

3

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

Docente: Dr. Giorgio Pia

Corso di Tecnologia dei Materiali

Il Cemento

La Produzione del Clinker

Il Cemento

Il Cemento

Produzione del Clinker – la cottura

3

Già a partire da 1250-1300°C inizia la fusione, con formazione di una fase liquida ricca in allumina e ossido di ferro, costituita principalmente da:

alluminato tricalcico $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 - \text{C}_3\text{A}$

e

ferroalluminato tetracalcico $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{C}_4\text{AF}$

Questa fase ha un'importanza notevole in quanto avvolgendo le particelle solide rende possibili velocità di reazione molto più elevate che non con le sole particelle solide direttamente a contatto. La fase liquida non deve essere superiore al 25% del totale.

Pertanto consente di ridurre i tempi necessari per la formazione dei silicati e le temperature a cui si formano. Il C_3S è stabile solo a temperatura superiore a 1250°C.

Per poterlo avere in forma metastabile anche a bassa temperatura viene raffreddato bruscamente.



Il Cemento

Produzione del Clinker

4

Si ottiene così il clinker,

che possiede una granulometria tra i 3-25 mm di diametro ed è costituito al 75-85% da C_3S e C_2S mentre dal 20-25% da C_4AF e C_3A ,

inoltre vi sono una serie di composti in piccola percentuale (ossidi di Mg, Mn, Ti, Na, K, in particolare questi ultimi due sono responsabili dell'alcalinità dell'estratto acquoso).

Al clinker viene aggiunto del gesso e in quantità non superiori al 5% e il tutto viene nuovamente macinato.

Il Cemento

Produzione del Clinker

4

Il clinker di cemento Portland è caratterizzato dalla presenza di 4 fasi fondamentali, esse sono:

Alite, silicato tricalcico, C_3S , 50÷70%

Belite, silicato bicalcico, C_2S , prevalentemente in forma β , 15÷30%

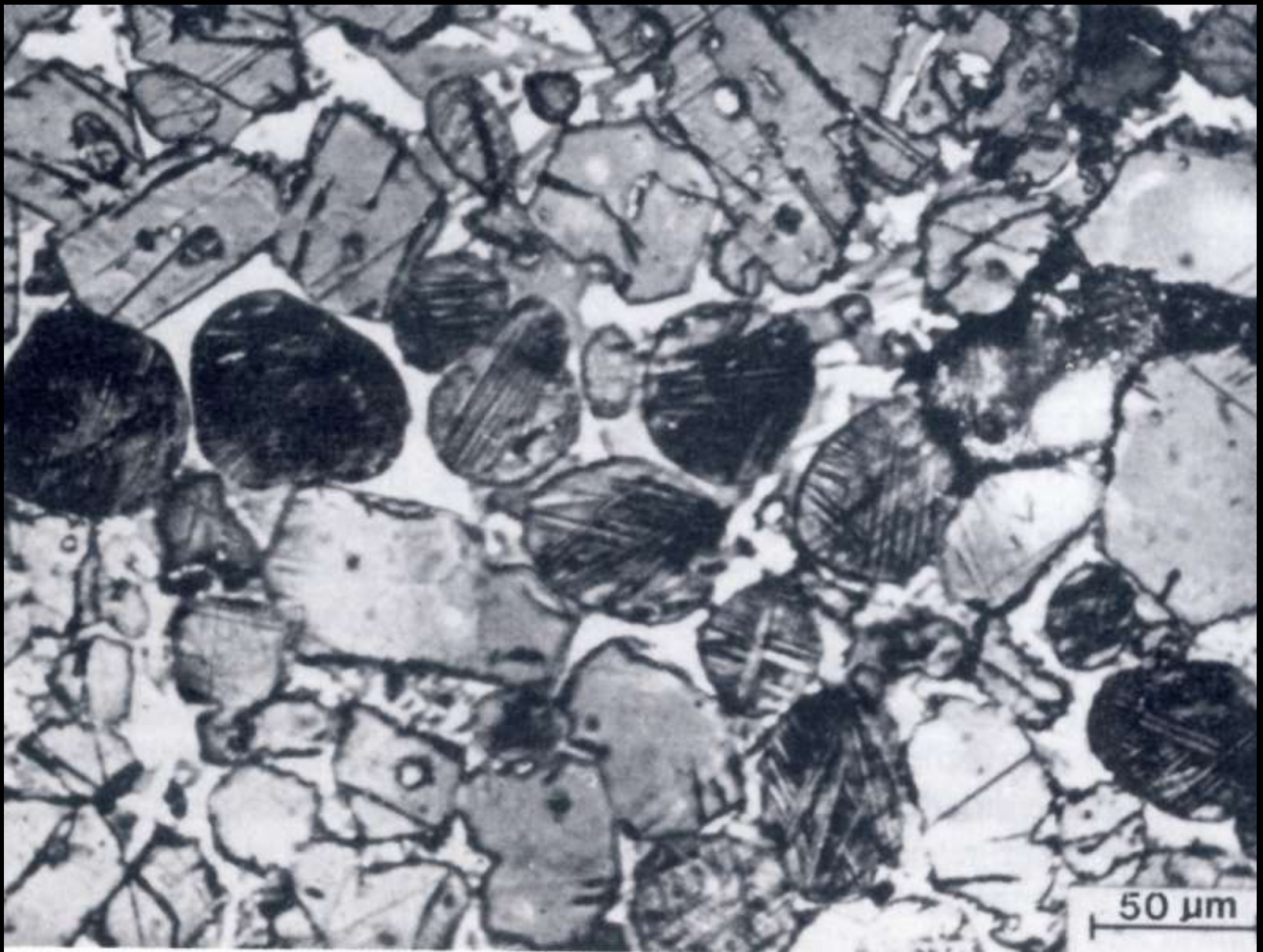
Alluminato di calcio, C_3A , 5÷10%

Alluminoferrito di calcio, C_4AF , 5÷15%.

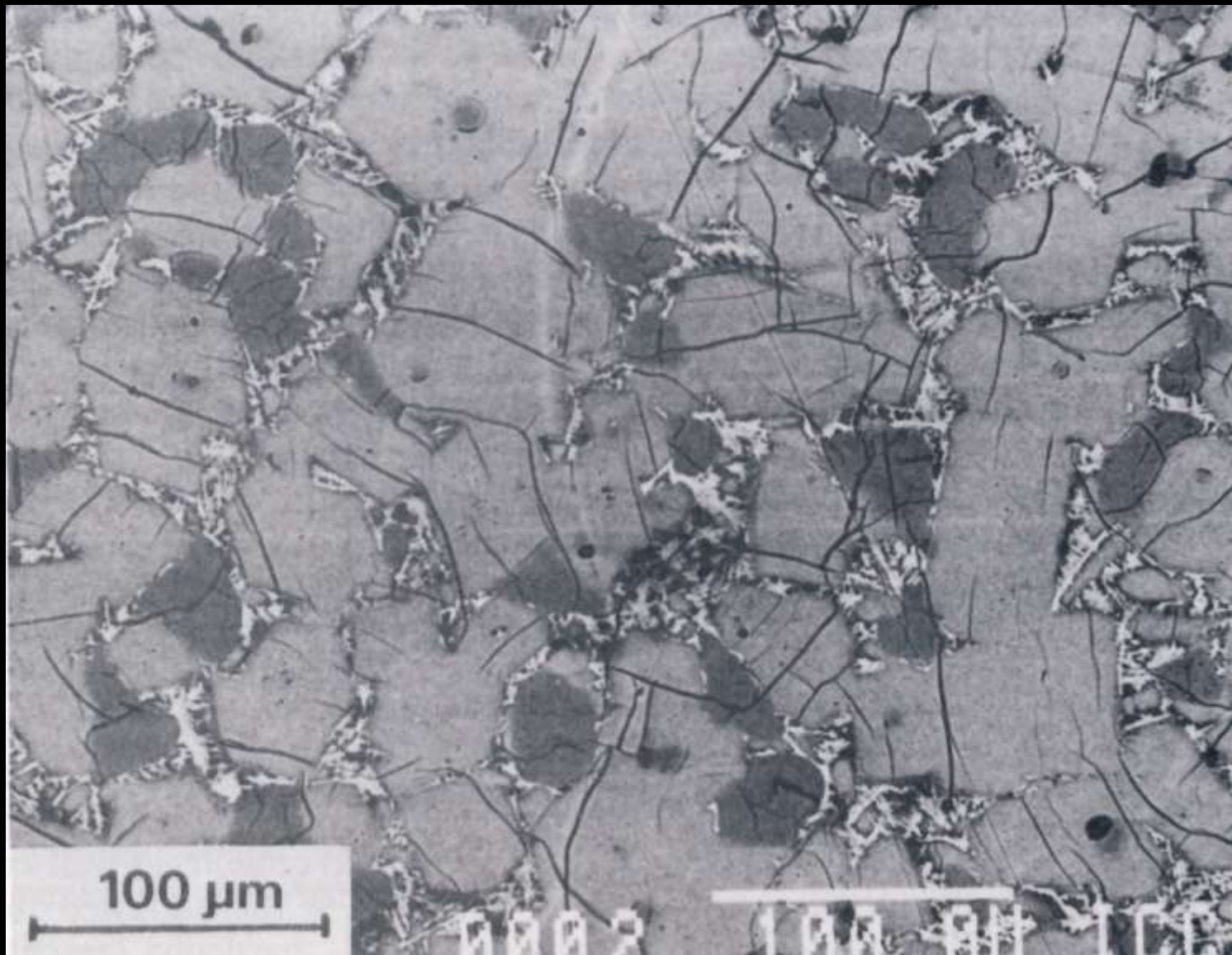
L'alite si presenta come cristalli angolari,

la belite come grani arrotondati e striati mentre le altre due fasi fungono da matrice, in quanto rappresentative di una fase fusa alle condizioni di massima temperatura del forno, e sono distinguibili dai differenti tenori di grigio.

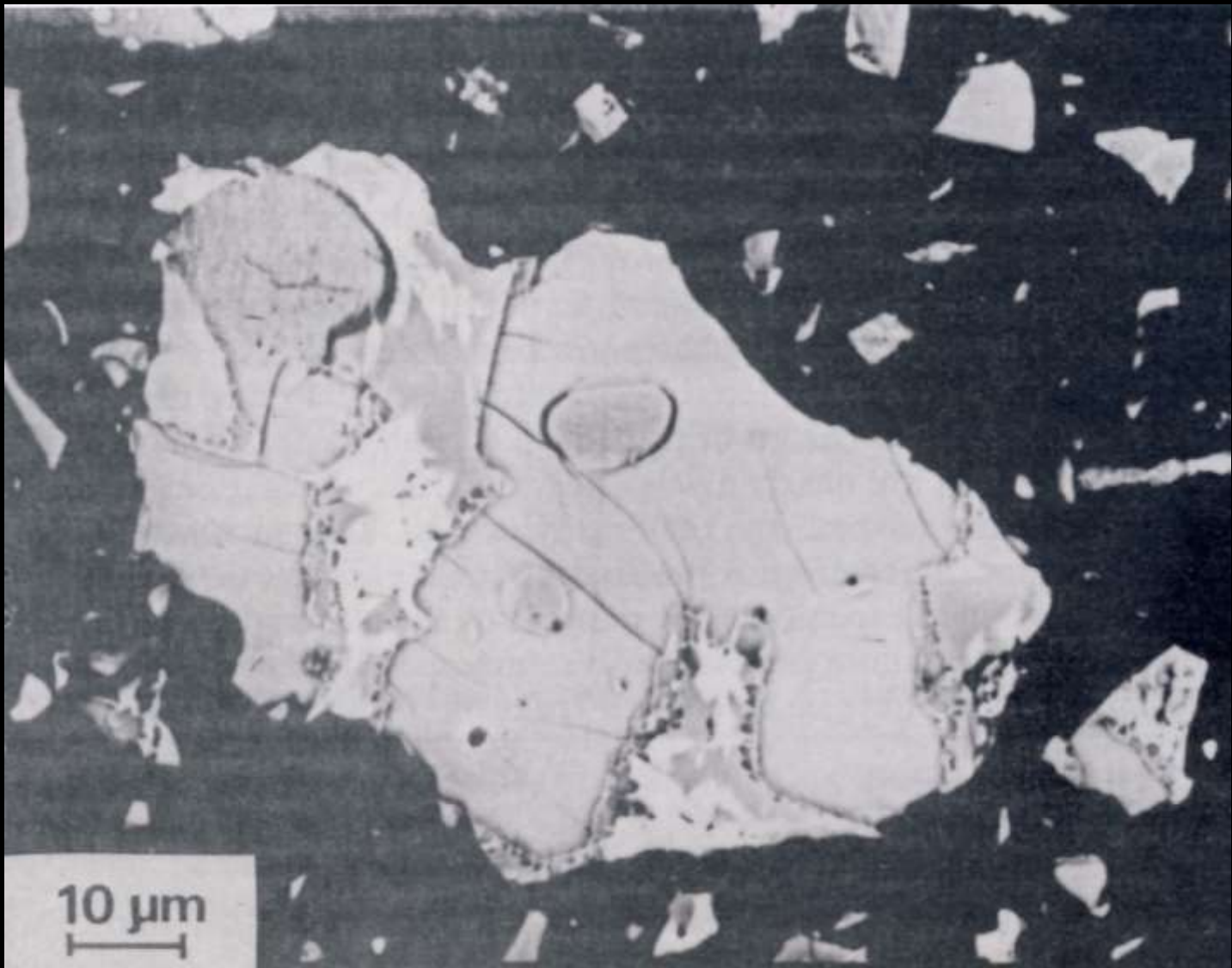
In tutte e quattro le fasi sono presenti impurezze di svariati elementi sotto forma di sostituzioni isomorfe.



Microstruttura del clinker.



Microstruttura del clinker, i grani scuri sono di belite.



Microstruttura del clinker, cristallo di belite in una matrice di ferriti e alluminati.

Il calcolo di Bogue

Calcolo di Bogue

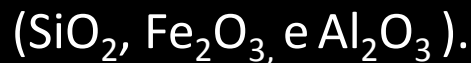
Il calcolo di Bogue serve per determinare, attraverso alcune semplici regole, la quantità delle quattro più importanti fasi mineralogiche del cemento portland:



conoscendo le percentuali dei quattro ossidi che si originano dalla decomposizione del calcare



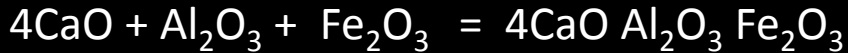
e dell'argilla



Calcolo di Bogue

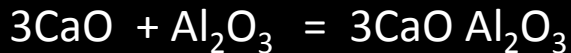
1a Regola:

tutto l' Fe_2O_3 andrà a formare il C_4AF secondo la reazione:



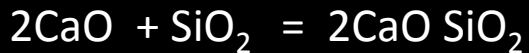
2a Regola:

l' Al_2O_3 rimanente andrà a formare il C_3A secondo la reazione:



3a Regola:

l' SiO_2 andrà a formare il C_2S secondo la reazione:



4a Regola:

Tutto il CaO rimanente reagirà con parte del C_2S per formare C_3S secondo la reazione:



Esempio di calcolo di Bogue

Percentuali degli ossidi di partenza

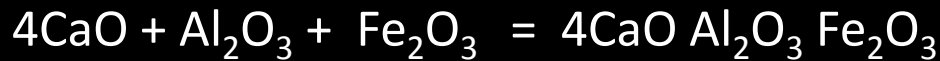
SiO ₂	20 %	(PM = 60)
Al ₂ O ₃	7 %	(PM = 102)
Fe ₂ O ₃	3 %	(PM = 160)
CaO	66 %	(PM = 56)
Altri	4 %	

Essendo percentuali in peso e considerando 1000 g come base di calcolo avremo:

200 grammi di	SiO ₂	cioè 200/60	=	3.33 moli
70 grammi di	Al ₂ O ₃	cioè 70/102	=	0.68 moli
30 grammi di	Fe ₂ O ₃	cioè 30/160	=	0.19 moli
660 grammi di	CaO	cioè 660/56	=	11.78 moli

1a Regola:

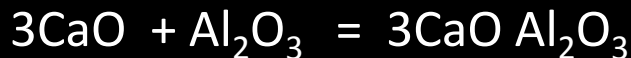
tutto l' Fe_2O_3 andrà a formare il C_4AF secondo la reazione:



Quindi 0.19 di F reagiranno con 0.19 moli di A e con 4×0.19 (cioè 0.76) moli di C per dare 0.19 moli di C_4AF

2a Regola:

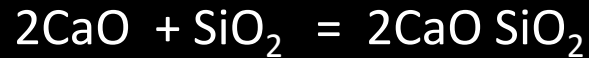
l' Al_2O_3 rimanente andrà a formare il C_3A secondo la reazione:



Quindi $0.68 - 0.19$ (cioè 0.49) moli di A reagiranno con 3×0.49 (cioè 1.47) moli di C per dare 0.49 moli di C_3A

3a Regola:

l'SiO₂ andrà a formare il C₂S secondo la reazione:



Quindi 3.33 moli di SiO₂ reagiranno con 2 x 3.33 (cioè 6.66) moli di C per dare 3.33 moli di C₂S

4a Regola:

Tutto il CaO rimanente reagirà con parte del C₂S per formare C₃S secondo la reazione:



Quindi 2.89 moli di CaO (cioè 11.78 – 0.76 – 1.47 – 6.66) reagiranno con 2.89 moli di C₂S per dare 2.89 moli di C₃S

Alla fine del processo quindi avremo:

0.19 moli di C_4AF

0.49 moli di C_3A

0.44 (cioè $3.33 - 2.89$) moli di C_2S

2.89 moli di C_3S

Moltiplicando ora per i rispettivi pesi molecolari ricaveremo le quantità in grammi delle quattro fasi mineralogiche:

$$0.19 \text{ moli di } C_4AF \times 486 \text{ (PM)} = 92.3 \text{ grammi, pari al } 9.2 \%$$

$$0.49 \text{ moli di } C_3A \times 270 \text{ (PM)} = 132.3 \text{ grammi, pari al } 13.2 \%$$

$$0.44 \text{ (cioè } 3.33 - 2.89) \text{ moli di } C_2S \times 172 \text{ (PM)} = 75.9 \text{ grammi, pari al } 7.6 \%$$

$$2.89 \text{ moli di } C_3S \times 228 \text{ (PM)} = 658.9 \text{ grammi, pari al } 65.9 \%$$

Esempio di calcolo di Bogue

Percentuali degli ossidi di partenza

SiO ₂	23 %	(PM = 60)
Al ₂ O ₃	6.5 %	(PM = 102)
Fe ₂ O ₃	5.5 %	(PM = 160)
CaO	65 %	(PM = 56)

Essendo percentuali in peso e considerando 1000 g come base di calcolo avremo:

230 grammi di	SiO ₂	cioè 230/60	=	3.83 moli
65 grammi di	Al ₂ O ₃	cioè 65/102	=	0.63 moli
55 grammi di	Fe ₂ O ₃	cioè 55/160	=	0.34 moli
650 grammi di	CaO	cioè 650/56	=	11.60 moli

1a Regola:

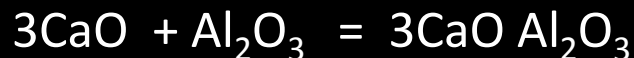
tutto l' Fe_2O_3 andrà a formare il C_4AF secondo la reazione:



Quindi 0.34 di F reagiranno con 0.34 moli di A e con 4×0.34 (cioè 1.36) moli di C per dare 0.34 moli di C_4AF

2a Regola:

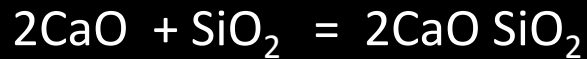
l' Al_2O_3 rimanente andrà a formare il C_3A secondo la reazione:



Quindi $0.63 - 0.34$ (cioè 0.29) moli di A reagiranno con 3×0.29 (cioè 0.87) moli di C per dare 0.29 moli di C_3A

3a Regola:

l'SiO₂ andrà a formare il C₂S secondo la reazione:



Quindi 3.83 moli di SiO₂ reagiranno con 2 x 3.83 (cioè 7.66) moli di C per dare 3.83 moli di C₂S

4a Regola:

Tutto il CaO rimanente reagirà con parte del C₂S per formare C₃S secondo la reazione:



Quindi 1.71 moli di CaO (cioè 11.60 – 1.36 – 0.87 – 7.66) reagiranno con 1.71 moli di C₂S per dare 1.71 moli di C₃S

Alla fine del processo quindi avremo:

0.34 moli di C_4AF

0.29 moli di C_3A

2.12 (cioè $3.83 - 1.71$) moli di C_2S

1.71 moli di C_3S

Primo esempio:

0.19 moli di C_4AF

0.49 moli di C_3A

0.44 moli di C_2S

2.89 moli di C_3S

Secondo esempio:

0.34 moli di C_4AF

0.29 moli di C_3A

2.12 (cioè $3.83 - 1.71$) moli di C_2S

1.71 moli di C_3S







Il Cemento

La Macinazione

La macinazione viene eseguita con l'utilizzo di mulini rotanti costituiti da cilindri orizzontali contenenti sfere o barre d'acciaio.

La reattività del cemento è funzione della granulometria ottenuta.

Particelle di dimensione superiore ai 45 μm richiedono tempi molto lunghi per idratarsi

Particelle di dimensione superiore ai 75 μm non si idratano mai completamente

La granulometria delle polveri influisce sulla lavorabilità degli impasti...

... Sulla quantità di gesso e sul costo del cemento

Il Cemento

La Macinazione

In un cemento moderno...

90% in peso ha delle dimensioni dei granuli comprese tra 2-90 μm ...

7-9% è minore di 2 μm ...

0-4% è maggiore di 90 μm ...

Nonostante questi vantaggi la macinazione non viene spinta oltre le frazioni più piccole descritte. Questo perché il costo risulta eccessivo ed inoltre il calore sviluppato velocemente dalle reazioni di idratazione può causare la compromissione del getto.

Il Cemento

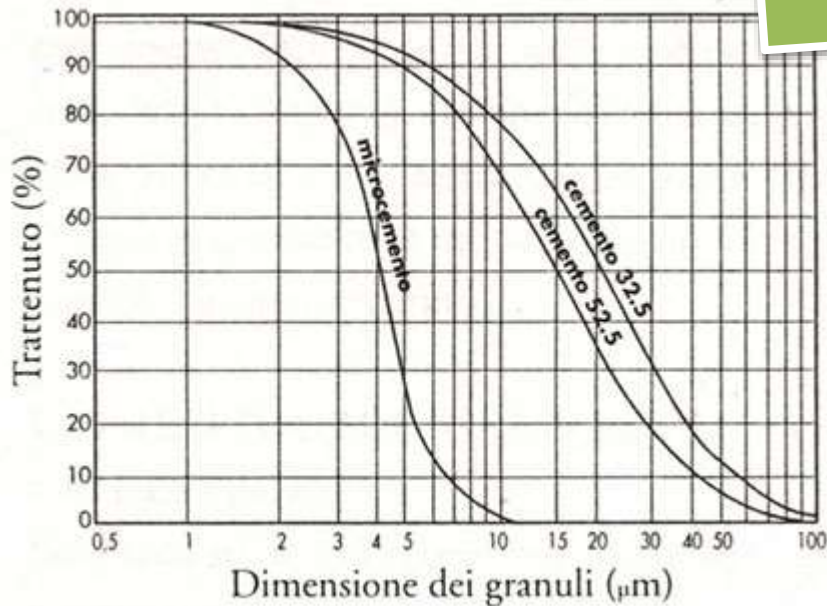
La Macinazione

In un cemento moderno...

90% in peso ha delle dimensioni dei granuli comprese tra 2-90 μm ...

7-9% è minore di 2 μm ...

0-4% è maggiore di 90 μm ...



Il Cemento

La Macinazione – Area superficiale

Durante la macinazione il materiale viene frantumato e si generano nuove superfici

Immaginiamo la superficie di un cubo...

Ora dividiamo quel cubo in altri piccoli cubi e calcoliamo la superficie laterale totale...

... si potrà notare che essa è superiore alla precedente

Il Cemento

Aggiunte

Alcuni minerali possono essere macinati ed aggiunti al clinker di cemento portland. Tra questi le pozzolane naturali o artificiali. Le pozzolane non hanno di per loro proprietà leganti, ma le acquisiscono in presenza di calce.

Pozzolane naturali: materiale prodotto da eruzioni vulcaniche.

Pozzolane artificiali: ceneri volanti prodotte dalla combustione del carbone nelle centrali termoelettriche. Per ogni tonnellata di carbone si producono 150 kg di ceneri volanti. Si formano ad elevate temperature, fondono e poi subendo un brusco raffreddamento solidificano. Alta reattività dovuta alla struttura vetrosa.

Il Cemento

Aggiunte

Alcuni minerali possono essere macinati ed aggiunti al clinker di cemento portland. Tra questi le pozzolane naturali o artificiali. Le pozzolane non hanno di per loro proprietà leganti, ma le acquisiscono in presenza di calce.

Fumo di Silice: sottoprodotto derivante dal forno elettrico del silicio o leghe ferro-silicio. Si presenta sottoforma di una polvere finissima con superficie specifica $13.000/30.000\text{m}^2/\text{kg}$ contro i $300-400\text{m}^2/\text{kg}$ e struttura vetrosa.

Loppa d'altoforno granulata: deriva dalla produzione della ghisa è composta da ossidi di calcio, silicio e alluminio con una composizione non molto diversa dal clinker. Se raffreddata bruscamente all'uscita del forno avrà delle caratteristiche idrauliche, viceversa si comporterà come un materiale inerte.

Il Cemento

Classificazione dei Cementi – UNI EN 197 - 1

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		UNI EN 197/1:2001 - Composizione (Percentuale in massa) ^a										Costituenti secondari	
			Costituenti principali											
			Clinker K	Loppa di altoforno S	Fumi di silice Db)	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato T	Calcare			
Naturale P	Naturale calcinata Q	Silicea V				Calcica W	L	LL						
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
CEM II/B-LL		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
Cemento Portland composito ^{c)}	CEM II/A-M	80-94	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	-	-	-	0-5	
	CEM II/B-M	65-79	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	-	-	-	0-5	
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Cemento pozzolanico ^{c)}	CEM IV/A	65-89	-	11-35	11-35	11-35	11-35	11-35	-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55	36-55	36-55	36-55	36-55	-	-	-	0-5	
CEM V	Cemento composito ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30	18-30	18-30	18-30	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50	31-50	31-50	31-50	-	-	-	0-5	

a) I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari

b) La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%

c) Nei cementi Portland compositi CEM II/A-M e CEM II/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi CEM V/A e CEM V/B i costituenti principali diversi dal clinker devono essere dichiarati nella denominazione del cemento.

Il Cemento

Classificazione dei Cementi – UNI EN 197 - 1

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		UNI EN 197/1:2001 - Composizione (Percentuale in massa) ^a										Costituenti secondari
			Costituenti principali										
			Clinker	Loppa di altoforno	Fumi di silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare		
						Naturale	Naturale calcinata	Silicea	Calcica				
K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L	LL				
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	Cemento Portland al calcare	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	Cemento Portland composito ^{c)}	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
CEM II/A-M		80-94	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	-	-	0-5	
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM II/B-M	65-79	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	-	-	0-5
	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM III/C		5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Cemento pozzolanico ^{c)}	CEM IV/A	65-89	-	11-35	11-35	11-35	11-35	11-35	-	-	-	0-5
	Cemento pozzolanico ^{c)}	CEM IV/B	45-64	-	36-55	36-55	36-55	36-55	36-55	-	-	-	0-5
CEM V	Cemento composito ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30	18-30	18-30	18-30	-	-	-	0-5
	Cemento composito ^{c)}	CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50	31-50	31-50	31-50	-	-	-	0-5

a) I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari

b) La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%

c) Nei cementi Portland compositi CEM II/A-M e CEM II/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi CEM V/A e CEM V/B i costituenti principali diversi dal clinker devono essere dichiarati nella denominazione del cemento.

esempio:
UNI EN 197 -1
CEM I 42.5R

CEM + numero romano + lettere che individuano tipo e sottotipo + resistenza normalizzata

Il Cemento

Classificazione dei Cementi – Classi di resistenza

Le classi di resistenza sono 3: 32.5 – 42.5 – 52.5.

Ciascuna è suddivisa in due classi per distinguere i cementi normali N, dai cementi a presa rapida R.

I tre parametri 32.5 – 42.5 – 52.5 individuano la resistenza meccanica di una malta cementizia confezionata con rapporto acqua cemento (a/c) pari a 0.5 e un rapporto sabbia/cemento pari 3. la misura di tale resistenza a compressione viene eseguita secondo la norma EN 196 – 1.

Il Cemento

Classificazione dei Cementi – Classi di resistenza

Classe	Rc MPa 2 giorni	Rc MPa 7 giorni	Rc MPa Normal. 28 giorni	Rc MPa Normal. 28 giorni	Inizio presa minuti	Espansione mm
32.5		> 16	> 32.5	< 52.5	> 60	< 10
32.5 R	> 10		> 32.5	< 52.5	> 60	< 10
42.5	> 10		> 42.5	< 62.5	> 60	< 10
42.5 R	> 20		> 42.5	< 62.5	> 60	< 10
52.5	> 20		> 52.5		> 45	< 10
52.5 R	> 30		> 52.5		> 45	< 10

Il Cemento

Classificazione dei Cementi – Classi di resistenza

Su di un sacco di cemento troveremo lettere e numeri che ci permetteranno di conoscerne le principali caratteristiche; ad esempio la scritta CEM II/A - P, 32.5 R sarà relativa ad un cemento di miscela (II) con un'aggiunta di pozzolana naturale (P) in quantità compresa tra il 6% ed il 20% (A), con una resistenza a 2 giorni (R) maggiore di 10 MPa ed una a 28 giorni compresa tra 32.5 e 52.5 MPa.

mentre alla scritta CEM II/B - L, 42.5 corrisponderà un cemento con una percentuale di calcare (L) tra il 21% ed il 35 % (B) con una resistenza a due giorni maggiore di 10 MPa ed una a 28 giorni compresa tra 42.5 e 62.5 MPa.

Idratazione del Cemento

Il Cemento

L'Idratazione



Pasta Cementizia

Il Cemento

L'Idratazione

Il processo di idratazione porta alla formazione di prodotti con solubilità molto bassa.

Inizialmente la pasta è lavorabile in quanto l'acqua al suo interno è libera di far scorrere le polveri tra loro

I composti che vanno a formarsi hanno molecole d'acqua sulla loro struttura e quindi la quantità di acqua libera si riduce.

La lavorabilità diminuisce via via che l'idratazione procede. L'impasto perde di plasticità.

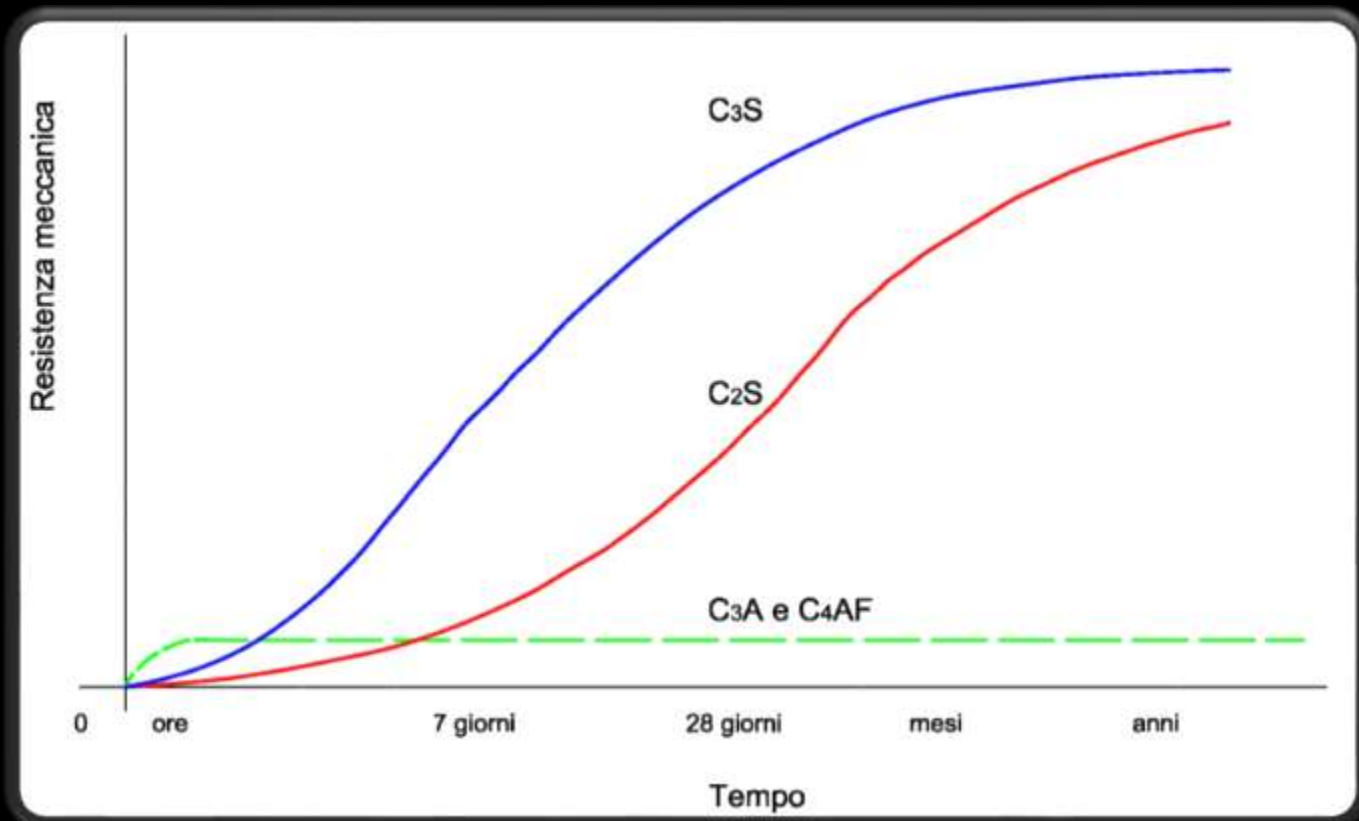
Le diverse fasi sono: impasto, lavorazione, inizio presa, termine presa, indurimento.

Mentre viene definita stagionatura o maturazione quel periodo di controllo delle condizioni, quali umidità relativa, al fine di ottenere una completa idratazione del cemento

Il Cemento

L'Idratazione

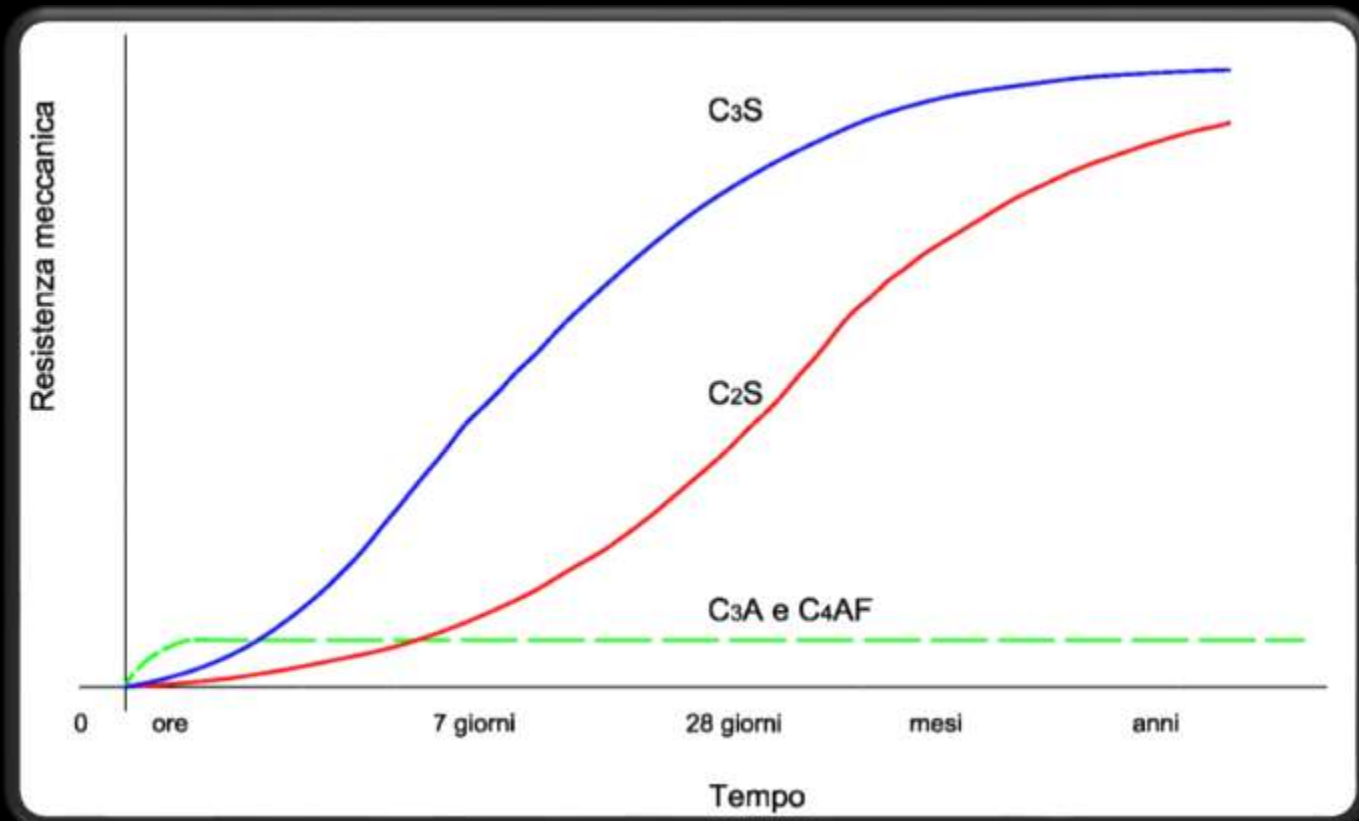
L'idratazione degli alluminati e dei ferroalluminati produce degli idrati cristallini con una reazione fortemente esotermica, in realtà i primi danno vita a reazioni leggermente meno esotermiche e si produce a velocità lievemente inferiori.



Il Cemento

L'Idratazione

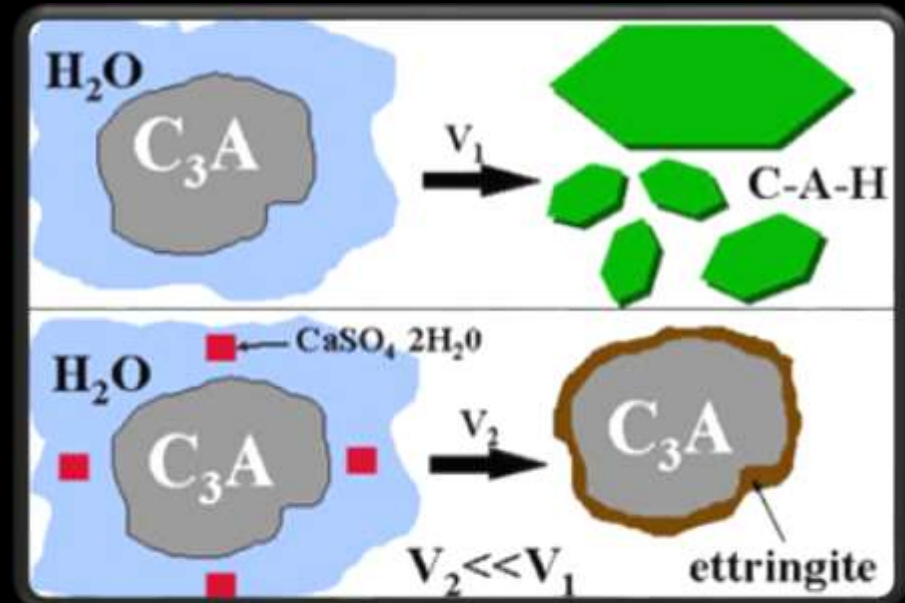
In generale le reazioni degli alluminati sono talmente veloci che devono essere rallentate. In caso contrario, l'impasto perde la plasticità nel giro di pochi minuti, cioè in un tempo insufficiente perché possa essere messo in opera e costipato.



Il Cemento

L'Idratazione

Per rallentare questo processo perciò viene utilizzato il gesso. A contatto con l'acqua il gesso libera ioni Ca^{2+} e SO_4^{2-} che reagiscono con gli ioni alluminati presenti per formare un trisolfato (l'ettringite) che successivamente tende a trasformarsi in monosolfato.



L'ettringite ricopre la superficie degli alluminati e ferroalluminati ostacolando la loro idratazione e perciò rallentando la presa.

Il Cemento

L'Idratazione

Reattività del C_3S nel Clinker	Disponibilità di solfati in soluzione	Periodo di idratazione			
		< 10 min	10 – 45 min	1 – 2 ore	2 -4 ore
Caso I		lavorabile	lavorabile	Meno lavorabile	Presenza normale
bassa	bassa				
Caso II		lavorabile	Meno lavorabile	Presenza normale	
alta	alta				
Caso III		lavorabile	Presenza rapida		
alta	bassa				
Caso IV		Presenza istantanea			
alta	nulla/molto bassa				
Caso V		Falsa Presenza			
bassa	alta				

Il Cemento

L'Idratazione

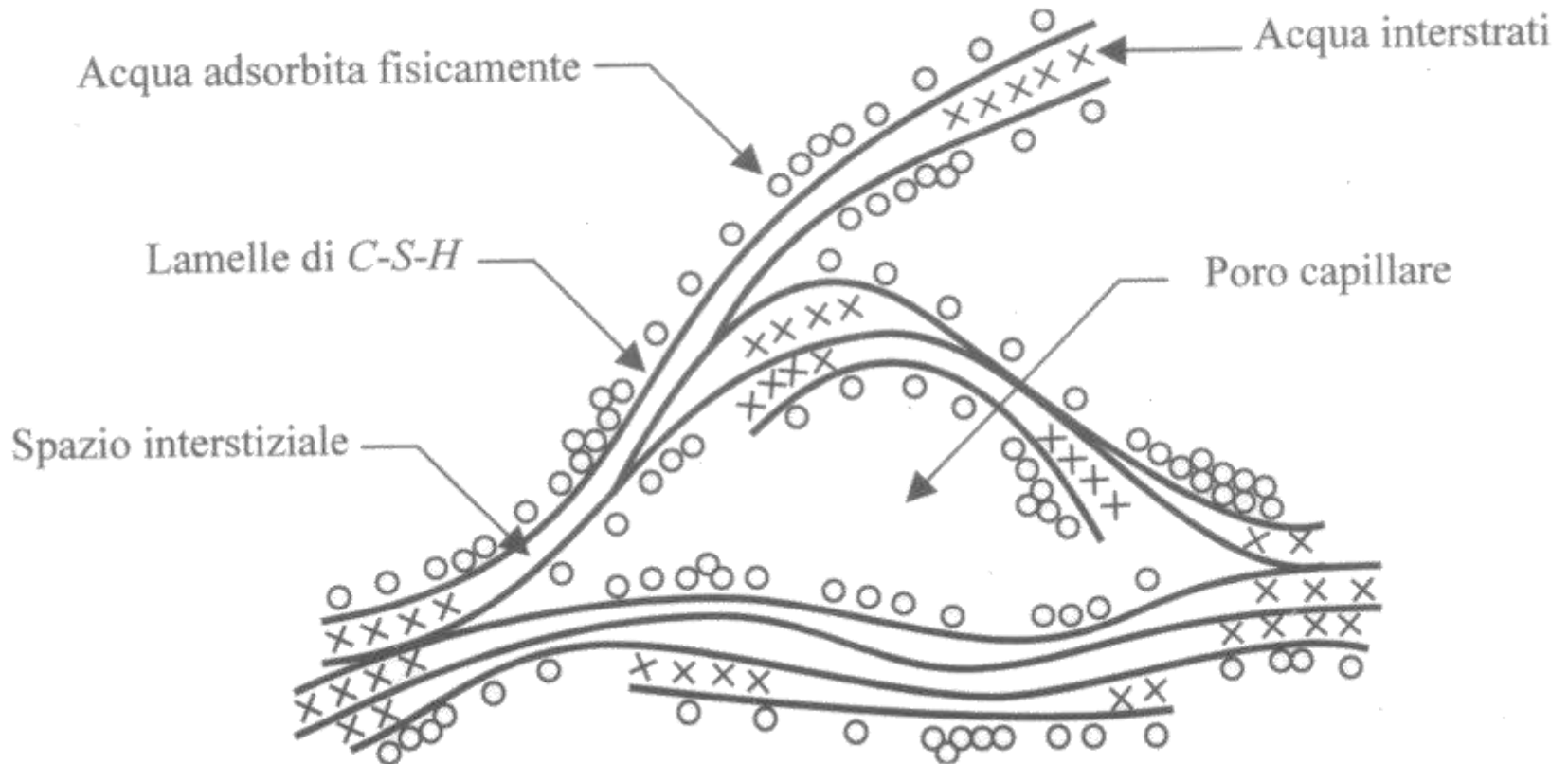
L'idratazione dei due silicati, tricalcico e bicalcico, è invece responsabile della resistenza meccanica del cemento e dà luogo a una famiglia di silicati di calcio idrati strutturalmente simili.

Questo prodotto viene indicato come C-S-H o gel di cemento. Presenta una struttura di dimensioni molto piccole costituita da piccole particelle solide a forma di filamenti o lamelle estremamente sottili, dello spessore dell'ordine del nanometro che si estendono per decine o centinaia di nanometri.

Il Cemento

L'Idratazione

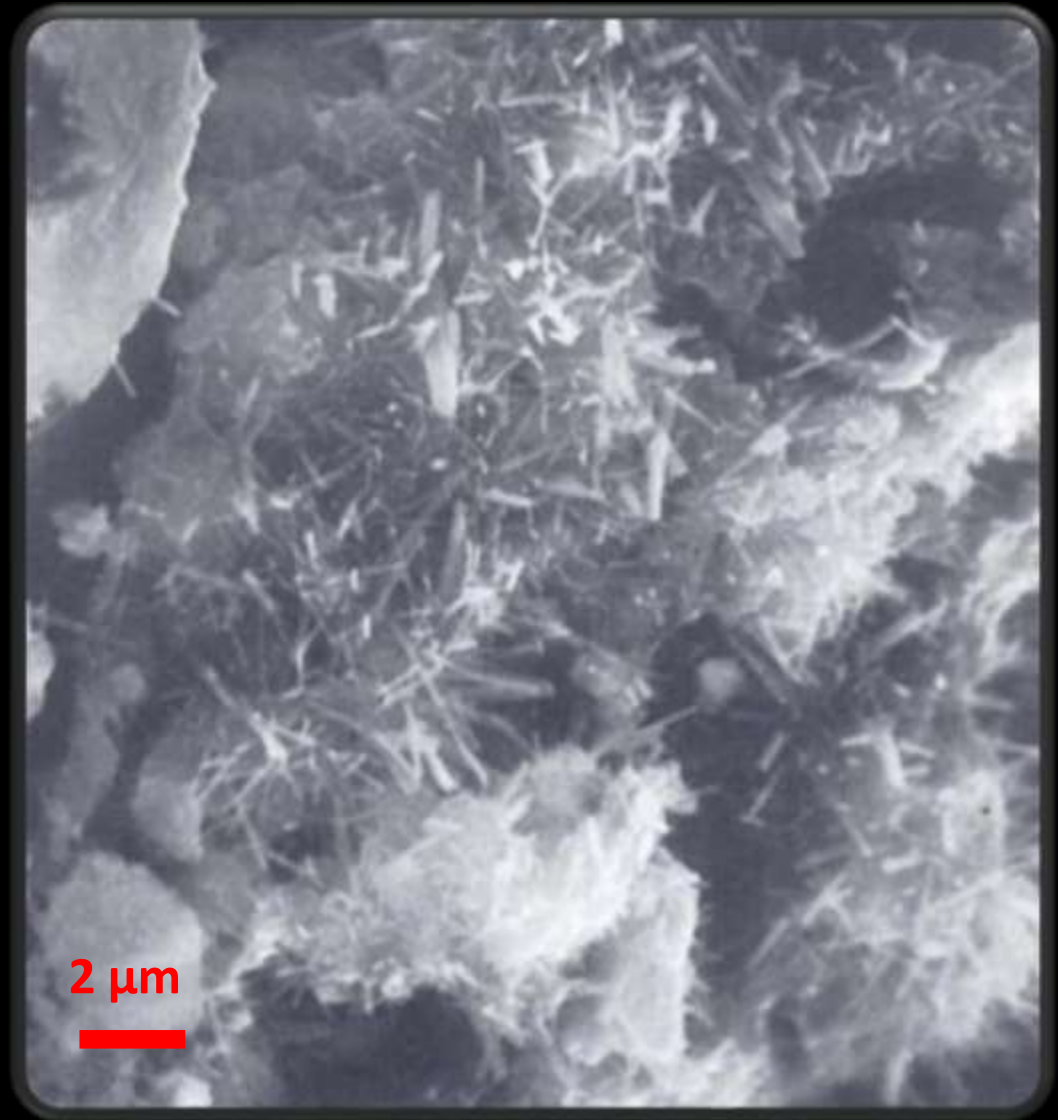
Tra le lamelle rimangono degli spazi dello stesso ordine di grandezza (nm) che danno luogo ai pori del gel. L'acqua è presente in diverse forme.



Il Cemento

L'Idratazione

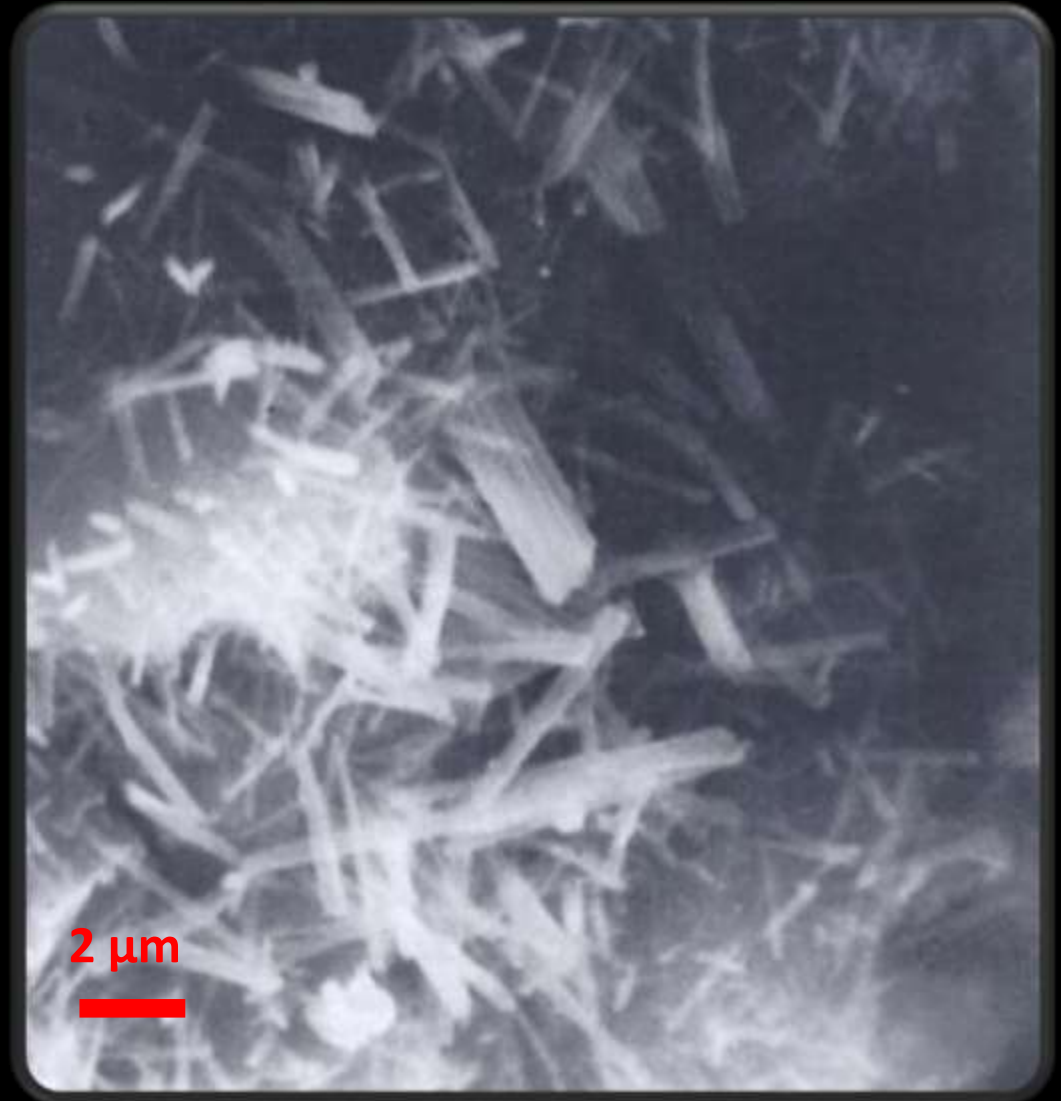
Microfotografia di una pasta di cemento portland



Il Cemento

L'Idratazione

Microfotografia di una pasta di cemento portland



Il Cemento

L'Idratazione

L'idratazione dei silicati produce anche cristalli esagonali di idrossido di calcio (portlandite) di dimensioni molto maggiori delle dimensioni delle lamelle che costituiscono il C-H-S.

Questi cristalli sono facilmente soggetti a frattura a causa del debole legame tra gli strati che lo costituiscono.

I prodotti di idratazione hanno un volume maggiore di quello del cemento da cui provengono e quindi, al procedere dell'idratazione, occupano gli spazi tra le particelle di cemento, inizialmente occupati dall'acqua.

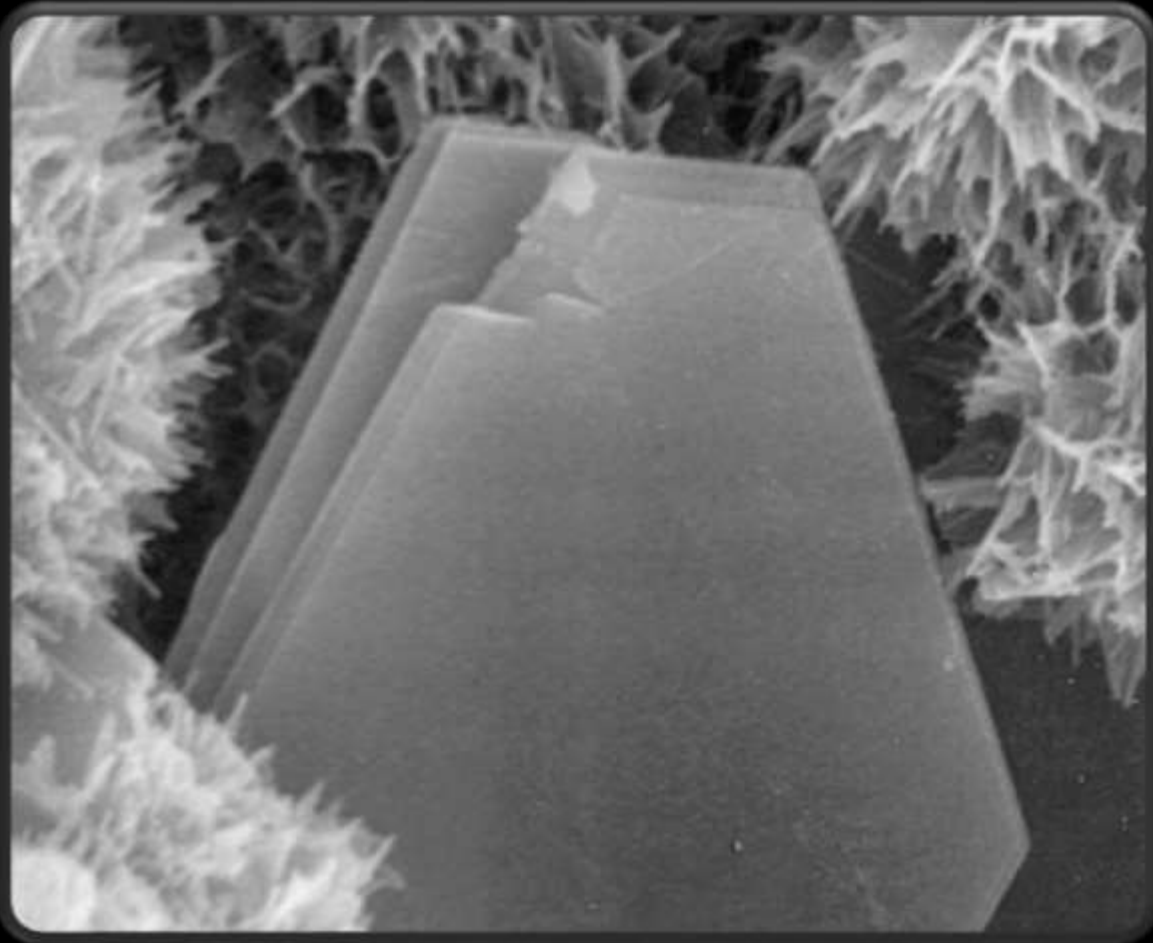
L'idratazione prosegue nel tempo con velocità decrescente in quanto il C-S-H che si deposita sui grani di cemento ostacola il processo di diffusione dell'acqua verso il nucleo non ancora idratato. Tutto ciò comporta una diminuzione progressiva della porosità della pasta di cemento che comporta da una parte l'aumento della resistenza meccanica e dall'altro la riduzione della permeabilità della pasta di cemento.

Il Cemento

L'Idratazione

L'idratazione dei silicati produce anche cristalli esagonali di idrossido di calcio Ca(OH)_2 (portlandite) di dimensioni molto maggiori delle dimensioni delle lamelle che costituiscono il C-H-S.

Questi cristalli sono facilmente soggetti a frattura a causa del debole legame tra gli strati che lo costituiscono...

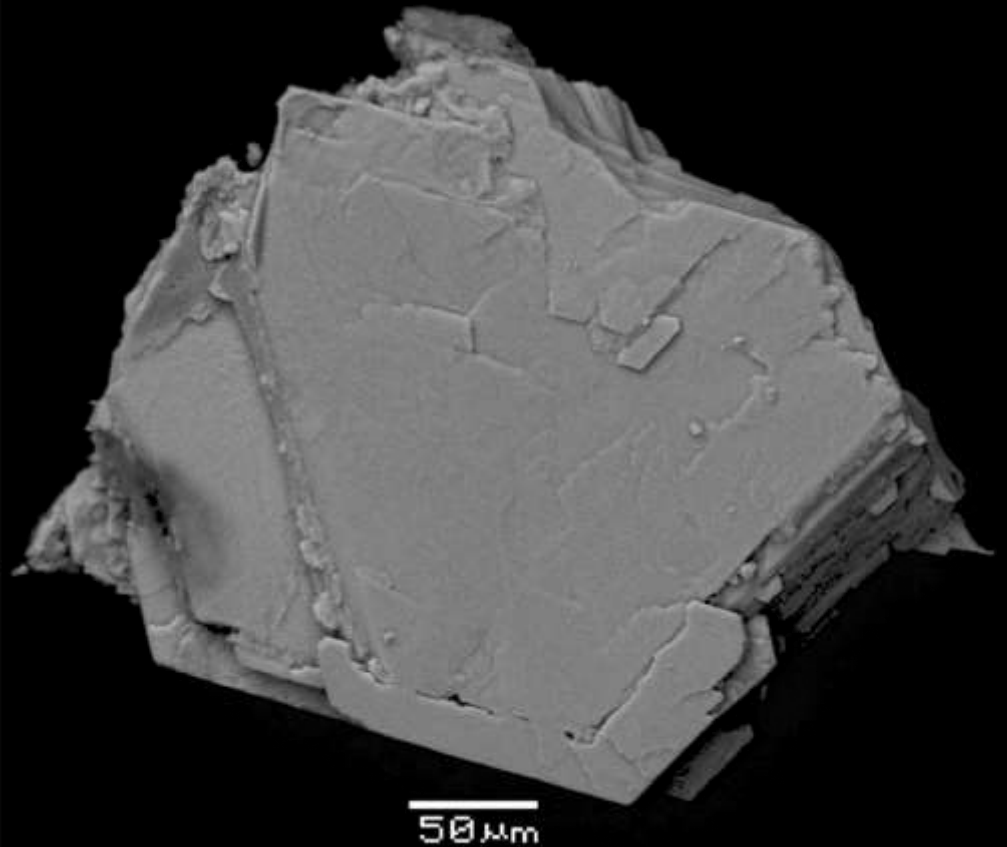


Il Cemento

L'Idratazione

... Quindi non contribuiscono alla resistenza meccanica del cemento.

La loro presenza è però molto importante perché mantengono il calcestruzzo alcalino ritardando la corrosione dei ferri d'armatura.





Studenti_Studiare

Puoi apprendere e memorizzare i concetti chiave di un esame perfettamente, ma se ci impieghi 1 anno per ogni esame la tua carriera universitaria è destinata a fallire. Avere successo all'Università significa essere in grado di gestire efficacemente risorse scarse (tempo, focus, concentrazione, energia, etc.). Un metodo di studio completo non può prescindere da strategie di organizzazione dello studio.

