



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO : 415

DATA : 02/11/2012

A P P U N T I

STUDENTE : Insana

MATERIA : Scienza e Tecnologia dei Materiali

Prof. Montanaro

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

Politecnico di Torino



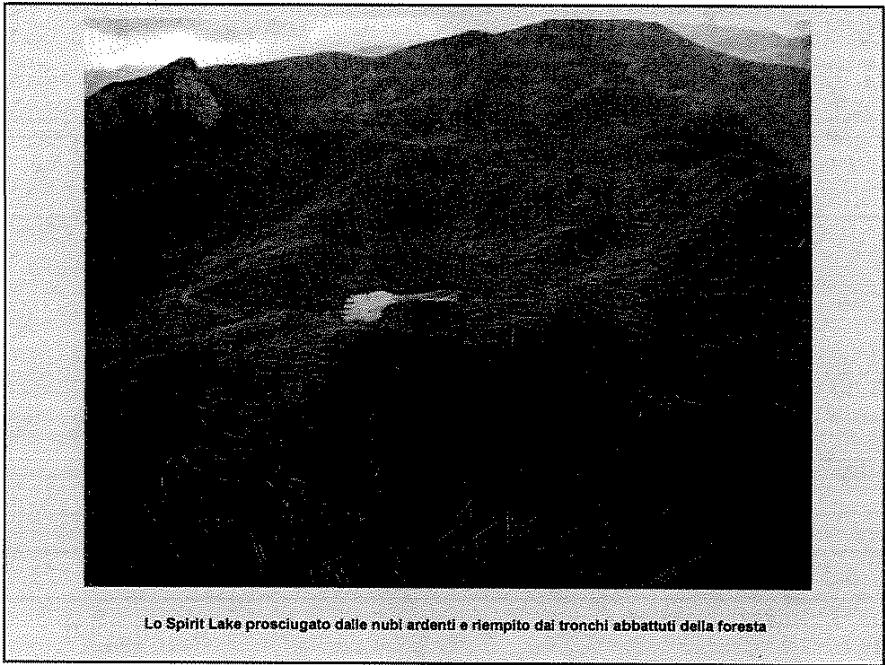
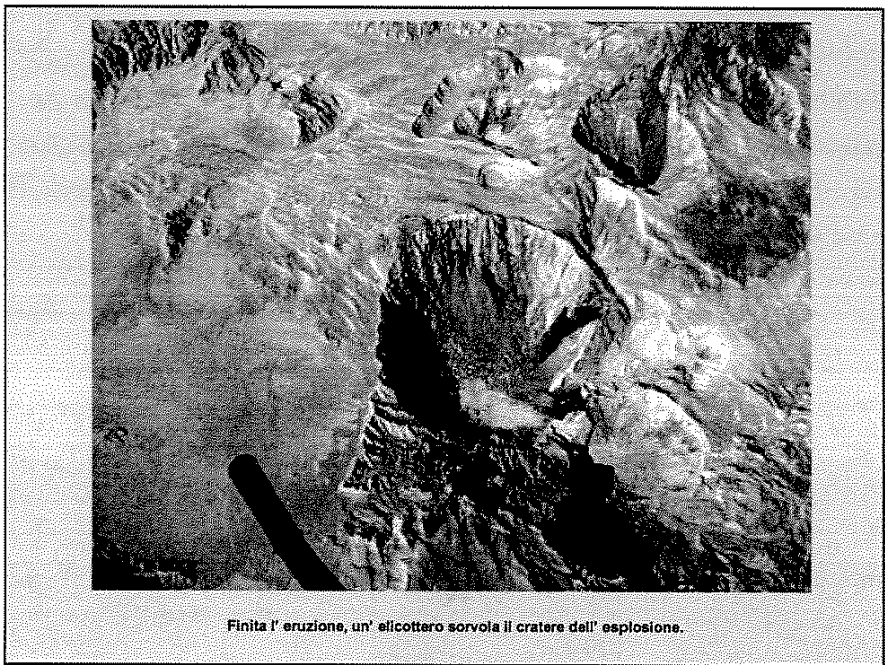
a.a 2011-2012

**I facoltà di ingegneria
corso di laurea in Ingegneria Civile**

Corso di Scienze e tecnologie dei materiali

Prof. ssa Laura Montanaro

a cura di Alessandra Insana

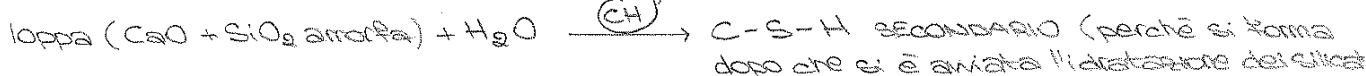


Alcune informazioni aggiuntive sui cementi

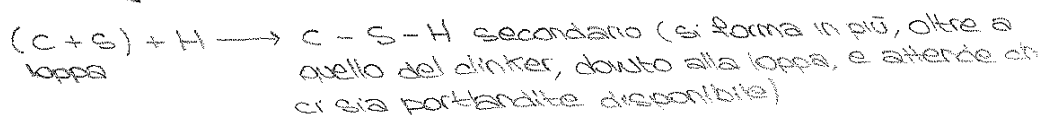
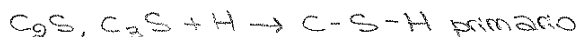
I cementi di miscela: d'altoforno e pozzolanico (III e IV)

loppa basica d'altoforno: formata da CaO e SiO₂ amorfa → contiene i costituenti del C-S-H.

Attivazione della loppa basica d'altoforno: non è un reagente, ma un catalizzatore

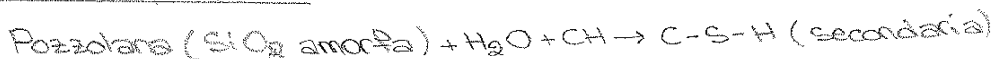


Schema:



sono sufficienti piccole quantità di CH (e quindi di cemento Portland) → catalizzatore e attivatore → idraulicità LATENTE

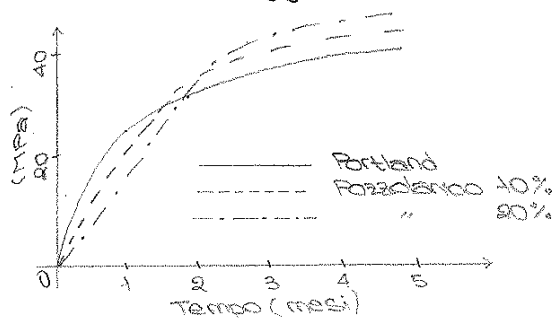
idratazione delle pozzolane:



In questo caso la portlandite non è più un catalizzatore, ma un reagente vero e proprio → è progressivamente sottratta. Ottengo sempre C-S-H, aghi che apportano le proprietà meccaniche.

Del test sulla pozzolanicità vedo di quanto diminuisce [CH] che in soluzione acquosa reagisce per dare C-S-H.

Ruolo delle aggiunte su comportamento meccanico e durabilità

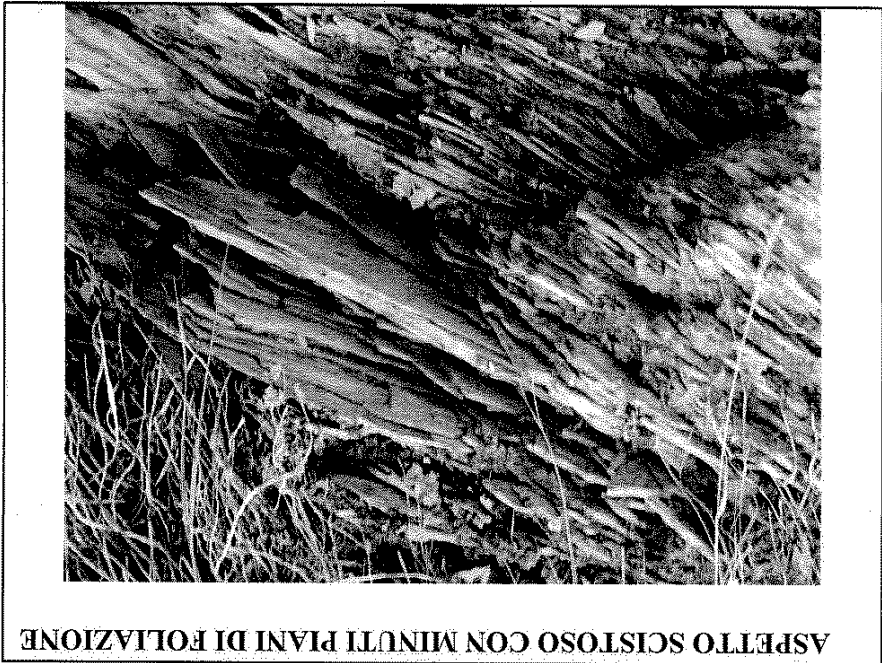


Confronto fra l'evoluzione delle resistenze meccaniche di un cemento Portland e di cementi di miscela.

Aghi si aggiungono a quelli del C-S-H primario → struttura molto più fibrosa. In più una matassa di cemento più fibrosa è anche meno permeabile: garanzia di durabilità, oltre ad essere meccanicamente più performante.

Inoltre nel caso del cemento di miscela va rispettato il parametro progettuale dell'apporto acqua/cemento.

I cementi di miscela hanno uno sviluppo delle proprietà meccaniche nelle brevi stagionature ritardato rispetto a ciò che avviene nel cemento Portland. ~~Però~~ necessitano dell'evoluzione di portlandite per dar vita a C-S-H secondario (per i pozzolanici serve proprio come reagente). Però si nota che dopo una certa stagionatura (medio-lunga) i cementi di miscela sviluppano proprietà meccaniche superiori al cemento puro. ~~Però~~ Loppa e pozzolana formano C-S-H secondario i cui



Tecnologia dei Materiali da Costruzione A
Docente: Prof. Laura Montanaro

Appendice 5) Calcestruzzo: approfondimenti

1. L'acqua d'impasto: requisiti di accettabilità

L'acqua è uno dei tre protagonisti indispensabili – insieme a cemento ed aggregati – nel processo produttivo del calcestruzzo (cls); senza di essa il cls non può essere prodotto perché il cemento non si idraterebbe e di conseguenza non andrebbe soggetto a presa ed indurimento! Tuttavia, se si esagera con l'acqua d'impasto, si confeziona un cls mediocre in termini di resistenze meccaniche e durabilità. La tentazione ad eccedere con l'acqua d'impasto non è infrequente, in quanto, a differenza degli altri due ingredienti del cls, l'acqua ha un costo pressoché nullo (quindi, abbondare in acqua non comporta alcun aumento del costo del prodotto finito) ed inoltre un eccesso di acqua permette di ottenere un cls fresco più fluido, più lavorabile, e quindi più gradito in cantiere agli addetti alla sua messa in opera. Attenzione quindi che la riaggiunta di acqua in cantiere, seppur in uso, può avere conseguenze gravi sulle prestazioni dell'opera ed in tal caso il direttore dei lavori se ne assume piena responsabilità. Torneremo più avanti su questo argomento, parlando delle relazioni che intercorrono tra contenuto di acqua (soprattutto definito attraverso il rapporto a/c), lavorabilità, prestazioni meccaniche e durabilità.

Criteri di accettabilità dell'acqua d'impasto

Tutte le acque potabili sono idonee al confezionamento dei calcestruzzi.

La maggior parte delle acque naturali (compresa quella di mare), anche se aggressive nei confronti del calcestruzzo indurito, possono essere tranquillamente usate per il confezionamento di calcestruzzi non armati,* mentre estrema prudenza richiede l'uso di acque di scarico industriale o di acque naturali inquinate da scarichi industriali.

Non si deve porre attenzione unicamente al quantitativo d'acqua impiegato per il confezionamento del calcestruzzo o della malta, ma anche alla sua composizione. Le sostanze che si trovano in sospensione, i sali disciolti (i più comuni sono i carbonati, i bicarbonati, i solfati, i cloruri di calcio, magnesio e sodio) intervengono nella presa del cemento e nella reologia del conglomerato; inoltre, possono dar luogo ad efflorescenze sul getto indurito, e influenzano reologia (lavorabilità) e tempi di presa.

Le sostanze in sospensione, le quali possono essere costituite da argilla, residui d'origine vegetale, alghe, microrganismi, non dovrebbero superare i 2 g/l in quanto possono interferire con il processo d'indurimento del cemento e, soprattutto, indebolire l'adesione tra aggregato e pasta di cemento con conseguente peggioramento delle resistenze meccaniche (Tabella 1).

Tra le sostanze disciolte meritano attenzione, per le possibili conseguenze sulle prestazioni del calcestruzzo fresco od indurito, i carbonati ed i bicarbonati, i solfati, i cloruri e le sostanze organiche.

I carbonati ed i bicarbonati sono tollerati in un'acqua d'impasto fino a valori di 2 g/l. La loro presenza influenza i tempi di presa e, pertanto, quando sono presenti in tenori superiori al grammo per litro, è conveniente effettuare prove di presa e resistenza meccanica di riferimento.

(c) I solfati sono ritenuti agenti fortemente aggressivi quando contenuti in acque che possano bagnare un calcestruzzo già indurito. Tuttavia, la loro presenza in un'acqua d'impasto non deve suscitare eccessiva preoccupazione: usando come acqua d'impasto con rapporto acqua/cemento pari a 0,5 (50 l acqua/ 100 kg cemento) dell'acqua di mare che contiene circa 5g/l di solfati (per lo più, si tratta soprattutto di solfato di sodio), si aumenta di circa lo 0,25% il tenore in solfati dell'impasto, non causando quindi nessuna conseguenza apprezzabile sulle caratteristiche dell'impasto. → non vi è pericolo di "bassa presa".

Ma l'acqua di mare non contiene solo solfati, ma anche cloruri, non accettabili per la durabilità in esercizio delle armature → non va bene per il cls armato.

acque potabili:
accettabili senza
terrici cattivi
come naturali:
accettabili senza
altro.

ATTENZIONE!!!
ricordo sono le
sostanze chimiche
dell'impasto e in
rito nel materiale
durato. Es.: solfati

Tecnologia dei Materiali da Costruzione A
Docente: Prof. Laura Montanaro

(b) Per quanto attiene il pH, in genere le acque naturali hanno difficilmente un pH inferiore a 6 e pertanto sono utilizzabili senza problemi (Tabella 1). Un'acidità eccessiva deve insospettire l'utilizzatore, perché è indice di un probabile inquinamento da parte di scarichi industriali. Dal momento poi che da acido ad acido possono cambiare gli effetti sulla presa ed indurimento del calcestruzzo e, conseguentemente, sulle sue proprietà meccaniche, è consigliabile non utilizzare per l'impasto acque a pH < 4 o 4,5 (nel caso delle strutture armate, ove un abbassamento del pH è una condizione favorevole all'innesco dei fenomeni di corrosione dell'armatura).

Gli ioni H⁺ sono pro motori delle reazioni di ossidazione dei metalli (ossidi che creano lo strato passivante delle armature)

(c) I cloruri sono particolarmente dannosi nella confezione dei calcestruzzi armati, ed in particolare dei precompressi, in quanto promuovono la corrosione dell'armatura. Inoltre, il cloruro di calcio, ottenuto per reazione con la portlandite, è un forte accelerante dell'idratazione del cemento Portland.

Intaccano il film superficiale passivante delle armature che forma in ambiente basico grazie alla portlandite.

Tabella 1

Concentrazioni limite di sostanze in sospensione e sali disciolti nell'acqua d'impasto

Inquinante	Limite (mg/l) <small>mq/l di acqua d'impasto</small>		
	Cls	Cls armato	Cls armato precompresso
(a) Solidi in sospensione	5000 <small>5g/l</small>	2000	2000
(b) Cloruri	20000	1000-500	500
(c) Solfati	2000	2000	2000
(d) Acidità (pH)	> 4	> 4,5	> 4,5

Le sostanze organiche sono generalmente contenute in quantità limitate (qualche mg/l fino a qualche decina di mg/l) nelle acque potabili e fluviali, rispettivamente. Il loro contenuto sale fino a qualche centinaio di mg/l nelle acque di rifiuto e negli scarichi industriali. La loro azione si manifesta soprattutto a livello di presa (che viene in genere rallentata) e conseguentemente di sviluppo di resistenze meccaniche a brevi stagionature. Rallentano velocità di presa → rallentano lo sviluppo di prop. mecc.

Alcuni limiti di composizione aggiuntivi, validi per acque di origine industriale sono riportati in Tabella 2.

Tabella 2

Limiti aggiunti di composizione per acque di origine industriale

pericolosi per il confezionamento del cls perché piccole quantità possono estendere ad alcuni gg tempo di inizio presa, rallentano a cinetiche. alcuni sono dotti a concorrenti

Inquinante	Massimo tenore ammesso (mg/l)
Zuccheri	100
Fosfati	100
Nitrati	500
Piombo	100
Zinco	100

2. Gli aggregati: note aggiuntive

E' uso corrente chiamare **inerte** il materiale lapideo più o meno finemente suddiviso che viene utilizzato per il confezionamento di un cls. Ma, la dicitura più corretta per indicarlo è quella di **aggregato** con il quale lo si indicherà d'ora innanzi.

Le funzioni dell'aggregato possono essere riassunte come segue:

- Aggregato: nominata UNI 9550 (definisce criteri di accettazione, materiali da utilizzare e loro caratteristiche)
- naturale
 - alluvionale (sabbia + ghiaia → tondeggianti, a seguito del movimento del materiale lapideo trasportato dalle acque dei fiumi)
 - di frantumazione (sabbia + pietre → sferzoli vivi, superfici di fratture nette perché materiale fragile)
 - artificiale
 - argille espansive (struttura porosa), scisti... per cls leggeri

Fine ($\phi < 4-5 \text{ mm}$) e grossolano ($\phi > 4-5 \text{ mm}$) → 4-5 mm linea di demarcazione dimensionale
↓
sabbia ghiaia, ghiaione, pietrisco
! aggregato va lavato per taglia dimensionale (lavaggio → separazione nelle taglie granulometriche)

Tecnologia dei Materiali da Costruzione A
Docente: Prof. Laura Montanaro

Ruolo dell'aggregato nel cls:

- esso contribuisce alle resistenze meccaniche ed alla durabilità del conglomerato cementizio, l'aggregato è inerte, non reagisce come la pasta di cemento che può essere aggressiva (umidità indurita).
- ne contrasta il ritiro da idratazione;
- permette di ridurre la quantità di legante (cemento) da utilizzare, portando ad una riduzione dei costi e del calore di idratazione. motivo economico e tecnologico

Queste ragioni spiegano perché circa $\frac{3}{4}$ del volume di un calcestruzzo è costituito dall'aggregato.

diestr. grandi
cloruri
solfati
silice alcali-
reattiva
limo argilloso
sostanze organiche
niche
gelività

Non tutti gli aggregati – naturali o provenienti da roccia frantumata – sono necessariamente idonei alla produzione del cls. Esistono alcuni requisiti fondamentali (criteri di idoneità o di accettazione) in assenza dei quali il cls rischia di essere degradato. Le prove che permettono di definire l'accettabilità dell'aggregato debbono essere effettuate preventivamente al primo impiego dello stesso nel cls e poi ripetute annualmente, a meno che non si manifestino eventi che possano far sospettare una variazione della qualità e della fonte di approvvigionamento.

UNI 9880
Ecco perché non sono più chiamati INERTI. L'aggregato può portare dei difetti se non è selezionato.

Il contenuto limite di **cloruri** è pari al 0,05% in peso ed è correlato al rischio di corrosione dell'armatura; nei cls privi di armatura metallica la presenza di cloruri nell'inerte non comporta alcun rischio di serio degrado, ma può indurre un danno superficiale per la formazione di depositi salini sulla superficie dei manufatti esposti a cicli alternati di bagnatura ed asciugatura. Per lo più gli aggregati inquinati da cloruri sono identificabili con la sabbia di mare. Questa può essere impiegata come frazione fine di un aggregato per cls, purché il sale idrosolubile (cloruro di sodio) sia rimosso attraverso preventivo lavaggio in acqua potabile.

nel c.a.
→ danno estetico (efflorescenze)

I **solfati** possono essere presenti nell'aggregato sotto forma di gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o di "anidride" (CaSO_4). La presenza di solfati oltre un certo limite (0,2% in peso) comporta il rischio di fessurazione, per lento rilascio di solfati nel cls oramai indurito e conseguente formazione di ettringite secondaria.***

Possono essere i aggregati con vene di solfati.

A differenza delle sabbie marine, che possono eventualmente essere private di cloruri per lavaggio, gli aggregati inquinati da gesso o da anidride non possono essere bonificati con alcun trattamento e debbono essere scartati dalla produzione di cls. Con sospetto debbono anche essere considerati gli aggregati contenenti minerali a base di solfuri (quali la pirite, FeS_2), che, seppur a tempi più lunghi, possono ossidarsi a solfati e generare fenomeni espansivi e dirompenti.

Attualmente la presenza di **silice reattiva** in un aggregato rappresenta la più insidiosa ed erratica forma di degrado del cls; ciò dipende dal concorso di più cause:

- la presenza di silice reattiva nell'aggregato può essere accertata con molta difficoltà e a tempi lunghi;
- la silice reattiva è distribuita in forma discreta (alcuni granuli di aggregato la contengono, altri no): questo comporta il rischio di non evidenziarne la presenza se il campione prelevato non è statisticamente significativo;
- La reazione alcali-aggregato dipende dal contenuto di alcali del cls; un contenuto di alcali superiore ai 2 kg/m^3 di cls è considerato pericoloso;
- La reazione alcali-aggregato si manifesta solo in presenza di umidità e si verifica più frequentemente in ambienti esterni. Tuttavia, in ambienti interni, può presentarsi il fenomeno, ad esempio in pavimentazioni industriali esposte alla risalita capillare di acqua dal terreno;

* ma previo lavaggio con acqua dolce, per solubilizzare i sali e non portarli nell'impasto fresco. I cloruri sono presenti in grande quantità nelle acque di mare, non dolci (sono soprattutto cloruri di sodio e calcio)

*** Il gesso (o anidrite) non si solubilizza rapidamente, non viene reso disponibile quando l'impasto è fresco, ma si solubilizza molto lentamente e, nel getto ormai indurito, grazie alla penetrazione di umidità atmosferica. Nel cls indurito i solfati sono pericolosi perché possono produrre ettringite secondaria → composto espansivo → fessurazione.

Tecnologia dei Materiali da Costruzione A
Docente: Prof. Laura Montanaro

- La reazione alcali-aggregato è generalmente molto lenta (può richiedere da qualche mese ad una decina di anni per manifestarsi) ed è accelerata dalle temperature elevate.

Data l'erraticità del fenomeno e la difficoltà di una diagnosi preliminare, il miglior modo per prevenirlo è l'impiego sistematico di cementi di miscela, in presenza dei quali la reazione alcali-aggregato è fortemente ridotta o addirittura eliminata. Questa soluzione consiste paradossalmente nel distribuire all'interno del cls una miriade di particelle di silice amorfa (quelle della pozzolana) o vetrosa (come nella loppa) potenzialmente capaci di reagire con gli alcali proprio come la silice amorfa o mal cristallizzata degli aggregati alcali-reattivi. La ripartizione della reazione su un numero elevatissimo di particelle di pozzolana o loppa distribuite omogeneamente in tutto il cls attenua fortemente il carattere distruttivo dell'espansione che in caso contrario si verificherebbe localmente, in corrispondenza dei pochi granuli di aggregato reattivo.

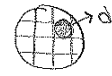
Per la scelta della **distribuzione granulometrica** dell'aggregato ci si potrebbe basare sulla curva di Fuller, seguendo la quale si perviene alla massima densità apparente. Fuller e Thompson hanno proposto una curva granulometrica descritta dall'equazione:

$$p_i = 100 \cdot (d/D)^{1/2}$$

ove p_i è la percentuale (rispetto al totale di solido) del passante cumulativo al setaccio con apertura di diametro d e D è il diametro massimo dell'aggregato.

Il valore di D è in genere vincolato a tre condizioni:

- esso non deve superare il 25% della sezione minima del getto, per evitare eterogeneità; nelle prestazioni del cls soprattutto meccaniche
- non deve superare la distanza massima tra i ferri d'armatura diminuita di 5 cm, per evitare che un aggregato grossolano ostruisca il flusso del calcestruzzo; protegge l'armatura da aggressioni ambientali, garantendo un pH basso
- non deve superare del 30% lo spessore del copriferro, per evitare l'ostruzione al flusso del calcestruzzo tra armatura e cassaforma.



A partire dall'equazione di Fuller, si è costruito lo strumento di lavoro per la qualificazione della distribuzione dimensionale di un aggregato, il cosiddetto **fuso granulometrico**, che è delimitato da due curve di distribuzione granulometrica limite. Il procedimento per valutare se un certo aggregato si situa entro il fuso granulometrico (ed è quindi accettabile) consiste nel setacciarne un quantitativo noto, tramite una serie di setacci sovrapposti ed aventi aperture decrescenti dall'alto verso il basso, pesare quanto è rimasto sui vari setacci e per differenza calcolare ciò che è passato.

come si valuta una distrib. granom? l'aggregato si ferma in corrispondenza al setaccio dopo il quale non riesce più a passare. I setacci raccolgono l'aggregato che è troppo grosso per passare sotto. Il passante cumulativo attraverso un setaccio è la somma dell'aggregato nei setacci al di sotto.

separo i setacci e costruisco la curva granom.

A questo punto è sufficiente riportare i valori ottenuti, in corrispondenza dell'apertura dei setacci, sul grafico (disponibile) del fuso granulometrico e verificare la rispondenza allo stesso.

Esistono due importanti serie di setacci: quelli con apertura secondo ASTM (American Standards for Testing Materials) e quelli con apertura secondo UNI/EN.

In Tabella 3 sono presentati i valori dei passanti p_t per un aggregato ottimale e per un esempio di aggregati disponibili realmente in una centrale di betonaggio. Al setaccio da 4,76 mm, il passante dell'aggregato ottimale corrisponde al 48%. Nel caso dell'aggregato reale, solo la sabbia è totalmente passante a tale vaglio e pertanto, mescolando 48% di sabbia a 52% di ghiaia, si soddisfa il requisito.

Si raccolgono frazioni omogenee di aggregato, suddivise per taglia. Dove l'aggregato si ferma è perché ha dimensioni maggiori del diametro di quel setaccio.
Percentuale cumulativo → se si ferma il 40% su un certo setaccio sarà il 60%.

Strumento: setacciatrice automatica che impone vibrazioni controllate ai setacci in modo che la distr. gran. non vari da caso a caso come se fatta a mano, per avere risultati non variabili in funzione dell'operatore

Tecnologia dei Materiali da Costruzione A
Docente: Prof. Laura Montanaro

Tabella 3
Distribuzione granulometrica dell'aggregato ottimale, di quelli disponibili (sabbia e ghiaia) e della miscela di aggregato realmente ottenibile

e primo secondo rappresentano i punti che definiscono la curva di Fuller. Usando tali punti ottengo la curva di Fuller.

Apertura (mm) del setaccio	Passante al setaccio (%)					
	Aggregato ottimale	Sabbia	Ghiaia	Contributo sabbia	Contributo ghiaia	Aggregato ottenuto
19,10	100	100	100	48	52	100
9,52	72	100	52	48	25	73
4,76	48	100	0	(48)	(0)	48
2,38	35	81	0	39	0	39
1,19	25	58	0	28	0	28
0,59	17	37	0	18	0	18
0,30	12	26	0	12	0	12
0,15	7	14	0	7	0	7
0,075	3	5	0	2	0	2
0,038	0	0	0	0	0	0

48% sabbia
52% ghiaia
miscela con piccoli scostamenti che rappresentano le oscillazioni consentite e incluse nel suo granulometrico rispetto alla curva di Fuller.

Un cls che soddisfa granulometricamente l'equazione di Fuller-Thompson e, quindi, presenta il massimo impacchettamento possibile, non coincide con un impasto che possa essere facilmente messo in opera, perché soggetto ad un difficile scorrimento. Si tratta pertanto di un cls poco lavorabile (vedasi paragrafo dedicato alla lavorabilità) e che richiederà in cantiere di mezzi di compattazione molto efficienti per la sua corretta messa in opera.

Per queste motivazioni, la curva granulometrica "ideale" è stata modificata da **Bolomey**, che ha introdotto il parametro A , che tiene appunto conto delle esigenze di lavorabilità (facilità di messa in opera e costipamento) e del tipo di aggregato disponibile (alluvionale o di frantumazione):

soluzione: EQUAZIONE DI BOLOMEY = ottimizza la curva di Fuller
Arriva ad un compromesso tra fluidità e ottimo impacchettamento (che era invece l'unico obiettivo di Fuller)
Lavorabilità
Lavorabilità alla fluidità

$$P = A + (100 - A) \cdot (d/D_{max})^{1/2}$$

Quest'equazione coincide con quella di Fuller-Thompson per $A = 0$. Il parametro A assume valori crescenti (da 8 a 14) per lavorabilità crescente e nel passaggio da aggregati alluvionali (tondeggianti) ad aggregati di frantumazione (irregolari e spigolosi). L'aumento del parametro A comporta un aumento del contenuto di materiale fine (cioè del passante P al vaglio con apertura d uguale a 5 mm) (Tabella 4).

Tabella 4 – Valori ottimali di A in funzione del tipo di aggregato e di lavorabilità

Aggregato	Consistenza umida	Consistenza plastica-semifluida	Consistenza fluida-semifluida
Alluvionale	8	10	12
Frantumato	10	12	14

fluidità aumenta
→
A aumenta
→
A seconda della fluidità varia A

L'umidità dell'aggregato è un parametro che ha forte incidenza sulla costanza di qualità del cls, in termini di resistenza caratteristica e di lavorabilità.

L'umidità dell'aggregato può modificare significativamente il quantitativo di acqua d'impasto e conseguentemente il rapporto a/c .

A parità di scorrevolezza dell'impasto A aumenta nel frantumato per qualsiasi consistenza del cls fresco. Perché? L'aggregato alluvionale contribuisce in modo positivo alla scorrevolezza, quello frantumato no.

Ma mano che A aumenta la curva granulometrica si sposta verso taglie più fini → aumento del contenuto di sabbia, > contenuto fine > lavorabilità del cls.



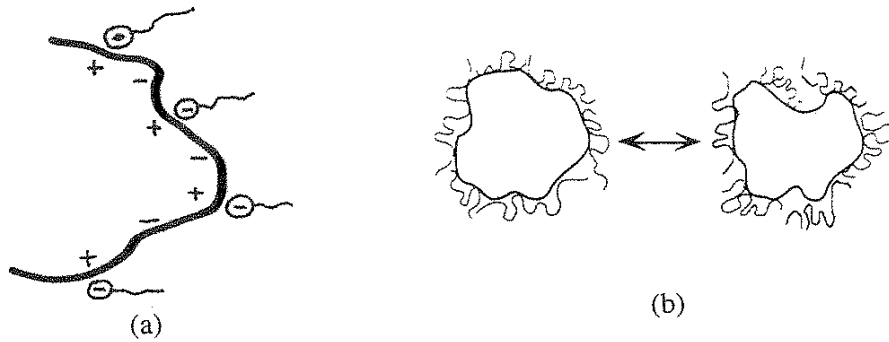
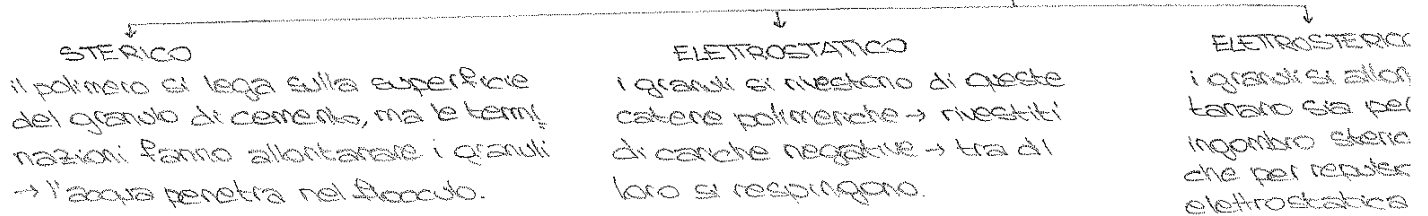


Fig. 5.15. Esempificazione dell'azione dei fluidificanti:
 (a) adesione al granulo di cemento
 (b) repulsione tra granuli, dispersione

Fluidificanti contengono delle sostanze polimeriche capaci di aderire alla superficie dei granuli di cemento → i granuli di cemento vengono dispersi e separati nell'acqua d'impasto.

Schema:

adesione sulla superficie dei granuli di cemento → meccanismi repulsivi → dispersione



2) Servono per ridurre il tempo di presa (acceleranti di presa) e anticipare le prime fasi dell'indurimento del c/c (acceleranti d'indurimento) con un incremento delle resistenze meccaniche nei primi giorni. Lo stesso additivo o una miscela di due additivi specifici possono svolgere tali ruoli.

Migliorano la cinetica delle reazioni.

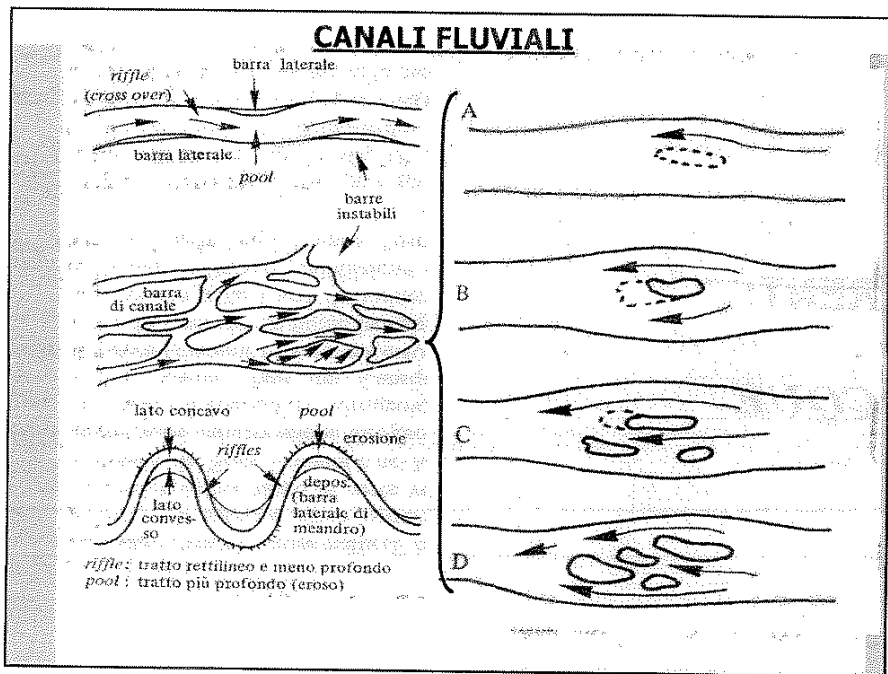
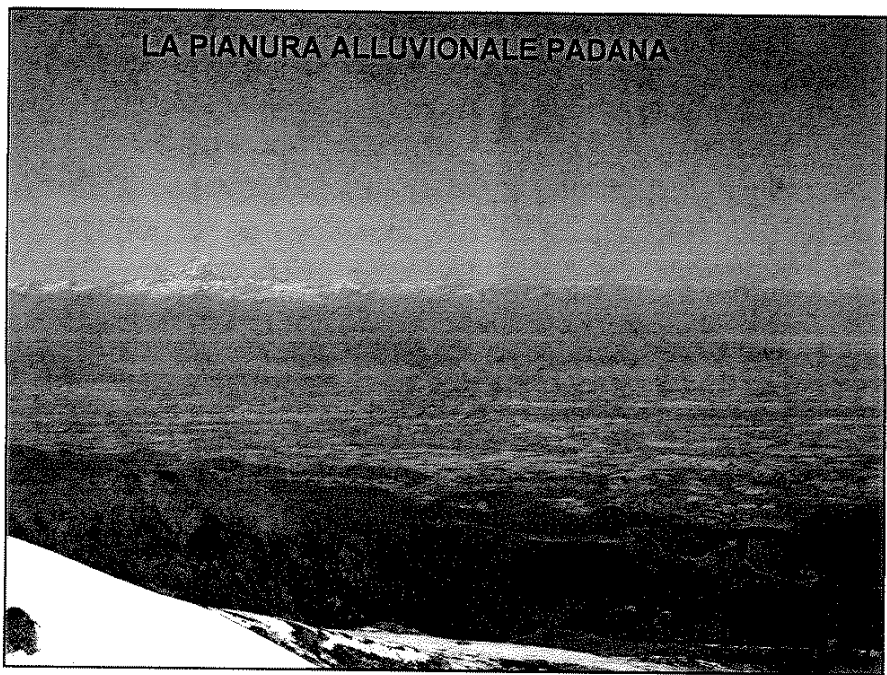
Es: temperatura esterna bassa → getto in climi freddi → rischio di $T \sim 0^{\circ}C$ → l'acqua d'impasto può ghiacciare → espansione → in un impasto non ancora indurito questo passaggio liquido-solido produce fessurazioni del getto.

→ L'accelerante aumenta il grado d'idratazione α del cemento alle brevi stagionature e permette di resistere alle glaciazioni dell'acqua d'impasto

→ per getti in climi freddi o rapidi disarmi.

Composizione: un tempo a base di cloruri ($CaCl_2$ addizionato circa al 2% rispetto alla massa del cemento), ma abbandonati → corrosione !!!

Ora: trietanolanmina e formiato di calcio.



L'aggregato può essere impasto non è secco, può influenzare il tenore di acqua resa disponibile al cemento nell'idratazione → dobbiamo tener conto dell'umidità dell'aggregato che può modificare il rapporto a/c rispetto a quello previsto nel progetto.

Tecnologia dei Materiali da Costruzione A
Docente: Prof. Laura Montanaro

L'umidità (u) viene determinata misurando la diminuzione percentuale di massa, a seguito del riscaldamento a 110°C per essiccare completamente l'aggregato, rispetto alla massa dell'aggregato completamente secco:

→ cioè finché la massa non rimane costante (si fanno prove in itinere)

$$u = \frac{(m - m_0)}{m_0}$$

normalizzato

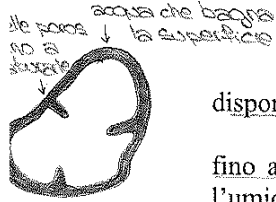
dove m e m_0 sono rispettivamente la massa dell'aggregato così come è disponibile e quella dell'aggregato completamente secco.

Una parte di questa umidità è quella assorbita (u_a), cioè quella che è contenuta, fino a saturarla, nella porosità interna all'aggregato. Oltre a questa, vi è ovviamente l'umidità che bagna superficialmente l'aggregato. → u_a + umidità che bagna sup. l'aggregato

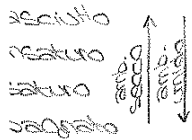
In base al contenuto di umidità, pertanto un aggregato potrà essere asciutto (esente da umidità), insaturo (umidità contenuta nei pori interni all'aggregato ma in quantità tale da non saturarle), saturo (con le porosità interne saturate di umidità), bagnato (con le porosità interne saturate di umidità e la superficie esterna bagnata).

La condizione di umidità dell'aggregato è fondamentale per i dosaggi d'acqua del cls. Infatti un inerte bagnato cede l'acqua in eccesso ($u > u_a$) all'impasto. Questa va a sommarsi all'acqua introdotta in betoniera e fa aumentare il valore di acqua totale d'impasto (a), alterando il rapporto a/c . D'altra parte, un inerte insaturo ($u < u_a$) o asciutto ($u = 0$) assorbe parte dell'acqua d'impasto, facendo diminuire il valore di a ed alterando il rapporto a/c . Nel primo caso, cresce la lavorabilità del cls, a scapito delle resistenze meccaniche; nel secondo avviene esattamente l'opposto.

Per questo motivo è indispensabile verificare quotidianamente il tenore di umidità dell'aggregato per correggere opportunamente il dosaggio d'acqua dell'impasto che via via si confeziona in cantiere.



asciutto = ne arriva alla superficie e nei pori → con let. secco, c'è solo m_0



insaturo = acqua nelle porosità, in queste hanno ancora spazio per raccogliere dell'acqua.

dietro

3. Gli additivi: note aggiuntive

Gli additivi **acceleranti** e quelli **ritardanti** hanno la funzione di modificare il grado di idratazione α del cemento solo alle brevi stagionature e modificano, quindi, le prestazioni del cls in corso di esecuzione ma non le prestazioni delle strutture in esercizio. Gli acceleranti fanno aumentare il grado di idratazione del cemento alle brevi stagionature in modo da accorciare i tempi di presa (**acceleranti di presa**) o di incrementare la resistenza meccanica nei primi giorni (**acceleranti di indurimento**), soprattutto per getti in climi freddi o per rapidi disarmi. Gli acceleranti un tempo utilizzati (a base di cloruri, ad esempio CaCl_2 addizionato in rapporti di circa il 2% rispetto alla massa di cemento) sono stati abbandonati, a favore di trietanolammina $\text{N}(\text{CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH})_3$ (dosaggio allo 0,25 % in peso) ed il formiato di calcio $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$ (dosaggio di qualche percento rispetto alla massa di cemento).

Di particolare interesse, per motivazioni esecutive, sono gli acceleranti per calcestruzzo proiettato (vedasi Appendice 6), detto *shotcrete* o **gunite** (dell'Inglese *to gun*, sparare). Essi permettono di spruzzare i cosiddetti "betoncini" (cls caratterizzati da aggregati a D_{max} di 8mm) in galleria, accelerando l'indurimento nelle prime 24 ore senza penalizzazioni sulle prestazioni meccaniche in servizio, purché si impieghino acceleranti cosiddetti *alkali-free* (privi di alcali). Gli acceleranti alcalini (a base di silicato o alluminato o carbonato di sodio), oltre ad essere molto caustici e quindi pericolosi da maneggiare da parte della manodopera addetta, tendono a ridurre le resistenze meccaniche alle lunghe stagionature. Gli acceleranti privi di alcali (a base di solfato ferrino o solfato di alluminio) non hanno effetti deleteri sulle caratteristiche meccaniche del cls indurito.

Tecnologia dei Materiali da Costruzione A
Docente: Prof. Laura Montanaro

L'aggiunta di un **ritardante** ha come obiettivo quello di ritardare la presa del cemento al fine di mantenere più a lungo la sua lavorabilità, consentire il trasporto del calcestruzzo a più lunghe distanze, specialmente in climi caldi. Bisogna però sottolineare che il ritardante non dilata solo il tempo di presa ma ritarda anche l'indurimento, il che comporta una bassa resistenza del calcestruzzo alle brevi stagionature, anche se a tempi lunghi il recupero di resistenza è notevole. Esempi di ritardanti sono carboidrati (zuccheri mono e polisaccaridi), gli acidi idrossicarbossilici dicarbossilici, i fosfati, i borati, i sali di piombo e di zinco. Il ritiro plastico da idratazione può essere aumentato in presenza di tali additivi, in quanto un impasto additivato con ritardante si trova esposto per un periodo più lungo all'eventuale azione dell'essiccamento. Ciò induce a suggerire che la bagnatura dei getti o la loro protezione con teli o pellicole anti-evaporanti sia garantita per tempi più lunghi, per evitare l'essiccamento del getto non ancora indurito.

Gli additivi **inibitori di corrosione** sono aggiunti all'impasto per prevenire la ^{alle strutture armate} corrosione delle armature, per lo più indotta da cloruri. Molto diffuso a tal scopo è il nitrito di calcio, $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$. La loro efficacia è attualmente messa in dubbio, perché sembra che nel caso di cls fessurati superficialmente la presenza di questi additivi addirittura aggravi l'aggressione. In ambienti fortemente aggressivi, pertanto, si suggeriscono altri metodi, ben più efficaci, di prevenzione (protezione catodica, impiego di acciai inossidabili – si veda la trattazione specifica dei problemi di corrosione).

Gli **impermeabilizzanti** o **idrofobizzanti** (*waterproofers*) sono dei prodotti idrorepellenti, per lo più a base di alchil-alcossi-silano (**silano**), solitamente applicati sulla superficie per rendere idrorepellente il cls o altri materiali da costruzione inorganici (pietra, mattone, malte). Gli stessi possono però essere aggiunti anche nell'impasto (circa 1% in peso rispetto al cemento) per idrofobizzare il cemento in tutta la sua massa, non solo in superficie. Tale trattamento "in massa" appare molto promettente nelle applicazioni di cls esposti alle classi di esposizione più aggressive (vedasi trattazione della durabilità del cls), quali la XF4 (cloruri + sali disgelanti) o XS2 (acque marine in condizione di bagnasciuga). In questi casi l'aggressione è veicolata dall'acqua che penetra nel cuore del cls: in presenza del silano, però, l'acqua ambientale viene respinta dal cls in quanto l'angolo di contatto θ è diventato $>90^\circ$ e, conseguentemente, la pressione capillare diventa negativa:

$$P_c = 2 \gamma \cos\theta / r$$

Esistono anche i cosiddetti **additivi di superficie** (disarmanti e stagionanti), definibili come quelli che, anziché essere aggiunti all'impasto vengono applicati sulla superficie del calcestruzzo fresco ed hanno come funzione di migliorare l'aspetto superficiale (*faccia-vista*) della struttura o di evitare che le condizioni ambientali possano danneggiare le caratteristiche del materiale (ad esempio a causa di un'eccessiva evaporazione).

Sono additivi di superficie i **disarmanti**, applicati sulle casseforme che verranno a contatto con il calcestruzzo fresco, e che hanno la funzione di facilitare il distacco tra cassaforma e calcestruzzo indurito. Essi sono costituiti da miscele di oli minerali e

5) ADDITIVI DI SUPERFICIE

Sono applicati sulla superficie del cls fresco. Sono di natura diversa:

disarmanti applicati sulle casseforme che verranno a contatto col cls fresco per facilitarne il distacco, lubrificano l'interfaccia armatura-cls per evitare che si generino difetti, come lo STRAPPO DEL CLS → porzioni corticali del getto restano aderenti alla cassaforma con gravi conseguenze per il cls faccia-vista. Servono per salvaguardare l'aspetto superficiale.

Quindi, ruolo: qualificare altamente la superficie faccia-vista evitando adesioni con la cassaforma che l'ha generata.

Composizione: miscele di oli minerali e vegetali, e tensioattivi → producono una pellicola sottile continua e uniforme sulla cassaforma.

Applicazione non uniforme → Formazione di macchie, bolle e "strappi" sul cls.

La stesura avviene a pennello o a spruzzo con diffusori appositi che garantiscono omogeneità.

Infatti la qualità di un buon cls faccia-vista dipende non solo dal disarmante, ma anche dal cls impiegato e dalla qualità e dalla qualità superficiale della cassaforma.

stagionanti (antievaporanti, agenti di curing): applicati sulle superfici libere di cls esposto all'aria. Controllano l'evaporazione dell'acqua del getto, la riducono per evitare che le condizioni ambientali possano danneggiare le caratteristiche del materiale (ad esempio a causa di un'eccessiva e rapida evaporazione potremmo non ottenere adeguate proprietà meccaniche).

Composizione: cere, resine, gomme, disciolte in un solvente molto volatile. Il solvente è solo un veicolo che rende queste sostanze più fluide, infatti subito dopo l'applicazione evapora formando una pellicola che protegge il cls dall'evaporazione dell'acqua d'impasto. Non permangono per lungo tempo sul manufatto perché sono sostanze organiche, ma per un tempo sufficiente a svolgere il loro ruolo.

Costituenti (cemento, acqua, aggregati, additivi)

↓
miscelazione (omogeneità della miscela → lavorabilità del cls fresco)

↓
presa in opera (getto)

↓
ostipamento (elimina le porosità perché

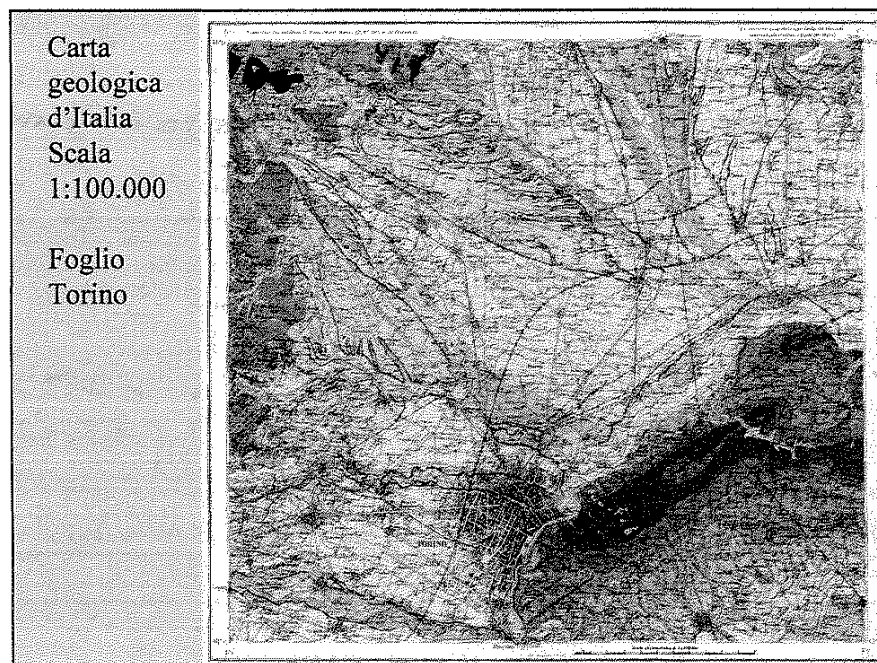
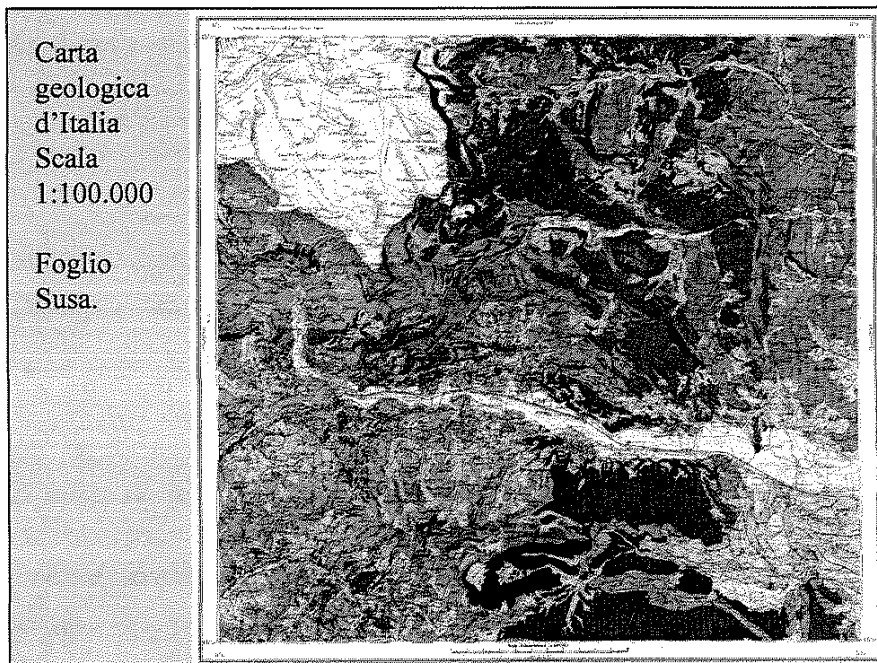
↑ porosità
↓ propr. mecc.
↓ durabilità

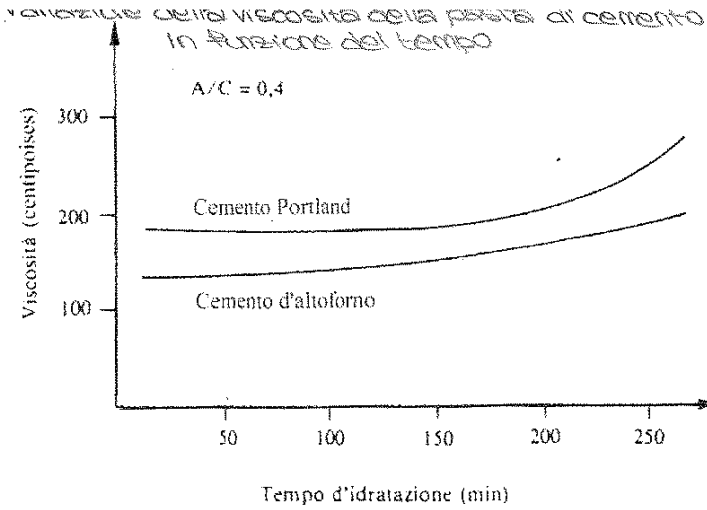
↓
stagionatura (normative, conseguenze)



Analizzeremo queste fasi per comprendere come possono essere alterate le caratteristiche del materiale e la sua durabilità in esercizio.

100000
100000





La viscosità di cemento Portland e cemento d'altoforno è compresa inizialmente tra 100 e 200. Cambia a seconda di:

- natura del cemento
- composizione
- granulometria → finezza di macinazione (infatti la loppa essendo vetrosa ha spigoli vivi perciò la scorrevolezza della pasta è bassa → è portata ad una finezza più elevata

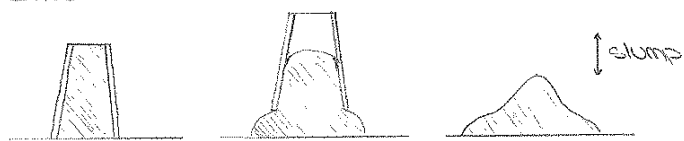
↑ finezza della polvere ↓ viscosità

Evoluzione nel tempo d'idratazione: si perd scorrevolezza, aumenta la viscosità perché inizia l'idratazione, il C-S-H crea una struttura fibrosa. Nel cemento Portland l'aumento di viscosità, almeno nelle prime fasi, è più rapido perché il cemento d'altoforno attende la Portlandite per formare CS-H secondario.

Come si può valutare la reologia di un cls fresco, tenendo conto che le misure non sono applicabili ad esso? In cantiere serve una prova rapida ma efficace per qualificare la lavorabilità. Allora → cono di Abrams (slump test) → prova normalizzata → UNI 9414

Tronco di cono in acciaio con dimensioni normalizzate (h = 30 cm, d = 10 cm, D = 20 cm), cavo poggia su base metallica liscia, stabile, dotato di due maniglie a 2/3 h e due alette alla base. Lo si riempie col cls fresco in 3 strati successivi intervallati da fasi di costipamento manuali (date le dimensioni) con 25 colpi di un fondino in ferro o di un bastone di legno di ≈ 16 mm di diametro ad estremità arrotondata. Si liscia la superficie superiore del getto. Le alette di base servono per appoggiare i piedi e non far muovere durante il costipamento; le maniglie per lasciare libero il contenitore per sollevarlo.

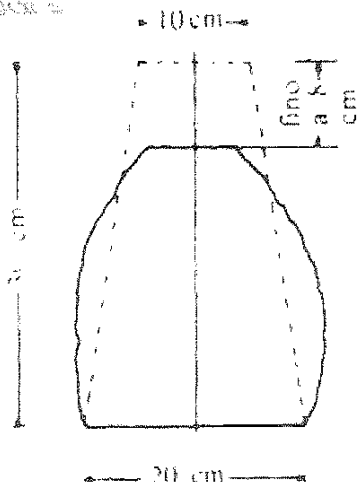
vedo come il cls scorie e si deforma sotto il suo stesso peso, libero da ogni contenimento.



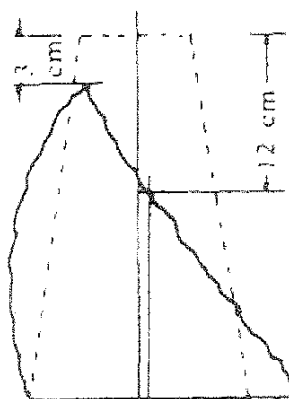
Verifico lo slump rispetto all'h iniziale della struttura troncoconica

Slump = h iniziale - h max del cls accostato e lasciato libero di deformarsi

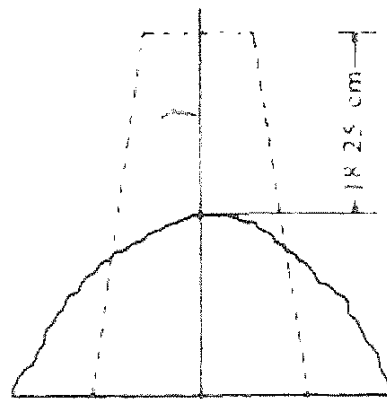
Abbassamenti al cono di Abrams: tipi di esec =



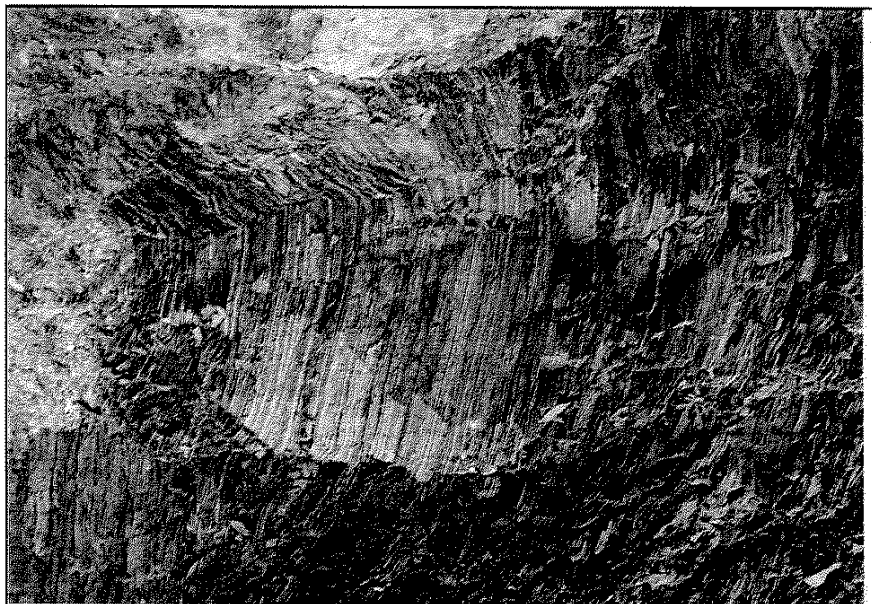
Slump di taglio



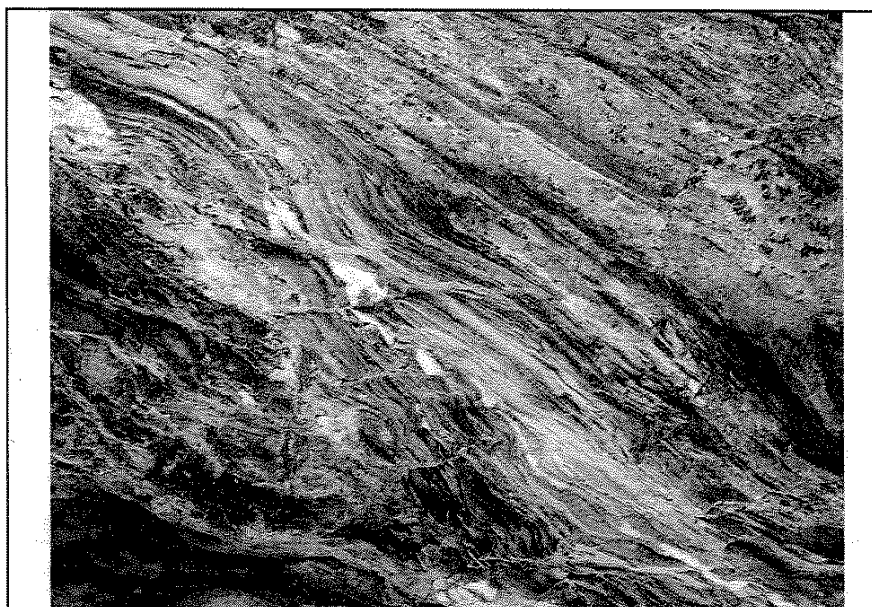
Collasso



6



ASPETTO SCISTOSO CON PIANI DI FOLIAZIONE RIFIEGATI



ASPETTO SCISTOSO CON PIANI DI FOLIAZIONE RIFIEGATI

Tab. 5.3. Relazione intercorrente tra slump e classi di consistenza

Classe di Consistenza	Slump (cm)	Denominazione corrente
S1	0-4	Umida
S2	5-9	Plastica
S3	10-15	Semifluida
S4	16-20	Fluida
S5	>20	Superfluida

Lavorabilità in funzione dello slump.
 Classificazione in 5 classi di consistenza, indicate con la lettera S.
 Al crescere del numero cresce la lavorabilità del c.a.
 Ci sono anche denominazioni dell'impasto

> slump > lavorabilità



> 18cm → slump accettabili solo se il c.a. è stato trattato con additivi Fo SF

progettista deve selezionare il valore di slump a seconda del tipo di opera che vuole realizzare. Per esempio per un c.a. armato servirà più fluidità per riempire efficacemente tutto lo spazio residuo oltre alle armature.

bassi slump → pavimentazioni

alti slump → da strutture non armate a strutture poco, medianamente, fortemente armate

regola di Lyse: si riferisce ai quantitativi d'acqua che occorre impiegare per il confezionamento di c.a. di diverse classi di consistenza

- a) per un dato D_{max} dell'aggregato, > classe di consistenza richiesta al c.a. fresco > quantità di acqua d'impasto
- b) per una data classe di consistenza del c.a., > D_{max} dell'aggregato, < richiesta d'acqua per conseguire la consistenza prefissata

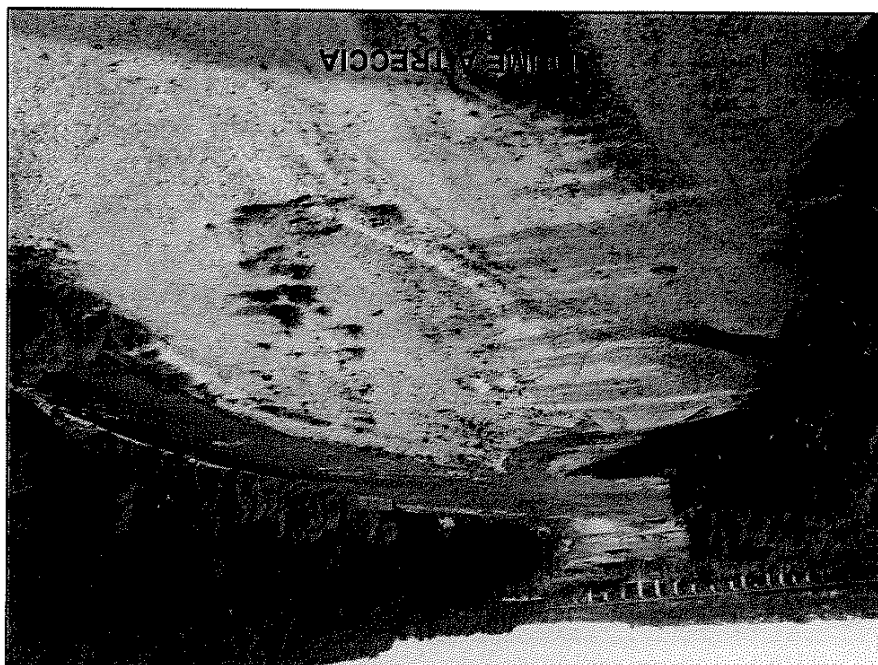
Tab. 5.4. Contenuto d'acqua indicativo per calcestruzzi di differente lavorabilità e contenuto d'aggregato con diverso diametro massimo

Parametri che influenzano la scorrevolezza di un impasto fresco

Diametro massimo aggregato (mm)	Tenore d'acqua (litri/m ³ di calcestruzzo)					
	Lavorabilità del calcestruzzo: slump (cm)					
	2.5-5		7.5-10		15-17.5	
	Aggregato tondeggiant	Aggregato spigoloso	Aggregato tondeggiant	Aggregato spigoloso	Aggregato tondeggiant	Aggregato spigoloso
9.5	190	210	200	225	230	255
19.0	170	195	190	210	210	225
38.1	160	170	170	190	190	210
50.8	150	165	165	180	180	195
76.2	135	155	155	165	160	185

Confronta il tenore di acqua (L/m³ di c.a.) in funzione:

- dello slump con intervalli di valori
- del diametro massimo dell'aggregato in mm
- della natura dell'aggregato (tondeggiant, spigoloso)



Tecnologia dei Materiali da Costruzione A
Docente: Prof. Laura Montanaro

Nel caso (a) l'effetto immediato è un aumento della fluidità dell'impasto (Tabella 5). Il passaggio da una consistenza S1 ad una consistenza S5 comporta comunque la necessità di aumentare il rapporto tra aggregato fine e grosso (sabbia/ghiaia) per ridurre il rischio di segregazione. L'aumento di lavorabilità, infatti, comporta l'adozione di una costante A di Bolomey maggiore e, conseguentemente, un maggior contenuto di aggregato fine ed un minor contenuto di quello grosso.

Tabella 5 – Effetto dell'aggiunta di un superfluidificante senza sostanziale modifica della composizione del cls

aggiungo il SF lasciando inalterata la composizione della miscela, se non per l'aggiunta. Poi valuto a dosaggio R_{ck}: ottengo la stessa S1 per il cls senza SF sia con il cls con SF.

	Cls iniziale	+ superfluidificante (1%)
Cemento	320 kg/m ³	= 320 kg/m ³
Acqua	144 kg/m ³	= 144 kg/m ³ L/m ³
Aggregato fine	800 kg/m ³	+ 820 kg/m ³
Aggregato grosso	980 kg/m ³	- 960 kg/m ³
Slump	2 cm	+ 24 cm
Rapporto a/c	0,45	= 0,45
R _{ck}	45 MPa	= 45 MPa

A parità di:
 - composizione della miscela (+ stesso a/c)
 - resistenza caratteristica a compressione S1 → S5
 Aumenta la lavorabilità con un'aggiunta dell'1% di SF.
 cls a pasta unita
 ↓
 cls superfluida

Il vantaggio nell'impiegare l'additivo con queste modalità consiste nell'ottenere una maggiore affidabilità del getto, che tenderà a presentare un elevato grado di compattazione.

Nel caso (b) si dice che l'additivo è utilizzato come super-riduttore d'acqua (high-range water reducer, HRWR), in quanto lo si usa per ridurre l'acqua d'impasto a pari lavorabilità (Tabella 6).

Tabella 6 – Effetto dell'aggiunta di un superfluidificante con riduzione dell'acqua d'impasto

+ superfluidificante (1%)
 - H₂O (20%)
 dopo 24h dal dosaggio, perché compensati la aggiunta di SF, per compensare la perdita il volume aumento il dosaggio di aggregati

	Cls iniziale	+ superfluidificante (1%)
Cemento	305 kg/m ³	= 305 kg/m ³
Acqua	168 kg/m ³	- 134 kg/m ³
Aggregato fine	820 kg/m ³	+ 860 kg/m ³
Aggregato grosso	1010 kg/m ³	+ 1060 kg/m ³
Slump	12 cm	= 12 cm
Rapporto a/c	0,55	- 0,44
R _{ck}	35 MPa	+ 45 MPa

A parità di:
 - slump → lavorabilità
 Riduco l'acqua:
 - ↓ porosità, ↓ permeabilità
 - ↑ durabilità
 - ↑ R_{ck}
 cls + compatto
 - poroso
 - permeabile } + durevole

Con un dosaggio dell'1% di superfluidificante, si può ridurre l'acqua del 20-30%. Se non si modifica il dosaggio in cemento, si avrà una riduzione sensibile del rapporto a/c senza alterare la lavorabilità, il che porta ad una minore porosità e permeabilità del cls, ad una sua maggiore resistenza meccanica e durabilità.

Infine, il caso (c) può essere visto come la combinazione dei due esempi precedenti. Si supponga di avere a disposizione un cls non ancora additivato a consistenza superfluida (S5), grazie ad un dosaggio elevato d'acqua, ma meccanicamente resistente, durevole ed impermeabile, perché si è adottato un basso rapporto a/c (Tabella 7). Questo risultato lo si è ottenuto solo attraverso un dosaggio in cemento abbastanza elevato. L'elevato quantitativo di acqua comporta anche un ridotto contenuto di aggregato ed un basso rapporto aggregato/cemento, il che presenta inevitabilmente la tendenza ad un elevato ritiro idrometrico. Inoltre, il forte dosaggio in

Tecnologia dei Materiali da Costruzione A
Docente: Prof. Laura Montanaro

dall'efficacia della compattazione in opera, cioè dalla qualità della manodopera di cantiere, e pertanto più affidabile.

Se si confrontano le resistenze a compressione a 28 gg di due cls ottenuti con lo stesso cemento, ma a classe di consistenza diversa (S2 e S5, quest'ultima raggiunta grazie all'aggiunta di additivo superfluidificante, a parità di rapporto a/c), si può notare che il cls a consistenza S5 dà il massimo della prestazione meccanica (ca 35 MPa a compressione a 28 gg) purché sia stato vibrato per almeno 5 secondi. Il cls a minor consistenza (S2) presenta una pari resistenza a compressione solo se la vibrazione è stata protratta per oltre 25 secondi. Tale cls vibrato per soli 5 secondi arriverebbe ad una resistenza a compressione a 28 gg di appena 22 MPa. Infine, in completa assenza di vibrazione, la resistenza meccanica del cls a consistenza superfluida arriverebbe comunque a circa 30 MPa (più dell'85% del valore massimo, pari a 35 MPa, ottenibile con questo cls), mentre quella del cls a consistenza S2 raggiungerebbe appena il 40% di quel valore (circa 14 MPa).

5. La posa in opera del calcestruzzo

Il trasferimento del conglomerato dalle betoniere nelle casseforme a la successiva costipazione devono avvenire in modo tale da assicurare un riempimento completo con calcestruzzo omogeneo. Occorre evitare che il conglomerato cada dall'alto urtando le armature o le pareti delle casseforme o formando cumuli: se ciò accade, l'aggregato grosso può segregarsi e concentrarsi in volumi delimitati del getto, formando i **nidi di ghiaia** o **vespai**.

Si ricordi inoltre, facendo riferimento al confronto tra cls a parità di cemento impiegato e di rapporto a/c fatto alla fine del paragrafo precedente, che in un cls superfluida (S5) non si formano vespai, sia che venga vibrato o meno, ed i difetti di getto sono facilmente eliminabili nei primi 5 secondi di vibrazione. In un cls meno lavorabile (S2), i vespai si formano nel cls non vibrato e scompaiono solo dopo 25 secondi di vibrazione.

Il calcestruzzo può essere deposto nelle casseforme mediante trasporto a pressione (ottenuta con pompe a pistone, aria compressa o pompe peristaltiche) in tubi rigidi o flessibili. Il pompaggio è particolarmente utile quando lo spazio disponibile è limitato o ci sono difficoltà di accesso.

Il calcestruzzo proiettato si impiega invece per realizzare velocemente strati di conglomerato su superfici poco stabili (scarpate o gallerie) così stabilizzandole, senza dover costruire casseforme. Tali strati costituiscono talora il rivestimento definitivo o, altrimenti, il rivestimento vero e proprio viene in seguito realizzato con calcestruzzo gettato in casseforme.

Bleeding (dall'Inglese *to bleed*, essudare) definisce la raccolta d'acqua sulla superficie del cls gettato.

Tecnologia dei Materiali da Costruzione A
Docente: Prof. Laura Montanaro

la velocità delle reazioni di idratazione, con rapida perdita della lavorabilità; l'acqua d'impasto evapora più facilmente, accentuando il ritiro plastico con possibile formazione di fessurazioni; a causa della presa più rapida, i getti successivi non aderiscono bene l'uno all'altro.

In tali circostanze si possono adottare le seguenti precauzioni: i getti vanno eseguiti di mattina, alla sera o di notte; si usano cementi a più basso calore di idratazione, oppure si aggiungono additivi ritardanti; dopo il getto si mantengono bagnate le superfici dei getti annaffiando mediante nebulizzatori (senza dilavare le superfici, però) o con teli bagnati e si ergono barriere frangivento, per limitare l'evaporazione; si raffreddano i costituenti prima dell'impasto (inerti immagazzinati all'ombra, acqua fredda o con aggiunta di ghiaccio).

A temperature basse, invece (getti in climi freddi) si hanno i seguenti inconvenienti: ritardo nello sviluppo delle resistenze; pericolo di congelamento dell'acqua di impasto; maggiore pressione sulle casseforme. Se il ghiaccio si forma prima della presa (periodo dormiente), quest'ultima viene soltanto rimandata al momento del disgelo, dopo il quale le reazioni d'idratazione riprendono. Invece, se il ghiaccio si forma nel corso della presa, a causa del suo effetto espansivo, si ha il danneggiamento dello scheletro dei silicati idrati in via di formazione con notevoli perdite di resistenze. In queste condizioni non si eseguono getti se la temperatura è inferiore a 0°C o se si prevede che tale temperatura possa verificarsi nelle 24 ore. Si possono impiegare additivi acceleranti, che aumentando la velocità di reazione fanno sviluppare più rapidamente il calore di reazione, mantenendo la temperatura del getto più elevata. Si può anche ricorrere al pre-riscaldamento degli inerti con vapore. Le casseforme possono essere protette con materiali coibenti (ad esempio, con polistirolo espanso) o riscaldate all'esterno con vapore acqueo, acqua calda o con resistenze elettriche.

Si ricorda che le casseforme comunemente utilizzate sono in legno, in acciaio, in materiale plastico. Quando il calcestruzzo viene introdotto nelle casseforme contiene dal 5 al 20% in volume di aria intrappolata (Figura 1), a seconda della sua lavorabilità. Per eliminare tale aria, occorre compattare (costipare) l'impasto.

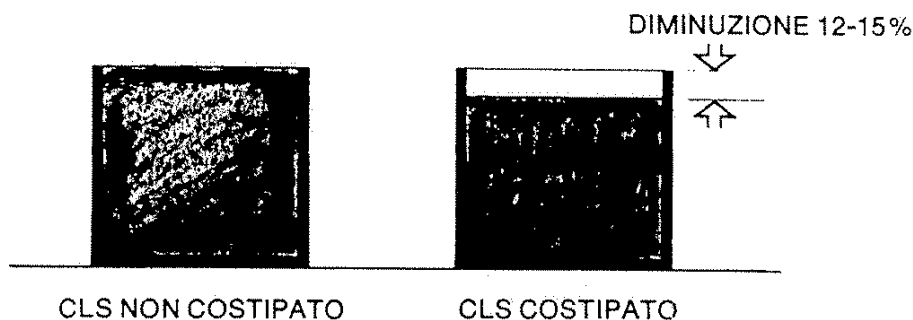


Figura 1. Diminuzione di volume del calcestruzzo con il costipamento

La compattazione può essere fatta a mano, con barre di ferro, oppure, normalmente, con mezzi meccanici. La costipazione a mano richiede ovviamente una maggior lavorabilità dell'impasto. Tra i mezzi meccanici il più diffuso è la vibrazione, che può essere interna (vibratori immersi nell'impasto, figura 2) oppure esterna (trasmessa attraverso le casseforme), come avviene generalmente nel caso della prefabbricazione. I vibratori ad immersione (o ad ago) possono essere ad aria compressa

Tecnologia dei Materiali da Costruzione A
Docente: Prof. Laura Montanaro

Ovviamente, si ricorda che una operazione di costipazione ben condotta, provocando l'eliminazione di gran parte dell'aria intrappolata contribuisce al raggiungimento di più elevate proprietà meccaniche: dalla Figura 30 si nota come la vibrazione meccanica è efficace anche su calcestruzzi poco lavorabili (bassi rapporti a/c), mentre quella manuale (pigiatura) diventa efficiente solo su calcestruzzi più fluidi. Una buona costipazione non potrà comunque mai sopperire alla caduta delle proprietà meccaniche che deriva dall'impiego di un rapporto a/c troppo elevato.

6. La stagionatura del calcestruzzo: la legge di Abrams

La **legge di Abrams** è di grande importanza tecnologica: la resistenza meccanica ad una determinata stagionatura ed ad una data temperatura aumenta al diminuire del rapporto a/c , secondo l'equazione:

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

Ove R = resistenza meccanica a compressione, K_1 e K_2 due costanti che dipendono dal tempo e dalla temperatura di stagionatura, oltre che dal tipo di cemento.

7. Grado di compattazione

Per quantificare a posteriori il cosiddetto grado di compattazione (g_c) di un cls gettato si può ricorrere semplicemente alla misura della massa volumica (peso specifico o densità) di una carota estratta dalla struttura (m_v) ed al suo raffronto con quella (m_0) del corrispondente cls compattato "a rifiuto" (cioè fino a costipazione del 100%), valutata su un provino (cubico o cilindrico) confezionato *ad hoc* in corso d'opera:

$$g_c = m_v/m_0$$

Numericamente è ragionevole che la massa volumica di un cls costipato a rifiuto sia pari a 2300 kg/m^3 . Pertanto se la massa volumica della nostra carota, prelevata dal manufatto indurito, è pari a 2250 kg/m^3 , si ottiene un grado di compattazione pari a:

$$g_c = m_v/m_0 = 2250/2300 = 0,98$$

cioè si è pervenuti ad una compattazione pari al 98% del valore massimo ottenibile.

8. Le strutture armate e precomprese: cenni

La maggior parte del calcestruzzo è impiegato per strutture armate. Un esame del calcestruzzo armato non rientra negli scopi di questo corso, tuttavia si tratta di un classico esempio di materiale composito, nel quale si accoppiano sinergicamente le proprietà di due materiali: il calcestruzzo e l'acciaio. Il conglomerato cementizio ha

Tecnologia dei Materiali da Costruzione A
Docente: Prof. Laura Montanaro

In pratica, quindi, se il valore di δ della centrale di betonaggio è pari a 5 MPa, a fronte di una richiesta del progettista di una $R_{ck} = 25$ MPa, occorre almeno garantire una R_{cm28} di $(25 + 1,4 \times 5) = 32$ MPa.

A maggior garanzia della sicurezza dell'opera è richiesto anche che il minimo valore di resistenza meccanica ($R_{c \text{ min } 28}$) tra tutti i provini testati soddisfi la disequazione:

$$R_{c \text{ min } 28} \geq R_{ck} - 3,5 \text{ MPa}$$

Pertanto, data una $R_{ck} = 25$ MPa, nessun provino dovrà presentare una $R_{c28} < 21,5$ MPa.

Le relazioni:

$$R_{cm28} \geq R_{ck} + K\delta$$

$$R_{c \text{ min } 28} \geq R_{ck} - 3,5 \text{ MPa}$$

Sono raccomandate per lavori molto importanti, di grande impegno volumetrico (> 1500 m³ di cls) ed il tipo di controllo che esse effettuano sulla qualità del cls è detto **controllo di tipo B**.

Per lavori meno importanti, si adotta il cosiddetto **controllo di tipo A**, per il quale invece dev'essere rispettata la disequazione:

$$R_{cm28} \geq R_{ck} + 3,5 \text{ MPa}$$

cioè si assume forfettariamente un valore di $K\delta$ pari a 3,5 MPa, fermo restando l'altro requisito:

$$R_{c \text{ min } 28} \geq R_{ck} - 3,5 \text{ MPa}$$

Per completare il quadro delle correlazioni, si ricorda quella che unisce la resistenza a compressione (R_c), o anche la resistenza caratteristica R_{ck} , al modulo elastico:

$$E = K_E (R_c)^{1/2}$$

ove K_E è una costante che dipende dalle condizioni di misura.

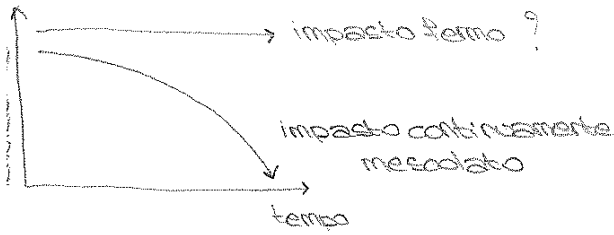
Per la normativa italiana, in assenza di misure dirette del modulo elastico E , esso è valutabile (a 28 gg) come pari a:

$$E_{28} = 5700 (R_{ck})^{1/2}$$

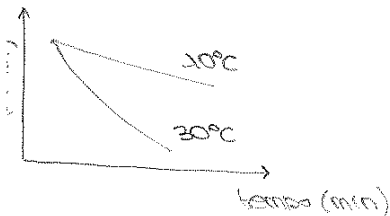
10. L'effetto della temperatura sul cls: approfondimenti

Le prove meccaniche di riferimento (vedi paragrafo 9) vanno effettuate in condizioni termoigrometriche standard (20°C, U.R. (umidità relativa) $\geq 95\%$), a causa della notevole influenza di temperatura ed umidità relativa sull'evoluzione delle proprietà del cls durante la stagionatura.

La lavorabilità degli impasti diminuisce col tempo perché progressivamente avvengono le reazioni di presa e indurimento. Quindi la classe di consistenza diminuisce nel tempo. Per ciò deve effettuarsi la prova del cono di Abrams pochi attimi prima del getto nella cassaforma.



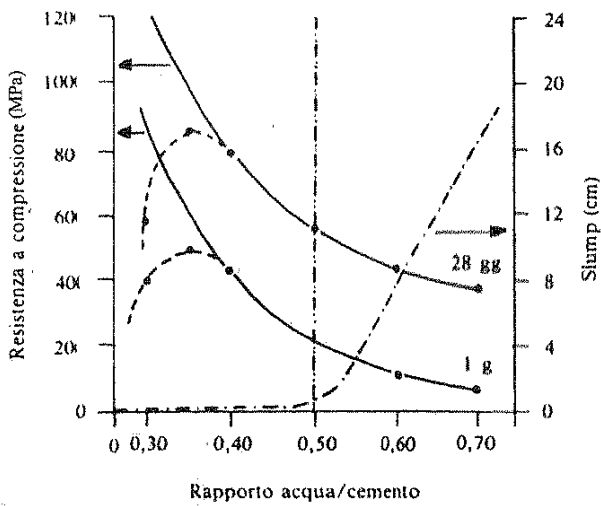
La lavorabilità diminuisce molto rapidamente se l'impasto è continuamente mescolato perché la miscelazione favorisce una maggiore velocità della reazione di idratazione.



Maggiore è la temperatura, più rapidamente l'impasto rapprende per la veloce cinetica di reazione → più rapidamente lo slump, e quindi la lavorabilità decresce.

A 10°C in 1h non cambia la classe di consistenza

A 30°C in 1h cambiano 2-3 classi di consistenza



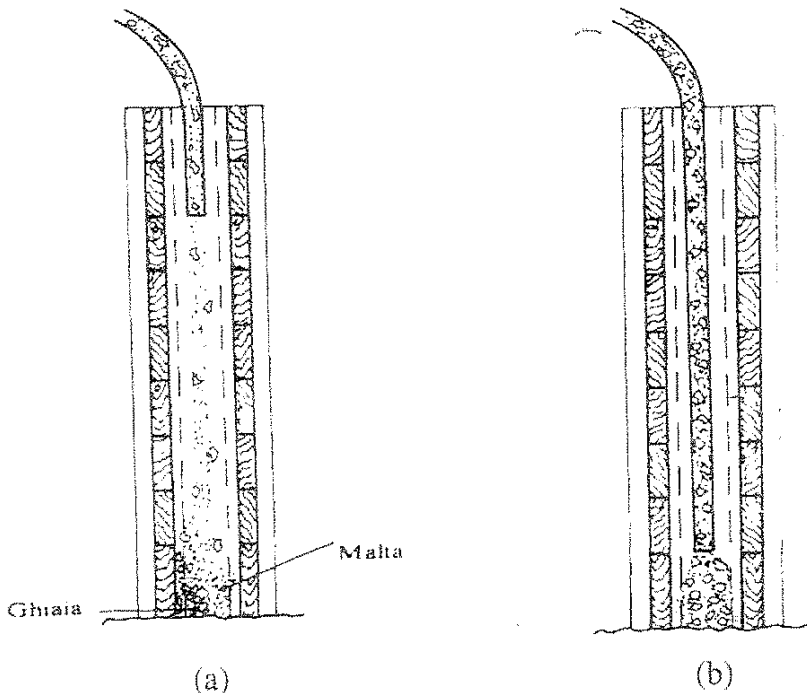
— resistenza a compressione
 - - - slump
 > a/c → > slump → > lavorabilità → < resistenza anche se guadagno tempo

— teorica, calcolata, non tiene conto che l'acqua è un reagente

- - - reale, devia da quella teorica per $a/c < 0,4$
 A partire da 0,35 circa come a/c la curva decresce, cioè diminuisce la resistenza perché l'acqua è comunque un reagente e se non la dose correttamente rimane cemento non idratato.

Fig. 5.24. Relazione tra il rapporto a/c , la resistenza e la lavorabilità di calcestruzzi

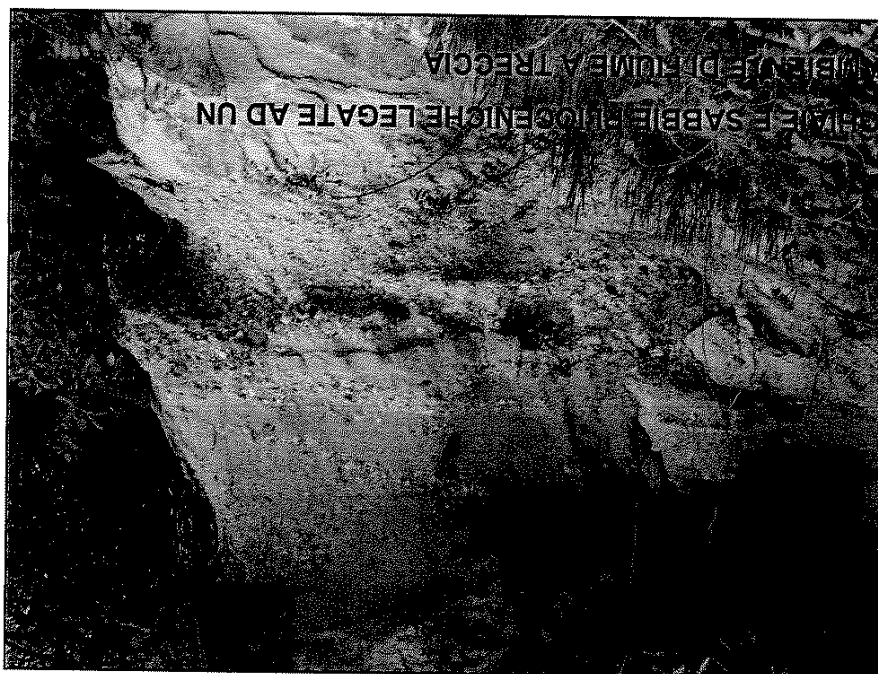
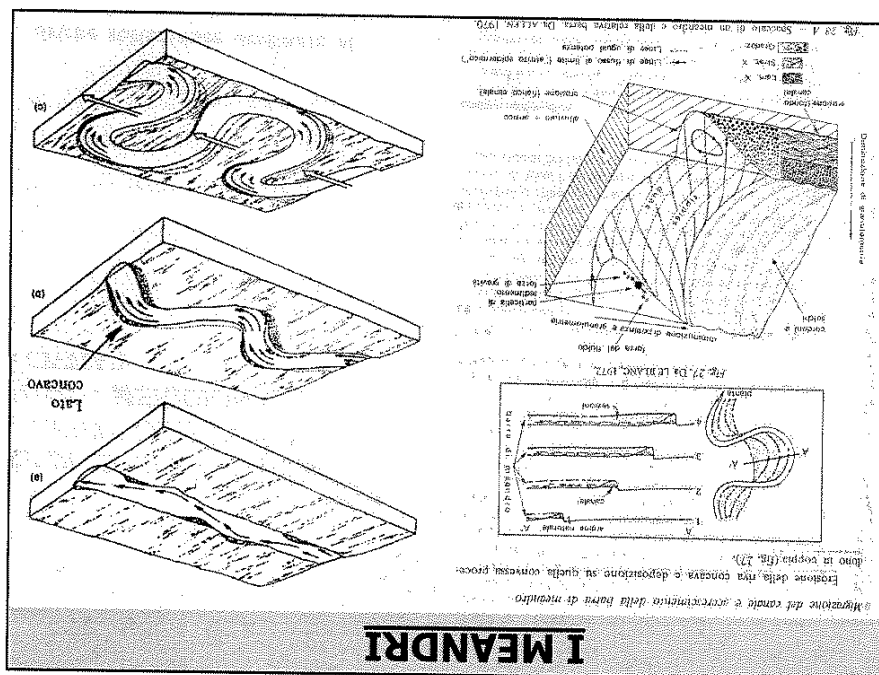
MESSA IN OPERA DEL CLS

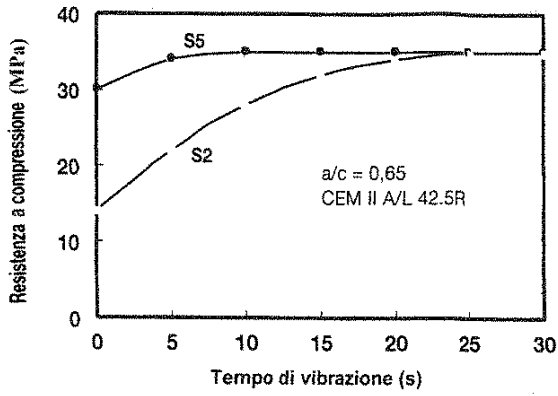


Metodo scroscello (a) e corallo (b) di riempimento di una cassaforma

Nella fase di getto posso compromettere la qualità del cls: per esempio nel getto per pompaggio commetto un errore se lo lascio cadere dall'alto perché l'effetto di gravità forma vespai di ghiaia, segregazione, l'aggregato grossolano arriva per primo sul fondo (a). Devo accompagnare il pompaggio dal basso verso l'alto, in modo da non produrre la segregazione.

Le casseforme possono essere in:
 - legno: minor costo, piccole dimensioni, bassa durabilità, vanno





suppliamo di aere dei provini contestualizzati con CEM II, a/c = 0,65.

• senza SF → classe di consistenza S2
La resistenza a compressione se non lo costipassimo ($q_c = 0,8 \rightarrow 20\%$ di porosità) è inferiore a 15 MPa.

Procedendo con la vibrazione e costipando ($q_c = 0,98 - 0,99$), man mano che cresce la qualità del costipamento crescono le resistenze meccaniche fino a 35 MPa.

• con SF → classe di consistenza S5
La maggiore fluidità dell'impasto fa sì che molta meno aria resti intrappolata

Fig. 5.17. Resistenza a 28 gg di calcestruzzi di consistenza S2 ed S5.

$q_c = 0,98 \rightarrow 2\%$ di porosità). La resistenza meccanica senza andare in vibrazione è già di 30 MPa
→ alta compattazione e alte proprietà meccaniche.
Dopo 30 s il provino di classe di consistenza S2 raggiunge le proprietà meccaniche a cui un provino di classe S5 arriva in 10 s, raggiungendo il massimo delle proprietà meccaniche.
unque si vede che il costipamento è un'operazione rapida ma va svolta in modo accurato.

il crescere dello slump raggiunge rapidamente i gradi di compattazione elevati e consistenze fluide e superfluide portano a valori di compattazione che consentono basse porosità e elevate proprietà meccaniche.

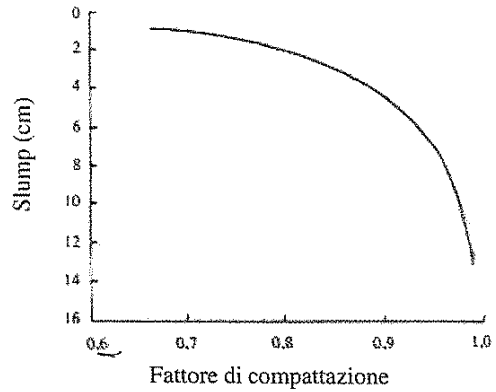


Fig. 5.22. Correlazione tra slump e fattore di compattazione

• STAGIONATURA (curing)

procedura applicata al getto nelle sue prime fasi di vita (primi giorni, prima settimana) col solo scopo di garantire il controllo dell'evaporazione dell'acqua del getto e far sì che rimanga per il tempo necessario alle reazioni di idratazione → procedura attuata, a seguito del getto, per promuovere la presa e l'indurimento.

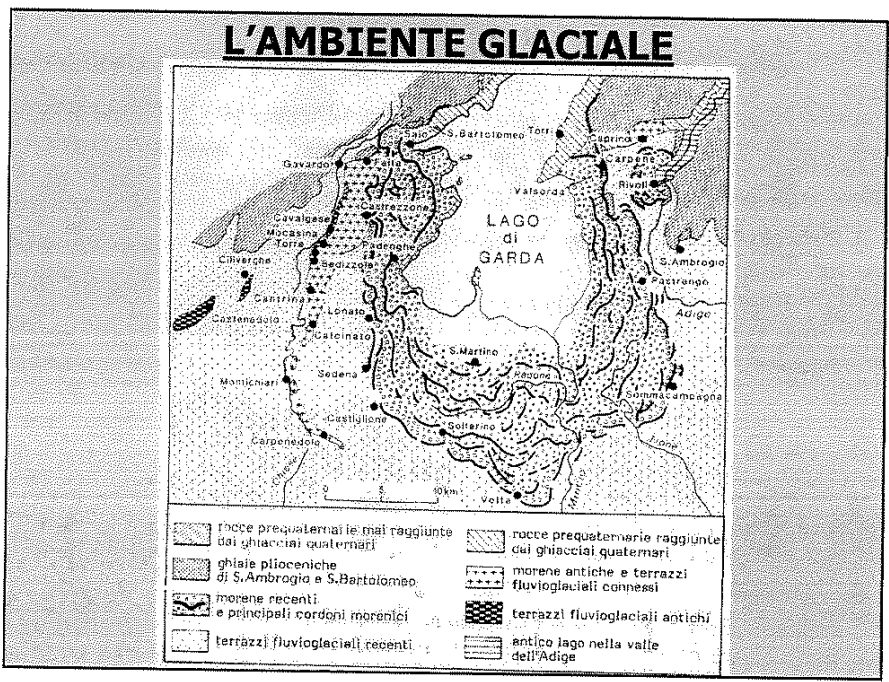
- controllo umidità che influenzano il processo d'idratazione del cemento
- controllo temperatura

Questa procedura che evita un essiccamento precoce dura per almeno 7gg o per il tempo necessario a sviluppare il 70% della resistenza a compressione richiesta al manufatto.

La stagionatura può essere:

• ORDINARIA → avviene in cantiere

• ACCELERATA → avviene in fabbrica ad alta temperatura e sotto pressione di vapore
accelerazione della velocità d'idratazione → rapido essiccamento → usata per la prefabbricazione così produttività maggiore e recupero costi. L'evita l'essiccamento precoce.



a legge di Abrams correla la resistenza meccanica a compressione, ad una certa stagionatura e temperatura, al rapporto a/c.

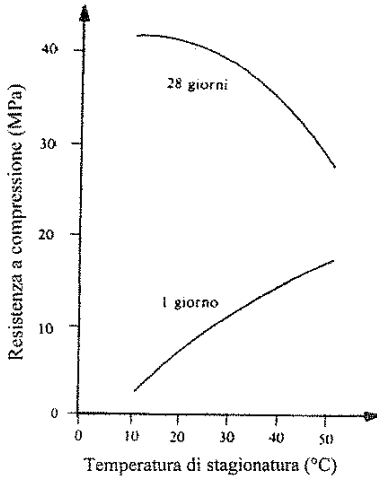
$$R = \frac{K_1}{K_2 a/c}$$

→ aumenta al diminuire del rapporto a/c

R = resistenza meccanica a compressione

→ K_1, K_2 = costanti che dipendono dal tempo e dalla temperatura di stagionatura, e dal tipo di cemento

fig. 5.29. Effetto della temperatura sullo sviluppo delle resistenze meccaniche



La temperatura influisce sulle cinetiche di idratazione e queste sulle resistenze meccaniche, soprattutto a lungo termine.

• dopo 1 giorno le resistenze meccaniche crescono al crescere della temperatura perché ad alte T si sviluppano più rapidamente le proprietà meccaniche → le alte T hanno un effetto benefico sull'incremento della resistenza meccanica a breve termine (1 giorno)

• MA le alte T provocano una caduta delle resistenze meccaniche a lungo termine (28 gg), quindi il trend si inverte. Perché?

Se l'idratazione è più lenta, gli aghi di C-S-H crescono lentamente riempiono più efficacemente lo spazio intergranulare, riducono le porosità e formando una struttura più fibrosa si ottengono così prestazioni meccaniche superiori.

Quindi!

basse T → cinetiche lente → lento sviluppo di prop. mec. → porosità molto ridotte → > prop. mec.

alte T → cinetiche rapide → rapido sviluppo di prop. mec. → < prop. mec. a lungo termine.

Esistono diagrammi con parametri che controllano come il getto si essicca, la stagionatura

temperatura ambiente

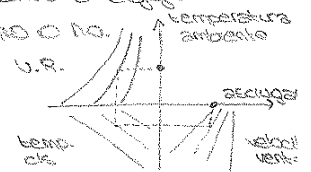
U.R. dell'aria

temperatura interna del getto

velocità del vento

4 parametri che influenzano l'ASCIUGAMENTO $\frac{kg}{mq \cdot h}$ → litri di acqua di impasto che evaporano in 1h per ogni m^2 di getto esposto all'aria

con un termometro misuro la $T_{ambiente}$, con un igrometro misuro l'U.R. aria, valutiamo con un termometro $T_{interna}$ del getto, con un anemometro misuro la velocità del vento e leggo la velocità con cui l'acqua evapora. Ciò mi dice se sono in condizioni di rischio o no.



RITIRO DEL CLS

dopo la stagionatura si ha una fase di ritiro che va controllato:

1) ritiro ELASTICO (pasta fresca) legato all'evaporazione → lo controllo con una corretta stagionatura evitando la repentina e incontrollata evaporazione dell'acqua d'impasto

2) ritiro da ESSICCAMENTO (contrazione da idratazione) → lo controllo con una corretta composizione della miscela

in caso di ritiro incontrollato si possono avere fessurazioni

il ritiro è contrastato dalla presenza di aggregati. Tanto più il cls è basso dosato in cemento, tanto minore è il ritiro perché chi si ritira è la pasta di cemento.

↓ tenore di cemento ↓ ritiro

senza un'opportuna aggiunta di aggregati e opportune distribuzioni granulometriche si avrà il ritiro con conseguenti fessurazioni.

L'AMBIENTE GLACIALE

WURM

RISS - WÜRM

RISS

MINDEL - RISS

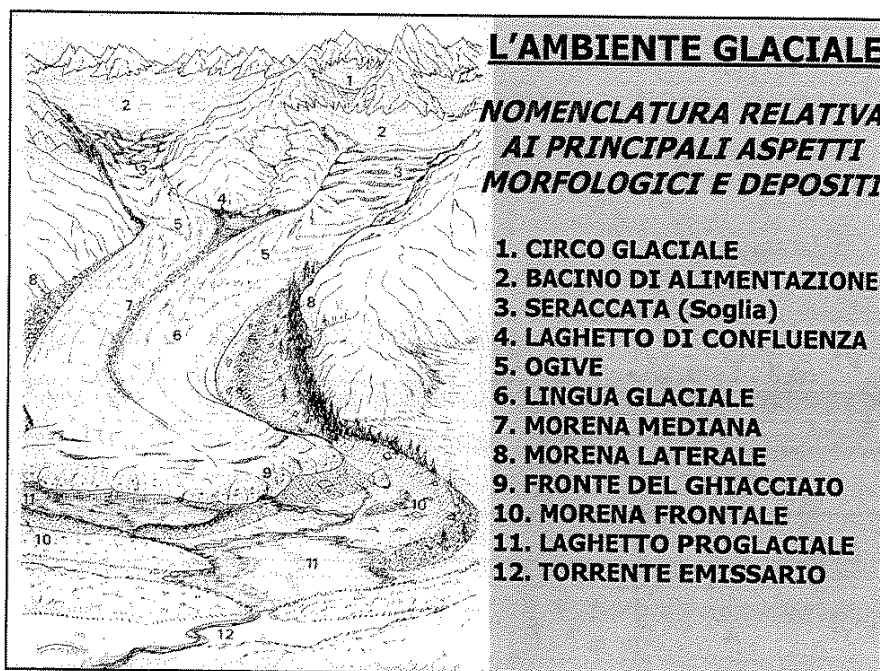
MINDEL

GUNZ - MINDEL

GUNZ

DONAU - GUNZ

DONAU



L'AMBIENTE GLACIALE

NOMENCLATURA RELATIVA AI PRINCIPALI ASPETTI MORFOLOGICI E DEPOSITI

- 1. CIRCO GLACIALE**
- 2. BACINO DI ALIMENTAZIONE**
- 3. SERACCATA (Soglia)**
- 4. LAGHETTO DI CONFLUENZA**
- 5. OGIVE**
- 6. LINGUA GLACIALE**
- 7. MORENA MEDIANA**
- 8. MORENA LATERALE**
- 9. FRONTE DEL GHIACCIAIO**
- 10. MORENA FRONTALE**
- 11. LAGHETTO PROGLACIALE**
- 12. TORRENTE EMISSARIO**

Resistenza a compressione in funzione del tempo e del **rapporto acqua/cemento**: le differenze sono evidenti a 28 e a 90 gg, meno a 3 e a 7 gg. Supponendo di avere in cls con le stesse caratteristiche composizionali, se non per il rapporto acqua/mento, osservo che $\downarrow a/c \rightarrow \uparrow$ valori di resistenza.

$a/c = 0,5$

28gg \rightarrow 35-38 MPa

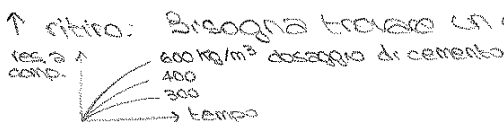
30gg \rightarrow 50 MPa

nel tempo prosegue l'indurimento e migliorano le proprietà meccaniche

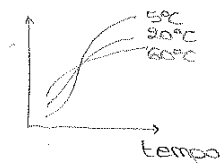


Un altro parametro è il **dosaggio di cemento**. Supponiamo di avere 3 cls con la stessa composizione se non per il dosaggio di cemento (200, 300, 400 Kg/mc) e valutiamo la resistenza a compressione nel tempo. Osservo che \uparrow dosaggio di cemento $\rightarrow \uparrow$ proprietà meccaniche

MA \uparrow ritiro: materiale finale



Poi la **temperatura**: vediamo la resistenza a compressione nel tempo di 3 cls esposti a temperature di 5, 20, 60°C. La temperatura influenza la cinetica.



$\uparrow T \rightarrow \uparrow$ velocità di idratazione

Quindi a 60°C ho uno sviluppo precoce delle proprietà meccaniche MA si ripercuote negativamente alle lunghe stagionature. Infatti la curva relativa a 60°C ha una crescita con pendenza inferiore

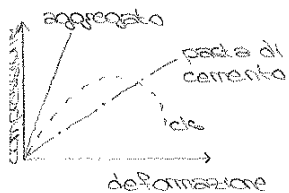
rispetto al materiale che si è idratato lentamente alle temperature più basse, perché si sviluppa in questo caso una struttura più fitta, più fibrosa di C-S-H. Dunque $\downarrow T \rightarrow$ velocità di idratazione \rightarrow lento ma efficace sviluppo degli aggl. di C-S-H

\uparrow resistenze meccaniche

\uparrow resistenze agli ambienti aggressivi

Curve sforzo-deformazione

aggregato
pasta di cemento
cls



Aggregato: resistenza meccanica superiore alla pasta di cemento \rightarrow più resistente e più rigido

Aggregato e pasta di cemento: hanno comportamento fragile \rightarrow solo def. elastica fino a rottura

Il cls ha un comportamento da composito dato dall'unione di 2 materiali: infatti nella prima fase meccanica, quella di def. elastica, vedo che il tratto rettilineo ha una pendenza intermedia tra aggregato e pasta di cemento. È tipico dei compositi perché

vale la legge della miscela:

$E_c = \chi_m E_m + \chi_r E_r$

$\chi_m + \chi_r = 1$

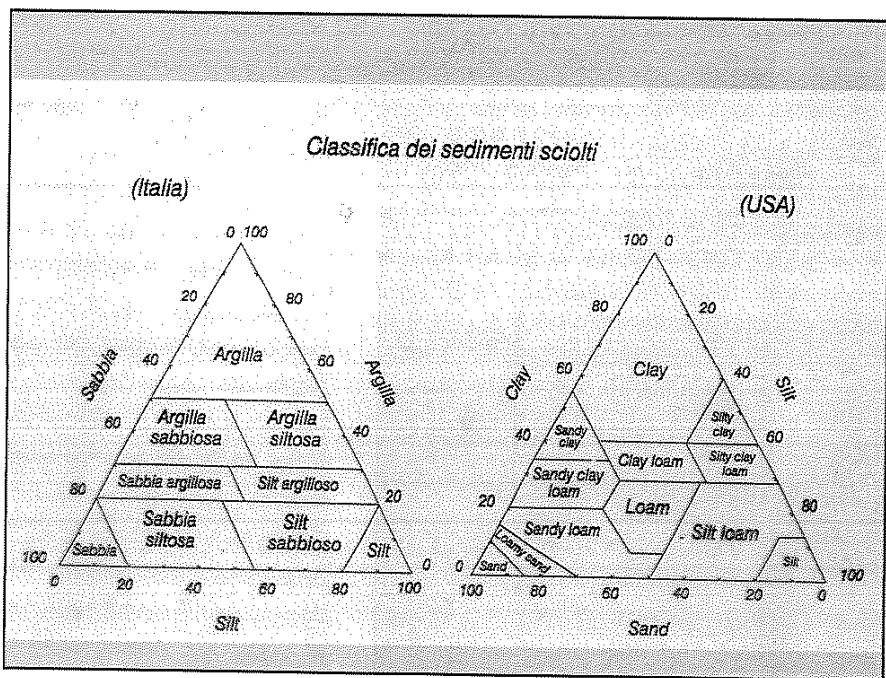
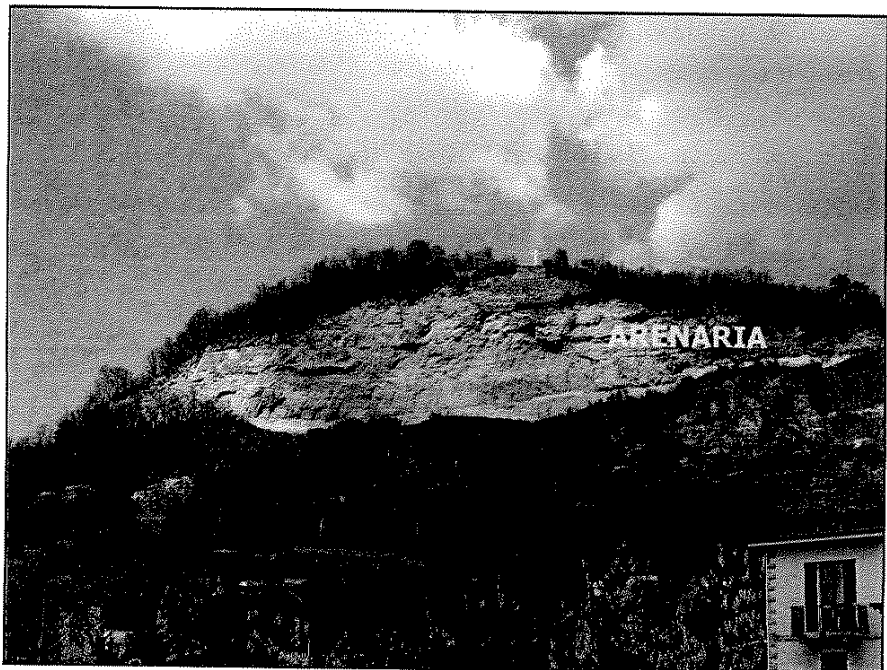
infatti $\chi_m = \frac{m_m}{m_m + m_r}$ frazione in massa

pasta di cemento che avvolge i granuli dando continuità meccanica \leftarrow matrice

rinforzo \rightarrow aggregato che garantisce migliori prestazioni meccaniche

ecco perché il tratto elastico si colloca in una posizione intermedia tra aggregati e pasta di cemento: il loro contributo è pesato.

Ma poi il cls, formato da costituenti con comportamento fragile (andamento lineare fino a rottura) ha una piccola deformabilità di tipo plastico fino a rottura. Perché all'interfaccia tra matrice e rinforzo sono possibili dei micromovimenti dovuti alla sollecitazione di taglio e che trasferiscono la sollecitazione all'aggregato. Questi



non necessariamente migliore e che esclude molti meno problemi. La maggior parte dei problemi
 $R_{ck} > R_m \rightarrow R_{ck}$ qualifica in modo più corretto e più sicuro la reale prestazione meccanica.

$R_{ck} < R_m$ e corrisponde ad una verticale spostata a sx in un punto in cui solo il 5% di
 tutti i risultati saranno inferiori ad essa.

$$R_{ck} = R_m - Ks$$

dove K è una costante numerica che vale in genere 1,64 e s è lo scarto quadratico medio. Il progettista quando qualifica un cls si riferisce a R_{ck} , non a R_m , così si tiene all'interno del progetto il 90% dei provini prodotti.

L DEGRADO DEL CLS INDURITO

Tab. 7.2. Cause di degrado in strutture in calcestruzzo

Cause	Descrizione	Numero strutture	Tot.	% su 139 strutture
Tecnologiche	a) calcestruzzo di qualità scadente	31	58	42
	b) attacco chimico del calcestruzzo	12		
	c) corrosione dei ferri dovuta ad inadeguata protezione con calcestruzzo di qualità scadente	9		
	d) materiali (cemento, inerte, ecc.) non idonei	6		
Costruttive	a) scarso controllo della messa in opera	19	31	22
	b) assenza del controllo della messa in opera o ignoranza delle tecniche esecutive	12		
Strutturali	a) calcolo strutturale inadeguato b) calcolo insufficiente per un'adeguata prestazione strutturale	11 12	16	12
Sovraccarichi	strutture progettate per altri usi e sovraccaricate	11	11	8
Fondazioni	fondazioni inadeguate	10	10	7
Accidentali	incendio	6	6	4
Collasso	a) risultante da almeno due delle suddette cause	5	7	5
	b) rottura delle strutture di collegamento	2		

Possibile confermare il miglior cls (aggregato corretto, basso a/c...) ma se c'è un errore, come scottatura, non stagiano bene, posso chiamare un cls di scarsa qualità, aggregabile e poco durevole.

~ 85% delle cause di degrado

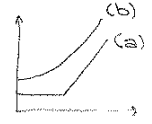
L'opera in esercizio deve garantire una certa durabilità. Per un'opera rilevante circa 120 anni, per un attracco marino 30-40 anni. L'ambiente di esposizione condizionerà l'empo di vita, ma a quel tempo devo arrivare. Quindi devo conoscere il degrado e sapere come contrastare i fenomeni di questo degrado.

Tab. 7.3. Cause di degrado del calcestruzzo

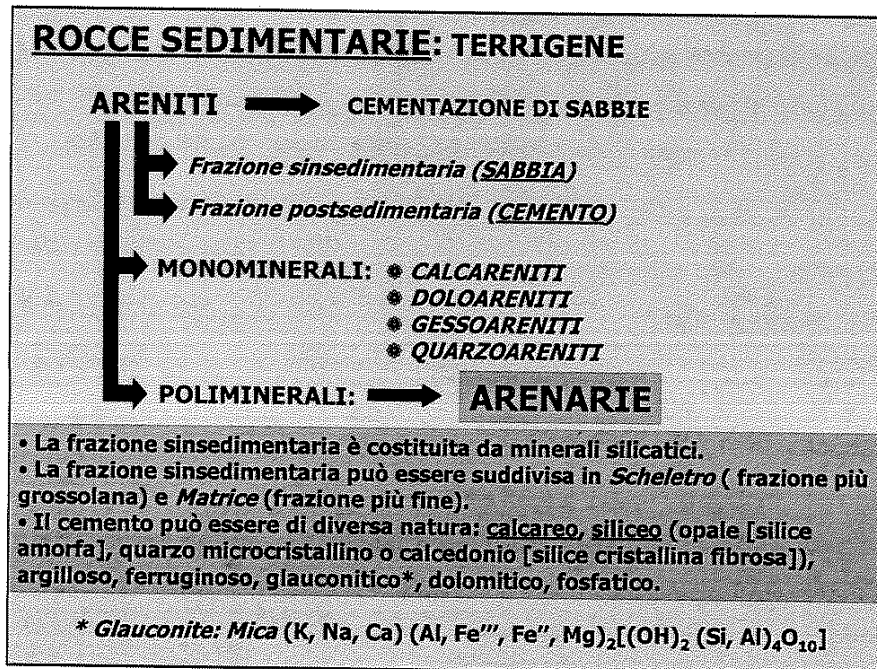
Cause di degrado di tipo		
Chimico	Fisico	Meccanico
Solfati (SO_4^{2-})	Gelo-disgelo	Urto, scoppio
Anidride carbonica (CO_2)	Ritiro da essiccamento	Erosione, abrasione
Cloruri (Cl)	Incendio	Sisma
Alcali (Na^+ e K^+)	Calore di idratazione	Vibrazioni

La composizione del cls favorisce il degrado chimico. Le cause fisiche sono legate soprattutto a errori nella progettazione della miscela come a/c, correlabili alla lavorabilità al momento del getto. Quelle meccaniche sono legate alla non adeguata stagionatura del cls.

Evoluzione del degrado e dei costi di intervento



Il cls è il materiale più usato al mondo, con volumi d'impiego superiori agli acciai → impatto sul costo sociale della manutenzione.
 In ordinate vediamo il livello di degrado, da nullo a intollerabile, in funzione

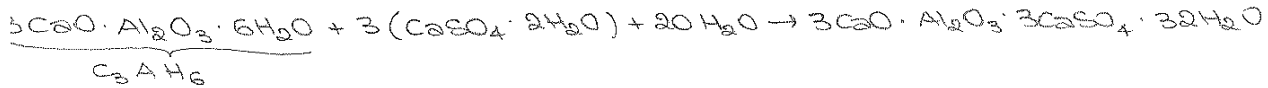


ROCCE SEDIMENTARIE: TERRIGENE

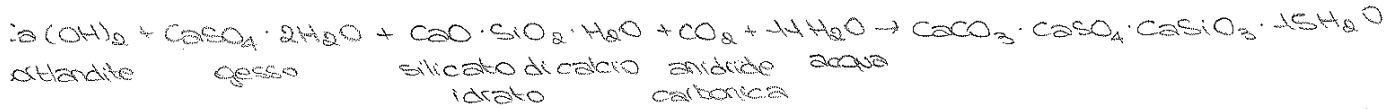
CLASSIFICAZIONE DELLE ARENARIE

CEMENTO		ASSENTE	PRESENTE		
MATRICE		> 15% < 75%	< 15%		
FRAZIONE SINSEDIMENTARIA	Frammenti litici < dei feldspati	GROVACCHE FELDSPATICHE	Arenarie Arcosiche		QUARZOARENITI
			ARCOSE	SUBARCOSE	
SCHELETRO	Frammenti litici > dei feldspati	GROVACCHE con INCLUSI LITICI	Arenarie con inclusi litici		SILICE DETRITICA
			SUBGROVACCHE	PROTO-QUARZITI	
Contenuto in quarzo		< 75%	> 75% < 95%	> 95%	

2) gesso + C_3AH_6 , C_4AH_{13} , monosolfato alluminato idrato → **ETTRINGITE SECONDARIA** ¹¹⁰¹ benefica
 . gesso appena prodotto reagisce con gli alluminati di calcio IDRATI (nel cls indurito non
 c'è più C_3A perché si sono completate le reazioni di idratazione). E di nuovo una reazione
 espansiva.



2) In climi freddi e umidi ($T = 0-5^\circ C$, U.R. > 90%) si crea la condizione ideale per un attacco molto più drammatico perché tocca il silicato di calcio idrato



si forma **THAUMASITE**. Questa terza reazione è peggiore delle precedenti perché
 coinvolge C-S-H, il vero collante strutturale del cls. È disrompente: gli aghi si sbriciolano
 e la struttura fibrosa scompare. La thaumasite è un prodotto innocente, con nessuna capaci-
 tà di legante, nessuna consistenza meccanica, non idraulicamente efficiente.
 il cls si sbriciola.

1) e (2) → fessure, distacco di porzioni di cls, perdita di continuità meccanica

3) → il cls perde la sua consistenza meccanica, diventa innocente, si sbriciola.

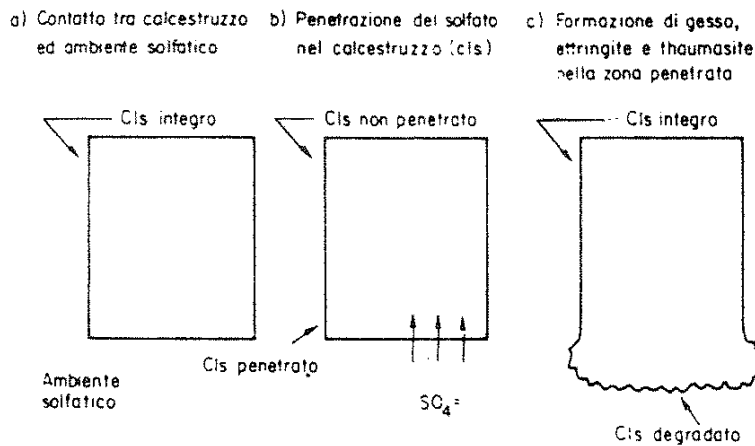


Fig. 7.9. Schematizzazione dell'attacco solfatico (17)

Aggressione da cloruri del cls indurito

La sorgente, l'origine dei cloruri è:

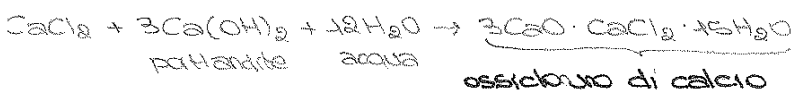
acqua di mare → opere sul bagnasciuga, offshore o in prossimità del bagnasciuga (vento che trasporta finissime gocce di acqua di mare, quindi sostanze saline, anche a diversi km)
 sali disgelanti (Deicing salts): NaCl, $CaCl_2$ → usati dove il clima è più rigido su strade autostrade, durante la stagione invernale

L'origine è sempre **esterna**, dato che cerchiamo già a priori di non introdurli nei costituenti del cls.

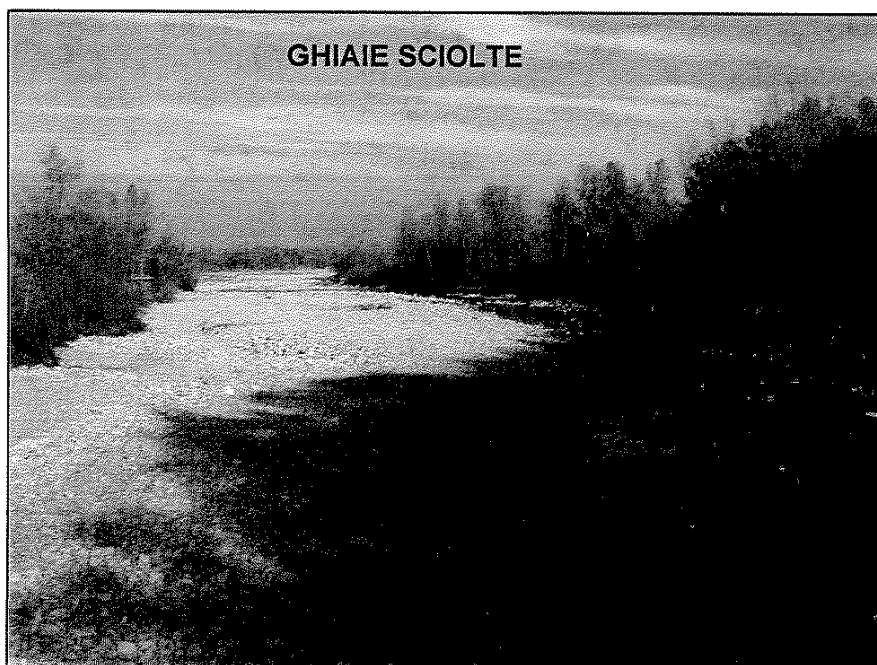
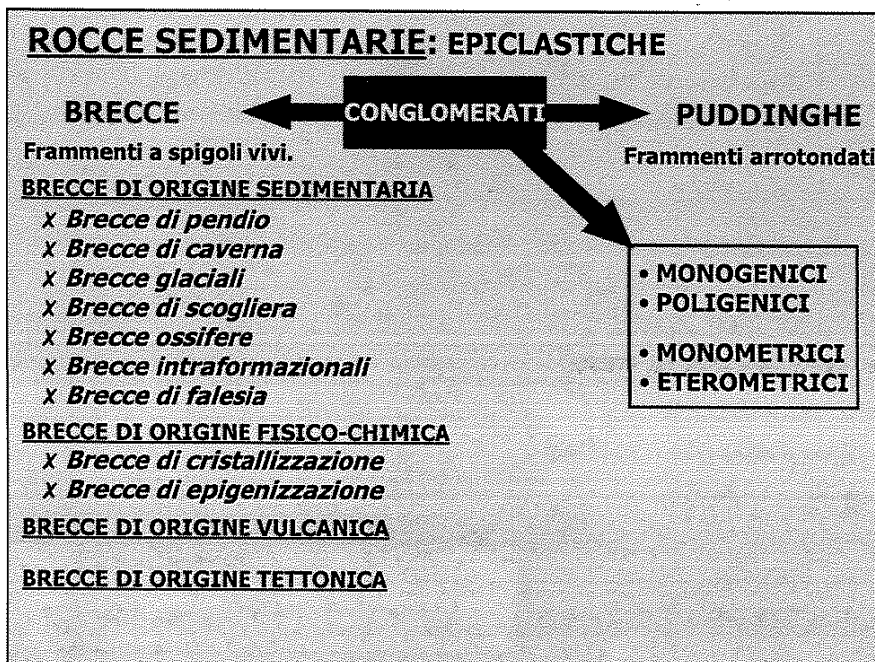
Esistono due tipi di aggressione:

- (1) sulla pasta di cemento indurita
- (2) sull'armatura, più importante

1) $CaCl_2$ → aggressione del cls indurito → fessurazione, delaminazione



$T_{critica} \sim 5^\circ C$



appa che dà CSH secondario, noi guadagno molto. Se doso più cemento aumenta il residuo integro rispetto al Portland. Ma il guadagno maggiore lo ottengo aumentando il tenore di loppa perché creo una quantità di C-S-H così rilevante da avere un degrado molto basso percentualmente anche se ho un basico dosaggio in cemento.

Attacco da parte dell'anidride carbonica

→ CO₂ aggredisce il cls con due meccanismi distinti:

- 1) più comune e diffuso → aggressione da CO₂ gassosa → interessa tutte le opere in cls
- 2) CO₂ disciolta in acque molto pure, come le acque di ritenzione di terreni montani (diga), di fusione dei ghiacciai o della neve

1) L'azione della CO₂ gassosa sul cls indurito si manifesta tramite la sua reazione con la portlandite generata dall'idratazione dei silicati di calcio: tale reazione è detta carbonatazione



Aria = azoto + ossigeno + umidità (acqua) + gas inquinanti (SO_x, NO_x)

→ CO₂ è diffusa in atmosfera non in modo omogeneo, ma è più concentrata nelle zone industriali e cittadine. La CO₂ è un'ANIDRIDE: a contatto con acqua dà acido carbonico. L'ambiente che circonda l'armatura è basico per la presenza di portlandite. Se la portlandite incontra la CO₂ → salificazione → CaCO₃. Questa reazione, vista per la calce aerea che era voluta, qui è dannosa perché abbassa il pH da 13 a 9 circa, creando le condizioni atte all'instaurarsi della corrosione. Una carbonatazione spinta può portare il pH anche a meno di 9. Al di sotto di 11 si perde l'effetto passivante della portlandite, non è più compatto e impermeabile il film passivante. Di per sé la pasta di cemento non ne soffre, ma ne soffre il cls armato per l'armatura

→ CO₂ è presente in atmosfera e aggredisce un solido. La carbonatazione procede dalla superficie verso il volume del cls in funzione del tempo.

Lo spessore s dello strato carbonatato è funzione del tempo

$$s = kt^{1/n}$$

Allora la velocità di carbonatazione v sarà $v = \frac{ds}{dt} = \left(\frac{k}{n}\right)t^{\frac{1-n}{n}}$

Per cls comuni → $n=2$ → $s = k\sqrt{t}$

Il valore della costante k dipende dalle condizioni ambientali (U.R. aria, concentrazione di CO₂) e dalle caratteristiche del cls (a/c, basicità, stagionalità del getto...).

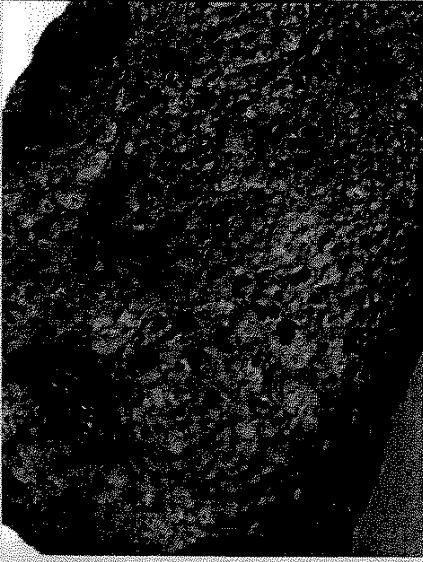
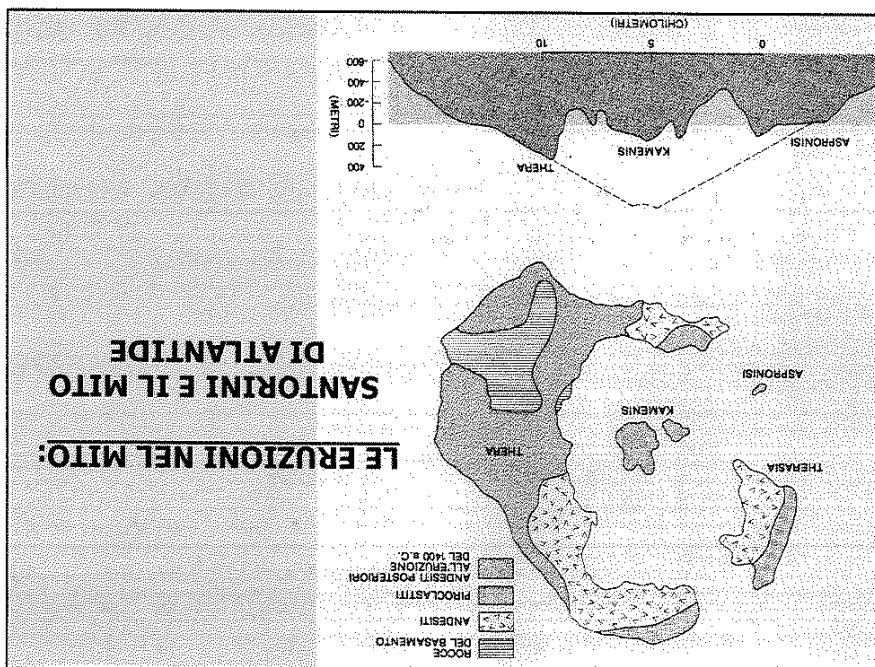
Com'è veicolata la CO₂ verso l'interno del manufatto? La CO₂ non entra allo stato gassoso, ma si solubilizza nell'acqua condensata nei pori capillari della parete del manufatto. È quest'acqua di condensa che veicola la CO₂ in essa disciolta verso l'interno del cls e la porta a reagire con la portlandite.

→ carbonatazione non menoma il cls, ma rende l'armatura più sensibile all'azione corrosiva dell'ossigeno atmosferico e dell'umidità.

→ profondità del fronte di carbonatazione varia a seconda del tipo di cls.

Lava bollosa

- Mineralogia: plagioclasti, pirosseni
- Struttura: porfirica
- Tessitura: vacuolare, porosità alta, permeabilità bassa
- Caratteristiche tecniche: $\gamma = 2,0 \text{ t/m}^3$, $\sigma = 50 \text{ MPa}$

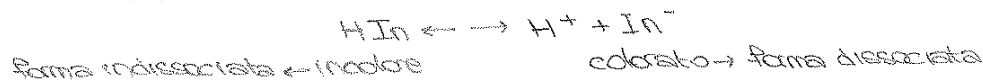
in presenza di ossigeno e di umidità, l'armatura subisce un degrado consistente nella trasformazione del ferro in ossidi e idrossidi di ferro: il ferro arrugginisce. Dato che la ruggine è poco compatta, non protettiva, H₂O e O₂ possono permearla e aggredire il metallo ad essa sottostante → fenomeno progressivo. Questo processo presenta due aspetti negativi:

riduzione sezione dei ferri a seguito della corrosione

distacco del copriferro perché la ruggine, prodotto della corrosione, ha un volume superiore a quello del ferro che l'ha generata. Così ho i ferri a vista.

Queste sono le conseguenze del degrado da carbonatazione, MA posso accorgermene ancora prima: vedo fessure longitudinali che ricoprono esattamente la porzione dell'armatura, corrono parallelamente ad esse perché si forma la ruggine che espande. Quindi a cricche descrivono come corrono le armature nelle zone sottocorticali.

come studiare la profondità di carbonatazione? Quanto è andata avanti? Si esegue una semplice prova: faccio un carotaggio e sulla superficie della carota spruzzo un indicatore di pH, la fenolftaleina HIn



Per il principio di Le Chatelier, se:

- pH fortemente basico → molti ioni OH⁻ → reagiscono con H⁺ → si neutralizzano → l'equilibrio si sposta verso dx → colorazione violacea
- pH meno basico, neutro → prevale la forma indissociata, incolore

la porzione carbonatata è quella incolore → valuto facilmente la profondità di carbonatazione. Al di sotto avrò ancora portlandite → pH basico → colorazione fucsia.

2) Mentre la carbonatazione è un fenomeno che coinvolge tutte le strutture in cls esposte all'atmosfera, la presenza di CO₂ nell'acqua interessa solo quelle opere che vengono a contatto con acqua relativamente pura e in movimento. (dighe, canalizzazioni)

Tab. 7.4. Effetto del tenore d'anidride carbonica nell'atmosfera sulla solubilità del CaCO₃
carbonato di calcio

CO ₂ presente nell'atmosfera (% in volume)	CaCO ₃ disciolto in acqua (g/l)
0.00	0.014
0.03	0.063
0.30	0.138
1.00	0.469

L'acqua è il migliore solvente che solubilizza i soluti. Se è molto pura sarà aggressiva, avida di solubilizzare finché è satura. Invece l'acqua di mare non è un buon solvente.

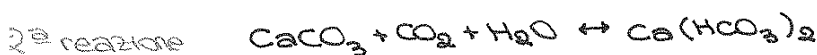
Dunque l'acqua pura solubilizza tutto ciò che può, in particolare subito la CO₂ → assume pH acido. Un'acqua pura non avrà mai pH = 7

1^a reazione: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ acido carbonico

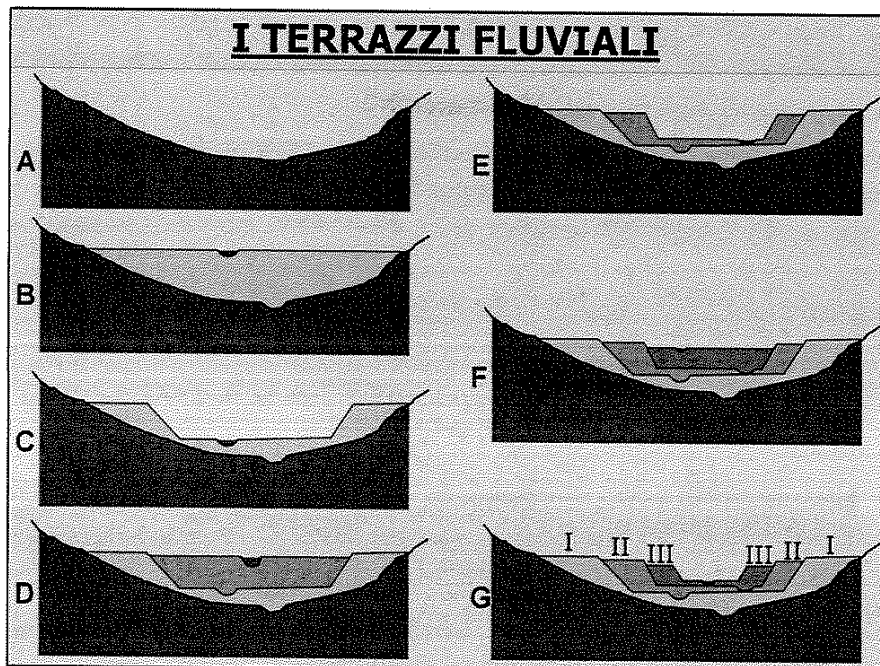
Tale acido è in grado di disciogliere il CaCO₃, considerato praticamente insolubile nell'acqua priva di CO₂, normalmente presente in un cls.

In base alla CO₂ presente nell'atmosfera, l'acqua sarà più o meno aggressiva nei confronti di CaCO₃ (vedi tabella)

Queste acque aggrediscono il cls in quanto agiscono sul carbonato di calcio, prodotto dall'idratazione e carbonatazione della pasta di cemento, in base alla reazione:



Se il carbonato di calcio viene a contatto con un'acqua relativamente ricca di CO₂,



L MIX-DESIGN

È un procedimento di calcolo della composizione del cls (dosaggio in cemento, acqua, aggregati per m³ di cls). I requisiti a cui devo rispondere sono:

1. proprietà del cls indurito (R_{ck} , modulo elastico, ritiro, fessurazione, durabilità...)
 2. esigenze esecutive dell'opera (lavorabilità, modalità di getto, organizzazione del cantiere)
 3. materiali disponibili (tipo di cemento, distribuzione e natura aggregati, tipo di additivi)
- parametri di partenza, vincolanti la progettazione, sono:
1. resistenza caratteristica (R_{ck})
 2. tipo di cemento (f_{ct}) dato dalla centrale di betonaggio
 3. lavorabilità (L) che dipende dal tipo di opera (armata o meno)
 4. diametro massimo dell'aggregato (D_{max}) dato dalla centrale di betonaggio che conosce le curve granulometriche disponibili

Esistono due tipi di mix-design:

- semplice se la progettazione della miscela parte solo da quei 4 parametri iniziali
- complesso se a questi 4 parametri iniziali ne devo aggiungere un quinto, cioè esiste almeno un'altra caratteristica aggiuntiva per rispondere ad una particolare esigenza → 4 parametri classici + 1 aggiuntivo (durabilità, ritiro, resistenza allo scasso...)

• Il mix-design semplice

In questo caso esiste un'ulteriore suddivisione:

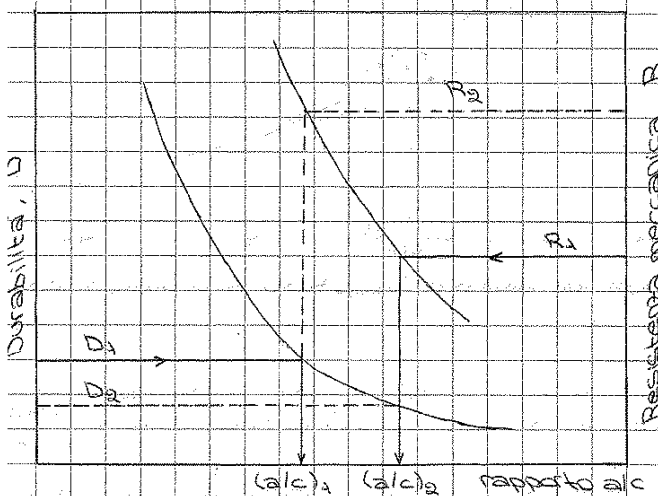
- chiuso se il progettista definisce i valori dei 4 parametri
- aperto se un parametro è lasciato libero (in genere non richiediamo vincoli particolari per il tipo di cemento)

• Il mix-design complesso

Anche qui esiste la medesima classificazione in aperto e chiuso, ma in più:

- congruente → parto dai 4 parametri iniziali e arrivo a certi parametri progettuali, poi ripeto il calcolo introducendo il vincolo del quinto parametro e trovo gli stessi parametri progettuali di prima → c'è piena sovrapposibilità tra mix-design semplice e complesso
- incongruente → in genere non c'è una completa sovrapposibilità di valori e si arriva ad un bivio

- ↳ solubilità del problema → definizione corretta della miscela che metterò in opera
- ↳ problema insolubile → devo ricominciare dall'inizio modificando qualcosa (magari la R_{ck})



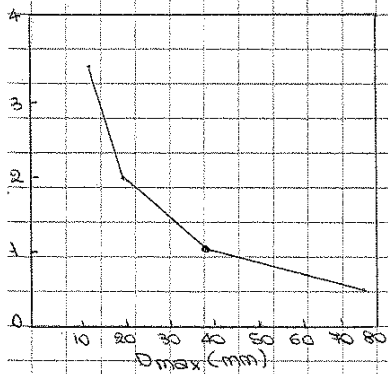
Esempio relativo alla coesistenza del vincolo della durabilità accanto a quello della resistenza meccanica. Sono riportate due curve:

- a dx → correlazione tra R e a/c
- a sx → " " " D e a/c

Se per esempio le richieste progettuali dell'opera sono $R > R_1$ per la resistenza meccanica, $D > D_1$ per la durabilità, i valori del rapporto a/c capaci di soddisfare queste richieste sono $a/c < (a/c)_2$ per R_1 e $a/c < (a/c)_1$ per D_1 .

per ottenere $R_1 \rightarrow (a/c)_2 \rightarrow D_2$ mix-design incongruente, i $D_1 \rightarrow (a/c)_1 \rightarrow R_2$ due valori non sono sovrapposti in serie

L'incongruenza è in questo caso solubile: uso $(a/c)_1$, così ottengo D_1 , la durabilità richiesta, e $R_2 > R_1$ maggiore di quella di progetto → va bene



a' (%) dipende da D_{max} dell'aggregato.
 Es: 38 mm \rightarrow 1% di aria intrappolata in $1m^3$ di cls (con $V_{cls} = 1000$)

$$a' = \frac{V_{a'}}{V_{cls}} \cdot 100 = \frac{V_{a'}}{10} \rightarrow a' \cdot 10 = V_{a'}$$

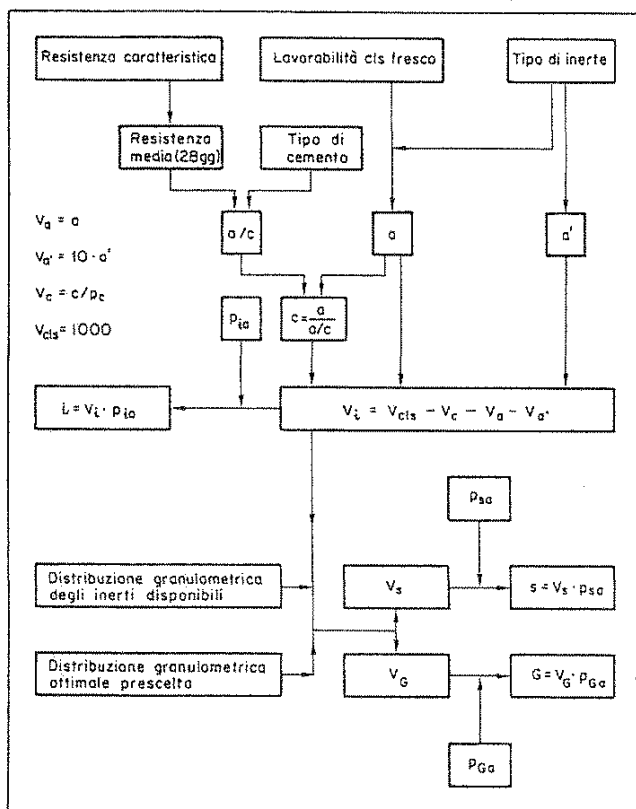
• Trovo il volume di aggregato:

$$V_1 = V_{cls} - V_c - V_a - V_{a'}$$

Lo trasformo in massa:

$$i = V_1 \cdot 2,7 = \left(1000 - C - a - 10a' \right) \cdot 2,7$$

Così abbiamo definito il dosaggio di acqua, cemento e aggregati. Questi devono rispettare il riso granulometrico (questo ci dice la parte bassa dello schema.)



A questo punto, per definire la composizione del calcestruzzo in termini di kg/m^3 di acqua (a), di cemento (c) e di inerte (i) si procede matematicamente come è mostrato in Fig. 1. Noti a/c ed a si calcola c , mentre il volume di inerte (V_i) è determinato mediante un semplice bilancio sottraendo ad un m^3 di calcestruzzo, il volume di acqua, di cemento e di aria:

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

dove $V_{cls} = 1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ l}$; $V_c = c/p_c$; $V_a = a$; $V_{a'} = 10a'$. Tenendo presente che la massa volumica del cemento (p_c) è con buona approssimazione eguale a $3,15 \text{ kg/l}$, ed assumendo per la massa volumica dell'inerte (p_{ia}) un valore di $2,7 \text{ kg/l}$, si può calcolare il peso dell'inerte (i) in kg per 1 m^3 di calcestruzzo:

$$i = V_i \cdot 2,7 = (1000 - c/3,15 - a - 10 a') \cdot 2,7$$

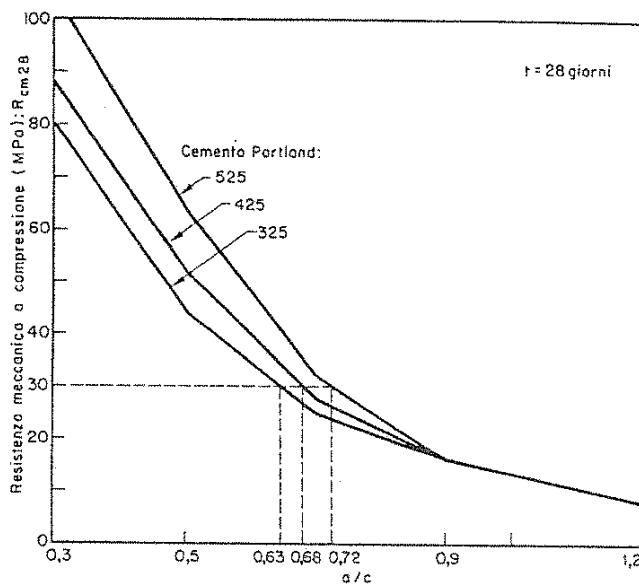


Fig. 2 - Resistenza meccanica a compressione media a 28 giorni in funzione del rapporto a/c di calcestruzzi confezionati con cemento Portland di classe 325, 425 e 525.

Fig. 1 - Schema logico per un "mix-design" semplice del calcestruzzo. Per i simboli si veda l'Appendice.

Qualora si desideri affinare il *mix-design* e calcolare le quantità di sabbia (s) e di inerte grosso (G) che costituiscono il quantitativo totale di inerte (i), è necessario conoscere le caratteristiche granulometriche dei singoli inerti, per determinare il proporzionamento ottimale in base alla curva granulometrica prescelta (Fuller, Bolomey, ecc.). In sostanza per calcolare a , c , ed i è necessario stabilire in partenza la resistenza caratteristica, la lavorabilità, il tipo di cemento e di inerte. Se invece, si vuole calcolare a , c , s , e G occorre conoscere anche le caratteristiche granulometriche della sabbia e dell'inerte grosso, determinate mediante le vagliature degli inerti disponibili.

IL MIX-DESIGN COMPLESSO

Qualora, oltre alla resistenza caratteristica, esistano altri requisiti tecnici del calcestruzzo indurito che debbano essere rispettati per l'opera progettata, il *mix-design* diviene più com-

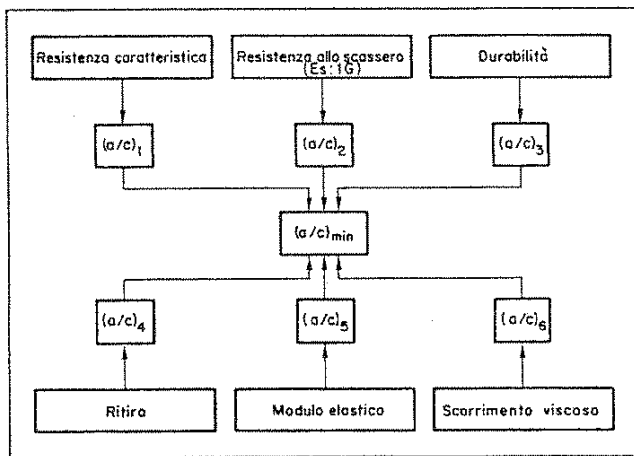


Fig. 5 - Scelta del rapporto a/c in un mix-design "complesso".

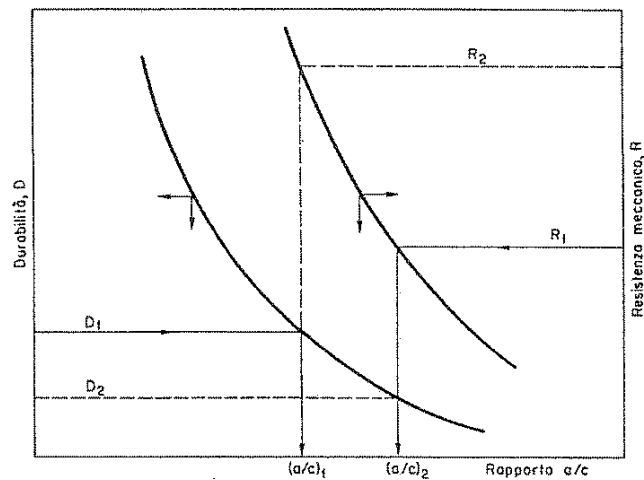


Fig. 6 - Scelta del rapporto a/c per soddisfare sia l'esigenza di resistenza meccanica R_1 , che quella di durabilità D_1 .

L'incongruenza è in questo caso *solubile* adottando il minore tra i due rapporti a/c. Infatti, nell'esempio specifico illustrato in Fig. 6 (*mix-design complesso incongruente solubile*) occorre scegliere il valore di $(a/c)_1$, capace di garantire la durabilità richiesta D_1 e di assicurare nel contempo una resistenza R_2 che risulterà quindi inevitabilmente maggiore di quella di progetto R_1 . Se si scegliesse $(a/c)_2$ sarebbe garantita la resistenza meccanica richiesta R_1 , ma non la durabilità che risulterebbe D_2 e quindi di livello inferiore a quella richiesta D_1 . Pertanto, solo scegliendo un rapporto a/c inferiore o eguale ad $(a/c)_1$ sono soddisfatte entrambe le condizioni richieste:

$$a/c < (a/c)_1 \rightarrow R > R_1; D > D_1$$

Qualora la durabilità richiesta fosse stata D_2 e non D_1 , allora entrambi i requisiti (R_1, D_2) sarebbero stati soddisfatti da un unico valore del rapporto acqua/cemento:

$$a/c < (a/c)_2 \rightarrow R > R_1; D > D_1$$

In questo caso si sarebbe trattato di un *mix-design complesso congruente* in quanto entrambe le richieste (R_1 e D_2) convergono verso un unico valore del rapporto acqua/cemento, $(a/c)_2$.

Qualunque sia stata la scelta del rapporto a/c, vincolata dalla esigenza di una certa durabilità oltre che di una certa resistenza meccanica, si procede al calcolo della composizione del calcestruzzo seguendo il principio già illustrato in Fig. 1.

IL MIX-DESIGN APERTO

Quando risultano definiti i valori dei quattro elementi base (R_{ck}, L, D_{max}, t_c), il *mix-design* non ammette che un'unica soluzione e pertanto esso è definito "chiuso". Il *mix-design* chiuso può essere *semplice* o *complesso* a seconda che i requisiti del materiale siano identificati soltanto dai quattro elementi base o da altre proprietà (durabilità, ritiro, ecc.) in aggiunta a questi.

Talvolta, però, uno o più dei quattro elementi base non è ancora definito. In tal caso il *mix-design*, *semplice* o *complesso* che sia, è *aperto* a diverse soluzioni. Per esempio, si immagini di aver fissato la R_{ck} , il D_{max} dell'inerte e la lavorabilità (L) del calcestruzzo, ma di non aver ancora scelto il tipo di cemento (t_c) con cui confezionare il calcestruzzo. In questo caso, non è possibile definire il rapporto a/c giacché la R_{ck} (e quindi la corrispondente R_{cm28}) da sola non è sufficiente ad individuare il rapporto a/c se non si fissa anche il tipo di cemento t_c . In sostanza, come è mostrato in Fig. 2, la stessa resistenza meccanica R_{cm28} (per esempio: 30 MPa) è ottenibile con diversi rapporti a/c a seconda del cemento che si impiega. Nella Fig. 7 è mostrato lo schema di un *mix-design aperto* a n soluzioni dove n è il numero dei cementi disponibili. Se per esempio n è 3, in quanto sono disponibili tre cementi Portland (325Pt, 425Pt e 525Pt), si dovranno calcolare tre diversi rapporti a/c, e quindi tre diversi valori di c e di i : in sostanza si procederà a tre distinti *mix-design* uno per ogni tipo di cemento.

Mix-design complesso incongruente insolubile:

quando il mix-design è di tipo complesso-incongruente (aperto o chiuso) e non si può trovare alcuna soluzione che concili i dati contrastanti; per es. R_{ck} , L , D_{max} , t_c + S con S (ritiro) che richiede oltre ad un a/c diverso da quello richiesto per R_{ck} anche un rapporto i/c incompatibile con il D_{max} disponibile: in questo caso occorre rinunciare ad uno dei due requisiti (D_{max} o S). Anche il mix-design semplice (chiuso o aperto), così come il mix-design complesso congruente (chiuso o aperto), può essere insolubile. In tali casi l'insolubilità nasce non dalla impossibilità di conciliare dei risultati contrastanti (ciascuno dei quali di per sé è tecnicamente conseguibile), come avviene nel caso del mix-design complesso incongruente insolubile, quanto piuttosto dai limiti imposti dalla natura stessa del calcestruzzo e dalle sue tecnologie di applicazione (es.: si richiede un calcestruzzo con una R_{ck} di 200 MPa).

ESEMPI DI MIX-DESIGN

Viene nel seguito descritto, a titolo di esempio, il procedimento di calcolo per un *mix-design semplice chiuso* per evidenziare soltanto che la scelta del tipo di controllo (A o B) secondo la legge n° 1086 non è, come spesso viene assunta, un'opzione indifferente ai fini della composizione e quindi del costo del calcestruzzo.

Si debba confezionare un calcestruzzo con R_{ck} di 20 MPa e lavorabilità pari a 15 cm di slump, avendo a disposizione un cemento Portland 425 e un inerte con diametro massimo di 38 mm. Si supponga, inoltre, di voler adottare il controllo di tipo B per il calcolo della resistenza caratteristica secondo la legge n° 1086.

$$R_{ck} = R_{cm28} - K\delta$$

avendo a disposizione un impianto di betonaggio, che, per le sue caratteristiche, presenta uno scarto quadratico medio (δ) di 7 MPa.

Si ricava pertanto, con $K = 1,4$, che:

$$R_{cm28} = 20 + 1,4 \cdot 7 = 30 \text{ MPa}$$

Dalla Fig. 2 si ricava che, con $t_c = 425$ Pt ed $R_{cm28} = 30$ MPa, è necessario adottare un rapporto a/c di 0,68.

Dalla Fig. 3 si ricava che, con l'inerte di $D_{max} = 38$ mm, occorrono 190 kg/m³ di acqua per ottenere una lavorabilità pari a 15 cm di slump.

Pertanto:

$$\frac{a}{c} = 0,68; \quad \frac{190}{c} = 0,68; \quad c = \frac{190}{0,68} = 279 \text{ kg/m}^3$$

Dalla Fig. 4 si ricava che nel calcestruzzo messo in opera rimarrà, dopo compattazione completa, un volume di aria (a') pari all'1% in volume.

Il volume di inerte (V_i) nello stato in cui si trova dentro il calcestruzzo (saturo a superficie asciutta) è calcolabile per differenza tra il volume di calcestruzzo e quello degli altri ingredienti, e risulta:

$$V_i = 1000 - 279/3,15 - 190 - 10 = 711 \text{ l/m}^3$$

Assumendo per l'inerte una massa volumica apparente (p_{ia}) nello stato di saturo a superficie asciutta pari a 2,7 kg/l, il quantitativo di inerte necessario risulta:

$$i = V_i \cdot p_{ia} = 711 \cdot 2,7 = 1921 \text{ kg/m}^3$$

Nella Tabella 1 sono riassunte le prestazioni richieste, le disponibilità dell'impianto di produzione (in termini di tipo di cemento, di inerte e di δ), e la composizione calcolata con il procedimento del *mix-design*.

Se lo stesso calcestruzzo dovesse essere confezionato in conformità al controllo di tipo A previsto dalla legge 1086 ($K\delta = 3,5$ MPa) la R_{cm28} risulterebbe:

$$R_{cm28} = 20 + 3,5 = 23,5 \text{ MPa}$$

TABELLA 1

PRESTAZIONI, DISPONIBILITÀ E COMPOSIZIONE DEL CALCESTRUZZO PER IL CONTROLLO DI TIPO B

Prestazioni richieste dal progetto	Disponibilità dell'impianto di betonaggio	Composizione del calcestruzzo
$R_{ck} = 20$ MPa	cemento Portland 425	$a = 190$ kg/m ³
slump = 15 cm	inerte con $D_{max} = 38$ mm	$c = 280$ kg/m ³
controllo di tipo B	$\delta = 7$ MPa	$i = 1920$ kg/m ³

BIBLIOGRAFIA

- [1] LYDON F.D.: "Concrete Mix Design", Applied Science Publisher, London 1972.
- [2] NEVILLE A.M.: "Properties of Concrete", Pitman Publishing, London, 1975.
- [3] ACI Committee 211: "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete," *ACI Manual of Concrete Practice 1986, Part 1*, 211, Detroit, (1986).
- [4] COLLEPARDI M.: "Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo", 2^a Ed. Hoepli, Milano, 1987.
- [5] COLLEPARDI M., COPPOLA L.: "Mix-Design del Calcestruzzo", Ed. Enco, Spresiano, 1990.

APPENDICE: lista dei simboli adottati

a	peso dell'acqua per m ³ di calcestruzzo.	R_{cm28}	R_{cm} a 28 giorni.
a'	volume di aria in percentuale sul volume di calcestruzzo	s	peso di sabbia s.s.a. per m ³ di calcestruzzo.
D	condizioni dettate dalla durabilità.	s.s.a.	inerte in condizioni di saturo a superficie asciutta.
D_{max}	diametro massimo dell'inerte.	S	ritiro (<i>Shrinkage</i> , in inglese).
G	peso di inerti grossi s.s.a. per m ³ di calcestruzzo.	t	tempo di stagionatura.
K	fattore di probabilità.	t_c	tipo di cemento.
L	lavorabilità del calcestruzzo.	V_a	volume dell'acqua per m ³ di calcestruzzo.
p_c	massa volumica del cemento.	$V_{a'}$	volume di aria per m ³ di calcestruzzo.
p_{ia}	massa volumica apparente dell'inerte s.s.a.	V_c	volume del cemento.
p_{sa}	massa volumica apparente della sabbia s.s.a.	V_{cls}	volume del calcestruzzo.
p_{Ga}	massa volumica apparente dell'inerte grosso s.s.a.	V_i	volume dell'inerte (sabbia + inerte grosso).
R	resistenza meccanica.	V_s	volume della sabbia.
R_c	resistenza meccanica a compressione.	V_G	volume dell'inerte grosso.
R_{cm}	resistenza meccanica a compressione media	δ	scarto quadratico medio.
R_{ck}	resistenza caratteristica di progetto.	325 Pt	cemento Portland ordinario.
		425 Pt	cemento Portland ad alta resistenza.
		525 Pt	cemento Portland ad alta resistenza e rapido indurimento.

Terzo capoverso: Viene ribadito il ruolo essenziale per l'indurimento idraulico dei silicati di calcio (C₃S e C₂S). Compare il primo VINCOLO COMPOSIZIONALE : (CaO+SiO₂ almeno 50% in massa)

Quarto capoverso: un accenno al processo produttivo e al ruolo della macinazione nel garantire omogeneità e finezza.

Pagina 6

4. Costituenti

4.1. Clinker di cemento Portland

Altro limite composizionale: almeno 2/3 in massa dei silicati C₃S e C₂S.

secondo vincolo composizionale

Presenza di Al₂O₃, Fe₂O₃ e altri ossidi.

di sodio, potassio, magnesio

Rapporto in massa CaO/SiO₂ non dev'essere minore di 2.

rapporto minimo per la produzione di C₃S, un dei 2 protagonisti idraulic. attivi.

4.2. Loppa granulata di altoforno

Una delle tipologie di cementi normati, il cemento d'alto forno, si ottiene macinando clinker di Portland con gesso e con il 36-95%

di loppa granulata d'alto forno.

Possiamo avere anche solo il 5% di clinker di portland e il resto di sottoprodotti d'altoforno -> grosso risparmio economico il 5% serve per agire il 5% di clinker che attiva il resto della loppa.

La loppa granulata d'alto forno è un materiale idraulico latente,

cioè un materiale che presenta proprietà idrauliche se attivato opportunamente; è un sottoprodotto dell'industria metallurgica che si ottiene liquido alla base degli altiforni e che viene raffreddato rapidamente al fine di conservare la struttura vetrosa.

produzione gesso - anidride

è una scoria di produzione di ghise

solido amaro molto reattivo

Deve contenere, per Norma, almeno due terzi in massa di materiale vetroso e dev'essere costituita da almeno due terzi in massa della somma di CaO, MgO e SiO₂.

Il rapporto in massa (MgO+CaO)/SiO₂ non dev'essere maggiore di uno.

ci interessa che CaO : SiO₂ in modo da dare C-S-H, il prodotto che vogliamo

Una composizione media di loppa basica d'altoforno è la seguente:

*SEM III/A, III/B, III/C
- sollecitazioni
- se si dichinano
di l'intercambio
impossibilitati*

*reazione loppa - acqua -> reazione lenta, che non interessa tecnologia -
Può essere catalizzata dalla portlandite
(CaO, SiO₂)
(C, S) + H -> C-S-H
Loppa
basicità elevata per presenza di ossido di calcio (e di Mg)*

Pagina 7

Le ceneri volati sono sottoprodotti delle centrali termoelettriche (alimentate a carbone) e che possono (in funzione della composizione) avere comportamento pozzolanico oppure più vicino a quello delle loppe d'alto forno (idraulico latente).

Si ponga attenzione alla definizione dei: **4.8 Fillers**.

Pagina 9

4.9. Solfato di calcio

Riconoscimento del solfato di calcio (nelle varie forme) come regolatore di presa. Azione di controllo sulla velocità di idratazione degli alluminati /ferroalluminati con formazione di ettringite primaria.

5. 1. Tipi di cemento sigla CEM e numero romano

I 5 tipi di cemento come definiti dalla Normativa: Prospetto di **pagina 10**.

Tipi di cemento per Norma, composizioni, loro sigle.

Si noti che ci sono dei sottotipi: ad esempio, i tipi III e IV sono suddivisi in 3 e 2 sottotipi, rispettivamente, in base alla composizione.

Attenzione ai limiti composizionali. Verranno discussi nel seguito.