



# Unidad de Aprendizaje: Materiales Para Ingeniería Civil

## **UNIDAD DE COMPETENCIA VI: Aglomerantes. Tema 6.3. Cemento Hidráulico**

Por: Ing. María Esther Antonio Salinas

Fecha: Agosto 2015.



## Justificación académica.



**El material didáctico multimedia es necesario en la Unidad de Aprendizaje denominada Materiales para Ingeniería Civil, que se imparte en la Facultad de Ingeniería de la UAEMEX, en el tema del cemento portland para explicar su forma de fabricación, pruebas para evaluar su calidad y modelos matemáticos que expliquen su comportamiento y deterioro, usando diapositivas.**

**Se complementa con la realización de practicas de laboratorio, con el fin de que no sea la explicación teórica la única forma de realizar la practica de enseñanza-aprendizaje.**



## Guión explicativo para el empleo del material.



**El presente material didáctico comprende el contenido de la Unidad de Competencia 6.3. de la Unidad de Aprendizaje denominada Materiales para Ingeniería Civil, que se imparte en la Facultad de Ingeniería de la UAEMEX. Comprende 3 temas principales, donde se busca que el alumno adquiera las competencias de identificar como las propiedades químicas, físicas y mecánicas de los materiales, en un ambiente de servicio definen su selección en una obra.**

**Se sugiere que se presente en 2 sesiones de 1.5 hrs.**

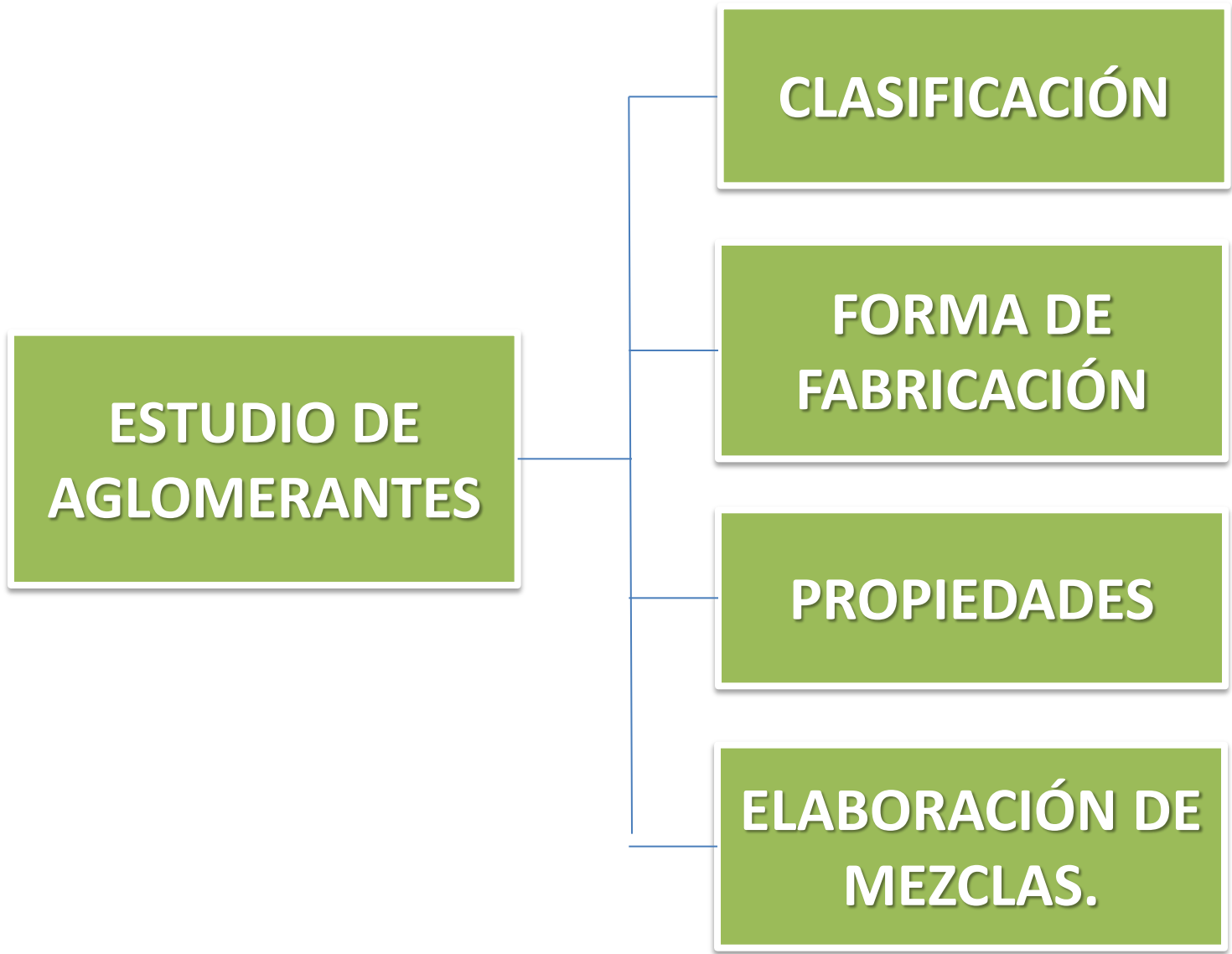


## Contenido.

1. Contextualización de la unidad de Aprendizaje.  
Evaluación diagnóstica.
2. Unidad de Competencia I: Selección y desarrollo de los materiales.
3. Consolidación del conocimiento. Evaluación sesión 1 y 2.



1. Inicio. Identificar la clasificación de los aglomerantes, para ubicar el cemento portland.
2. Describir el proceso de Fabricación, composición química e hidratación del cemento portland. Propiedades del cemento Portland, y representación del modelo de Powers.
3. Revisión de propiedades, tipos, usos y forma en que se deteriora los materiales que utilizan el cemento portland.



**ESTUDIO DE  
AGLOMERANTES**

**CLASIFICACIÓN**

**FORMA DE  
FABRICACIÓN**

**PROPIEDADES**

**ELABORACIÓN DE  
MEZCLAS.**

# CLASIFICACIÓN DE LOS AGLOMERANTES

**PÉTREOS**

**AÉREOS, ejem: Cal, yeso.**

**HIDRÁULICOS. Ejem:  
Cemento Portland,  
Pastocemento**



**HIDROCARBONATADOS**

**Ejem:  
resinas  
polimericas,  
cemento  
asfáltico**



## 6.3. CEMENTO PORTLAND

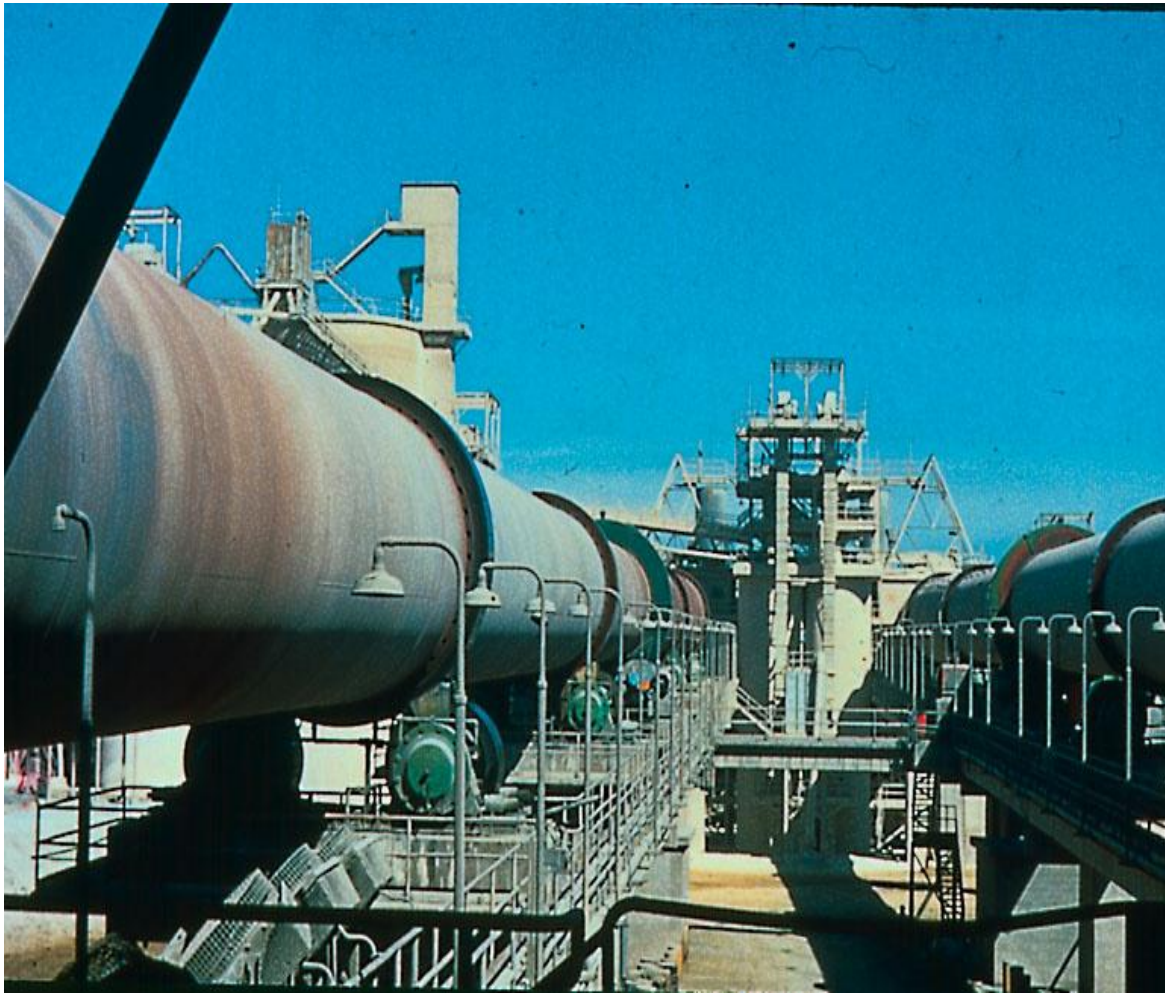
¿Qué diferencias nota en la Piedra de cantera de la isla Portland y un cilindro de concreto hidráulico fabricado con cemento portland?

Visualmente no existe diferencia, la roca es un material sólido natural y el cilindro de concreto es un material fabricado por el hombre utilizando cemento portland, agua, grava, arena y aditivos.





El cemento portland es un material manufacturado



# FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

## Materia prima

1. Calcio: Caliza, marga, etc. ( $\text{CaO} + \text{CO}_2$ )
2. Sílice: Arcillas, esquistos, etc. ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ )

## Proporción:

1/3 Arcillas

2/3 Caliza

La materia prima se homogeniza antes del tratamiento térmico a  $1400^\circ \text{C}$



Foto aérea de una planta cementera, Holly Hill, Carolina del Sur, EE. UU.

## Extracción de la materia prima: Caliza.







Suministro de materia prima homogeneizada para la fundición.



Interior del horno rotatorio, fundición de la materia prima para formación del clinker.



Horno rotatorio



1400 °C

Materia prima

(Calizas y arcillas)



Clinker + Yeso



Molienda

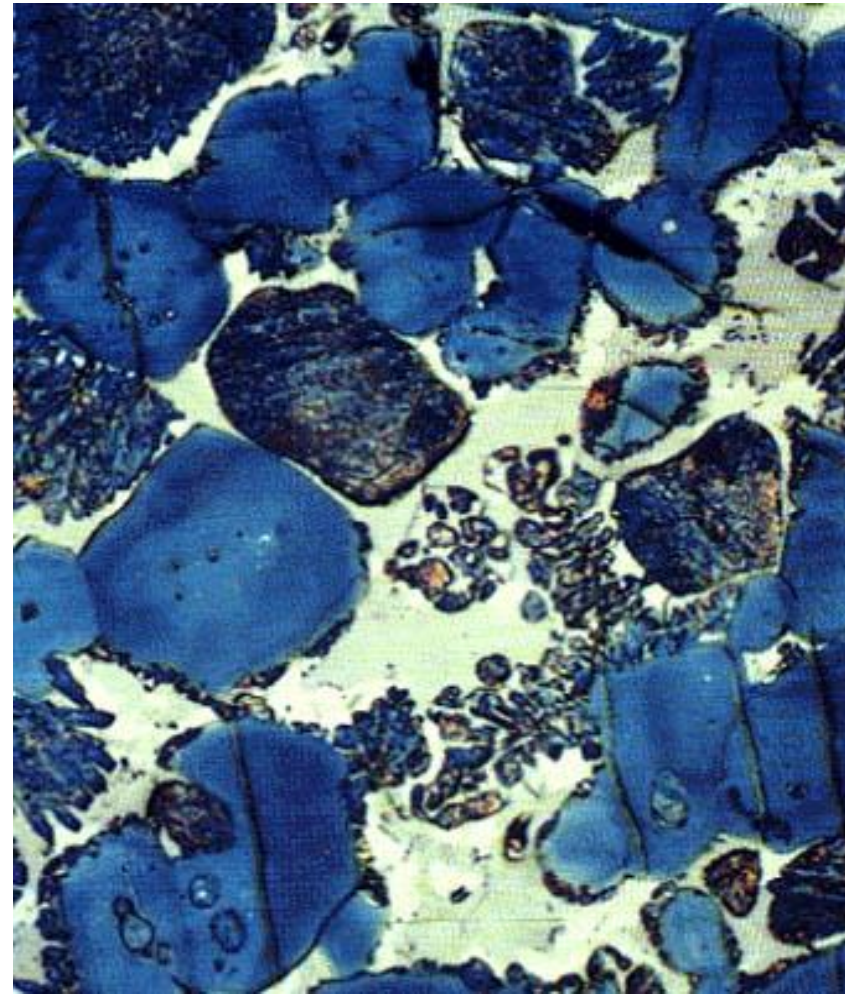
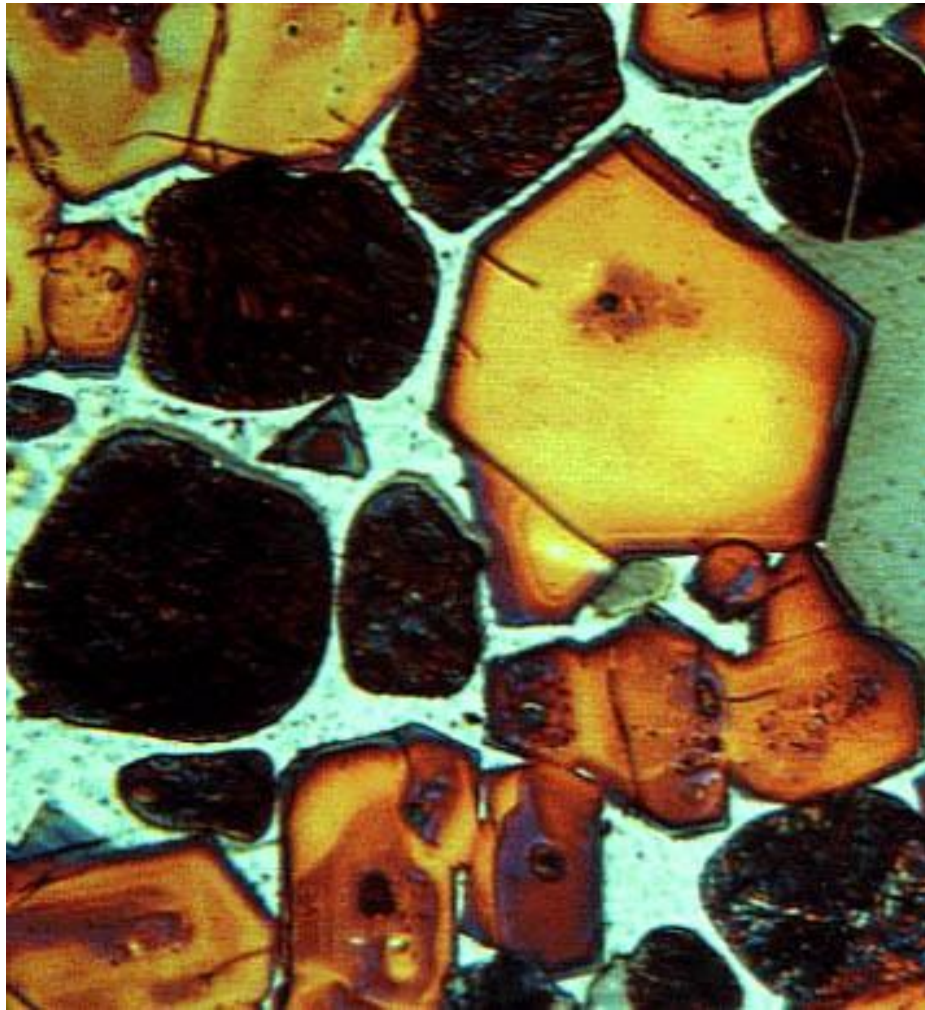


Cemento  
portland



Clinker:

# Microfotografía de los cristales del clinker



## Molienda de clinker



En la molienda se agrega ~ 5% en peso de yeso

95% del material pasa el tamiz No. 325



Yeso

**CEMENTO PORTLAND (NMX-C-414-ONNCCE).** Es un material inorgánico finamente pulverizado, comúnmente conocido como cemento, que al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava, asbesto u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad, se compone de silicatos de calcio y una cantidad dada de yeso.

En 1824, Joseph Aspdin descubre y patentó el cemento Portland. Recibe el nombre de cemento portland por tener color semejante a la roca de la isla Portland, Inglaterra.

El cemento portland se utiliza en la elaboración de concreto hidráulico o morteros hidráulicos, que se aplican en cualquier construcción independiente del tamaño de la obra.

# COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO

La composición química de cementos, los óxidos y los compuestos del clinker se expresan en forma abreviada.

Notación

C (CaO, óxido de calcio)

A (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, alúmina)

S (SiO<sub>2</sub>, sílice)

H (H<sub>2</sub>O, agua)

Compuestos reactivos

C<sub>3</sub>S (Silicato tricálcico)

C<sub>2</sub>S (Silicato dicálcico)

C<sub>3</sub>A (Aluminato tricálcico)

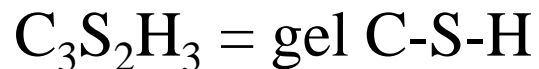
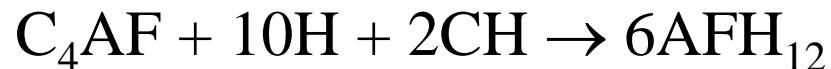
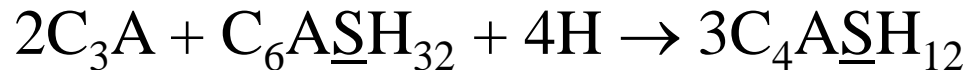
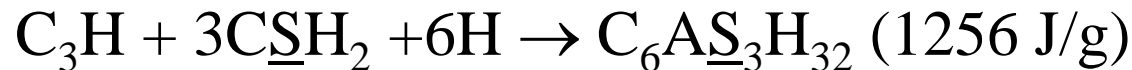
C $\underline{\text{S}}$ H<sub>2</sub> (Yeso)

C<sub>4</sub>AF (Alumino ferrito tretacálcico)

# COMPUESTOS PRINCIPALES DEL CEMENTO PORTLAND



Reacciones de hidratación al combinarse con agua.





CH = Hidroxilo de calcio

$C_6A\underline{S}_3H_{32}$  = ettringita; estable en  $\underline{S}O_4^{-2}$  forma  
 $C_3A + C\underline{S}H_2$ ,

$C_4A\underline{S}H_{12}$  = monosulfato, inestable en  $\underline{S}O_4^{-2}$   
forma  $C_6A\underline{S}H_{32} + C_3A$

$C_3(A,F)H_6$  = hidrominerales

Se tienen diferentes tipos de cemento portland en términos de los constituyentes reactivos.

Silicato tricálcico,  $C_3S$

Silicato dicálcico,  $C_2S$

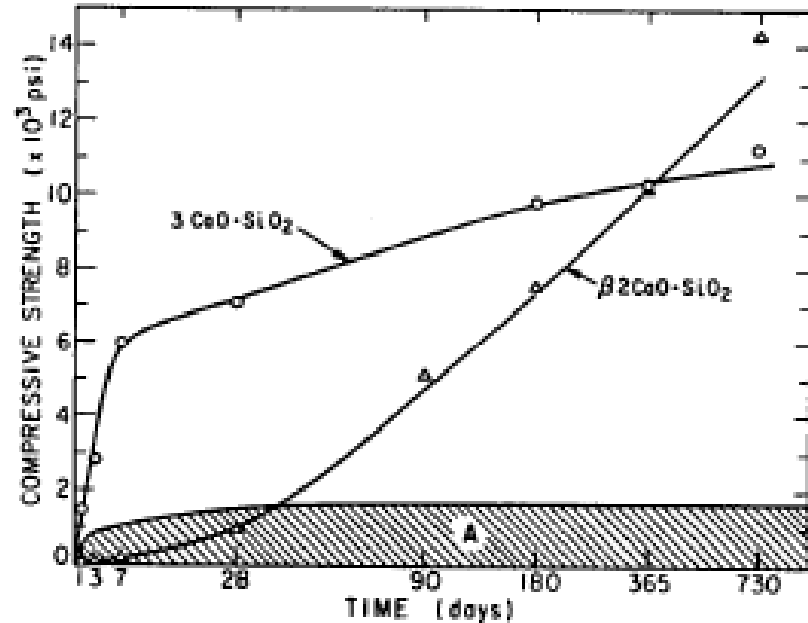
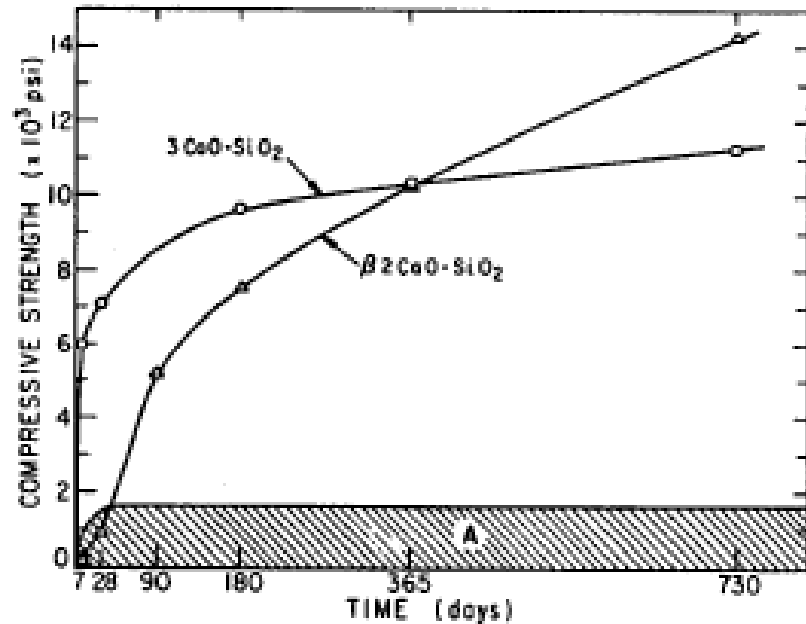
Aluminato tricálcico,  $C_3A$

Alumino ferrito tetracálcico,  $C_4AF$

# Hidratación del cemento portland

Compuesto	Composición	Morfología	Cantidad, % en volumen
C – H - S	Variable $1.5 < C/S < 2$	Poco cristalino, superficie específica alta, energía de enlace alta	50 – 60 %
CH	$Ca(OH)_2$	Cristales hexagonales grandes, superficie específica baja, energía de enlace baja	20 – 25 %
C – A – S - H	$C_6A\bar{S}_3H_{32}$ , ettringita $C_6A\bar{S}H_{12-18}$ , monosulfato	Sólidos longitudinales cristalizados, cristales hexagonales pequeños	15 – 20%

Solamente los silicatos de calcio desarrollan resistencia a la compresión cuando se hidratan.



# Microestructura de la pasta de cemento

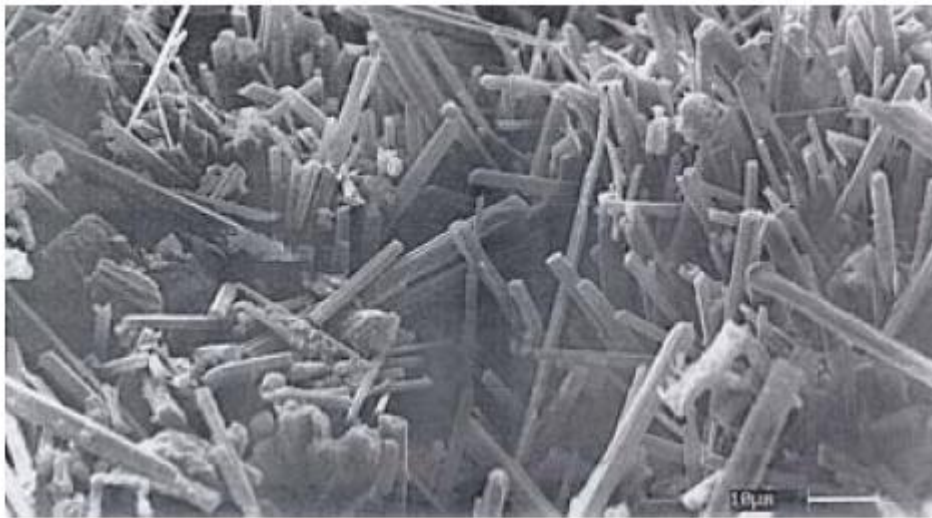


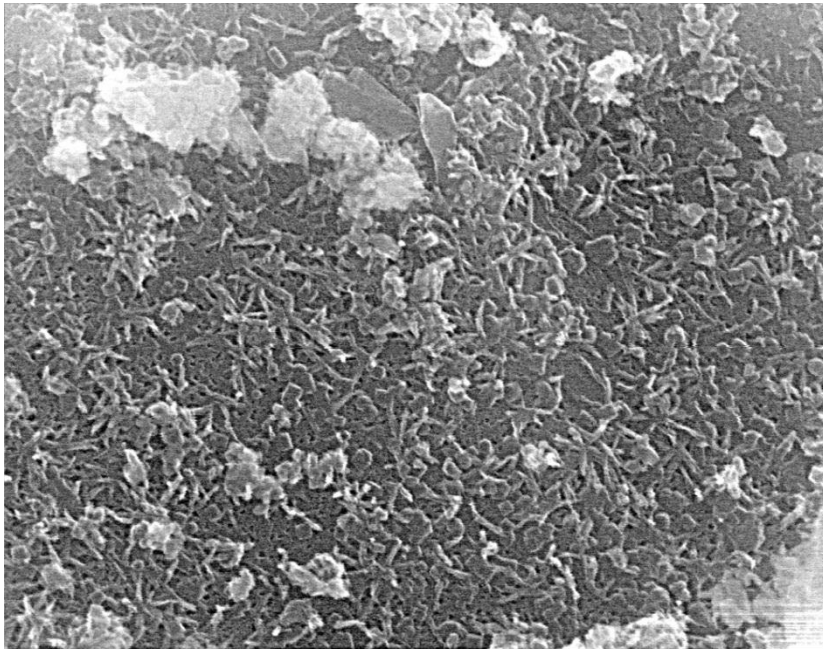
CH



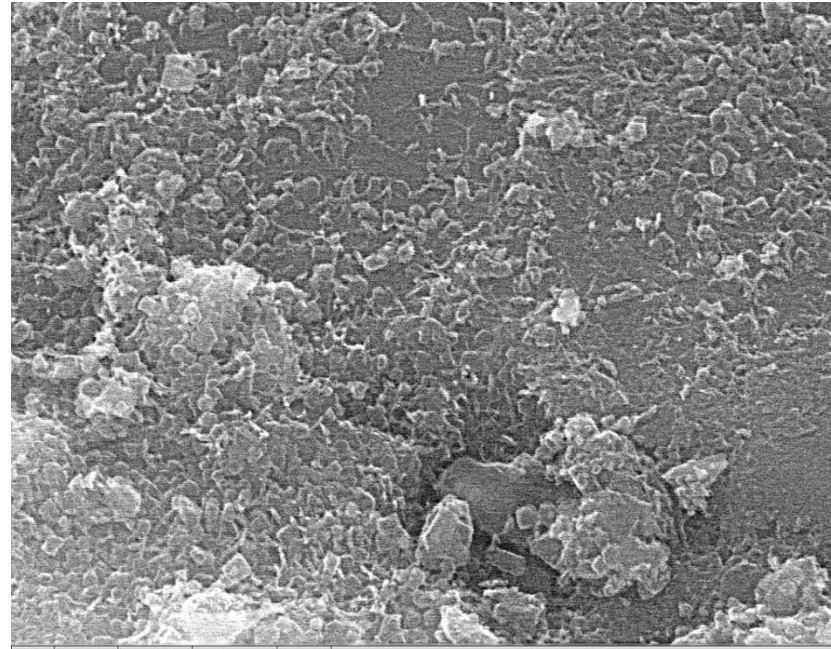
C-S-H

## Ettringite



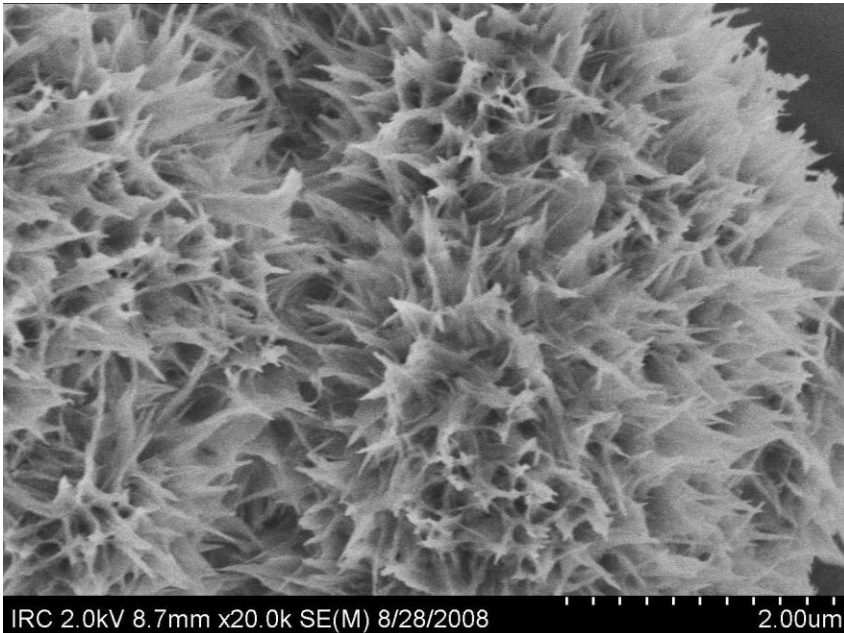


Mic	HV	WD	Mag	Det	Z430 US 5h
XL	30 kV	10 mm	16000 x	GSE	—1 μm—



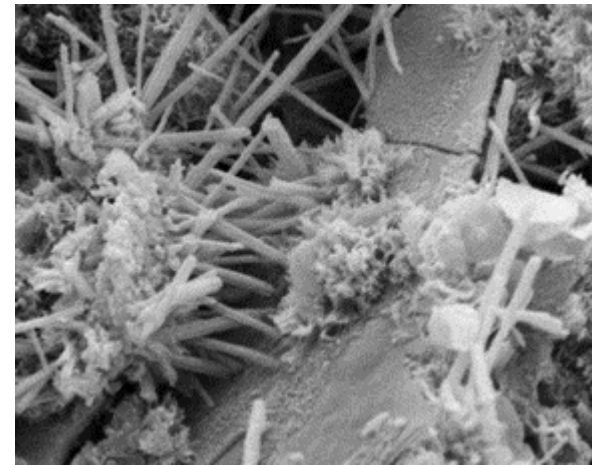
Mic	HV	WD	Mag	Det	Z430 oUS 5h
XL	30 kV	10 mm	16000 x	GSE	—1 μm—

CEM I 42.5; relación a/c = 0.55,  
pruebas después de 24 horas.



Hidrato de silicato de calcio, C – S - H

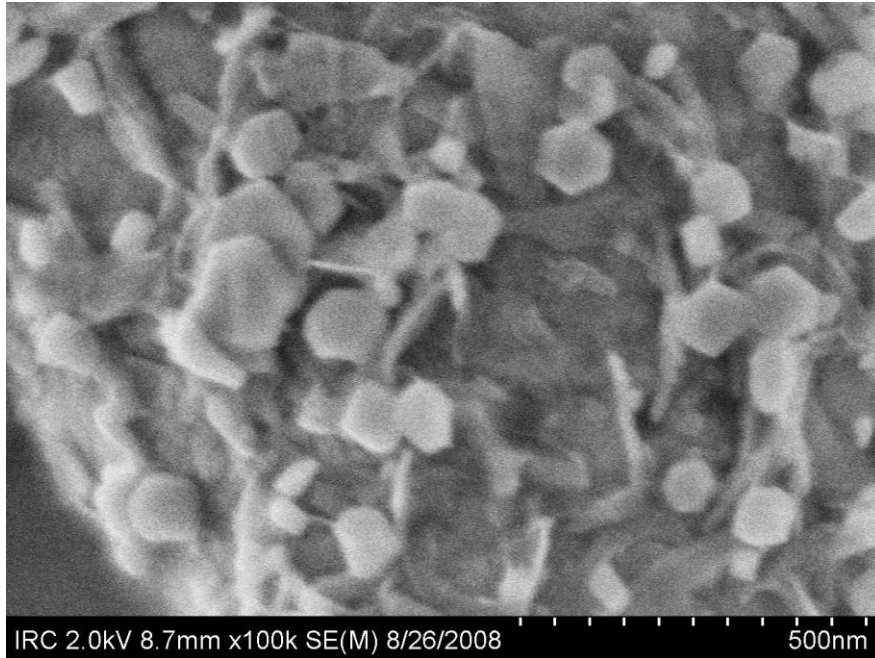
Cristales porosos de C – S – H después de dos semanas de hidratación de C3S (a/c = 0.8). La morfología de estos cristales depende de las condiciones de curado.



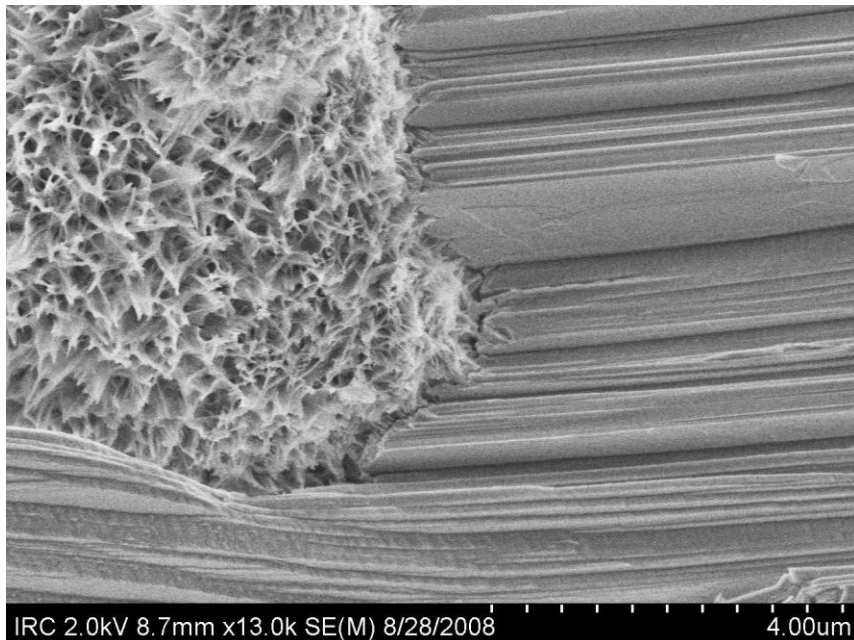
Pasta de cemento hidratada

Dependiente del de hidratación y la composición del cemento portland, se tienen diferentes cristales en la pasta de cemento hidratada. Esta contiene C-S-H, hidroxilo de calcio y ettringita. (cortesía de Mr. Jim Margeson, NRC-IRC).

[www.cementlab.com/cement-art.htm](http://www.cementlab.com/cement-art.htm)



Cristales hexagonales pequeños 100nm de  $\text{Ca(OH)}_2$  sobre la superficie de C3S después de 2.5 horas de hidratación a temperatura ambiente ( $a/c = 0.8$ ). La hidratación se detuvo con isopropanol y secado por vacío.



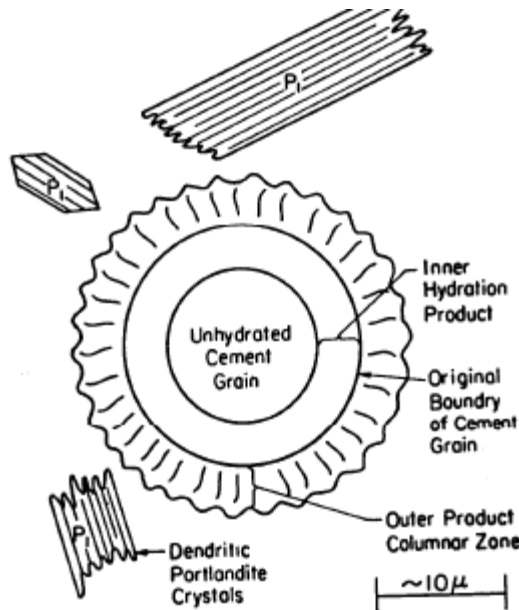
El crecimiento de cristales de C – S – H e hidroxilo de calcio, uno al lado del otro. La fase dominante en la forma de la superficie de contacto se debe a la mayor resistencia del silicato de calcio hidratado.



## Microestructura de la pasta de cemento

Una forma de estudiar la pasta de cemento es considerar un grano de cemento.

La hidratación parcial de un grano de cemento se presenta en forma esquemática.



Falta mucho por entender, pero se tiene información suficiente para formar un modelo mental de la hidratación del cemento.

# Modelo de Powers para la pasta de cemento hidratada

Supuestos:

1. El volumen total de productos de hidratación es igual al volumen de agua + volumen de cemento seco.
2. El agua no evaporable, químicamente combinada con el cemento, representa el 23% de la masa del cemento seco.
3. El volumen de sólidos de hidratación es igual al volumen de cemento seco – el agua no evaporable + 25% de esta agua.
4. Los poros gel equivalen a una porosidad del 28 %, una propiedad de la pasta.
5. La cantidad de vacíos, gel y capilares, establecen la resistencia de la pasta.

Variables:

**$W_c$  : Masa del cemento**

**$V_c$  : Volumen del cemento**

**$D_c$  : Densidad del cemento**

**Portland = 3.15**

**$V_w$  : Volumen de agua**

**$D_w$  : Densidad del agua**

**$V_{vp}$  : Volumen de vacíos en la pasta**

**$V_{sp}$  : Volumen de sólidos en la pasta**

El modelo de Powers considera una representación idealizada de la hidratación del cemento basada en las siguientes ecuaciones:

Volumen de agua no evaporable  $V_{wne} = 0.23 W_c$  (ecuación 4)

**Volumen de Sólidos de hidratación**  $V_{sh} = V_c + 0.75 V_{wne}$  (ecuación 5)

Volumen de agua gel  $V_{wg}$ , depende de la porosidad en la pasta agua-cemento

Powers considero  $n = 28\% = 0.28$  y la formula  $n = \frac{V_{wg}}{V_{sh} + V_{wg}}$

Despejando  $0.28 (V_{sh} + V_{wg}) = V_{wg}$

Sustituyendo  $V_{sh}$   $0.28 (V_{sh} + V_{wg}) = V_{wg} \Rightarrow V_{wg} = 0.28$

$V_{sh} / (1-0.28)$

**Volumen de agua gel**  $V_{wg} = 0.389 V_{sh}$  (ecuación 6)

Volumen de productos de hidratación  $V_{ph} = V_{sh} + V_{wg}$

Volumen de Capilares en la pasta agua cemento  $V_{cap} = V_p - V_{ph}$

Volumen total de la pasta agua + cemento  $V_p = V_c + V_w$

**Volumen de Capilares**  $V_{cap} = V_c + V_w - V_{sh} - V_{wg}$  (ecuación 7)

**Porosidad en la pasta agua-cemento**  $n = \frac{V_{cap} + V_{wg}}{V_p}$  (ecuación 8)

$V_p$

Obtener el volumen de vacíos capilares de 100 g cemento en un espacio cerrado con agua, densidad del cemento 3.15 g/cm<sup>3</sup>, por medio del modelo de Powers.

1. Masa de cemento seco:

$$W_{cs} = 100 \text{ g}$$

2. Volumen absoluto de cemento seco:

$$\begin{aligned} V_{cs} &= \frac{W_{cs}}{\rho_c} \\ &= \frac{100 \text{ g}}{3.15 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 31.746 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

3. Volumen de agua no evaporable:

$$\begin{aligned}W_{ne} &= 100 \times 0.23 \\ &= 23.0 \text{ g} = 23.0 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

4. Volumen de sólidos de hidratación:

$$\begin{aligned}V_{sh} &= V_{cs} + W_{ne} - 0.25W_{ne} \\ &= V_{cs} + (1 - 0.25)W_{ne} \\ &= 31.75 + 0.75 \times 23 \\ &= 49.00 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

5. Volumen de agua gel; la porosidad es una propiedad del material,  $n = 0.28$

$$n = \frac{W_g}{V_{sh} + W_g}$$

$$0.28 = \frac{W_g}{49.00 + W_g}$$

$$W_g = 19.06 \text{ cm}^3$$

6. Volumen de cemento hidratado o volumen de productos de hidratación:

$$\begin{aligned} V_{ph} &= V_{sh} + W_g \\ &= 49.00 + 19.06 = 68.06 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

7. Volumen de agua de mezclado:

$$\begin{aligned} V_a &= W_{ne} + W_g \\ &= 23.00 + 19.06 = 42.06 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

8. Relación a/c:

a) En peso

$$\frac{a}{c} = \frac{42.06}{100} = 0.42$$

b) En volumen

$$\frac{a}{c} = \frac{42.05}{31.75} = 1.32$$

9. Volumen total: cemento seco + agua:

$$\begin{aligned} V_t &= V_{cs} + V_a \\ &= 31.75 + 42.06 = 73.81 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

10. Volumen de vacíos capilares:

$$\begin{aligned}V_{cap} &= V_t - V_{ph} \\ &= 73.81 - 68.06 = 5.75 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

11. Porosidad de la pasta de cemento:

$$\begin{aligned}\text{porosidad} &= \frac{V_{cap} + W_g}{V_t} \\ &= \frac{5.76 + 19.06}{73.81} = 0.33\end{aligned}$$

Un grano de cemento aumenta el doble de volumen cuando se hidrata:

$$31.75 \rightarrow 68.06$$

$$1 \rightarrow x$$

$$\therefore x = 2.14 \text{ cm}^3$$



Igual cantidad de cemento, en un espacio abierto de agua.

1. Masa de cemento seco:

$$W_{cs} = 100 \text{ g}$$

2. Volumen absoluto de cemento seco:

$$\begin{aligned} V_{CS} &= \frac{W_{CS}}{\rho_C} \\ &= \frac{100 \text{ g}}{3.15 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 31.746 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

3. Volumen de agua no evaporable:

$$\begin{aligned}W_{ne} &= 100 \times 0.23 \\ &= 23.0 \text{ g} = 23.0 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

4. Volumen de sólidos de hidratación:

$$\begin{aligned}V_{sh} &= V_{cs} + W_{ne} - 0.25W_{ne} \\ &= V_{cs} + (1 - 0.25)W_{ne} \\ &= 31.75 + 0.75 \times 23 \\ &= 49.00 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

5. Volumen de agua gel; la porosidad propiedad del material,  $n = 0.28$

$$n = \frac{W_g}{V_{sh} + W_g}$$

$$0.28 = \frac{W_g}{49.00 + W_g}$$

$$W_g = 19.06 \text{ cm}^3$$

6. Volumen de cemento hidratado o volumen de productos de hidratación:

$$\begin{aligned} V_{ph} &= V_{sh} + W_g \\ &= 49.00 + 19.06 = 68.06 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

7. Volumen de agua de mezclado, los productos de hidratación ocupan todo el volumen:

$$\begin{aligned}V_{ph} &= V_t \\ &= V_{cs} + V_a \\ 68.06 &= 31.75 + V_a \\ \therefore V_a &= 36.31 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

8. Relación a/c:

a) En peso

$$\frac{a}{c} = \frac{36.31}{100} = 0.36$$

b) En volumen



9. Volumen total: cemento seco + agua de mezclado, en este caso:

$$\begin{aligned} V_t &= V_{ph} \\ &= 68.06 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

10. Volumen de vacíos capilares:

$$\begin{aligned} V_{cap} &= V_t - V_{ph} \\ &= 68.06 - 68.06 = 0 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

11. Porosidad de la pasta de cemento:

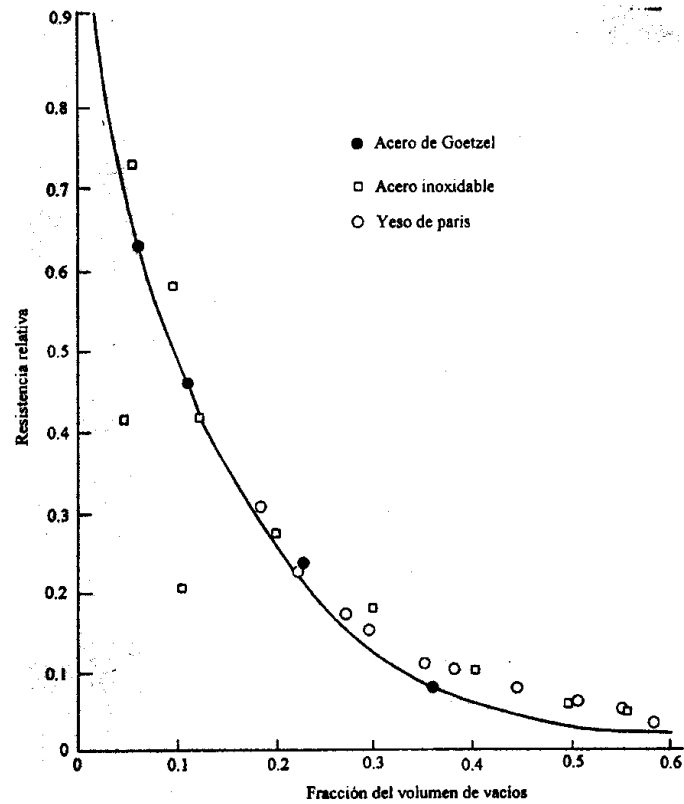
$$\begin{aligned} \text{Porosidad} &= \frac{V_{cap} + W_g}{V_t} \\ &= \frac{0.0 + 19.06}{68.06} = 0.28 \end{aligned}$$

## Clasificación de vacíos en la pasta de cemento

Vacíos	Descripción	Diámetro, nm
Capilares	Grandes	50 – 100
	Medianos	10 – 50
	Pequeños	2.5 – 10.0
Gel	Pequeños	2.5 – 10
	Microporos	0.5 – 2.5
	Microporos entre capas	< 0.5

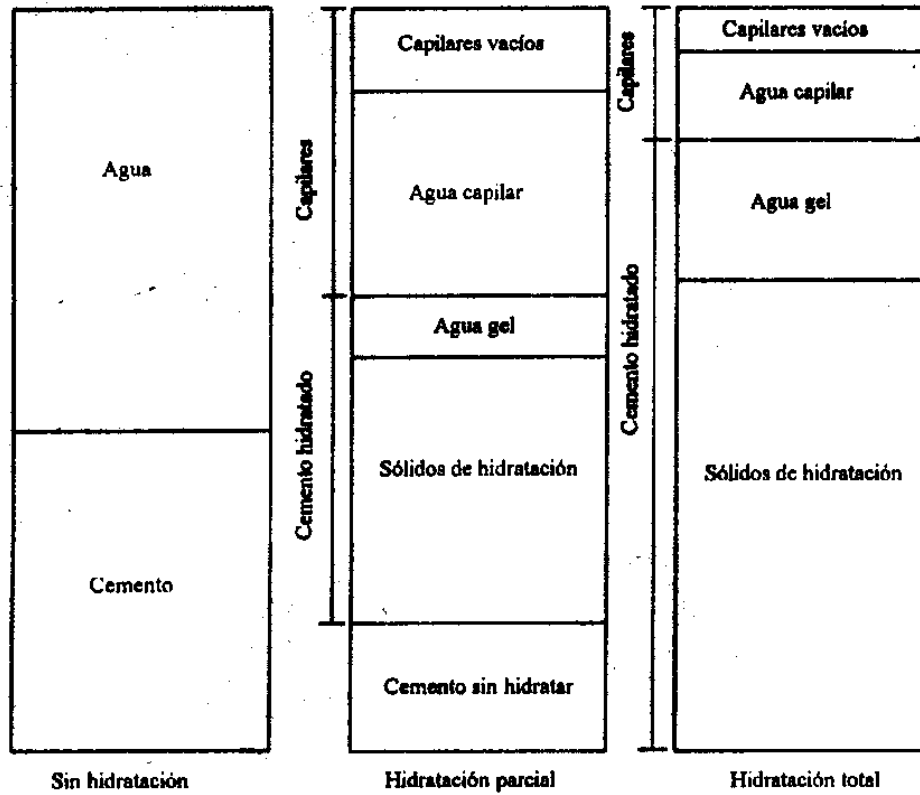
## Tiempo para segmentar los poros capilares

Relación a/c, en peso	0.40	0.45	0.50	0.60	0.70	> 0.70
Tiempo, días	3	7	14	180	360	Nunca

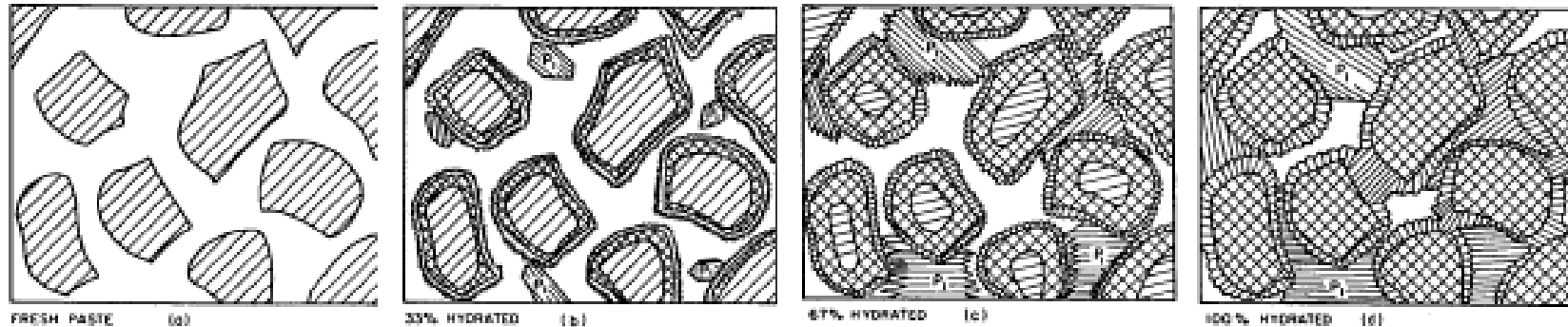


Efecto de la porosidad en la resistencia.





Estructura esquemática de la pasta de cemento hidratada



A schematic representation of the hydration of a number of cement grains. The multiphase nature the cement grains has been neglected as this is like the hydration of tricalcium silicate alone. **(a)** Fresh paste of water-to cement ration of 0.4 is shown cement grains in the originally water-filled space. **(b)** After 33% hydration, the cement grains now have inner hydration regions and outer products which form a "columnar zone" around each grain. **(c)** After 67% hydration, the un-hydrated cores are clearly surrounded by thick "rims" of inner hydration products and the columnar zone of outer products is growing on the surface of each grain. The primary portlandite, *P1*, is shown with the dendrite morphology. **(d)** At 100% hydration, the un-hydrated cement has been consumed but the shape of the original cement grains can be distinguished if the inner product differs from the columnar zone of outer products. The intergrowth of the columnar zones from two different grains is shown at several points, but this would be larger at low water/cement ratios.

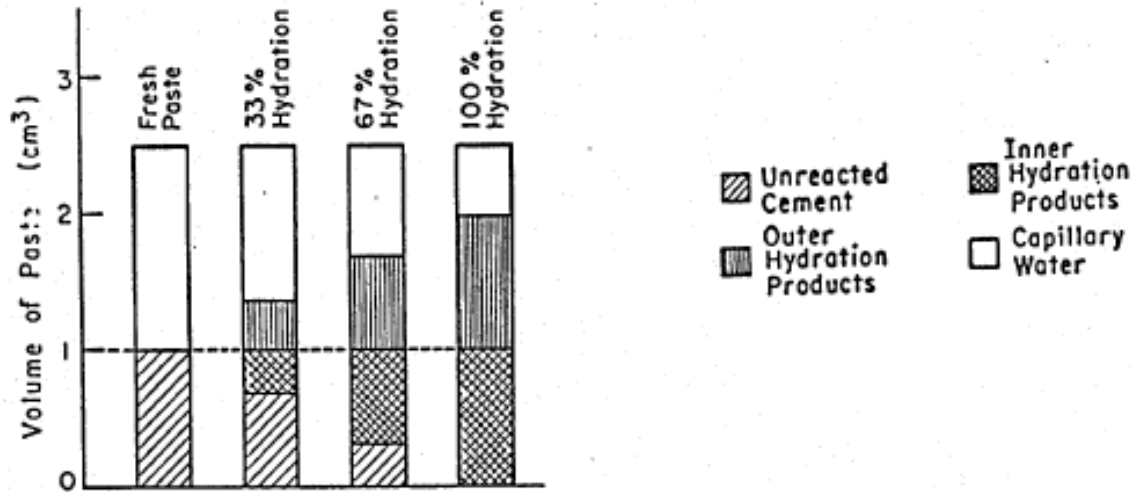
# POROS CAPILARES

El volumen originalmente ocupado con agua dentro de la pasta de cemento se transforma en poros capilares que actúan como concentradores de esfuerzo y disminuyen la resistencia significativamente.

La resistencia de la mayoría de los materiales de ingeniería depende de la porosidad; al controlar la relación a/c se logra controlar la porosidad de pasta de cemento. Sin embargo, existen otras fuentes de porosidad.

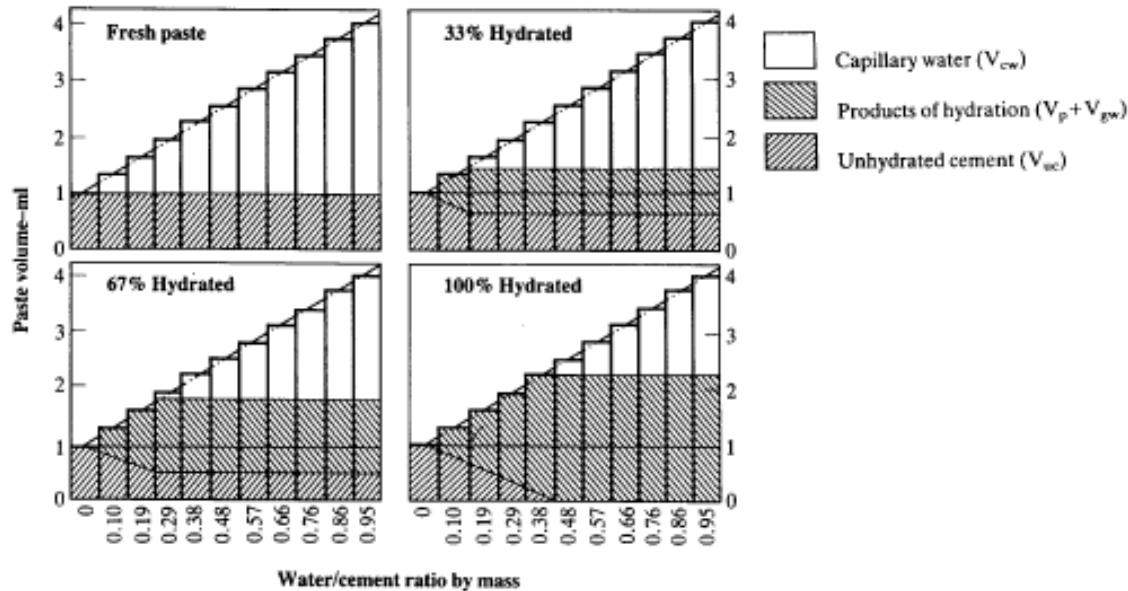
Al menos se conoce la porosidad de la pasta, dada una relación a/c.

La representación gráfica de los volúmenes relativos de los productos de hidratación para una relación a/c = 0.50; un grano de cemento produce dos veces su volumen en productos de hidratación.



Cuando se preparan muestras con diferentes relaciones a/c, se encuentra que el peso volumétrico de las muestras con relaciones altas es menor que las muestras con relaciones a/c bajas.

T. C. Powers presentó la figura siguiente.



T.C. Powers, "The Non-Evaporable Water Content of Portland Cement Paste: Its Significance for Concrete Research and Its Method of Determination," ASTM Bul., No. 158, (May 1949) pp. 68-76.

# Aditivos para el cemento portland.



## **ADITIVOS CEMENTANTES:**

**Ceniza volante:** clase F y clase C.

**Microsílice o humo de sílice:** acción puzolánica.

**Escoria molida de alto horno:** cementante, reduce la porosidad de la pasta.

**Arcilla calcinada, caolinita calcinada.**

**ADITIVOS QUÍMICOS:** Aditivos reductores de agua (Tipo A), aditivos retardantes de fraguado (tipo B, aditivos acelerantes (de la resistencia) aditivos reductores de agua y retardantes, aditivos reductores de agua y acelerantes

# CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND SEGÚN LA NMX-C-414-ONNCCE

Tipo	Denominación	Clase resistente	Características especiales
CPO	Cemento Portland Ordinario	20 30 30 R 40 40 R  R alta resistencia inicial	RS Resistente a los Sulfatos  BRA Baja Reactividad Álcali agregado  BCH Bajo Calor de Hidratación  B Blanco
CPP	Cemento Portland Puzolánico		
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno		
CPC	Cemento Portland Compuesto		
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice		
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno		

Especificación y tolerancia							
Tipo	Denominación	Componentes (% en masa)					Minoritarios <sup>(1)</sup>
		Principales					
		Clinker Pórtland + yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos <sup>(2)</sup>	Humo de sílice	Caliza	
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	95 - 100	-	-	-	-	0 - 5
CPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno	40 - 94	6 - 60	-	-	-	0 - 5
CPC	Cemento Pórtland Compuesto <sup>(3)</sup>	50 - 94	6 - 35	6 - 35	1 - 10	6 - 35	0 - 5
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	20 - 39	61 - 80	-	-	-	0 - 5

# REQUISITOS DEL CEMENTO PORTLAND SEGÚN LA NMX-C-414-ONNCCE

Especificación y tolerancia								
Requisitos que deben cumplir los componentes principales	Componente principal		Índice de actividad con cemento CPO 30 a 28 días % (mínimo). <sup>(1)</sup>			Carbonatos totales (% mínimo) <sup>(2)</sup>		
	Esfera granulada de alto horno		75			---		
	Puzolena		75			---		
	Humo de sílice		100			---		
	Caliza		---			75		
Especificaciones físicas	Clase resistente	Resistencia a compresión (N/mm <sup>2</sup> )			Tiempo de fraguado (min)		Estabilidad de volumen en autoclave (%)	
		3 días	28 días		Inicial	Final	Expansión	Contracción
		Mínimo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Máximo	Máximo
	20	-	20	40	45	600	0,80	0,20
	30 R	20	30	50	45	600	0,80	0,20
40	-	40	-	45	600	0,80	0,20	
Especificaciones químicas	Propiedades		Tipos de cemento			Especificación (% en masa)		
	Pérdida por ignición		CPO,CEG			Max 5,0%		
	Residuo insoluble		CPO,CEG			Max 5,0%		
	Sulfato (SO <sub>3</sub> ) <sup>(1)</sup>		Todos			Max 4,0%		
Especificaciones de los cementos con características especiales	Nomenclatura	Característica especial	Expansión por ataque de sulfatos (máx. %)	Expansión por la reacción Alcal Agregado (máx. %)		Calor de hidratación (máx.) kJ/kg (cal/kg)		Blancura (mín. %)
			1 Año	14 días	56 días	7 días	28 días	
	RS	Resistente a los Sulfatos	0,10					
	BFA	Baja Reactividad Alcal Agregado		0,020	0,060			
	BCH	Bajo Calor de Hidratación				250 (60)	200 (70)	
B	Blanco						70	



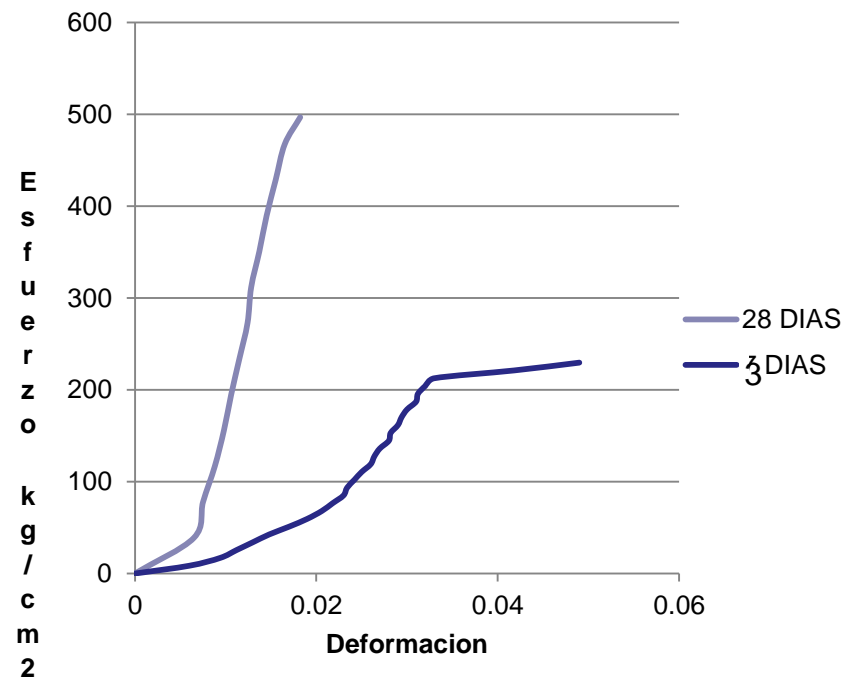
# Prueba de resistencia a compresión.

## Gráficas Esfuerzo-Deformación



Prueba de resistencia del mortero en compresión

### Ensayo de cubos de mortero a compresión



## Propiedades del cemento portland

1. **Hidráulico.** Endurece con el agua, aun en agua de mar.
2. **Finura,** menor que  $45\ \mu\text{m}$
3. **Tiempo de fraguado.** Inicia el endurecimiento a los 45 minutos.
  - a) Controlado. Cuando se va hidratando en el transcurso del tiempo y aumenta su resistencia,
  - b) Fraguado falso. Cuando después de 10 minutos pierde plasticidad, si se remezcla vuelve a adquirir fluidez.
  - c) Fraguado relámpago. Cuando endurece después de realizar la mezcla.

4. Sanidad. La expansión que sufren especímenes de cemento

a) MgO controlado (causa expansión)



Fig. 4-1 Autoclave.

5. Densidad relativa ~ 3.51

6. Calor de hidratación – reacciones exotérmicas

a)  $C_3S$  y  $C_3A$

7. Pérdida por ignición

8.  $SO_3$

## Referencias Bibliográficas.

Neville, A. M., *Tecnología del Concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, 1984.

NMX-C-414-ONNCCE-2004 “Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba”.

<https://es.wikipedia.org/wiki>, consultada en agosto de 2015.

<http://www.onncce.org.mx/> consultada en agosto de 2015.

<http://normas.imt.mx/>, consultada en agosto de 2015.