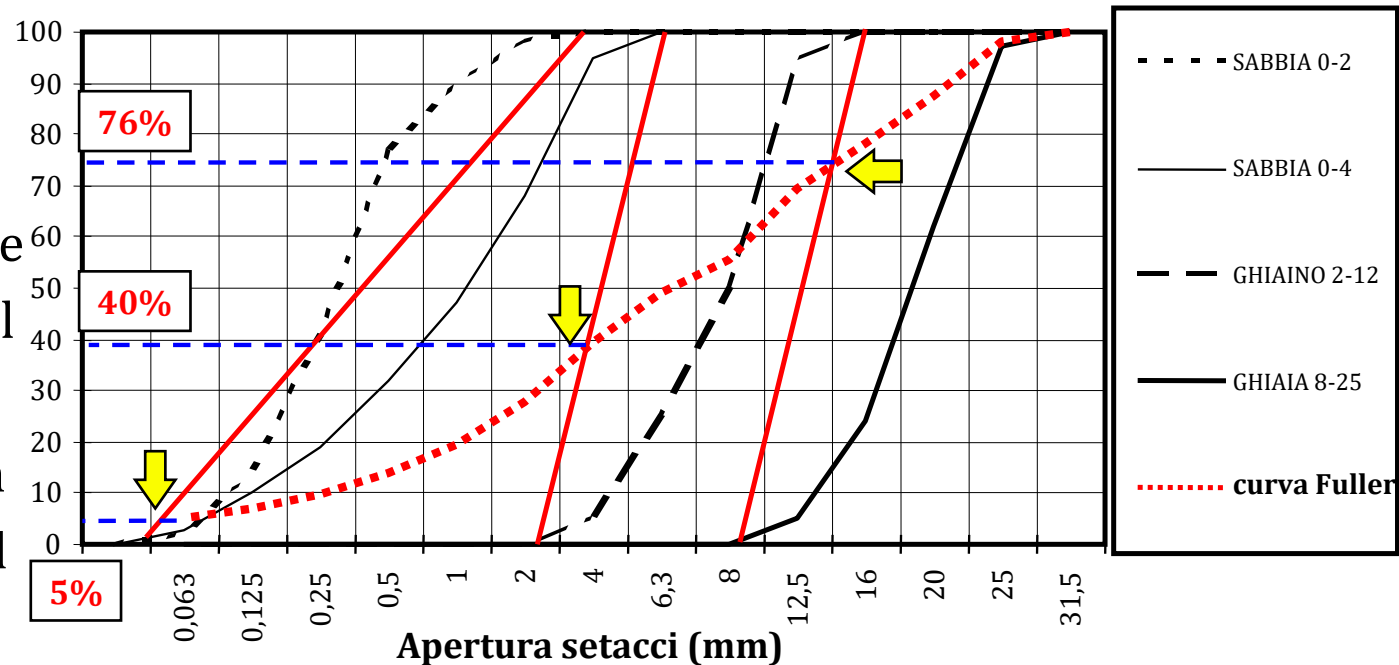
Metodo grafico

Consiste nel riportare su uno stesso diagramma le distribuzioni granulometriche degli inerti reali, misurate attraverso la vagliatura, e una delle curve ideali scelta tra quelle appena viste

Calcolo della distribuzione granulometrica ottimale con il metodo grafico

Per la determinazione della distribuzione granulometrica di un aggregato mediante il metodo grafico, si ricorre alla separazione mediante setacciatura con stacci di diversa luce di maglia ottenendo i pesi delle singole frazioni granulometriche. Questi, espressi percentualmente rispetto al peso di tutto il campione analizzato, consentono di calcolare il materiale passante a ogni staccio.

Riportando in un grafico il materiale passante in funzione dell'apertura (d) del vaglio, si costruisce la cosiddetta "curva granulometrica" del singolo aggregato.



L'intersezione con la curva ideale indica le percentuali dei singoli aggregati da impiegare.

Influenza dell'umidità dell'inerte sull'acqua di impasto

L'umidità dell'aggregato può radicalmente modificare l'acqua di impasto realmente immessa nel calcestruzzo, quindi, attraverso questa variazione, può provocare modifiche nella lavorabilità e può condizionare la Rck. Qualora gli aggregati non siano disponibili in condizioni standard (ssa), sarà necessario modificare le pesate degli ingredienti rispetto al mix design:

$$P_c = P_{ssa}(100 + U_t - U_a):100$$

P_c = Peso corretto

P_{ssa} = Peso saturo a superficie asciutta

U_t = umidità totale in %

U_a = umidità di assorbimento in %

Esempio numerico sul mix-design

Immaginiamo di dover confezionare un calcestruzzo secondo le seguenti prescrizioni:

- Tipo di cemento CEM II B/L 32.5 R
- $R_{ck} = 25 \text{ Mpa}$ $\Rightarrow$ $R_{cm} = 32.4 \text{ Mpa}$ $\Rightarrow$ $a/c = 0.67$
- Classe di consistenza S3 (150mm)
- $D_{max} = 25\text{mm}$ (inerte alluvionale) $\Rightarrow$ $a = 200 \text{ l/m}^3$

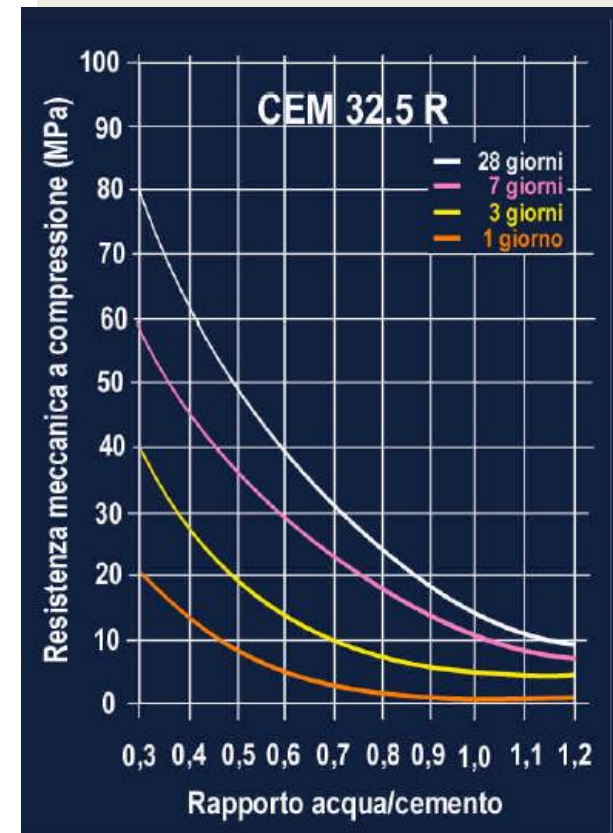
$$C = \frac{a}{\text{Rapporto } a/c} = \frac{200}{0.67} = 300 \text{ Kg/m}^3$$

$$V_i = V_{cls} - V_c - V_a - V_{a'}$$

$$V_i = 1000 - (300/3600 \times 1000) - 200 - 16 = 701 \text{ l}$$

$$V_i = 701 \text{ l} \Rightarrow V_i = 0.701 \text{ m}^3$$

$$I = V_i \times \rho_{ia} = 1900 \text{ Kg} \Rightarrow I = 1900 \text{ Kg/m}^3$$



Curva di correlazione ricavata sperimentalmente misurando la resistenza media dei calcestruzzi con rapporto a/c noto

Supponendo che in base alla disponibilità degli inerti vengano impiegati 1100 Kg/m^3 di ghiaia e 800 kg/m^3 di sabbia, la composizione del calcestruzzo sarà:

Mix-design

$$\left. \begin{array}{l} c = 300 \text{ Kg/m}^3 \\ a = 200 \text{ Kg/m}^3 \end{array} \right\} a/c = 0.67$$
$$g = 1100 \text{ Kg/m}^3 \text{ (ssa)}$$
$$s = 800 \text{ Kg/m}^3 \text{ (ssa)}$$

$$\text{Slump} = 150 \text{ mm}$$

I valori delle masse g (ghiaia) ed s (sabbia) sono riferiti come al solito alla situazione standard di s.s.a. Immaginiamo che in seguito ad una giornata di pioggia, l'umidità della ghiaia (u_g) e della sabbia (u_s) sia:

$$u_g = 3\%$$

$$u_s = 6\%$$

a fronte di valori di assorbimento che sono:

$$u_{ga} = 1\%$$

$$u_{sa} = 0.5\%$$

Modifica delle pesate degli ingredienti rispetto al mix design

$$P_c = P_{ssa}(100 + u_t - u_a)/100$$

$$P_{cg} = 1100 (100+3-1)/100 = 1122 \text{ Kg/m}^3$$

$$P_{cs} = 800 (100+6-0.5)/100 = 844 \text{ Kg/m}^3$$

Essendo per entrambi gli inerti, l'umidità maggiore dell'assorbimento, si verificherà una cessione di acqua all' impasto da parte degli inerti bagnati pari a $(1122-1100) + (844-800) = 66$ litri che dovranno essere sottratti all'acqua di impasto

Mix-design “corretto”

$$\left. \begin{array}{l} c = 300 \text{ Kg/m}^3 \\ a = 134 \text{ Kg/m}^3 \end{array} \right\} a/c = 0.67 \quad \text{Slump} = 150 \text{ mm}$$

$$g = 1122 \text{ Kg/m}^3 \text{ (ssa)}$$

$$s = 844 \text{ Kg/m}^3 \text{ (ssa)}$$

La durabilità nel mix-design

La **durabilità** gioca un ruolo determinante nel mix design poiché rappresenta un fattore vincolante nella scelta del rapporto **a/c**

La durabilità, definita come la conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali, è una proprietà essenziale affinché sia garantito il livello di sicurezza della struttura durante l'intera vita utile.

Affinché un **calcestruzzo sia durabile** è necessario **ridurre** quanto più possibile la sua **permeabilità** in modo tale da ostacolare la penetrazione degli agenti patogeni i quali potrebbero attraversare la matrice cementizia e raggiungere i ferri di armatura. Per perseguire tale obiettivo è necessario lavorare sulla **porosità capillare** la quale diminuisce in funzione del rapporto **a/c**, ed è pertanto responsabile della resistenza meccanica. Ne deriva che la **durabilità** è tanto maggiore quanto più alta è la **R_{ck}**

In base a tale criterio la normativa stabilisce i valori minimi di **R_{ck}** e contenuto in cemento, e massimo rapporto **a/c** in funzione delle condizioni ambientali identificate come classi di esposizione.

Esempio applicativo

Immaginiamo che per esigenze strutturali sia stato prescritto un R_{ck} 25 per realizzare una vasca di trattamento di acque industriali contenenti cloruri.

Pur non essendo abili nell'associare l'esatta esposizione ambientale al caso in esame, possiamo facilmente individuare l'esatta classe di esposizione tramite gli esempi informativi riportati sulla UNI 11104.

In sintesi, tramite il prospetto 1 della UNI 11104 collochiamo l'opera da realizzare nella classe di esposizione **XD2**, successivamente stabiliamo i valori limite riportati nel prospetto 4 della medesima norma, in funzione della classe di esposizione individuata.

Prospetto 1 UNI 11104

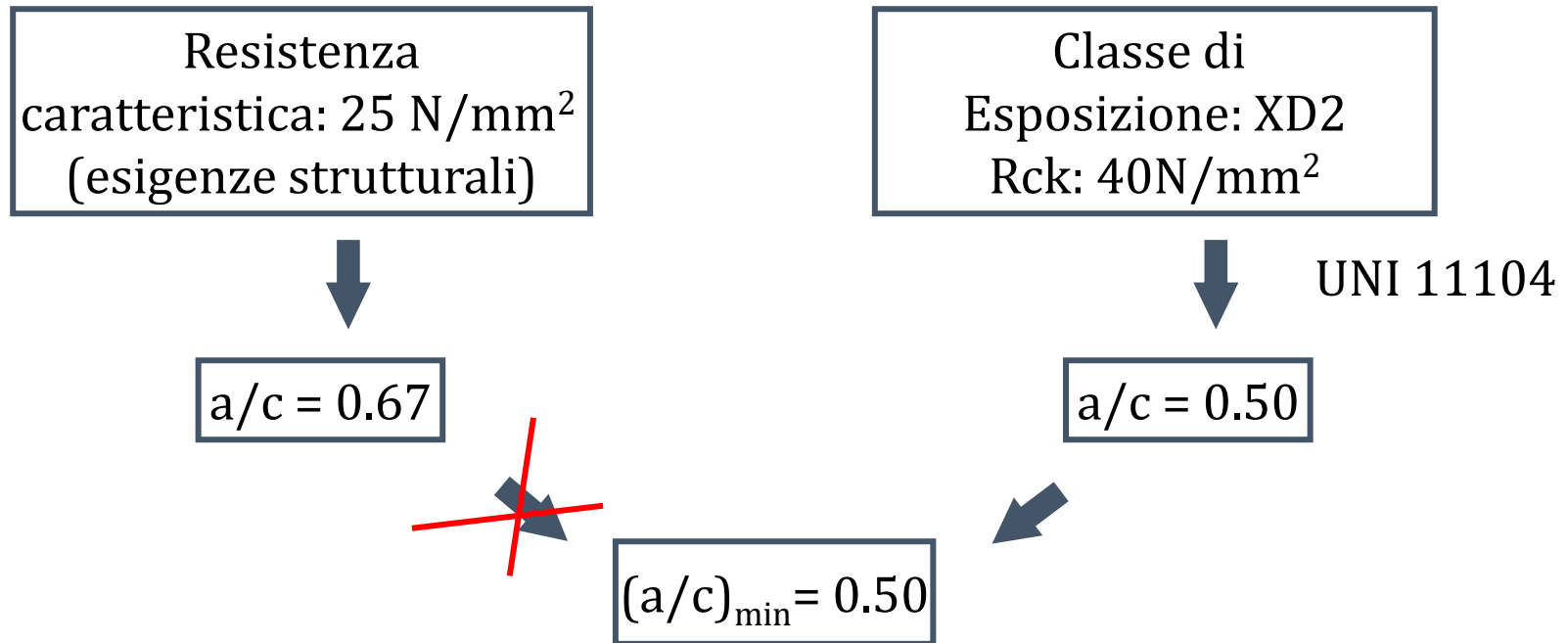
3 Corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare		
XD1	Umidità moderata	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in superfici o parti di ponti e viadotti esposti a spruzzi d'acqua contenenti cloruri.
XD2	Bagnato raramente asciutto	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in elementi strutturali totalmente immersi in acqua anche industriale contenente cloruri (piscine).
XD3	Ciclicamente asciutto e bagnato	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso, di elementi strutturali direttamente soggetti agli agenti disgelanti o agli spruzzi contenenti agenti disgelanti. Calcestruzzo armato ordinario o precompresso, elementi con una superficie immersa in acqua contenente cloruri e l'altra esposta all'aria. Parti di ponti, pavimentazioni e parcheggi per auto.

Prospetto 4 UNI 11104

prospetto 4	Valori limiti per la composizione e le proprietà del calcestruzzo									
	Classi di esposizione									
	Nessun rischio di corrosione dell'armatura	Corrosione delle armature indotta dalla carbonatazione				Corrosione delle armature indotta da cloruri				
						Acqua di mare			Cloruri provenienti da altre fonti	
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1
Massimo rapporto a/c	-	0,60	0,55	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45
Minima classe di resistenza ¹⁾	C12/15	C25/30	C28/35	C32/40	C32/40	C35/45	C35/45	C28/35	C32/40	C35/45
Minimo contenuto in cemento (kg/m³)	-	300	320	340	340	360	360	320	340	360
Contenuto minimo in aria (%)										
Altri requisiti										

Requisiti minimi per garantire la durabilità per una vita di servizio di 40-50 anni

La normativa impone per il caso in esame di adottare una Rck 40, maggiore di quella prevista, ed un rapporto a/c inferiore a quello previsto per esigenze strutturali.



In definitiva, dovendo rispettare i limiti imposti dalla 11104, impiegheremo un Rck non inferiore a 40 ed un rapporto a/c non maggiore di 0,5.

DEGRADO DEL CALCESTRUZZO



Foto Ecobeton





Riassumendo:

Il calcestruzzo (CLS) è un **materiale composito** costituito da cemento, aggregati lapidei e additivi di varia natura.



Il **cemento** fa la funzione di legante degli aggregati; il più noto è il cemento Portland, costituito da una miscela di silicati e alluminati di calcio.

Tali componenti reagiscono con l'**acqua di impasto** (reazione di idratazione) per dar luogo a composti solidi (**silicoalluminati idrati**) che *legano* gli aggregati tra loro.

Molto importante risulta il **rapporto acqua/cemento** che influenza fortemente le caratteristiche finali del calcestruzzo indurito, sia fisiche che meccaniche.

Riassumendo:

Le caratteristiche principali del cls indurito sono schematizzabili:

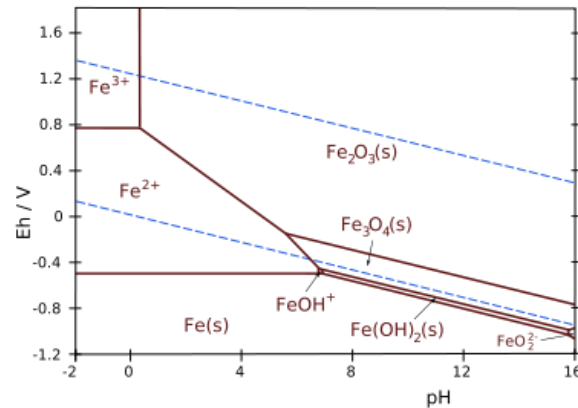
Alta porosità 20-30% Vol.

- di costipazione: pori 0.1-10 mm
- capillare: pori 0.1-10 mm

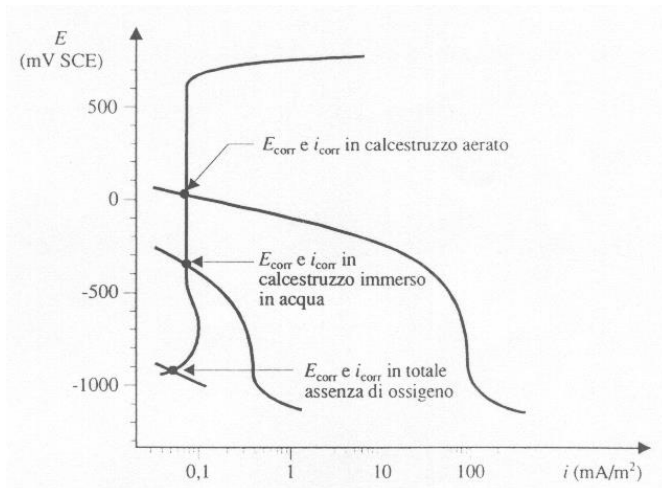
All'interno dei pori si trova una **soluzione di NaOH e KOH**, conseguentemente l'**ambiente è basico**, con $13 < \text{pH} < 14$.

Termodinamica

Si utilizza il diagramma di Pourbaix (o diagramma potenziale/pH)
Da un punto di vista termodinamico in queste condizioni il ferro si passiva.



Da un punto di vista cinetico, si osservi il diagramma ***E*** vs. ***i*** riportato di seguito per tre condizioni di processo catodico:



In queste condizioni il Fe si passiva con $v_{corr} < 0.1$ mm/anno.

Termodinamica

In assenza di specifiche cause di degrado il calcestruzzo può presentare durabilità pari a quella di una pietra naturale (Pantheon, età >2000 anni – Romani)

Diverso è il caso di strutture in cemento armato. La loro durabilità è limitata dal problema della **corrosione delle armature**.

In effetti le cause che possono portare a degrado del CLS sono molteplici, schematicamente si distinguono processi

- **fisici** (gelo-disgelo, incendi...)
- **meccanici** (abrasioni, erosioni, urti, esplosioni...)
- **chimici** (acidi, solfati, solfuri, alcali-aggregati...)
- **biologici** (licheni, alghe, incrostazioni = biofouling)
- **strutturali** (sovraccarichi, sollecitazioni cicliche...)

Tutti questi fattori sono spesso concomitanti o sovrapposti e tutti portano a **FESSURAZIONE** con conseguente **ESPOSIZIONE** del Fe all'ambiente, ovvero a corrosione.

Cause

Le cause chimiche più importanti e in molti casi ineliminabili perché dovute ad ambienti naturali sono:

CARBONATAZIONE

ATTACCO DA CLORURI

Carbonatazione

Carbonatazione: fenomeno che abbassa il pH del calcestruzzo ad opera della diffusione di CO_2 all'interno dei pori e conseguente neutralizzazione degli idrossidi presenti.

Nei pori, originariamente si è detto che c'è presenza di NaOH , KOH e Ca(OH)_2 (funzione del cemento: $\uparrow$ Portland $\downarrow$ d'altoforno)

Il trasporto delle sostanze dall'esterno verso l'interno può avvenire per diversi meccanismi:

LIQUIDI:

- assorbimento capillare
- permeazione
- diffusione
- elettroforesi

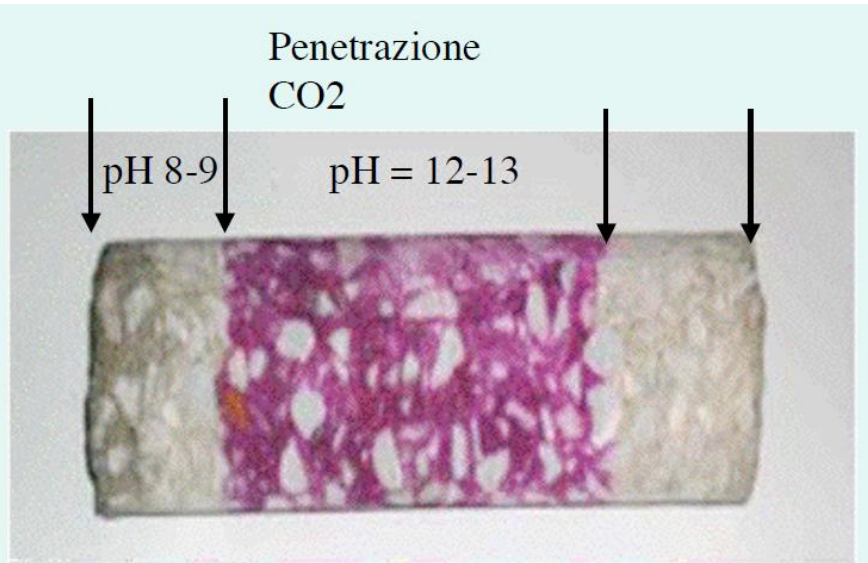
GAS:

- diffusione

Le sostanze gassose si muovono più velocemente attraverso i pori NON saturi d'acqua (v_{diff} in acqua = $10^{-4} \div 10^{-5}$ v_{diff} in aria)

Le specie ioniche invece possono diffondere solo se sciolte nell'acqua $\longrightarrow$ la diffusione è più efficace nei pori saturi.

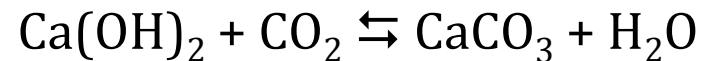
Carbonatazione



Penetrazione della CO₂ (neutralizza = scolora l'ambiente basico di Ca(OH)₂ = colorato rosso dalla Fenolftaleina (indicatore di pH))

L'anidride carbonica è contenuta nell'aria; la composizione dell'aria, per quel che interessa i fenomeni della corrosione e della carbonatazione si può semplificare con $[N_2] \cong 79\%$, $[O_2] \cong 21\%$ mentre la concentrazione di CO₂ è fortemente influenzata dalla zona, si avrà $[CO_2] = 0,04\%$ in zone rurali, mentre nelle città si può salire a 0,2%.

L'anidride carbonica permeando attraverso il calcestruzzo reagisce con i componenti alcalini neutralizzandoli secondo la reazione:



Questa reazione non è dannosa di per sé, anzi, per certi versi aumenta la resistenza meccanica del calcestruzzo, ma causa una **diminuzione del pH**, sino a valori di 9. Il momento in cui il fronte di carbonatazione raggiunge **il ferro** dell'armatura, questo **non si troverà più in campo di passivazione perfetta** e quindi risulterà attaccabile dall'ambiente.

Carbonatazione

Si definisce come **tempo di innesco** il tempo in cui il fronte raggiunge le armature.

La penetrazione del fronte carbonatato dipende dalla cinetica di diffusione di CO_2 all'interno della struttura. Definito s lo spessore carbonatato [mm], la relazione che lo lega al tempo [anni] è derivata dalla II **legge di Fick**:

$$s = K \cdot t^{1/n}$$

ove **K** ed **n** sono dei coefficienti determinati sperimentalmente che sono funzione della compattezza e della porosità del calcestruzzo:

elevata compattezza $K = 2 \div 6$

bassa compattezza $K > 9$

alta porosità $n = 2$

bassa porosità $n > 2$

Se sono presenti fessurazioni macroscopiche, $n \cong 0$.

Carbonatazione

Integrando $s = K \cdot t^{1/n}$ per il caso di calcestruzzi porosi ($n=2$) si ottiene la velocità di penetrazione:

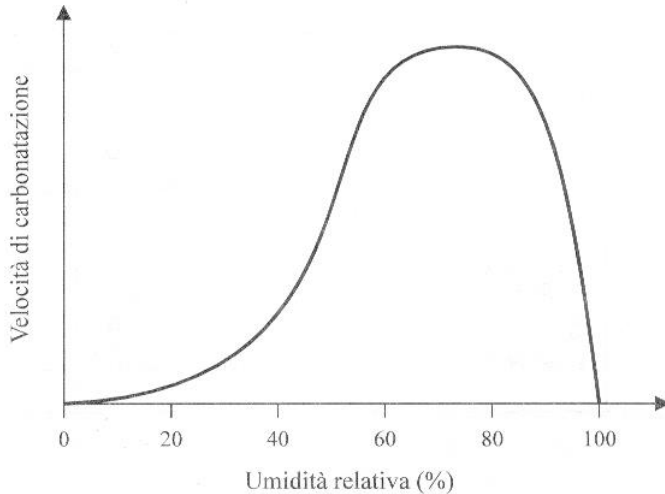
$$V_{\text{penetrazione}} = \frac{1}{2} K \cdot t^{-1/2}$$

Da questa relazione si vede che **la velocità di penetrazione** (ovvero la velocità di avanzamento del fronte carbonatato) **diminuisce nel tempo!**

La reazione di carbonatazione, si produce **solo in presenza di acqua**, di fatto a umidità relative inferiori al 40% la sua velocità non è apprezzabile.

La quantità di anidride carbonica che diffonde all'interno dei pori è inversamente proporzionale alla quantità di acqua presente nei pori stessi:
 $[CO_2] \propto 1/[H_2O]$ (velocità di diffusione di CO_2 a secco è circa 4 ordini di grandezza maggiore di quella a umido)

Carbonatazione



Velocità di carbonatazione in funzione dell'umidità relativa (UR)

Massimo di velocità di penetrazione del fronte carbonatato per UR tra il 50 e l'80%.

Bisogna fare attenzione al tempo di bagnamento, ovvero alle condizioni di secco e/o bagnato, ma soprattutto alle condizioni di alternanza secco/bagnato.

Carbonatazione armature

Da un punto di vista termodinamico  si esce dalla zona di passivazione **NON** è ancora sufficiente per l'innesco della corrosione: si devono verificare le condizioni di attivazione di un processo catodico.

Le specie interessate alla corrosione delle armature sono acqua e ossigeno.

Quindi, SE sono presenti anche H_2O (sempre) e O_2 si potrà avere depassivazione del ferro, ovvero innesco della **corrosione generalizzata delle armature**.

Carbonatazione armature

- Se le **strutture sono immerse**, i pori sono saturi di H_2O , la velocità di diffusione di O_2 è quindi bassa (anche per minore concentrazione nell'ambiente), vengono quindi a mancare i presupposti per la reazione di corrosione (manca l'ossigeno per la reazione di riduzione).
- Se le **strutture sono invece soggette ad alternanza** si possono schematizzare due momenti:
 - I riempimento dei pori di H_2O
 - II uscita di H_2O , entra O_2

In questo caso si avranno sempre acqua ed ossigeno a sufficienza per la reazione di corrosione: è il caso più pericoloso!

- Se c'è la **presenza anche di altri gas** (SO_2 , NO_x), questi possono partecipare alla neutralizzazione della basicità, amplificando il fenomeno.

Attacco da cloruri

I **cloruri** possono entrare nel calcestruzzo portati con l'acqua. Oltre ovviamente al caso dell'**acqua di mare**, la presenza di **sali antigelo** (NaCl), **scarichi industriali** o **perdite accidentali di sostanze a base di sali di Cl**, sono tutti casi frequenti di **inquinamento da cloruri**.

In certi casi i cloruri possono anche essere presenti nelle **materie prime**:

- un accelerante di presa molto utilizzato sino a non molto tempo fa era il cloruro di calcio CaCl_2 , ora sconsigliato;
- l'utilizzo di ghiaia e/o sabbia di mare non ben lavata;
- Cl^- liberati dalla dissociazione di cloroalluminati a seguito della carbonatazione.

Attacco da cloruri

Sono pericolosi solo i sali di cloro disciolti in acqua, che grazie alla loro dissociazione danno luogo a ioni Cl^- .

La **diffusione dei cloruri** all'interno della struttura **segue quella dell'acqua**, quindi è legata all'**umidità relativa** (oltre, ovviamente alla **temperatura**).

I parametri importanti per la definizione della serietà con cui si può avere un attacco da cloruri sono quindi il tipo di CLS (porosità, a/c, composizione/natura del cemento, maturazione), l'umidità relativa (UR) e la presenza di ossigeno.

La **natura del cemento** è importante in quanto definisce i componenti chimici presenti e quindi la loro reattività nei confronti degli ioni cloro; passando dal cemento ferritico al cemento Portland al cemento di altoforno, aumenta la quantità di Cl^- che può essere fissato chimicamente, e quindi si riduce la pericolosità dell'attacco da cloruri.

Attacco da cloruri

Gli ioni cloro depassivano il ferro, ovvero abbassano il potenziale di transpassività.

Esiste un tenore critico di concentrazione di ioni Cl^- per la stabilità del film protettivo pari circa allo 0.2-0.4% peso di Cl^- sul cemento.

L'attacco da cloruri si esplica con **corrosione localizzata**.

Nelle zone in cui si inizia l'azione di ossidazione del ferro a causa della depassivazione indotta dagli ioni Cl^- l'ambiente non solo non sarà più protettivo a causa della carbonatazione ($\text{pH} < 12.5$), ma diventerà decisamente acido, con conseguente instaurarsi della reazione catodica di sviluppo idrogeno. Si potrà quindi avere anche fragilimento da idrogeno.

Protezione

Come protezione da questi due fenomeni (carbonatazione e cloruri), la prima attenzione da porre è sulla **manifattura del calcestruzzo**, ovvero dalla scelta del cemento al confezionamento (giusto rapporto acqua/cemento, giusta costipazione, giusta maturazione); il tutto per ridurre la porosità del manufatto.

La carbonatazione in atmosfera è un fenomeno inevitabile, però si possono allungare i tempi aumentando lo **spessore del copriferro**.

Tempo di innesco della corrosione per diversi spessori di copriferro e rapporti a/c, calcolati in base ai coefficienti di diffusione dei cloruri (D_{ce}) determinati su due calcestruzzi (con 420 kg/m³ di cemento portland e con a/c pari a 0,4 e 0,54) rimasti 16 anni di immersione nel Mare del Nord.

Rapporto a/c	0,40	0,54
D_{ce} (cm ² /s·10 ⁻⁸)	2	3
Copriferro (mm)	Tempo di innesco della corrosione (anni)	
30	5	4
50	15	10
70	30	20

Protezione

La corrosione in presenza di carbonatazione si può ridurre riducendo la presenza di acqua, p.es. con **rivestimenti idrorepellenti** (pitture), ovvero con protezione catodica.

Stesso discorso anche per attacco da cloruri, anche se in questo caso la protezione catodica dovrà seguire impostazioni diverse.

Anche la scelta del materiale delle armature può avere la sua importanza, anche se meno praticata/praticabile a causa dell'aumento notevole di costi.

Solitamente sono impiegati acciai al carbonio basso legati ($0,5 \div 0,2\%C$ a seconda della richiesta di saldabilità) con proprietà meccaniche fissate da normativa

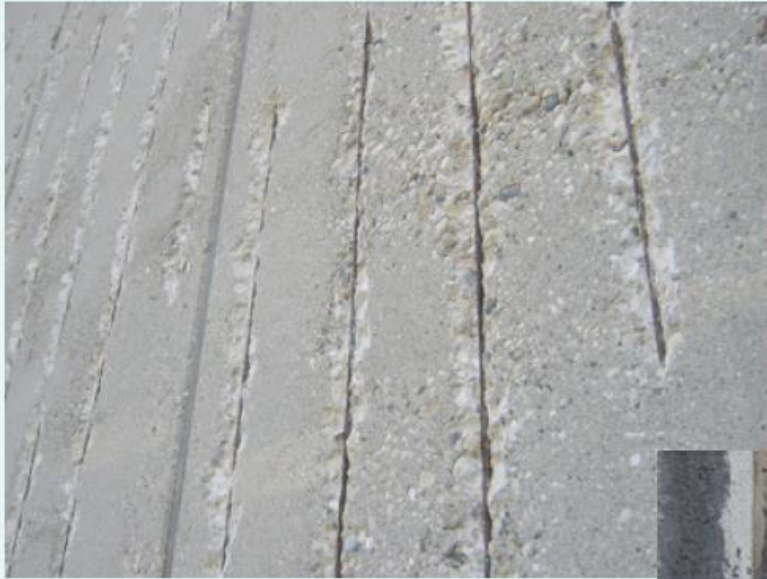
es.: FeB22k $s_y \geq 215\text{MPa}$, $s_{\text{rottura}} \geq 335\text{MPa}$, allungamento $\geq 24\%$
FeB44k $s_y \geq 430\text{MPa}$, $s_{\text{rottura}} \geq 540\text{MPa}$, allungamento $\geq 12\%$

Protezione

In condizioni particolari si possono utilizzare anche altri materiali, soprattutto se è prevedibile un inquinamento da cloruri:

Materiale	Tenore di Cl ⁻ (% peso su cemento)	
Acciaio al carbonio	0,4 – 1	
Acciaio zincato	1 – 1,5	
Inox AISI 304	3,5 – 5	
Inox AISI 316	3,5 – 8	
Prevenzione catodica	No limiti	

Protezione



Protezione

Per concludere, si riporta la **regola di De Sitter o regola del 5**:

- 1 €:
speso in prevenzione in fase di progetto, comporta gli stessi benefici ottenibili spendendo:
- 5 €:
per modifiche in sede di costruzione
- 25 €:
per modifiche a costruzione avvenuta
- 125 €:
per modifiche al momento in cui i fenomeni di corrosione si stanno innescando
- 625 €:
per sanare un danno da corrosione ormai evidente.