

3

Modulo di **T**ecnologia dei **M**ateriali

Docente: Dr. Giorgio Pia

Corso di Tecnologia dei Materiali

Il Cemento

Il Cemento

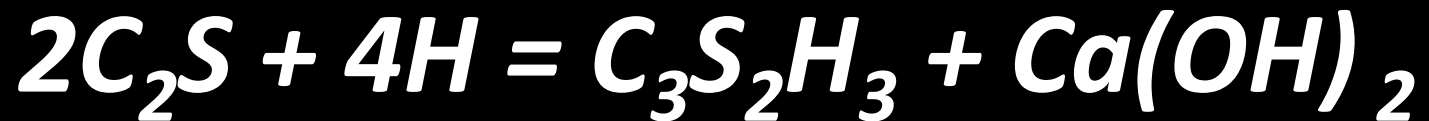
L'Idratazione



Pasta Cementizia

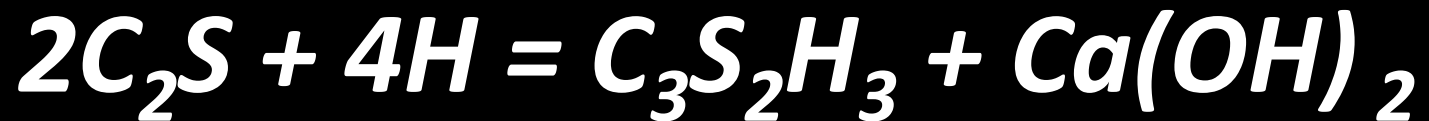
Il Cemento

L'Idratazione



Il Cemento

L'idratazione

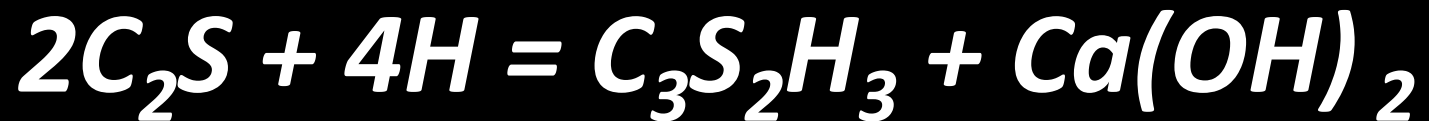


L'idratazione del C_3S richiede una quantità d'acqua maggiore della stessa idratazione del C_2S .

24% contro 21%

Il Cemento

L'Idratazione

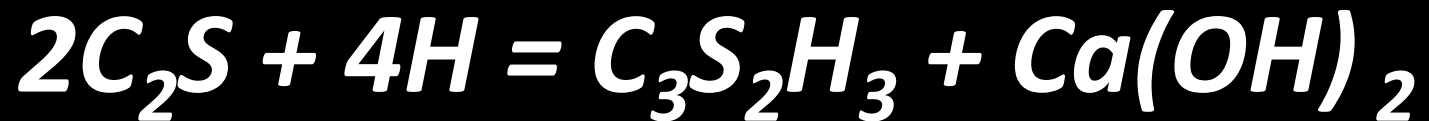


A parità di massa il C_2S produce una quantità di C-S-H maggiore di quella prodotta dal C_3S .

Dalla massa di partenza di C_2S infatti abbiamo la formazione dell'82% in C-S-H, mentre dalla stessa massa di partenza, stavolta di C_3S si ha la formazione del 61% di C-S-H

Il Cemento

L'Idratazione

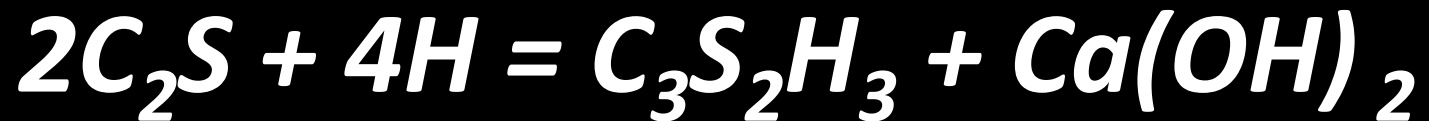


A parità di massa il C_2S produce una quantità di portlandite inferiore di quella prodotta dal C_3S .

Dalla massa di partenza di C_2S infatti abbiamo la formazione del 18% di $Ca(OH)_2$, mentre dalla stessa massa di partenza, stavolta di C_3S si ha la formazione del 39% di $Ca(OH)_2$.

Il Cemento

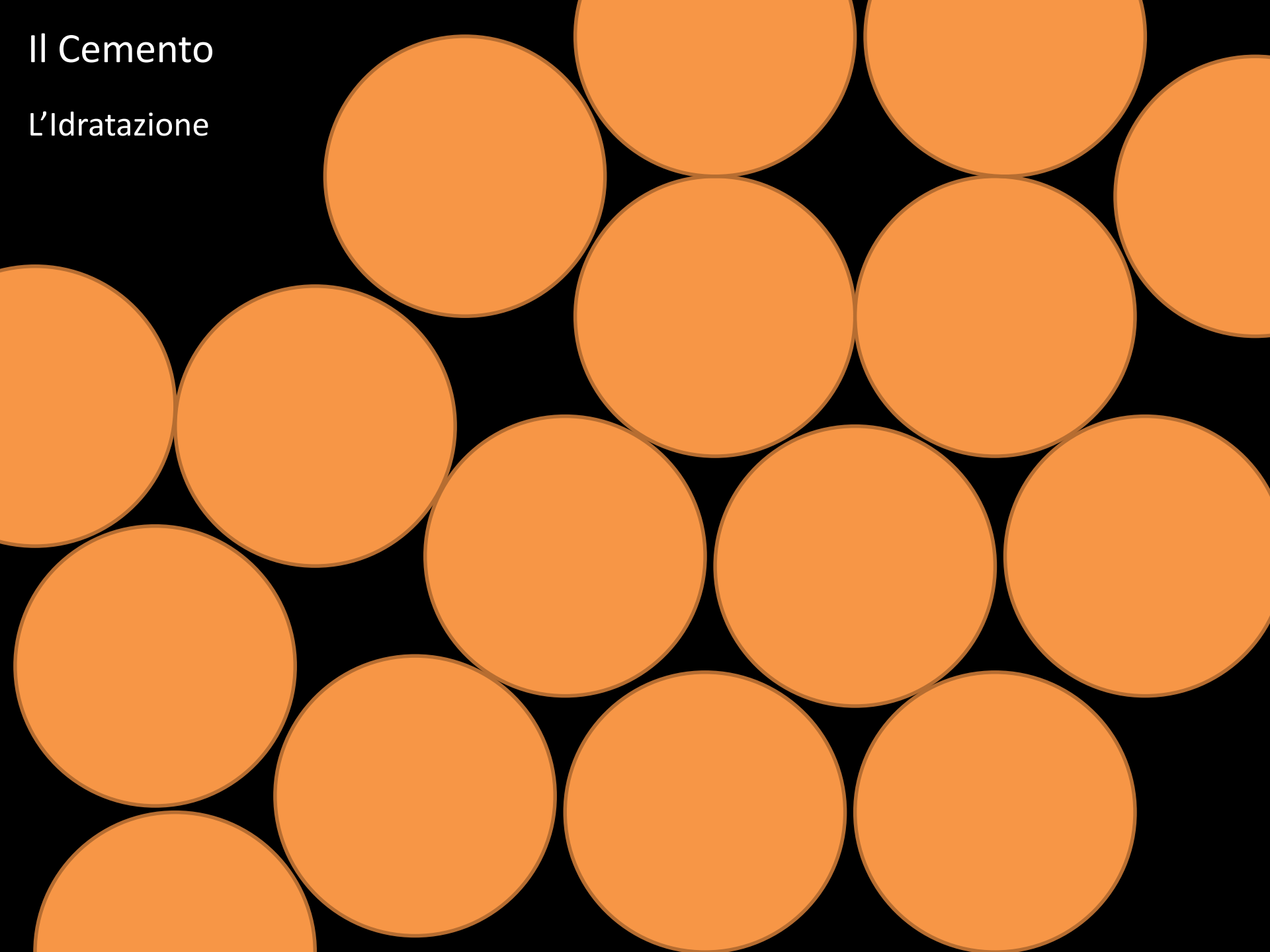
L'Idratazione



I prodotti di idratazione hanno un volume superiore a quello del cemento e quindi occupano gli spazi dove prima vi era l'acqua utilizzata per l'impasto.

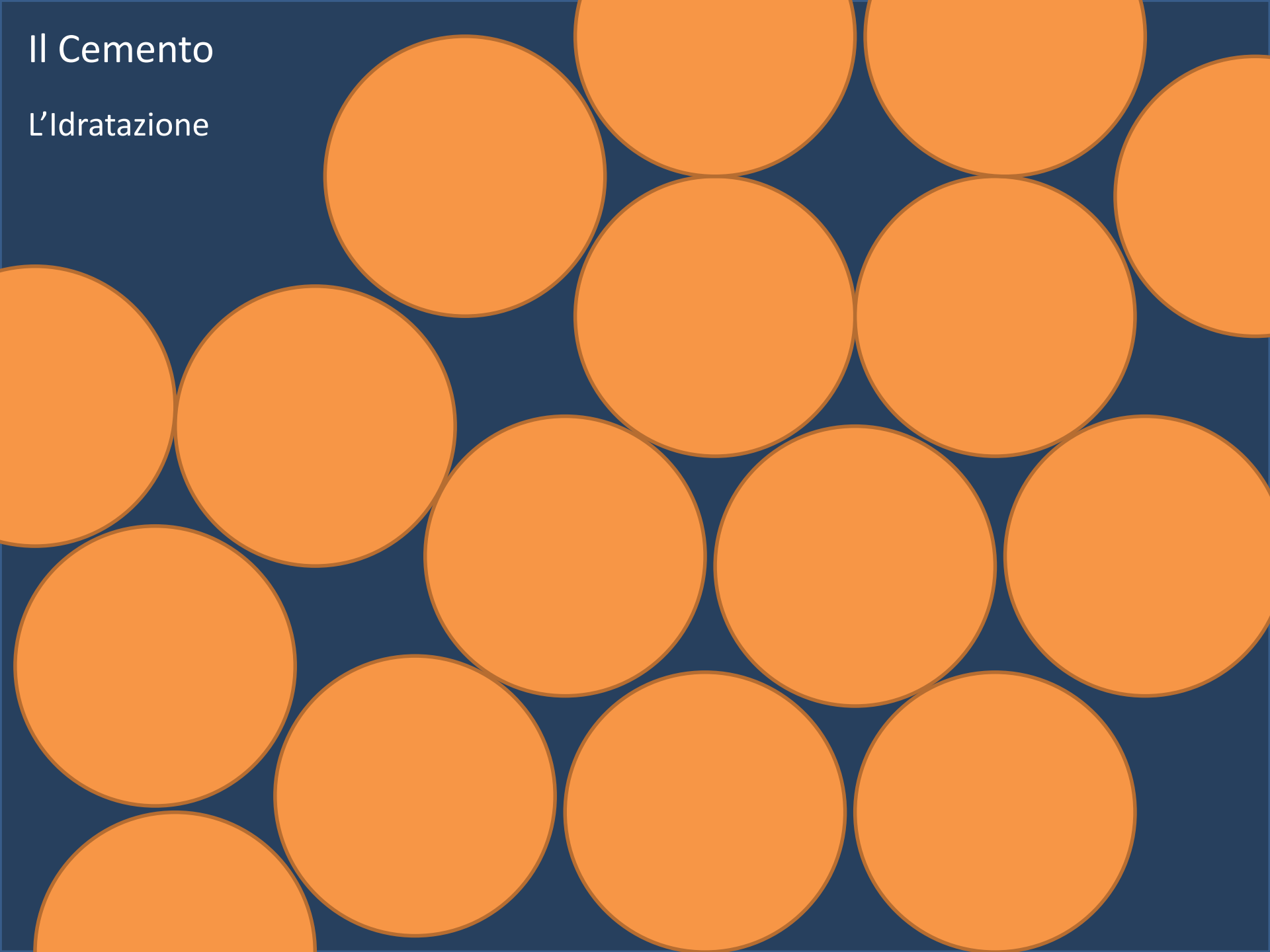
Il Cemento

L'Idratazione



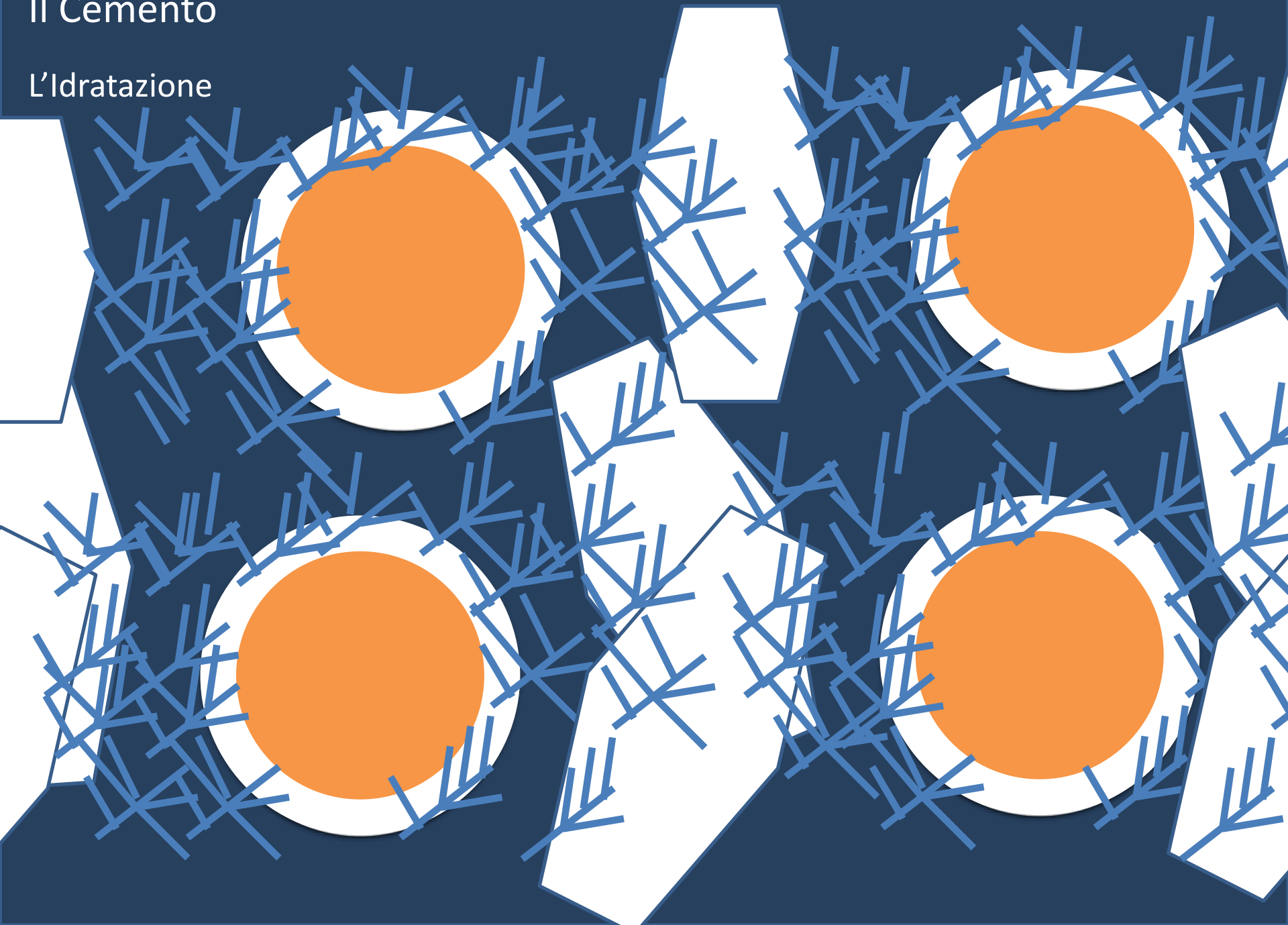
Il Cemento

L'Idratazione



Il Cemento

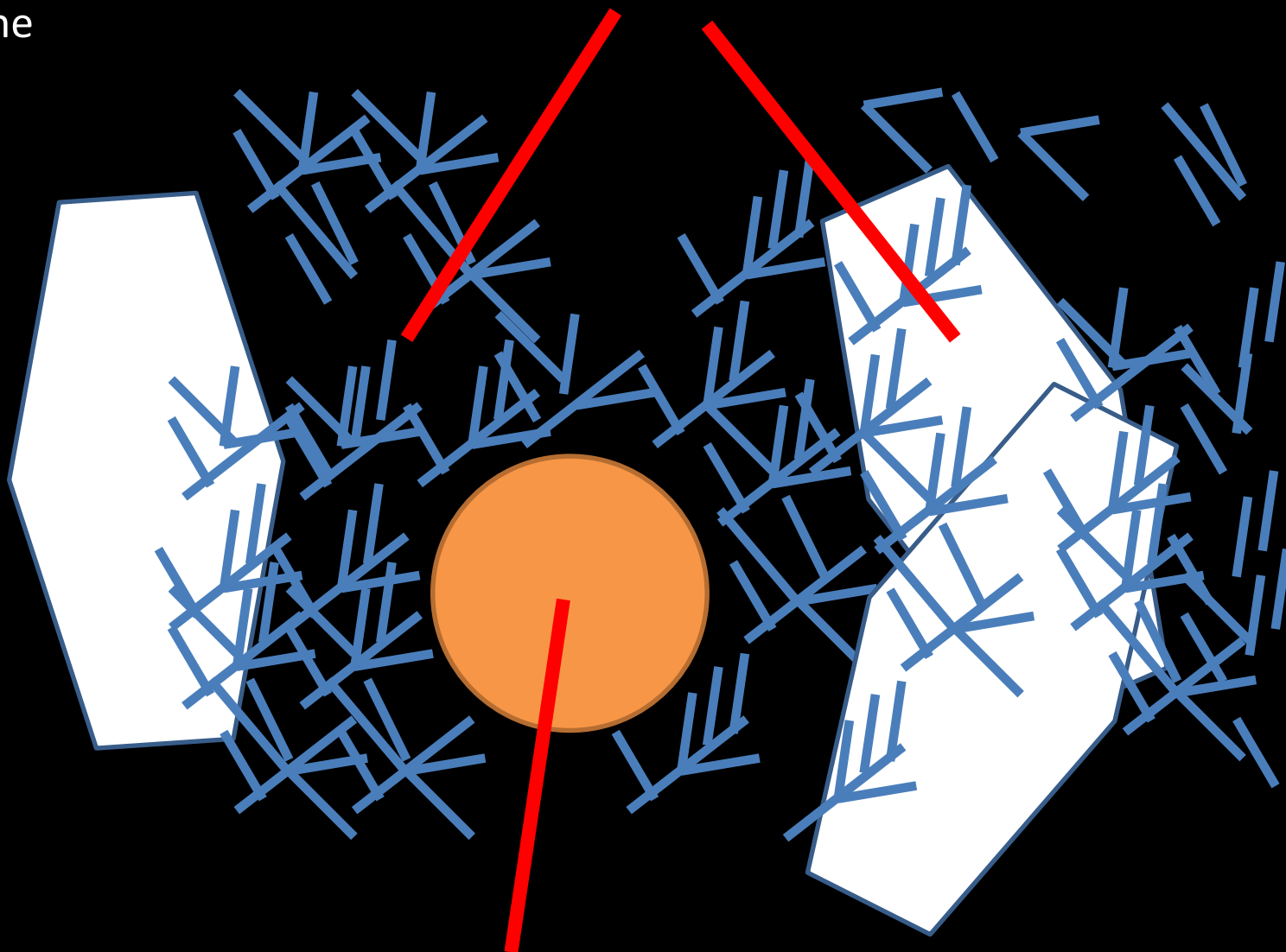
L'Idratazione



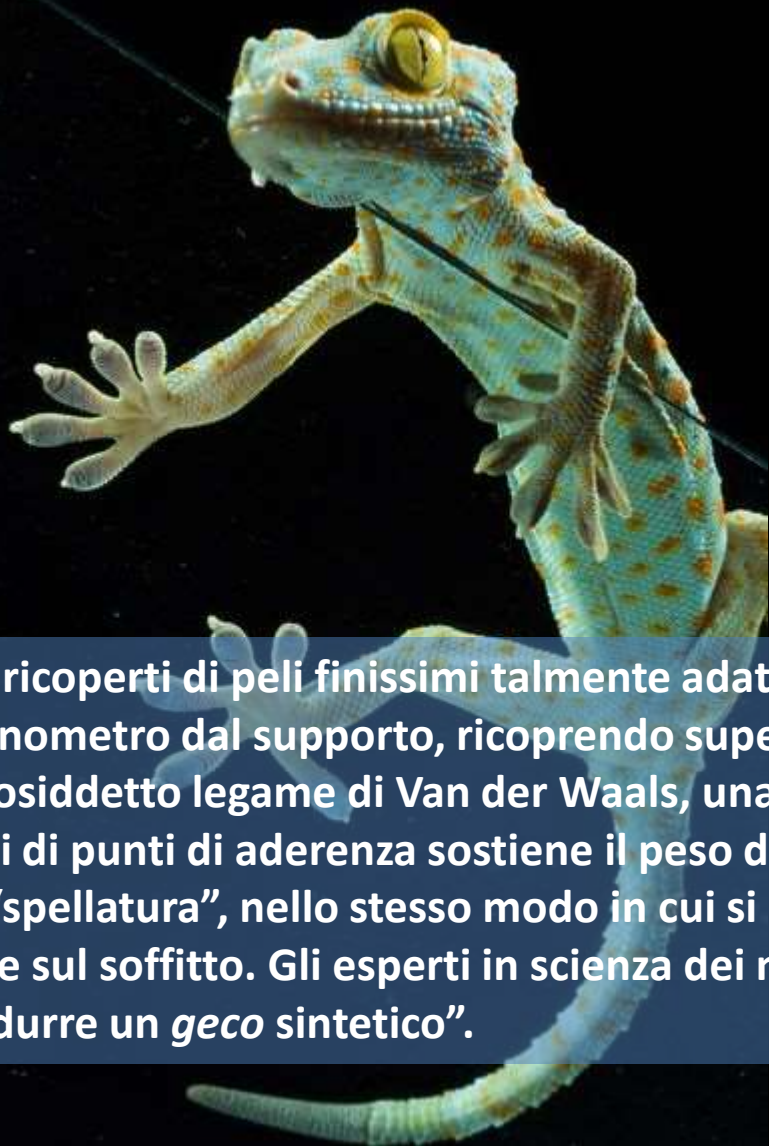
Il Cemento

L'Idratazione

Prodotti idratazione



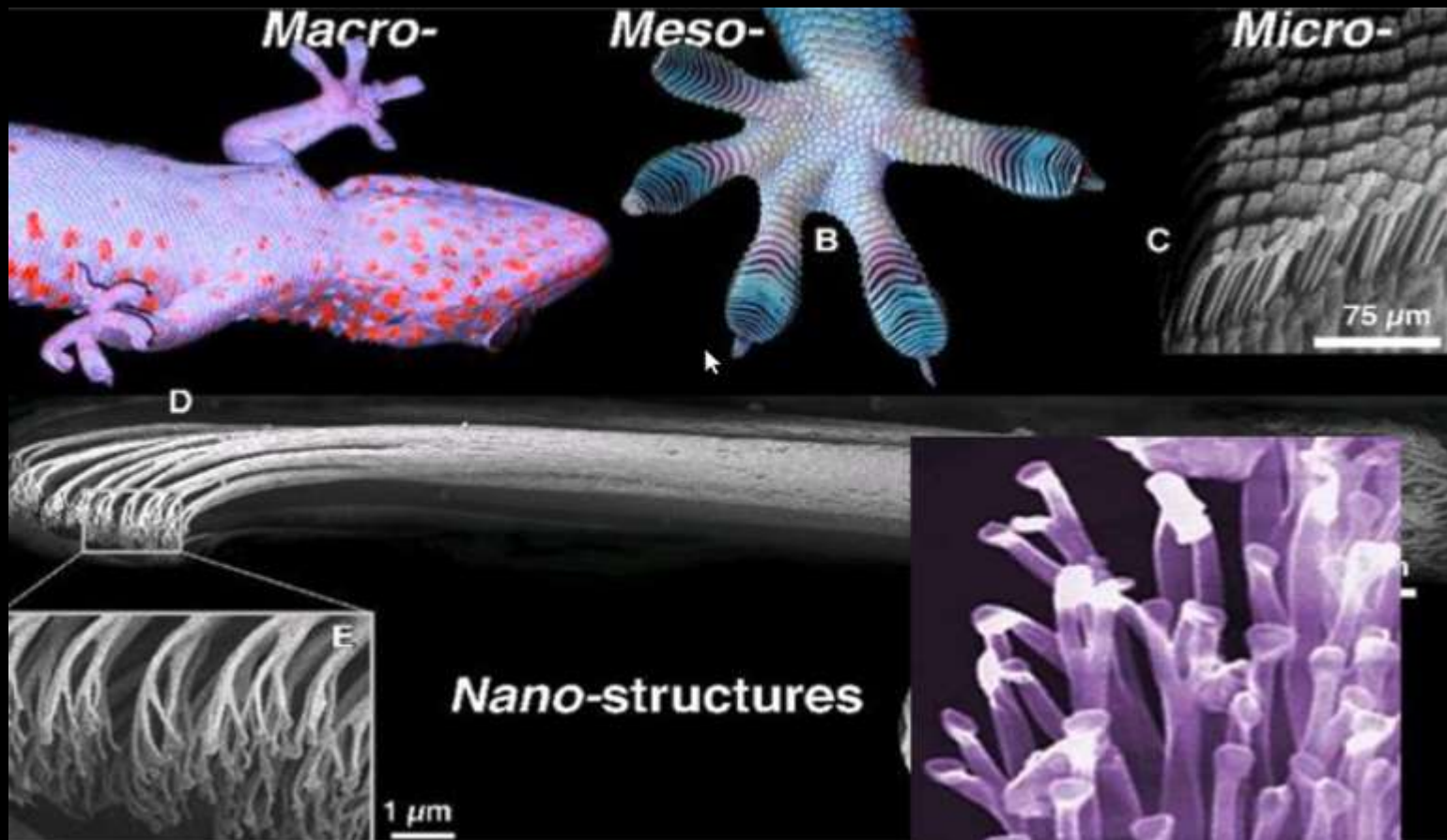
Cemento non idratato



CURIOSITÀ

“I loro polpastrelli sono ricoperti di peli finissimi talmente adattabili che possono avvicinarsi a qualche nanometro dal supporto, ricoprendo superfici molto ampie. A quel punto entra in gioco il cosiddetto legame di Van der Waals, una forza debolissima ma che moltiplicata per i milioni di punti di aderenza sostiene il peso del gecko. Il legame si scioglie facilmente per “spellatura”, nello stesso modo in cui si stacca un nastro adesivo. Il gecko riesce così a correre sul soffitto. Gli esperti in scienza dei materiali si rallegrano già all’idea di riuscire a produrre un *gecko* sintetico”.

CURIOSITÀ



Il Cemento

L'Idratazione

L'idratazione prosegue con una cinetica decrescente...

Ettringite si forma nelle prime 24 ore e poi successivamente si trasforma in mososolfato.

... Questa è tanto maggiore quanto più sarà presente il C_3S rispetto al C_2S

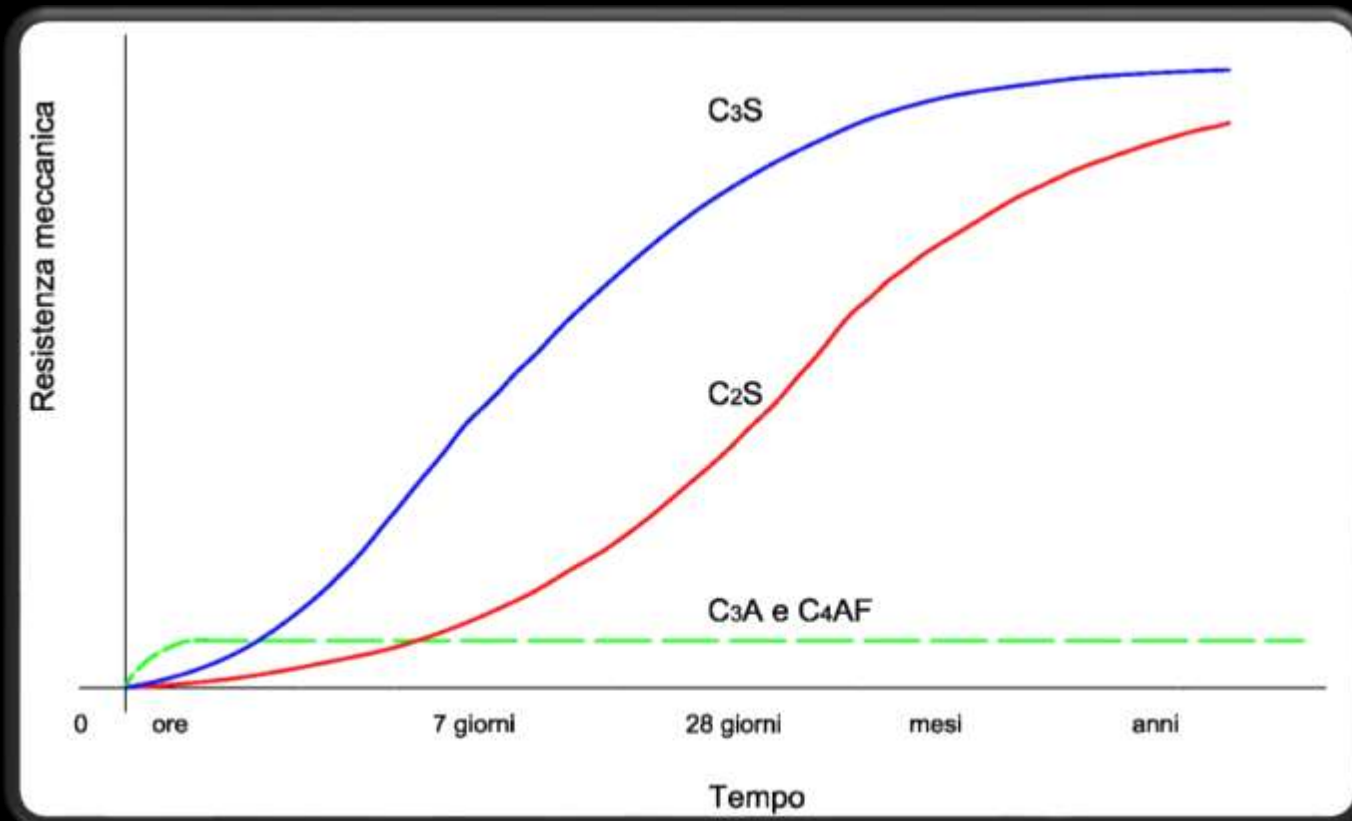
... Questo perché i prodotti di idratazione ostacolano il passaggio dell'acqua verso il cemento non ancora idratato.

La velocità di formazione del C-S-H è funzione della composizione del cemento...

Il Cemento

L'Idratazione

Riguardando questo grafico possiamo vedere come il C_3S acquisisca una resistenza meccanica notevole in tempi ragionevolmente accettabili nell'ambito delle costruzioni.



Il Cemento

L'Idratazione

È importante ricordare che il processo di idratazione può andare avanti se è presente dell'acqua. Se ad esempio a causa dell'evaporazione non vi fosse acqua sufficiente per l'idratazione del cemento questo fenomeno cesserebbe.

Peraltro quantità eccessive d'acqua porterebbero ad una microstruttura estremamente porosa e quindi a prestazioni meccaniche inferiori.

Il Cemento

L'Idratazione

La resistenza meccanica della pasta indurita è essenzialmente dovuta alle forze di attrazione di van der Waals, che dipendono dall'estensione delle superfici coinvolte, oltre che dalla loro natura.

Il gel C-S-H e gli alluminati di calcio possiedono un'area superficiale specifica enorme e quindi tendono ad aderire fortemente non solo tra loro, ma anche ai solidi di bassa superficie specifica, come la portlandite, i grani di cemento non idratati e gli aggregati (nel caso si stia parlando di calcestruzzo).

Il Cemento

Il calore di idratazione delle quattro fasi mineralogiche del Clinker



500 kJ / kg



250 kJ / kg



1000 kJ / kg



400 kJ / kg

Il Cemento

Il calore di idratazione del cemento Portland

Il calore di idratazione di un cemento portland varia con la sua composizione e può essere ottenuto sommando il calore di idratazione dei vari costituenti moltiplicato per la loro percentuale in peso.

Il calore di idratazione è molto importante per i grandi getti. Infatti nei paramenti murari di grosso spessore può verificarsi un gradiente di temperatura tra le superfici esposte all'aria e quelle più interne.

Le zone superficiali tendono a contrarsi, mentre quelle più interne ad espandersi e per questo si possono verificare, sulle prime, delle sollecitazioni di trazione.

Il Cemento

Il calore di idratazione del cemento Portland

Questo fenomeno non dipende solo dalla quantità di calore prodotto...

... Ma anche dalla velocità con cui si produce.

Una maggiore velocità di sviluppo fa aumentare rapidamente la temperatura del nucleo del getto.

Al contrario una bassa velocità determina minori differenze di temperatura.

L'idratazione del C_2S determina un calore di idratazione inferiore ed una velocità di sviluppo anch'essa inferiore del C_3S

Il Cemento

L'Idratazione dei cementi di miscela

Avviene in tempi più lunghi rispetto a quella del cemento portland. Per questo abbiamo un ritardo nello sviluppo delle prestazioni meccaniche e del calore di idratazione. Per questo motivi si preferiscono in climi caldi o in getti massicci.

I prodotti di idratazione della pozzolana o della loppa sono di dimensione ridotta e precipitando occludono parte dei pori costituendo un' loro affinamento. In questo modo si ha una riduzione della porosità e una inferiore circolazione e penetrazione di agenti aggressivi.

Per il particolare ostacolo che offrono al passaggio dei cloruri, questi cementi di miscela sono oggi preferiti al portland specie in ambienti marini.

Il Cemento

La porosità delle paste cementizie

La pasta di cemento idratata presenta una struttura porosa con tre tipologie di pori:

pori interstiziali, che si trovano tra gli strati che costituiscono il gel C-S-H, di dimensioni comprese tra qualche frazione di micron e qualche micron;

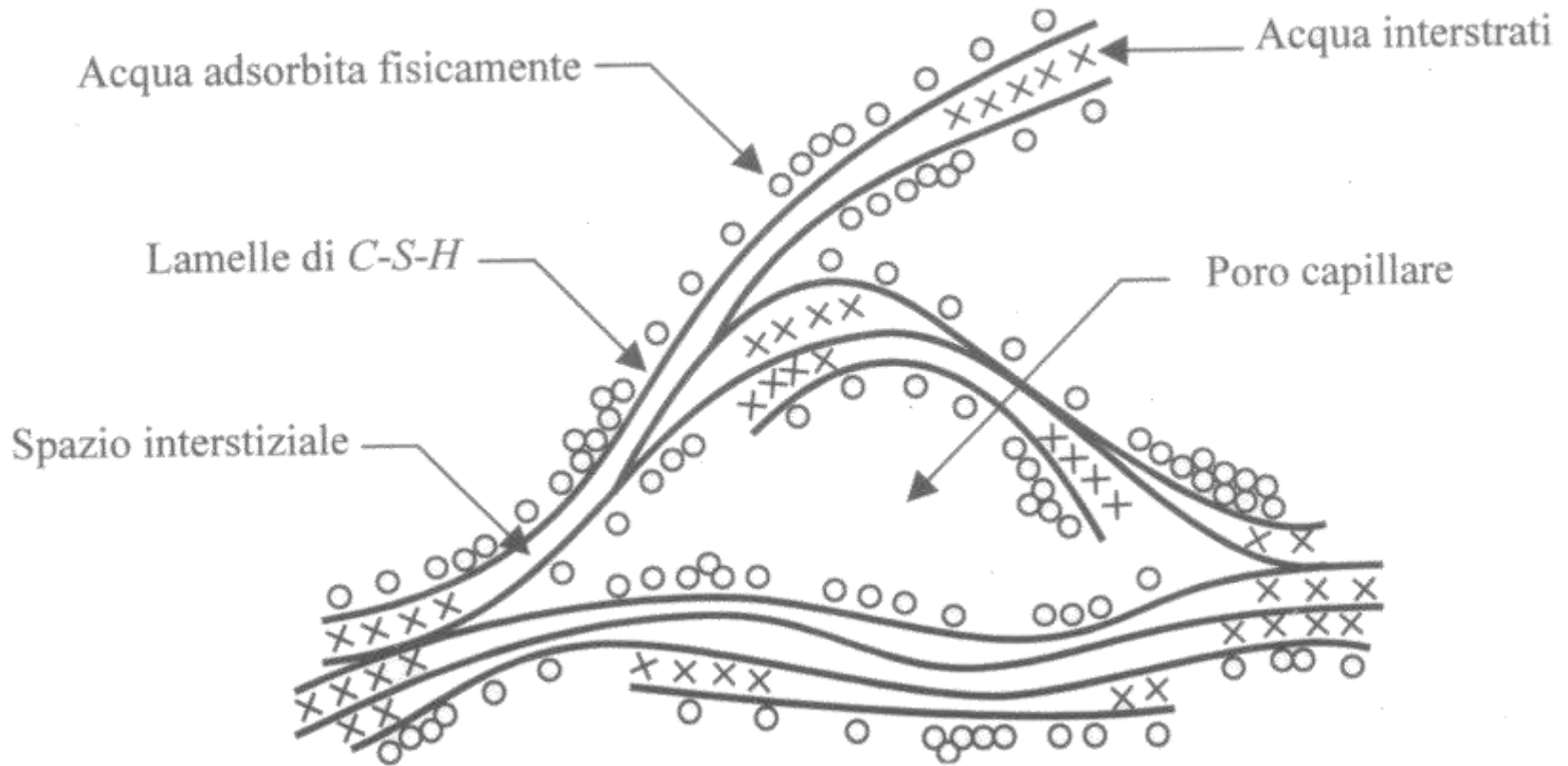
pori capillari, con diametri da 10 a 50 nm se il calcestruzzo è ben idratato e prodotto con bassi rapporti acqua/cemento, ma fino a 3-5 micron se il calcestruzzo è ottenuto con alti rapporti acqua/cemento e/o presenta un basso grado di idratazione.

pori o vuoti dovuti all'inglobamento di aria (macropori), che possono verificarsi in seguito ad un cattivo costipamento ed avere dimensione di qualche mm, oppure possono essere aggiunti volontariamente attraverso l'utilizzo di additivi aeranti che offrono resistenza ai fenomeni di gelo-disgelo;

in questo caso risultano avere dimensioni comprese tra 0,05-0,2 mm di diametro.

Il Cemento

La porosità delle paste cementizie



Il Cemento

La porosità delle paste cementizie

La porosità nel gel è pari al 28% del volume del C-S-H e non influenza né le proprietà meccaniche né la curabilità del calcestruzzo.

Infatti le dimensioni ridottissime degli spazi interstiziali risultano all'interno del raggio d'azione delle forze di van der Waals, responsabili della resistenza del C-S-H, e sono inoltre inferiori alle dimensioni necessarie per consentire dei fenomeni di trasporto di entità apprezzabile.

Risultano invece determinanti nel definire queste proprietà i pori capillari e i pori da inglobamento d'aria.

Il Cemento

La porosità delle paste cementizie

Per ridurre la porosità capillare della pasta di cemento si può intervenire sui due fattori che la determinano, cioè il rapporto a/c e la stagionatura

La stagionatura è definita come l'insieme di procedure di controllo, principalmente dell'umidità e della temperatura, allo scopo di promuovere l'idratazione del cemento e le proprietà che da essa derivano. Oggi sono stati realizzati dei calcestruzzi con rapporto a/c 0,2 (HPC) grazie all'utilizzo di superfluidificanti che rendono possibile la lavorabilità, senza di questi si potrebbe realizzare un cls a/c 0,3-0,4.

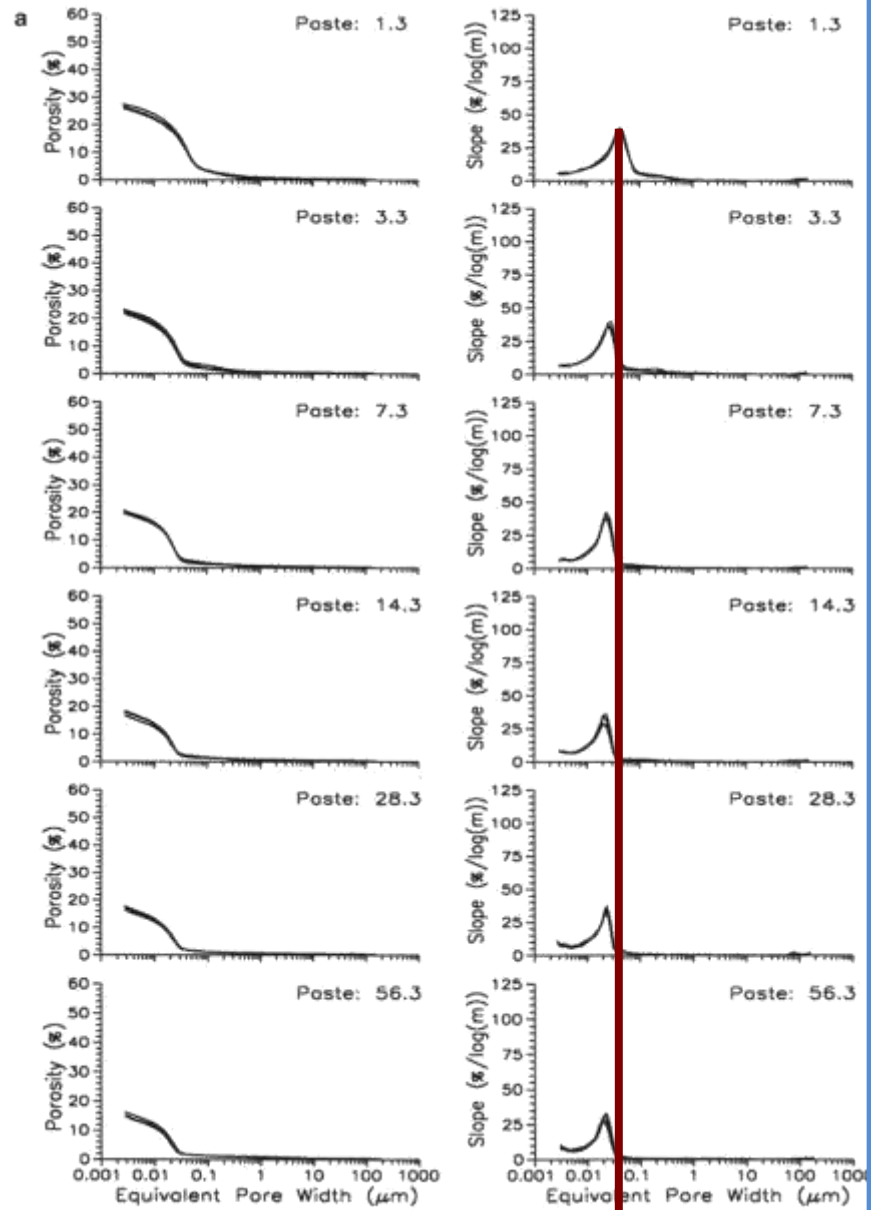


Fig. 2. Results from mercury intrusion into pastes made with a w/c ratio of (a) 0.3, (b) 0.4, (c) 0.5, (d) 0.6, (e) 0.7.

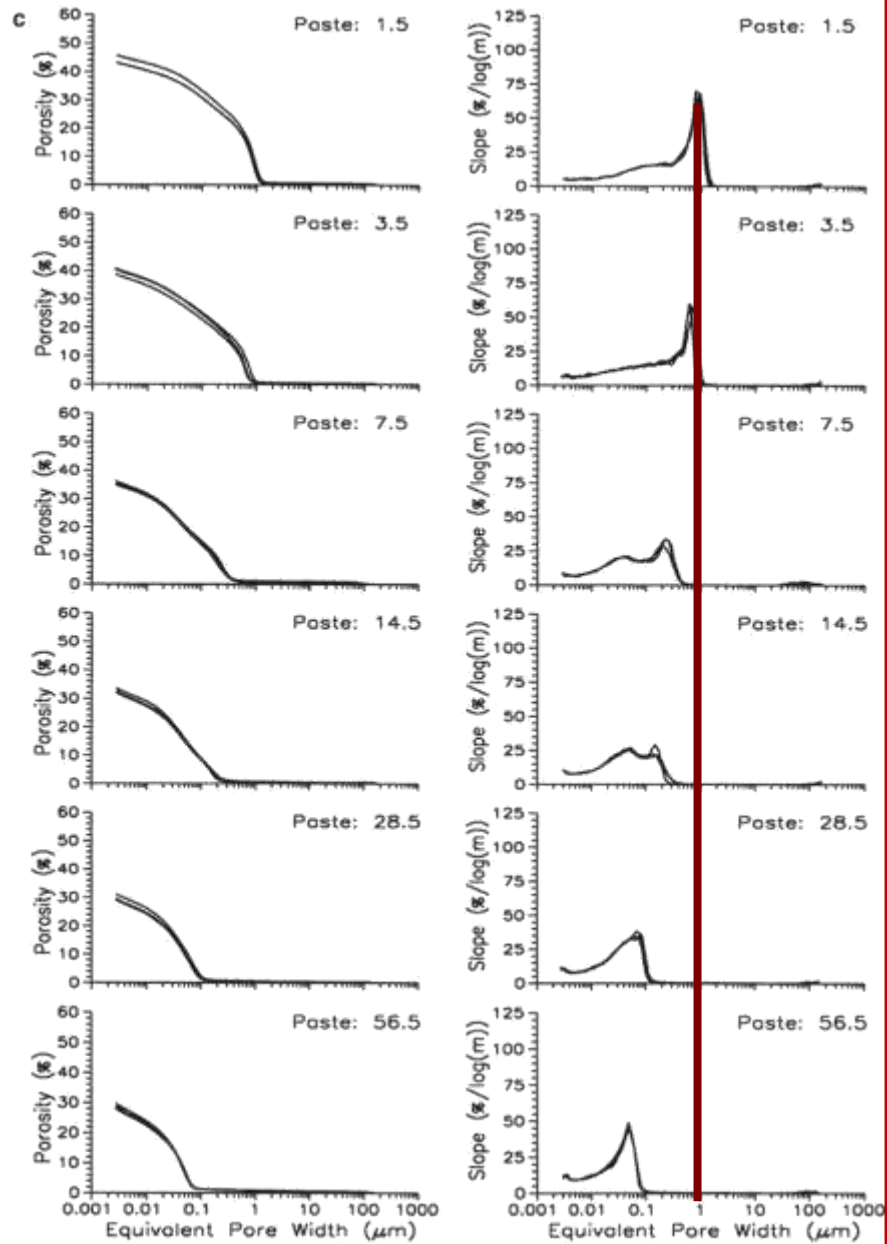


Fig. 2. (continued).

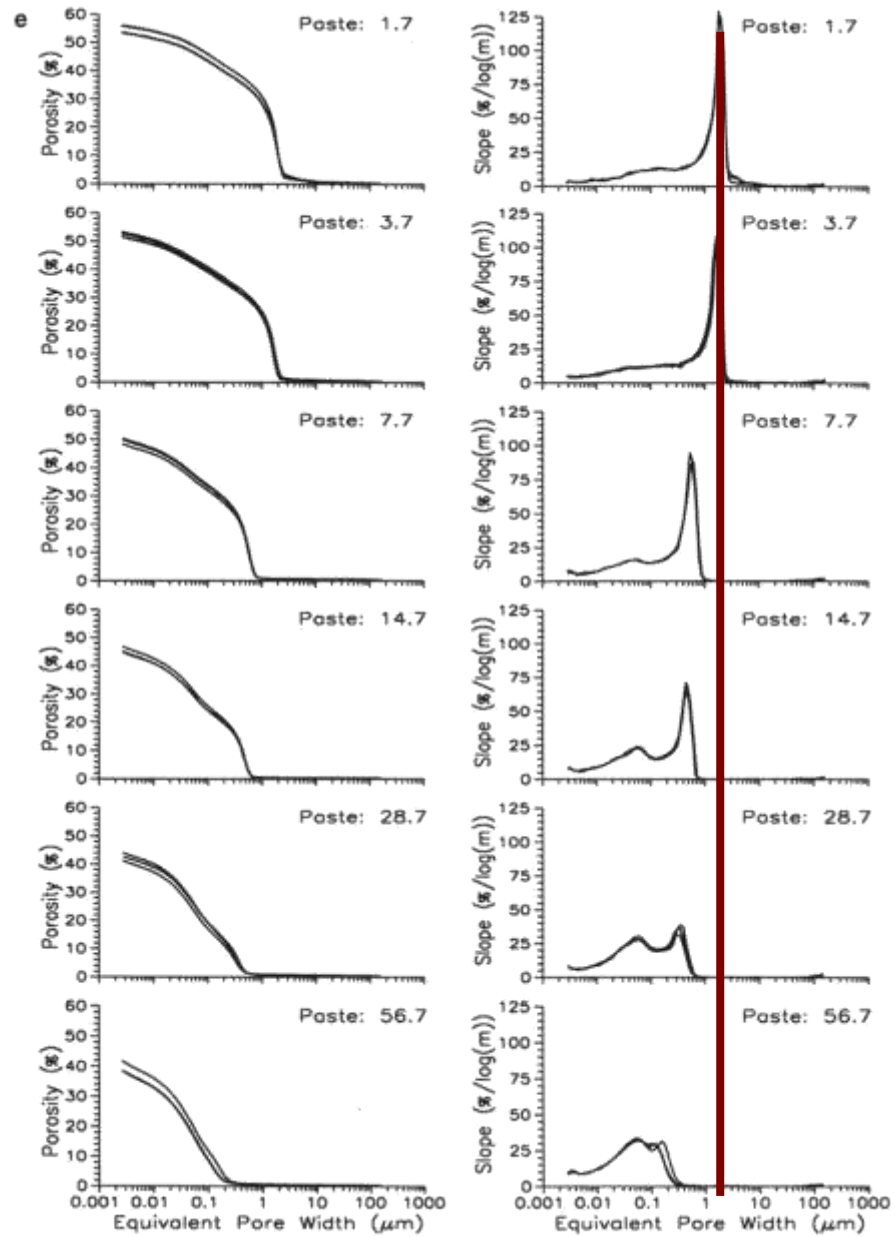


Fig. 2. (continued).

Il Cemento

La porosità delle paste cementizie

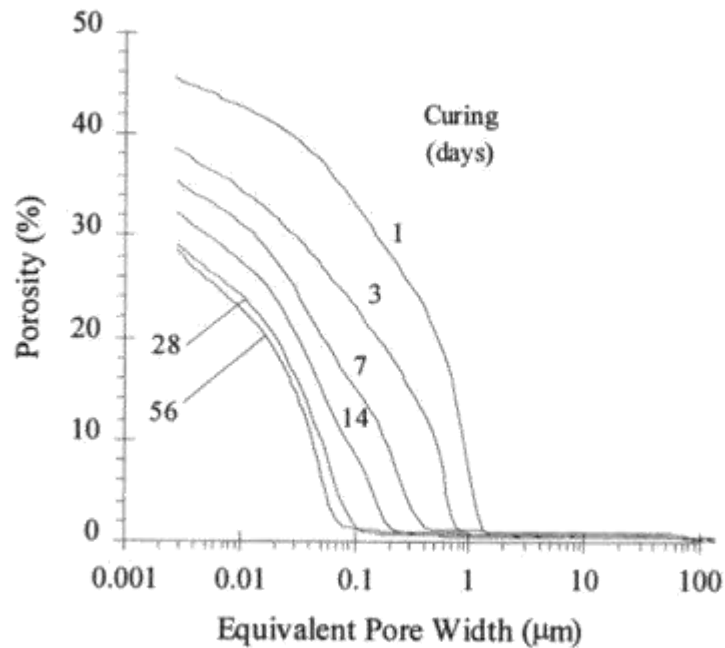


Fig. 3. The effect of curing on MIP results for pastes of $w/c = 0.5$.

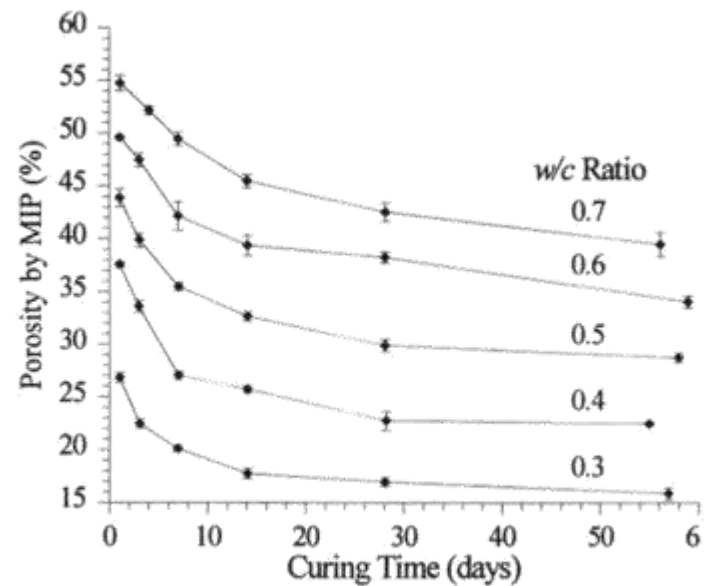


Fig. 5. Summary of the effect of curing time and w/c ratio on total porosity as determined by MIP.

Il Cemento

La porosità delle paste cementizie

*Consideriamo un impasto: 100 cm³ di cemento e 200 cm³ di acqua.
Tenendo in considerazione che la densità del cemento è pari a 3.14 g/cm³ e quella dell'acqua è 1g/cm³ troviamo il valore del rapporto a/c:*

$$a/c = 200 \text{ g} / (100 \text{ cm}^3 * 3.14 \text{ g/cm}^3) = 0.628 \approx 0.63$$

L'idratazione del cemento è progressiva nel tempo, considerando condizioni ottimali di temperatura (20-25 °C) e ambiente umido si arriverà ad un 100% in 365 giorni.

Il Cemento

La porosità delle paste cementizie

Sappiamo che il volume dei prodotti di idratazione è doppio rispetto al volume di cemento di partenza.

Sappiamo anche che il volume della pasta rimane praticamente uguale alla somma dei volumi dei costituenti.

Per questi motivi quando avremo il 100% di idratazione il volume dei prodotti di idratazione del cemento sarà pari a 200 cm^3

Essendo il volume totale pari a 300 cm^3 allora possiamo dire che i rimanenti 100 cm^3 sono il volume corrispettivo ai pori capillari presenti (porosità del 33%).

Il Cemento

La porosità delle paste cementizie

Svolgimento:

Determinare la porosità capillare di una pasta di cemento realizzata partendo da un volume di 100 cm^3 e rapporto a/c : 0.7, 0.5, 0.4

Il Cemento

La porosità delle paste cementizie

Esercizio:

$(a/c \cdot \text{Peso cemento}) = \text{Peso acqua}$

Dal peso dell'acqua ottengo il volume d'acqua

Volume dell'impasto (volume cemento + volume acqua)

Il volume occupato dai prodotti di idratazione è doppio rispetto a quello del cemento.

Volume pori capillari = Volume impasto – volume cemento idratato

Il Cemento

La porosità delle paste cementizie

I pori nella pasta cementizia possono contenere una soluzione acquosa alcalina che contiene principalmente NaOH e KOH. Il pH è circa 13!

Il contenuto d'acqua nei pori è funzione delle condizioni ambientali al contorno. Nei pori di dimensione maggiore dei 50 nm l'acqua può considerarsi libera dalle forze che la legano alla superficie solida. Quest'acqua evapora quando l'umidità esterna scende al di sotto di 95-100%.

Nei pori di diametro inferiore ai 50 nm l'acqua è legata alle superfici e questa evapora solo in ambienti con bassa umidità. Quando questa umidità relativa scende al di sotto del 30% allora l'unica acqua rimanente sulla pasta cementizia è quella interstiziale nel gel.

Il Cemento

La porosità delle paste cementizie

Nei pori di diametro inferiore ai 50 nm l'acqua è legata alle superfici e questa evapora solo in ambienti con bassa umidità. Quando questa umidità relativa scende al di sotto del 30% allora l'unica acqua rimanente sulla pasta cementizia è quella interstiziale nel gel.

Al variare della quantità d'acqua sulla pasta cementizia variano anche le capacità di trasporto di specie chimiche che come vedremo hanno un ruolo fondamentale nel degrado di questi materiali.

Corso di Tecnologia dei Materiali e Chimica Applicata

Il Calcestruzzo





Il Cemento

Aggregati

Gli aggregati sono sostanze minerali con particelle di dimensione e forma adatte alla produzione del calcestruzzo.



Il Cemento

Aggregati

Possono essere naturali, artificiali o riciclati

Occupano una frazione rilevante di volume nei calcestruzzi

Riducono le conseguenze del calore di idratazione dei cementi e del ritiro

*Sono economicamente più convenienti
E consentono un minore utilizzo di cemento*

Il Cemento

Caratteristiche degli Aggregati

Dimensione e forma

Caratteristiche di superficie

Porosità e proprietà meccaniche

Umidità e densità

Il Cemento

Caratteristiche degli Aggregati

Dimensione e forma

La dimensione degli aggregati dipende dall'origine del materiale e dalla lavorazione che ha subito.

*Esistono diverse procedure per stabilire questa proprietà ad esempio:
l'indice di forma o l'indice di appiattimento*

Il grado di riempimento è maggiore per forme tendenti alla sfera, così come è maggiore la lavorabilità a parità di acqua utilizzata.



Gli aggregati allungati e piatti possono aumentare la resistenza a flessione, mentre quelli angolari incrementando l'adesione con la pasta di cemento, aumentano la resistenza a trazione.



Il Cemento

Caratteristiche degli Aggregati

Caratteristiche di Superficie

Liscia



Il Cemento

Caratteristiche degli Aggregati

Caratteristiche di Superficie

Rugosa



Il Cemento

Caratteristiche degli Aggregati

Caratteristiche di Superficie

Cristallina



Il Cemento

Caratteristiche degli Aggregati

Caratteristiche di Superficie

**Porosa con
cavità**



Il Cemento

Caratteristiche degli Aggregati

Porosità

La porosità è legata all'origine della roccia. Varia dal 2 al 40% ed influenza le proprietà fisico-chimiche-meccaniche del calcestruzzo.

Inoltre è molto importante valutare la quantità d'acqua assorbita dall'aggregato.

Il Cemento

Caratteristiche degli Aggregati

Proprietà meccaniche

Le proprietà meccaniche degli aggregati non sono in genere determinanti per la determinazione delle proprietà del calcestruzzo in quanto sono superiori alla resistenza della pasta cementizia.

Infatti, la rottura del calcestruzzo avviene per distacco della pasta cementizia dagli aggregati.

Queste saranno invece considerate quando si dovranno realizzare particolari calcestruzzi ad esempio ad altissima resistenza o leggeri.

Il Cemento

Caratteristiche degli Aggregati

Umidità

Asciutto o insaturo: pori aperti e non completamente riempiti di acqua

Bagnato: pori completamente pieni d'acqua e superficie bagnata

Saturo a superficie asciutta (ssa): pori aperti completamente pieni d'acqua, ma superficie asciutta

“ssa”: è la condizione in cui si porta l'aggregato quando viene introdotto nell'impasto.

Il Cemento

Caratteristiche degli Aggregati

Umidità

L'umidità è il contenuto percentuale d'acqua rispetto alla massa secca.

La condizione saturo a superficie asciutta è detta: assorbimento

Il Cemento

Caratteristiche degli Aggregati

Densità

*Densità assoluta: massa/volume del granello
senza pori*

*Densità apparente: massa/volume del
granello con i pori*

*Densità in mucchio: massa/volume del
recipiente che li contiene*

Il Cemento

Caratteristiche degli Aggregati

Densità

Densità in mucchio della sabbia è funzione dell'umidità e della finezza. Infatti entro un contenuto d'acqua del 5% la sabbia aumenta di volume a causa del film che avvolge ogni singola particella allontanandola dalle altre.

Il Cemento

Distribuzione granulometrica



Il Cemento

Distribuzione granulometrica



Il Cemento

Distribuzione granulometrica

*Volume minimo dei vuoti fra le particelle
(massima densità in mucchio)*

*Garantire massima lavorabilità del
calcestruzzo*

*Non favorire la segregazione
dell'impasto*

Ma la massima densità inversamente proporzionale ad ottima lavorabilità

Il Cemento

Distribuzione granulometrica

Diametro massimo dell'aggregato (Norma EN 206)

Non deve risultare superiore :

- **A un quarto della dimensione minima dell'elemento strutturale**
- **Alla distanza tra le armature ridotta di 5 mm**
- **A 1.3 volte lo spessore del copriferro**

Il Cemento

Distribuzione granulometrica

Per ottimizzare le quantità delle frazioni di diversa dimensione si prendono sostanzialmente in esame due equazioni: quella di Fuller e quella di Bolomey che vengono di seguito riportate.

Relazione di Fuller

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

(P passante al setaccio con apertura d e D dimensione massima dell'aggregato)

Relazione di Bolomey

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

(A è funzione della lavorabilità richiesta e del tipo di aggregato disponibile)

Il Cemento

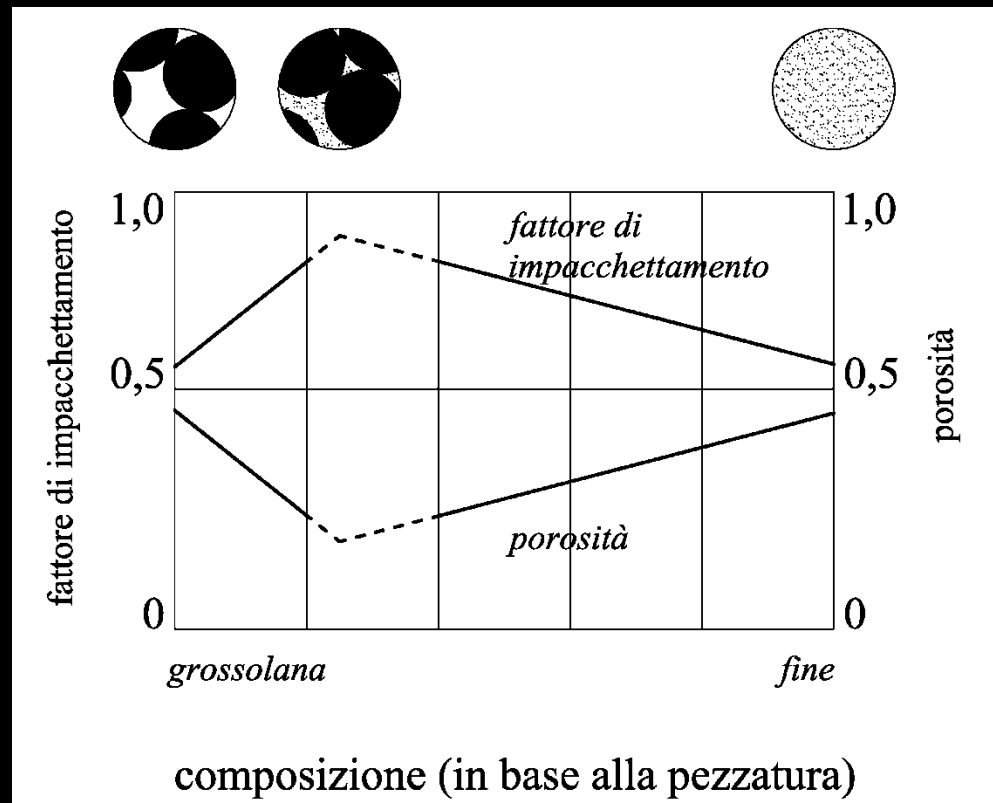
Distribuzione granulometrica

Per quanto riguarda le sue dimensioni, il principio fondamentale che sta alla base di una buona curva granulometrica con il massimo valore del fattore di impacchettamento, è quello che prevede aggregati di dimensione diversa, con quelli di minore dimensione che vanno ad occupare gli spazi lasciati liberi da quelli di dimensione maggiore.

Il Cemento

Distribuzione granulometrica

Come si può notare il sistema caratterizzato dal sistema bi-componente, risulta più compatto rispetto a quelli formati da aggregati di un'unica pezzatura.



Il Calcestruzzo

Altre componenti

Acqua

*Additivi riduttori d'acqua e
superfluidificanti*

Additivi acceleranti e ritardanti

Additivi aeranti

Il Calcestruzzo

Additivi

Fluidificanti, superfluidificanti, iperfluidificanti

Questi additivi (soprattutto le prime due tipologie sono piuttosto ricorrenti), vengono aggiunti con lo scopo di rendere più lavorabile il calcestruzzo (a parità di acqua di impasto) o di ridurre la quantità di acqua mantenendo costante la lavorabilità.

Acceleranti e Ritardanti

Gli acceleranti ed i ritardanti hanno lo scopo rispettivamente di incrementare o ridurre la velocità di idratazione del cemento e quindi di ridurre o di allungare il tempo di presa o di indurimento.

Il Calcestruzzo

Additivi

Additivi aeranti

Le bolle d'aria normalmente presenti nel calcestruzzo non sono in grado di migliorarne la resistenza al gelo perché troppo grandi, poco numerose e distribuite in maniera casuale.

Con gli additivi aeranti è possibile avere un sistema omogeneo di bolle con dimensione dell'ordine delle centinaia di micron, all'interno della matrice cementizia.

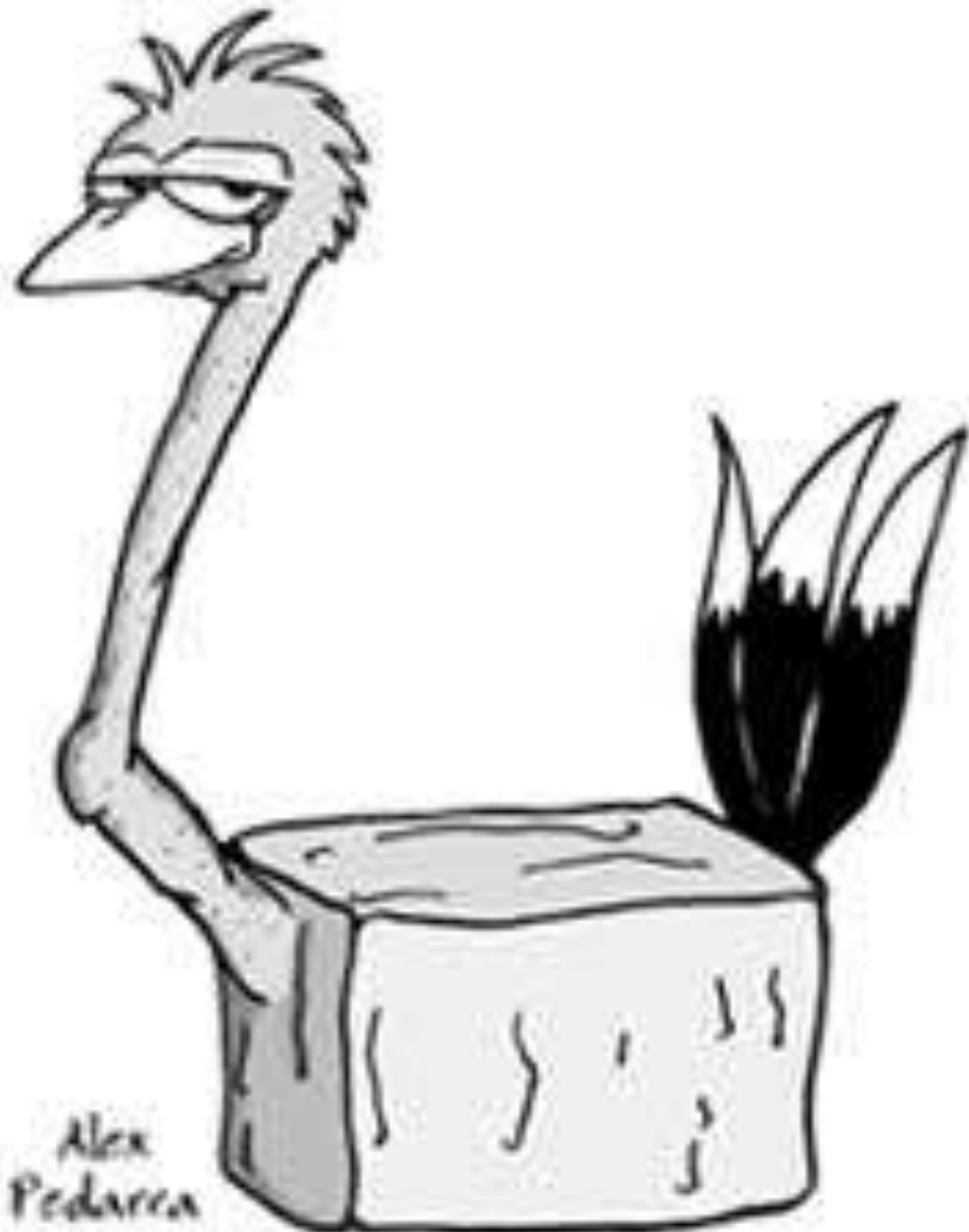
Per avere una buona resistenza al gelo è necessario che la distanza fra le bolle sia compresa fra 200 e 300 μm .

Il volume d'aria inglobata è, normalmente, del 4-6 %

Il Calcestruzzo

Proprietà allo stato fresco





Il Calcestruzzo

Proprietà allo stato fresco

Il Calcestruzzo fresco deve poter essere...

... Prodotto, trasportato...

... messo in opera e costipato...

In modo da poter espellere le bolle d'aria intrappolate, senza che si separino i costituenti

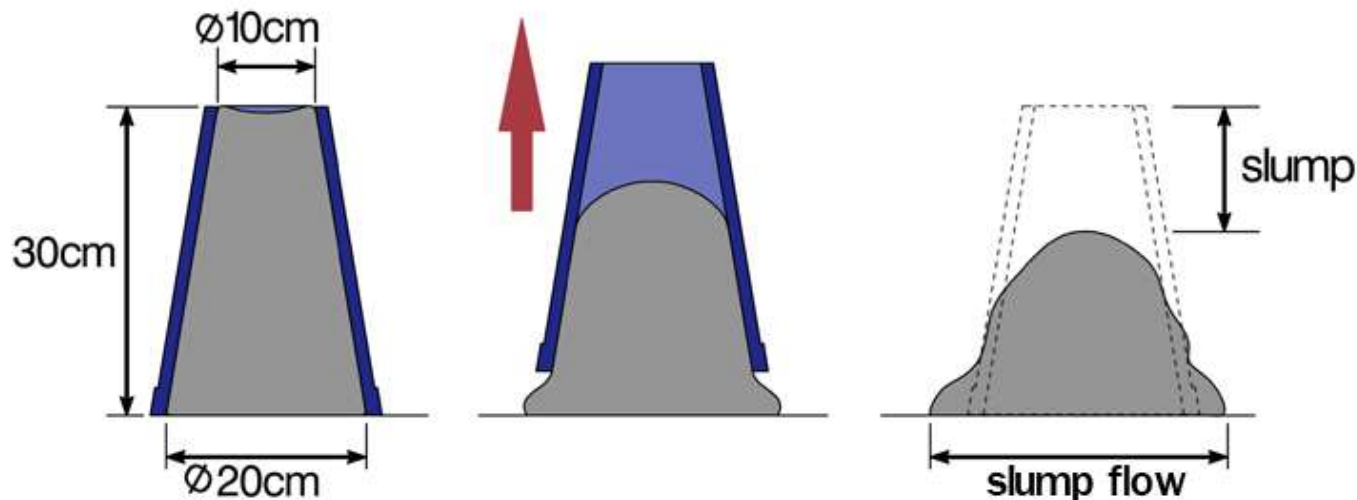
*Questo è possibile se vi sono adeguate condizioni reologiche:
fluidità, compattabilità e coesione*

Il Calcestruzzo

Misura della lavorabilità: Il cono di Abrams

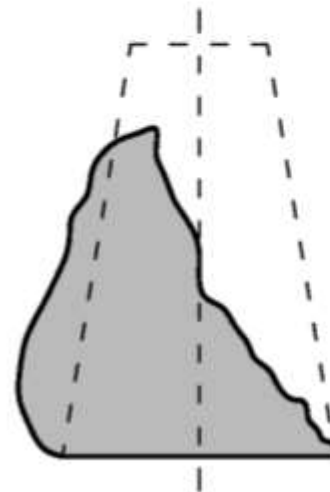
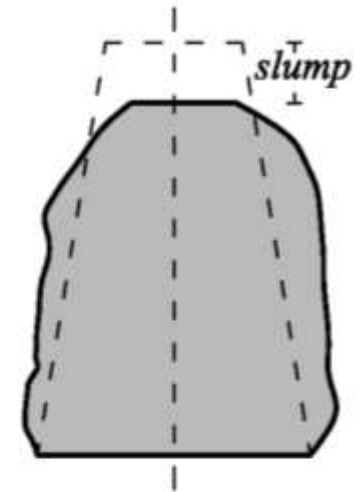
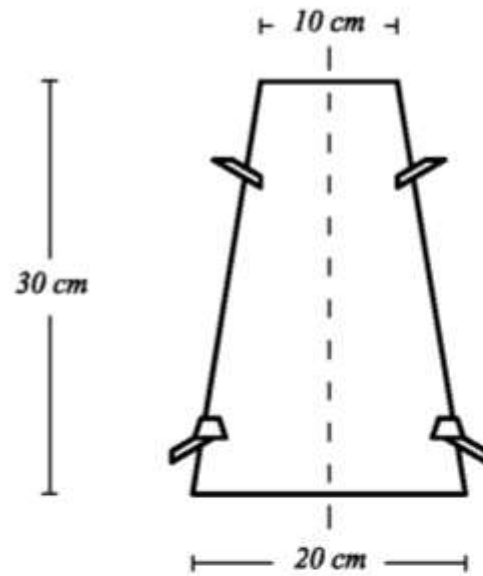
Ha una forma tronco-conica (di 30 cm di altezza e con diametri inferiore e superiore rispettivamente di 20 e 10 cm)

*Una volta costipato per bene l'impasto di calcestruzzo il cono viene sollevato .
A causa della forza di gravità contro le forze interne di coesione si ha un abbassamento la cui misura stabilisce la consistenza.*

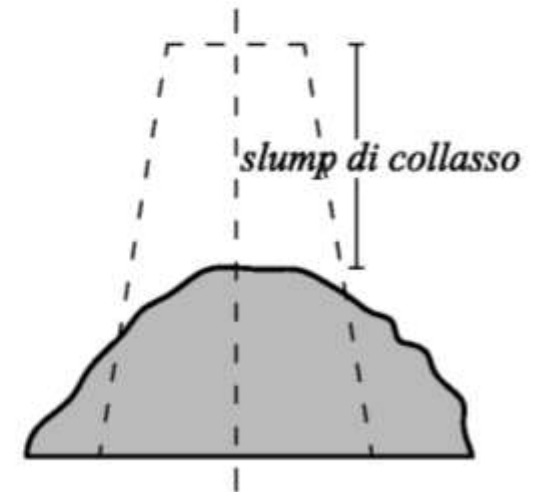


Il Calcestruzzo

Cono di Abrams



slump non misurabile



slump di collasso

Il Calcestruzzo

Classi di consistenza e lavorabilità

Classi di consistenza e contenuto di acqua (kg/m^3) approssimativamente richiesto per ottenere la lavorabilità indicata in funzione del diametro massimo dell'aggregato

Dmax (mm)	Consistenza umida S1	Consistenza plastica S2	Consistenza semifluida S3	Consistenza fluida S4
	Slump 10-40 mm	Slump 50-90 mm	Slump 100-150 mm	Slump > 150mm
9.5	195	210	230	250
19	180	195	215	230
38	155	170	190	210
50	145	160	180	195
75	140	155	170	185
150	125	135	150	165

Il Calcestruzzo

Classi di consistenza e lavorabilità

Influenza del diametro massimo dell'inerte sulla lavorabilità del calcestruzzo

Mantenendo costante la quantità di acqua per metro cubo di calcestruzzo (200 litri), la lavorabilità (slump), passa da:

4 con $d_{\max} = 10 \text{ mm}$

8 con $d_{\max} = 20 \text{ mm}$

16 con $d_{\max} = 40 \text{ mm}$

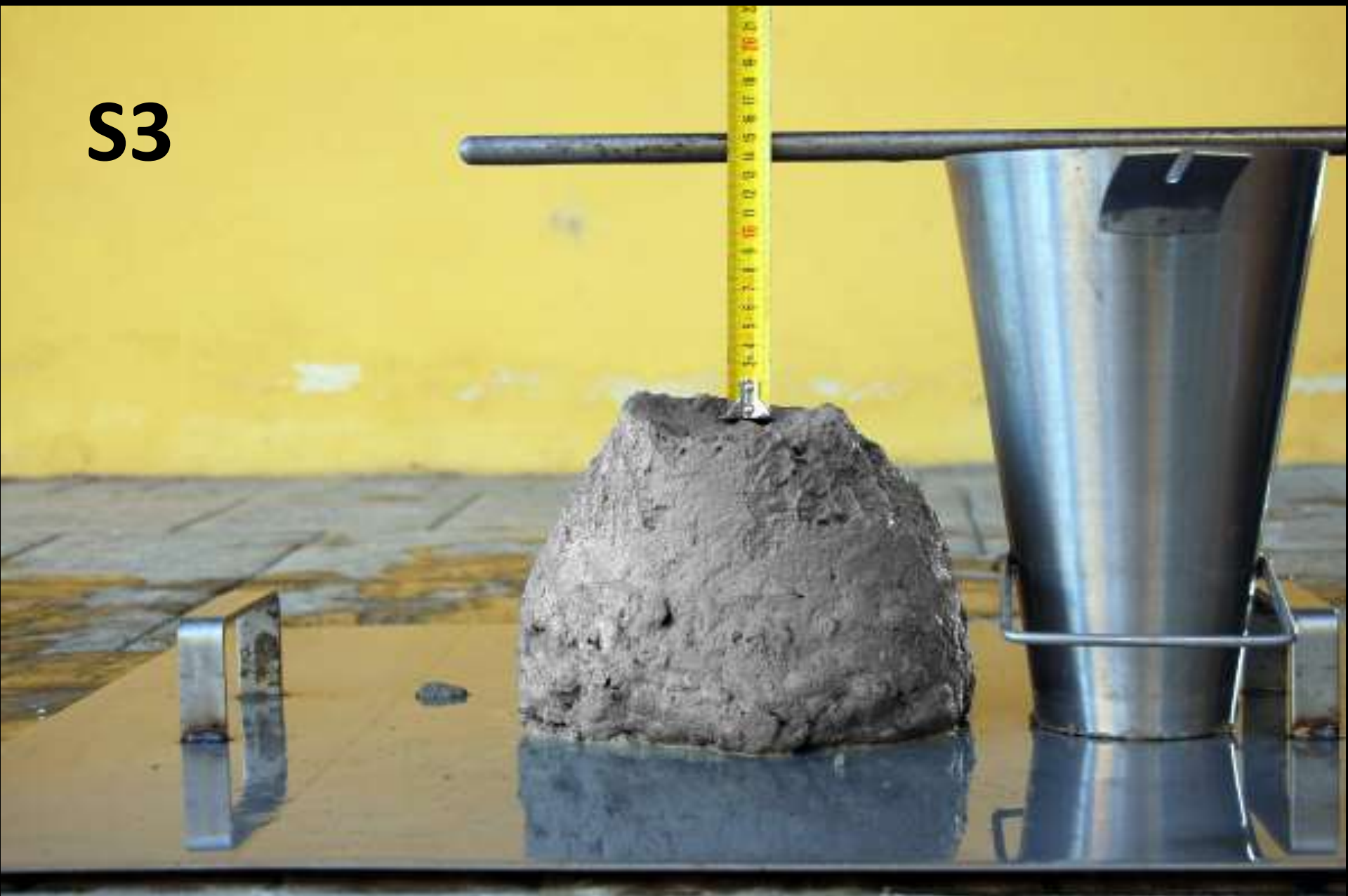
S1



S2



S3



S4



Slump flow



Corso di Tecnologia dei Materiali

Il Cemento e il Calcestruzzo