



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Amparo Moragues Terrades
E.T.S I. Caminos, Canales y Puertos

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

El cemento: Definición

Es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente dividido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece en virtud de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

El cemento: Composición

Nomenclatura

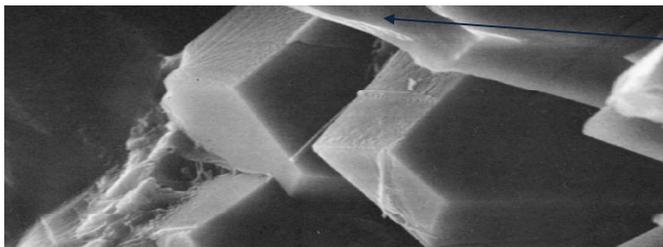
C=CaO A=Al₂O₃ F=Fe₂O₃ S=SiO₂ H=H₂O N=Na₂O K=K₂O

Clinkerización (proceso cocción)

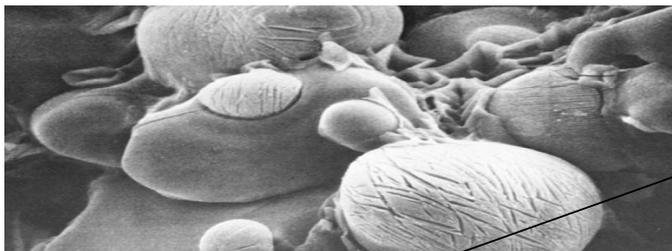
- ✓ **Alita**, que es una disolución sólida del 3CaO.SiO₂ (C₃S); está en una proporción aproximada del 50-60%
- ✓ **Belita**, (C₂S), en una proporción del 20-25%
- ✓ **C₃A**, en proporción 5-10%
- ✓ **Fase Ferrítica**: la más conocida C₄AF

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Microestructura de materiales base cemento



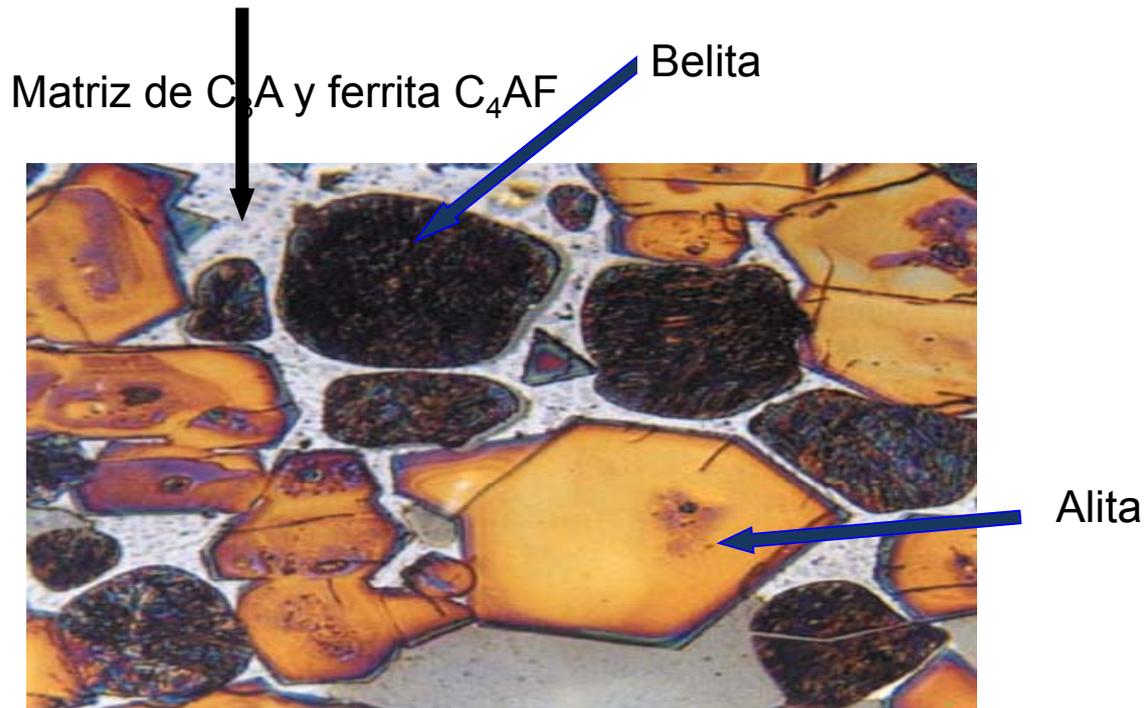
Cristales de Alita



Cristales de Belita

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Microestructura de materiales base cemento



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

El cemento: Cinética de la hidratación

Velocidad de reacción de las fases con el agua

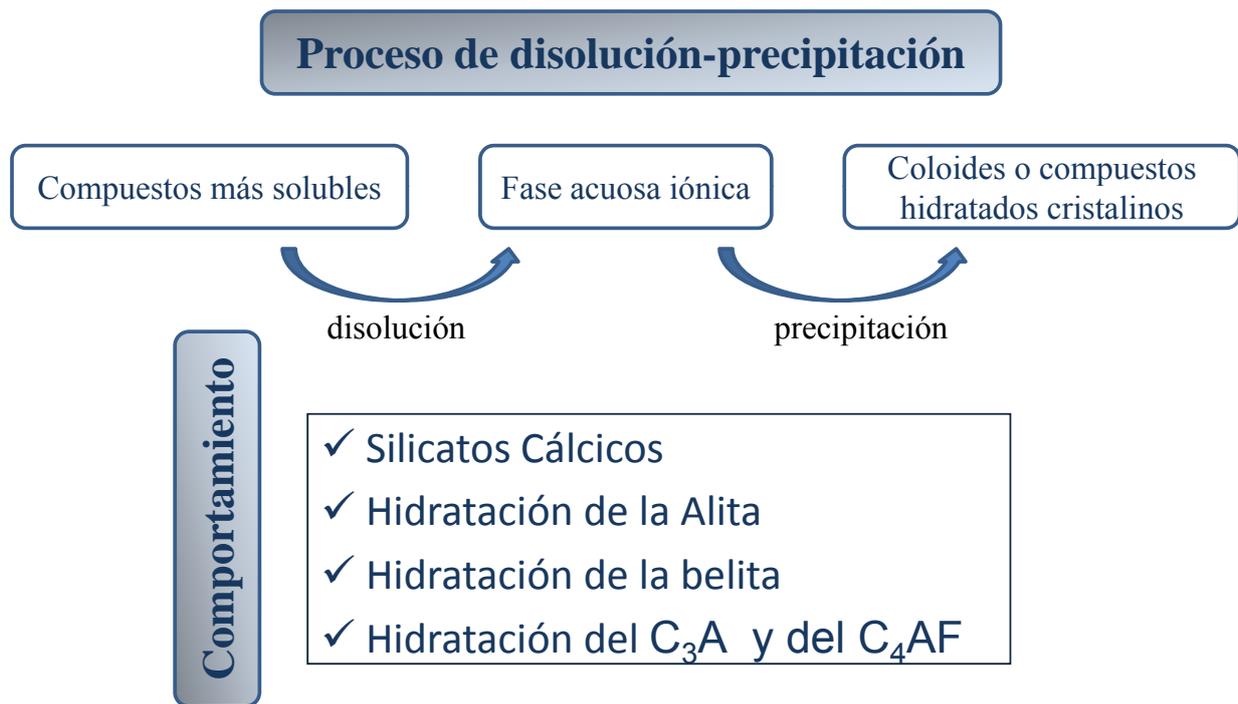
$C_3A > C_3S$ (Alita) $> C_4AF$ Fase Ferrítica $> C_2S$ Belita

Factores afectan a la *Reactividad de Cementos*

- ✓ temperatura máxima de cocción
- ✓ velocidad de enfriamiento
- ✓ empleo de fundentes y de mineralizadores
- ✓ atmósfera de horno que debe ser ligeramente oxidante para evitar la formación de compuestos reducidos e inestables

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

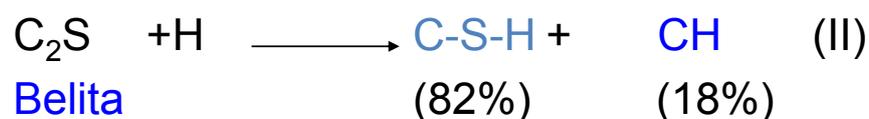
Reacciones de hidratación. Mecanismos



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Reacciones de hidratación. Mecanismos

Silicatos cálcicos: alita y belita



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Reacciones de hidratación. Mecanismos

Hidratación de la alita

Controla:

- El fraguado normal
- Desarrollo de resistencias

✓ Etapas de la Hidratación:

I. Etapa de **pre-inducción**:



II. Etapa de **inducción**:



III. Periodo de **hidratación media**: rápida precipitación de CSH junto con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$

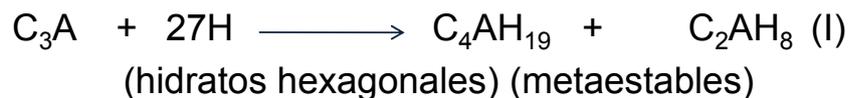
IV. Periodo de **hidratación final**: Se forma una estructura de CSH densa

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Reacciones de hidratación. Mecanismos

Hidratación de C_3A y del C_4AF (fase ferrítica)

- ✓ C_3A es la más reactiva frente al agua
- ✓ Define el fraguado del cemento
- ✓ La hidratación de la fase ferrítica es similar a la del C_3A , pero mucho más lenta;



(h. cúbico) (estables)

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

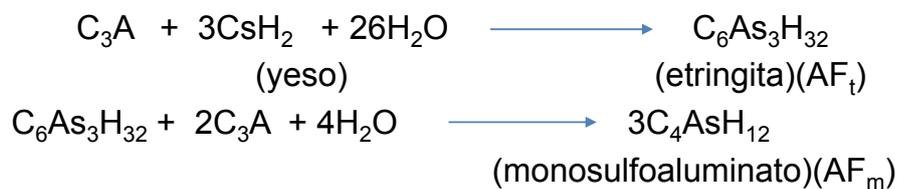
Fraguado del cemento Portland

El fraguado es el cambio de las características de una pasta de cemento, con el aumento de la consistencia hasta adquirir las propiedades de un sólido

Tiempo de fraguado

Norma Europea (EN 196-3)
≥ 52.5 minutos
≥ 62.5 minutos

Mecanismo de retraso en la hidratación de los aluminatos: formación de una capa protectora de etringita ($C_6As_3H_{32}$) sobre los gránulos de cemento.



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

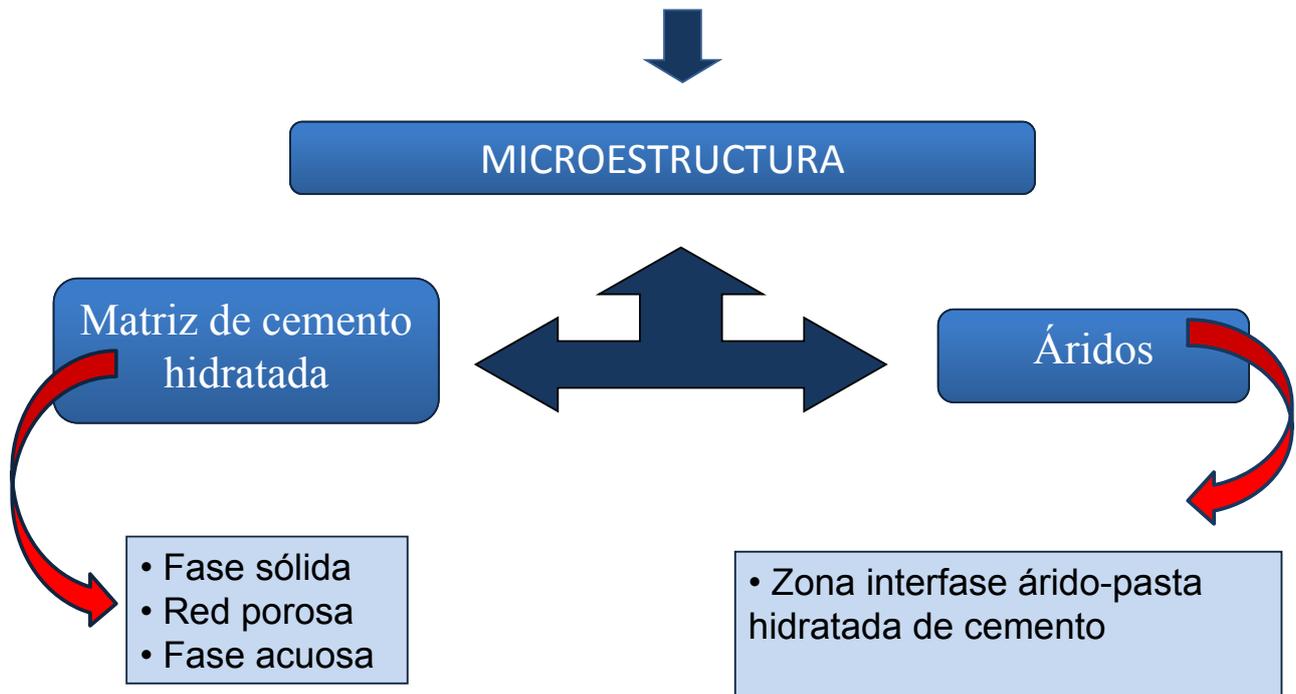
Influencia de componentes minoritarios

Compuestos alcalinos y sulfatados

- ✓ Los iones alcalinos Na^+ y K^+ derivan de las materias primas empleadas en la fabricación del clinker siendo la cantidad total expresada como Na_2O equivalente entre 0.3-1.5%
- ✓ Los sulfatos generalmente provienen del combustible que se emplea para el funcionamiento del horno
- ✓ La fuente de la mayoría de los sulfatos es el yeso
- ✓ El principal objetivo del yeso es retardar el rápido fraguado que origina la alta reactividad del C_3A hacia el agua
- ✓ El sulfato cálcico puede estar:
 - yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$),
 - hemihidrato ($CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$) ó como anhidrita ($CaSO_4$): presencia no deseable. Gran solubilidad podrían originar falsos fraguados por precipitación de yeso a primeras edades

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Propiedades del hormigón



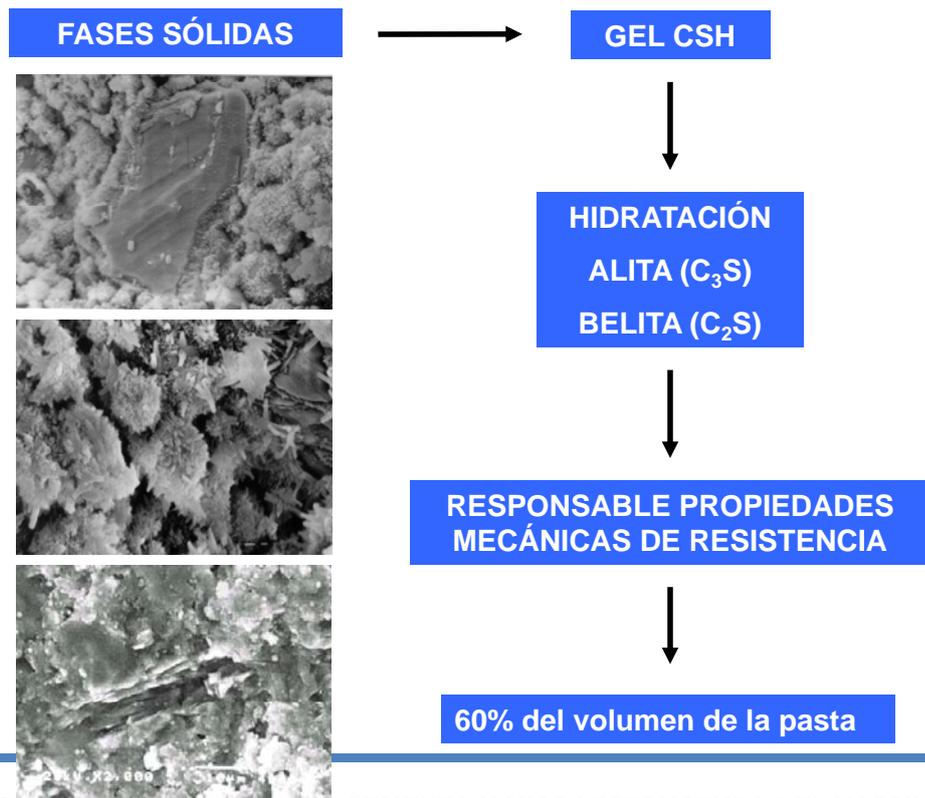
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Compuestos hidratados de la pasta de cemento Portland

- ✓ Silicato cálcico hidratado (gel CSH)
- ✓ Aluminato cálcico hidratado
- ✓ Trisulfato de calcio hidratado o ettringita (AFt)
- ✓ Cloroaluminatos de calcio hidratado o sal de Friedel (AFm)s
- ✓ Trisulfato de hierro de calcio hidratado o ettringita férrica
- ✓ Hidróxido de magnesio o brucita (MH)

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

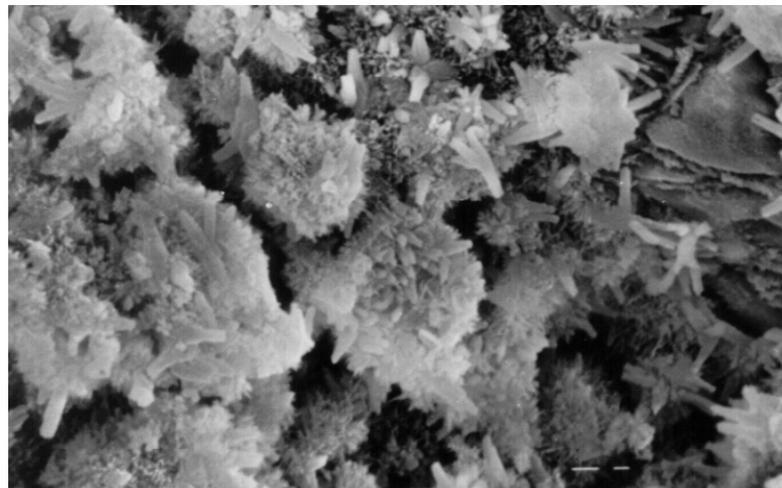
Fases hidratadas



PROCESOS DE HIDRATACION DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Fases hidratadas

Gel de sílice (CSH)

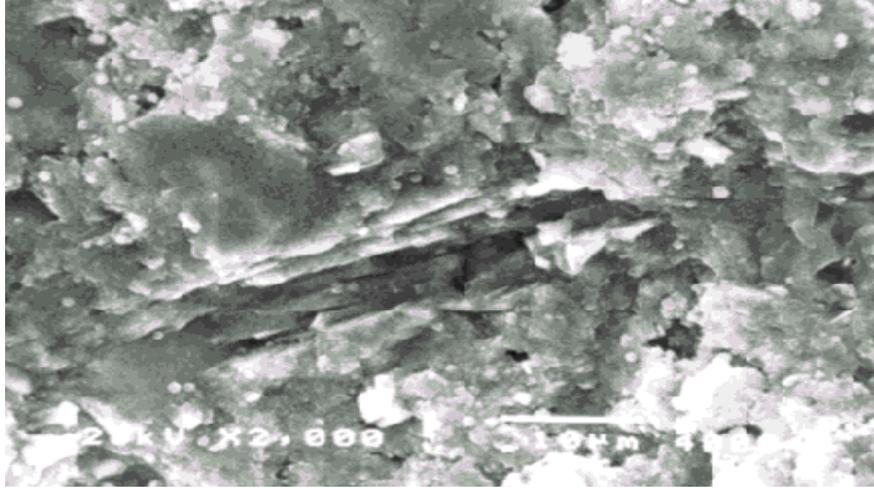


Forma acicular

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Fases hidratadas

Gel de sílice (CSH)

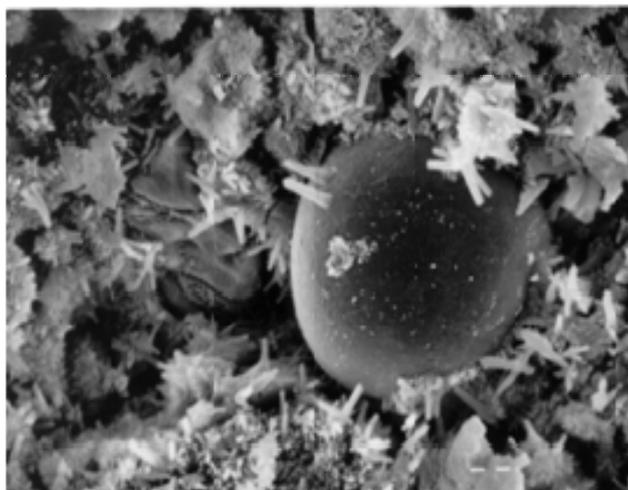


En forma de tubos

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Fases hidratadas

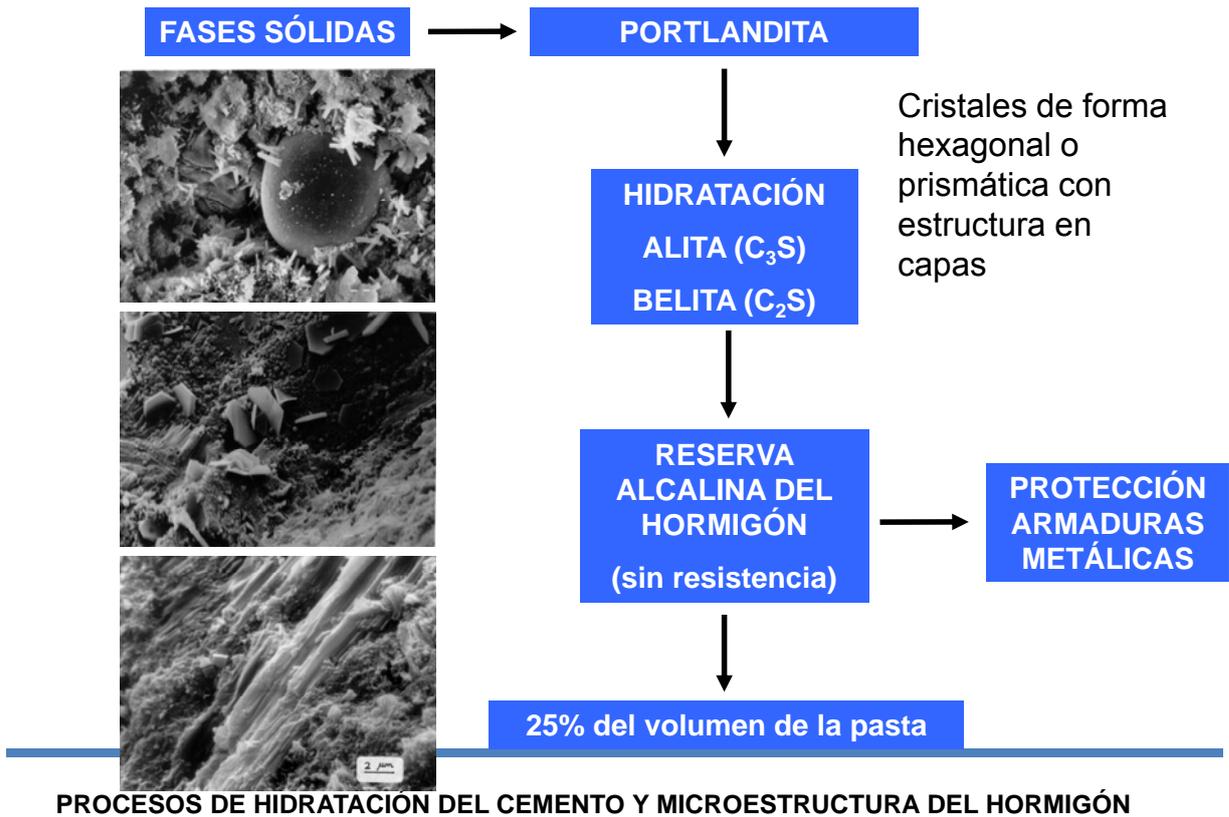
Gel de sílice (CSH)



Ceniza volantes en hormigón

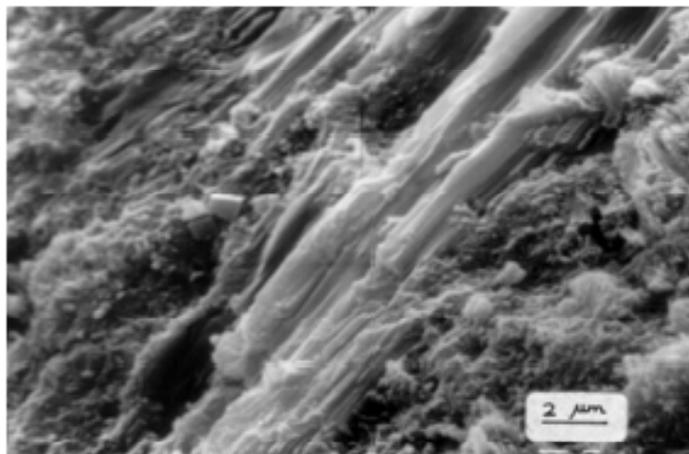
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Fases hidratadas



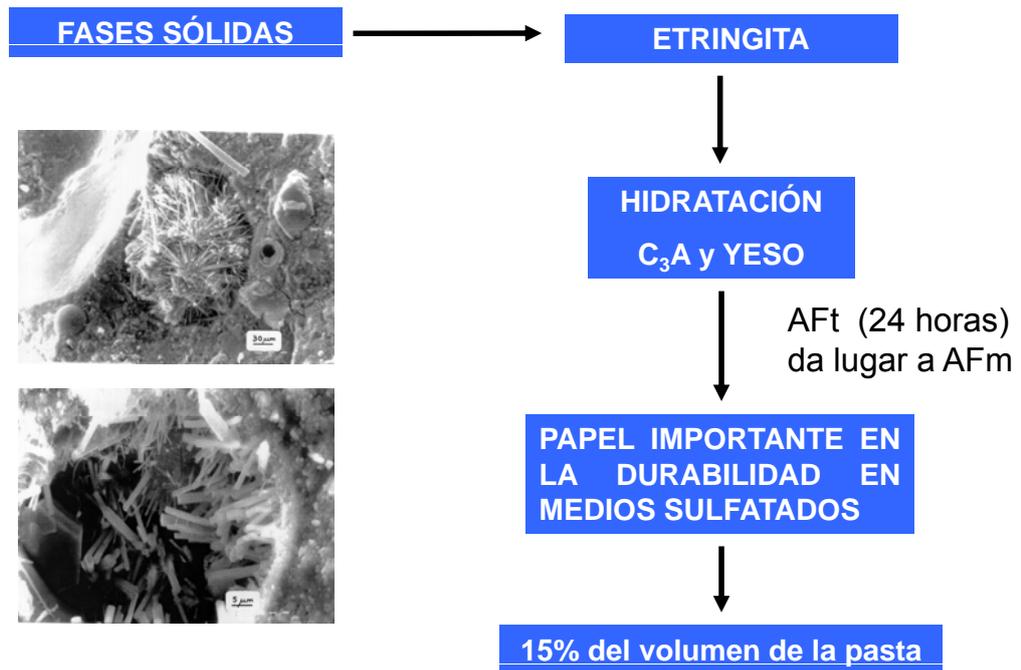
Fases hidratadas

Portlandita



PLACAS DE PORTLANDITA

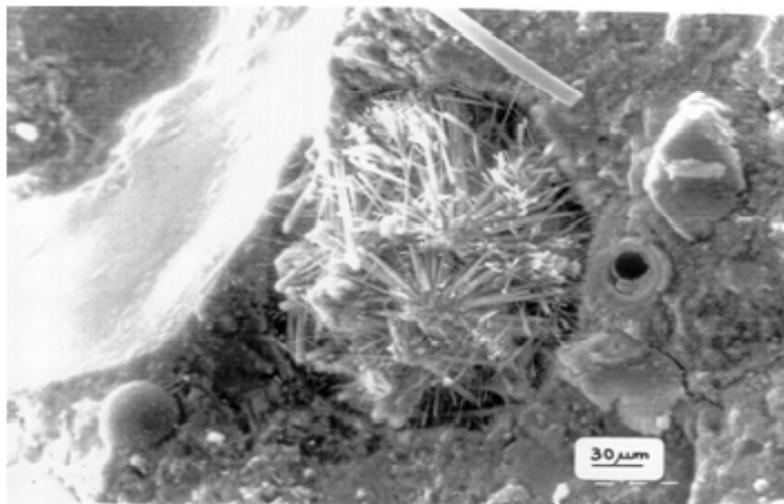
Fases hidratadas



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Fases hidratadas

Etringita



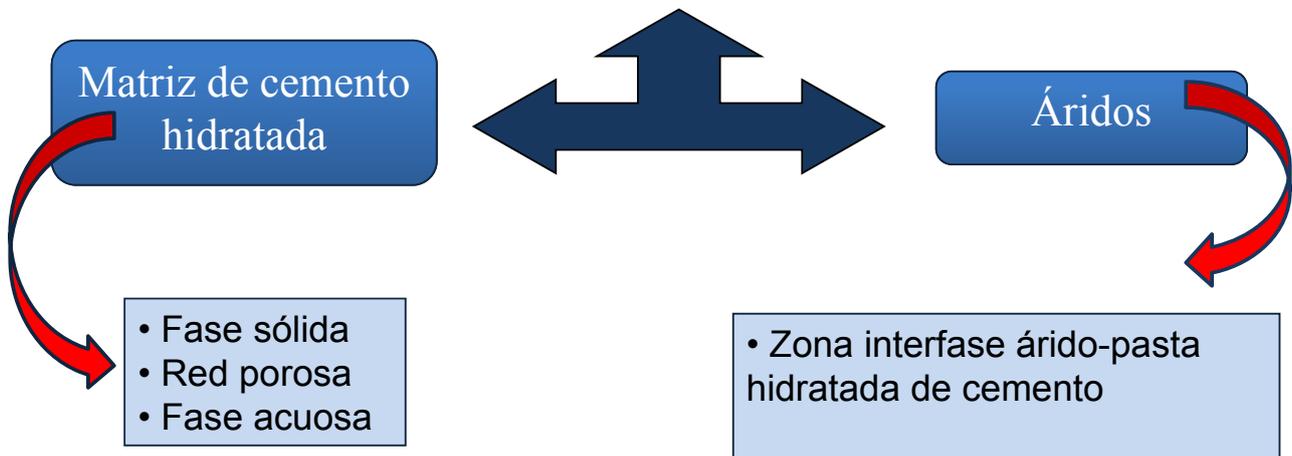
AGUJAS DE ETRINGITA EN PORO

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Propiedades del hormigón

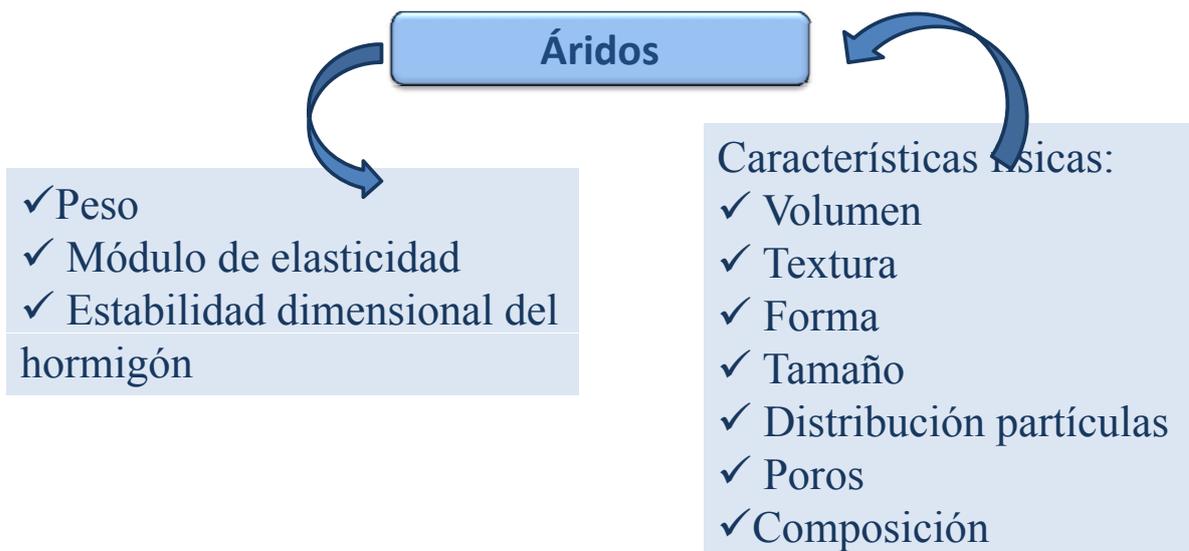


MICROESTRUCTURA



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Estructura de los áridos

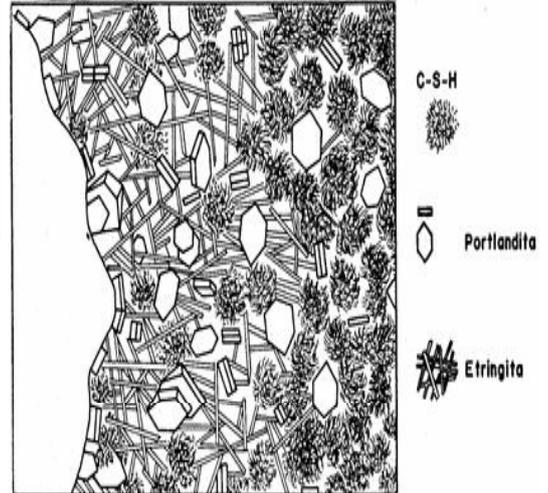


PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Zona de transición árido-pasta

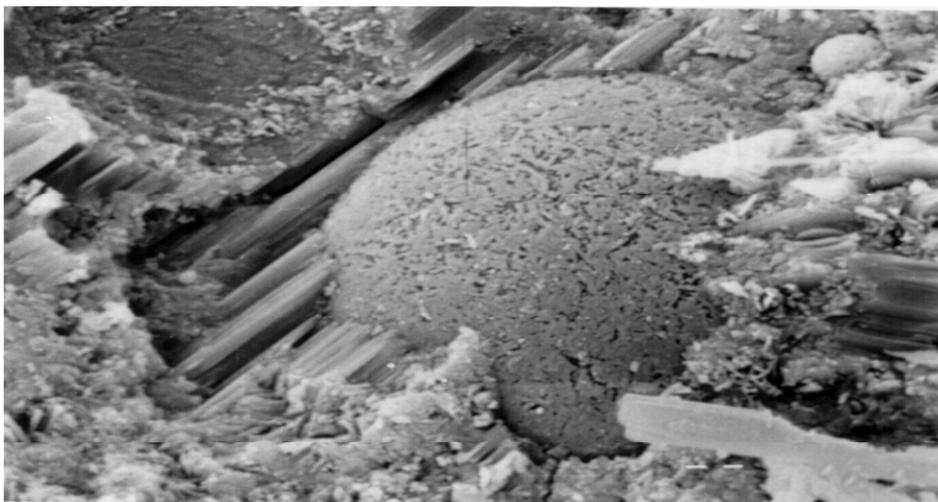
- ✓ Contenido significativamente alto de porosidad capilar (gran parte interconectada)
- ✓ Mayor permeabilidad
- ✓ Bajo contenido de granos de cemento sin hidratar
- ✓ Alto contenido en portlandita, con orientación preferentemente paralela a la superficie de los agregados
- ✓ Elevado contenido en etringita

Menor resistencia y rigidez



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Zona de transición árido-pasta



ZONA DÉBIL MECÁNICAMENTE EN LA INTERFASE CON LA PASTA

PAPEL IMPORTANTE EN LA REACCIÓN ÁRIDO-ÁLCALI

Porosidad de esta zona mayor que en la pasta por la mayor cantidad de agua acumulada ⇒ causa de su menor resistencia

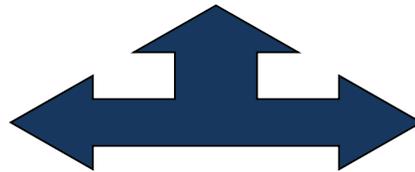
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Propiedades del hormigón



MICROESTRUCTURA

Matriz de cemento hidratada



Áridos

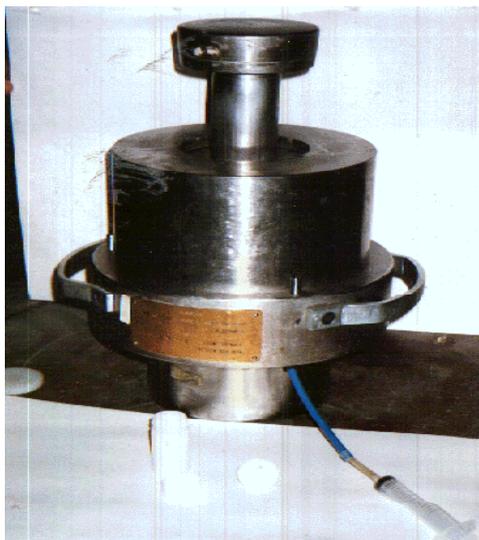
- Fase sólida
- Red porosa
- Fase acuosa

- Zona interfase árido-pasta hidratada de cemento

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Fase acuosa

Prensa de Longuet



K^+
 Na^+
 OH^-
 Ca^{2+}
 $Al(OH)^4^-$
 SO_4^{2-}

pH de la fase acuosa
12-13

REGULA TODOS LOS PROCESOS QUÍMICOS Y ELECTROQUÍMICOS DE DETERIORO

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Fase acuosa

COMPOSICION QUIMICA DE FASES ACUOSAS

Muestra	T° (°C)	Edad (días)	pH	[SO ₄ ²⁻] (M)	[Na ⁺] (M)	[K ⁺] (M)	[Ca ²⁺] (M)
Blanco	20°	21+7	13	0.0009	0.036	0.053	0.008
		21+28	13	0.004	0.025	0.041	0.014
		21+56	13	0.001	0.019	0.051	0.012
		21+90	13	0.0005	0.0076	0.0051	0.015
		21+180	12	0.0003	0.017	0.015	0.020
		21+365	11.7	0.020	0.091	0.010	0.012
		40°	21+7	12.4	0.0017	0.013	0.028
21+28	12.4	0.0006	0.009	0.033	0.017		
21+56	11.9	0.0003	0.013	0.018	0.017		
21+90	12.5	0.026	0.069	0.0084	0.015		
21+180	11.6	0.0002	0.21	0.13	0.055		
21+365	11.7	0.0008	0.009	0.003	0.022		
BWR-CO	20°	21+7	12	0.014	0.33	0.152	0.27
		21+28	12	0.008	0.14	0.028	0.63
		21+56	11.6	0.009	0.27	0.014	0.65
		21+90	11.7	0.012	0.25	0.0045	0.63
		21+180	11.3	0.010	0.17	0.00	0.30
	21+365	10.8	0.015	0.33	0.003	0.14	
	40°	21+7	11.7	0.009	0.24	0.038	0.49
		21+28	11.6	0.008	0.21	0.016	0.65
		21+56	11.2	0.009	0.34	0.018	0.74
		21+90	11.1	0.009	0.29	0.009	0.78
21+180		10.8	0.013	0.24	0.028	0.11	
21+365	10.0	0.115	0.77	0.013	0.06		

Composición de fase acuosa de cementos a distintas temperaturas

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Propiedades del hormigón

MICROESTRUCTURA

Matriz de cemento hidratada

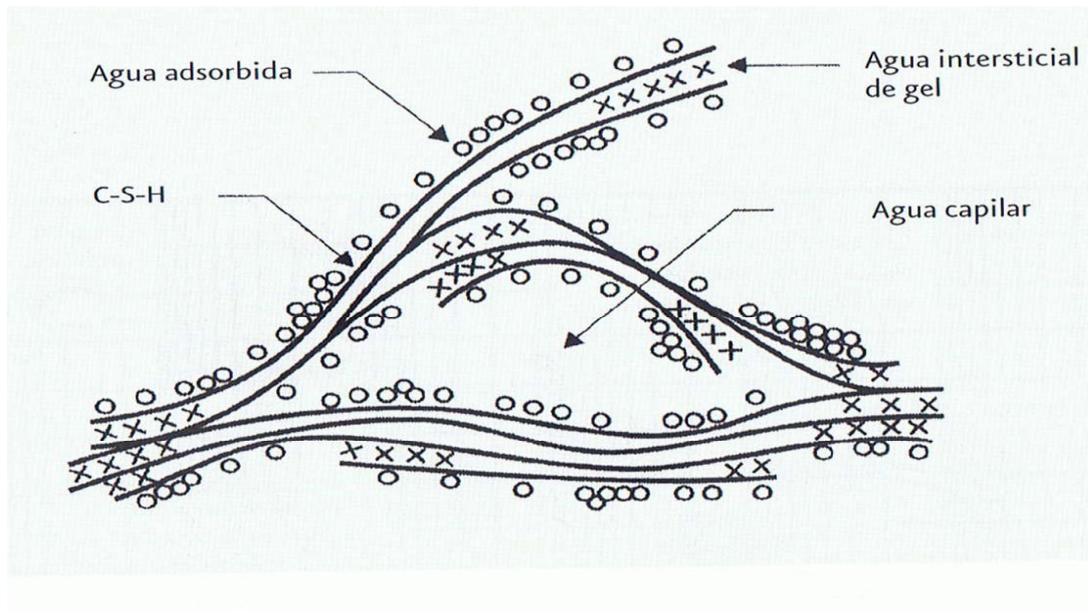
- Fase sólida
- Red porosa
- Fase acuosa

Áridos

• Zona interfase árido-pasta hidratada de cemento

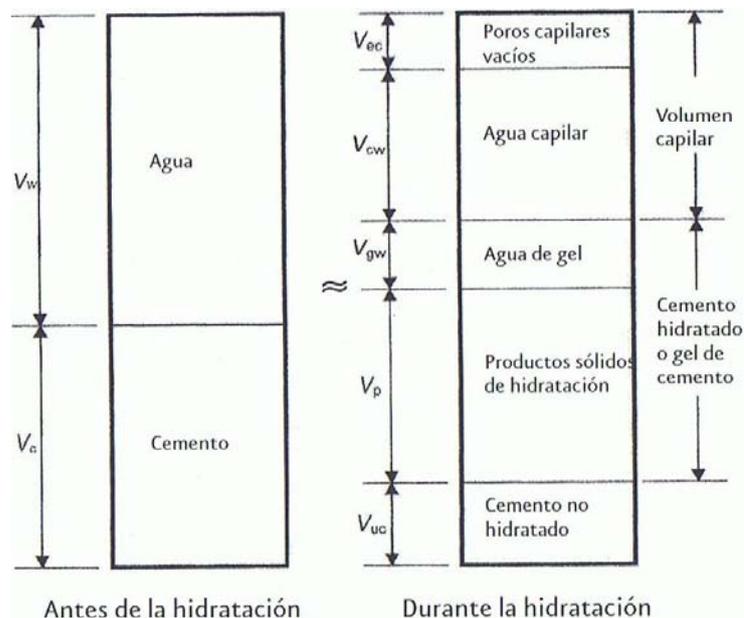
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Formación física de laminas de silicatos cálcicos hidratados.



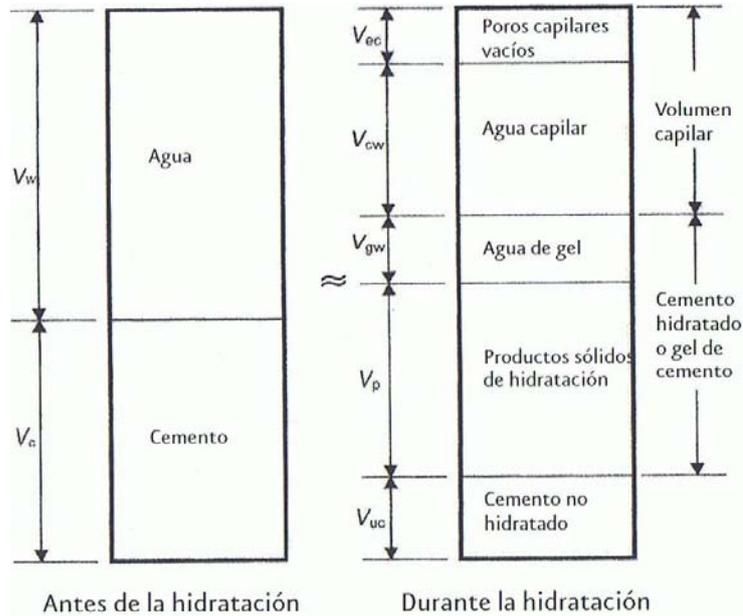
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Representación volumétrica de la pasta de cemento antes y después de la hidratación



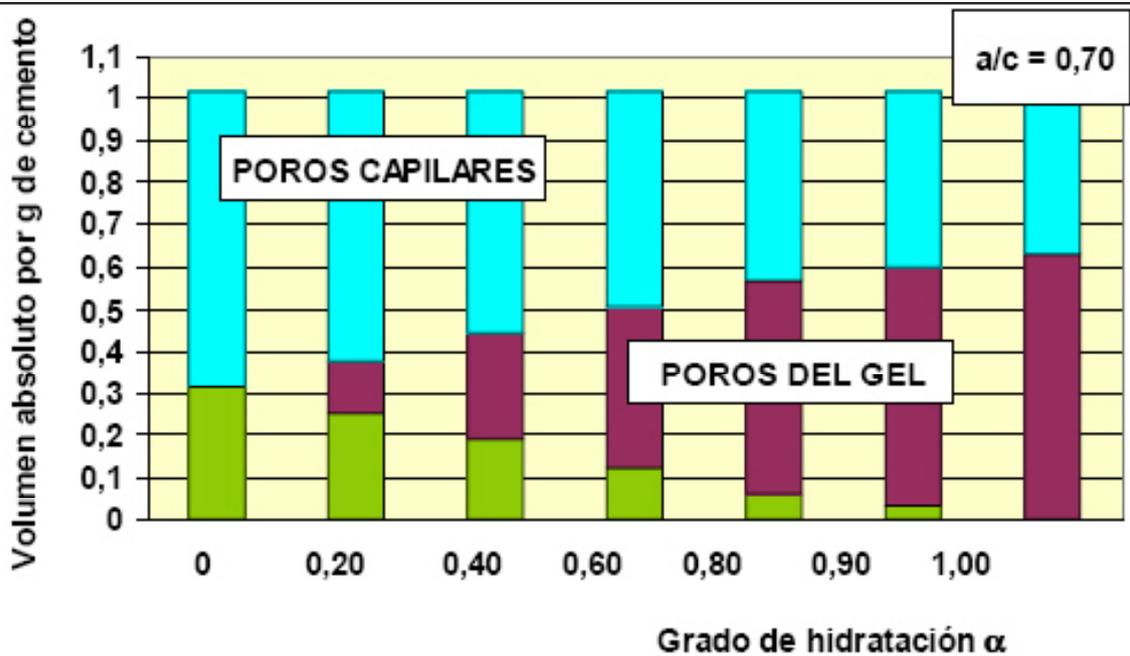
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Representación volumétrica de la pasta de cemento antes y después de la hidratación



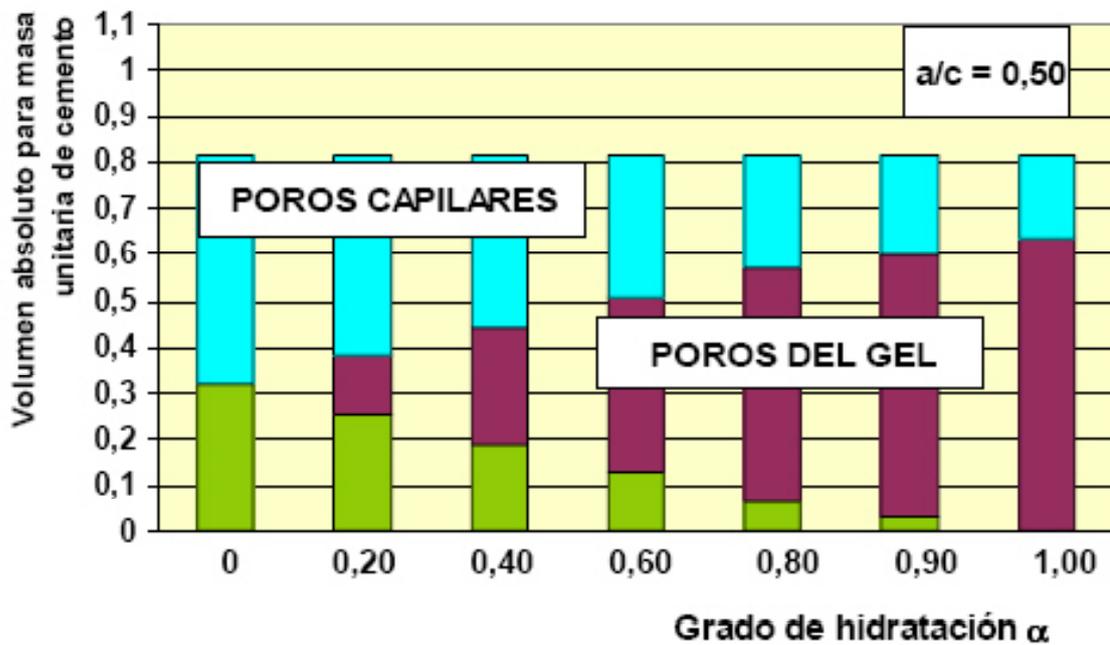
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Variación del tamaño de poro en función del grado de hidratación



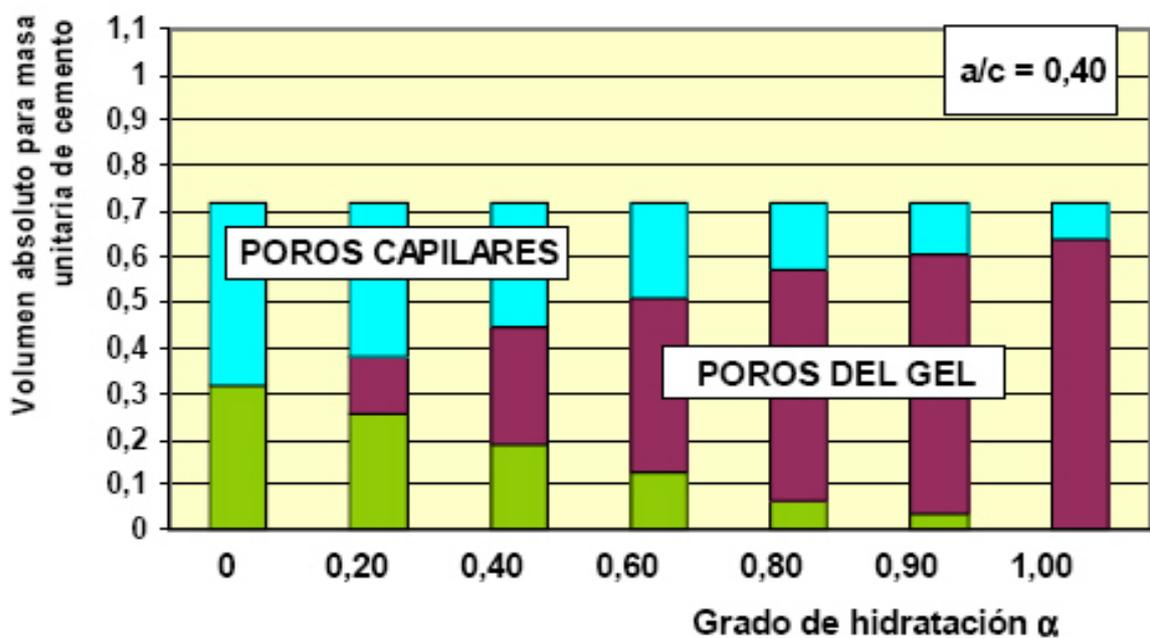
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Variación del tamaño de poro en función del grado de hidratación



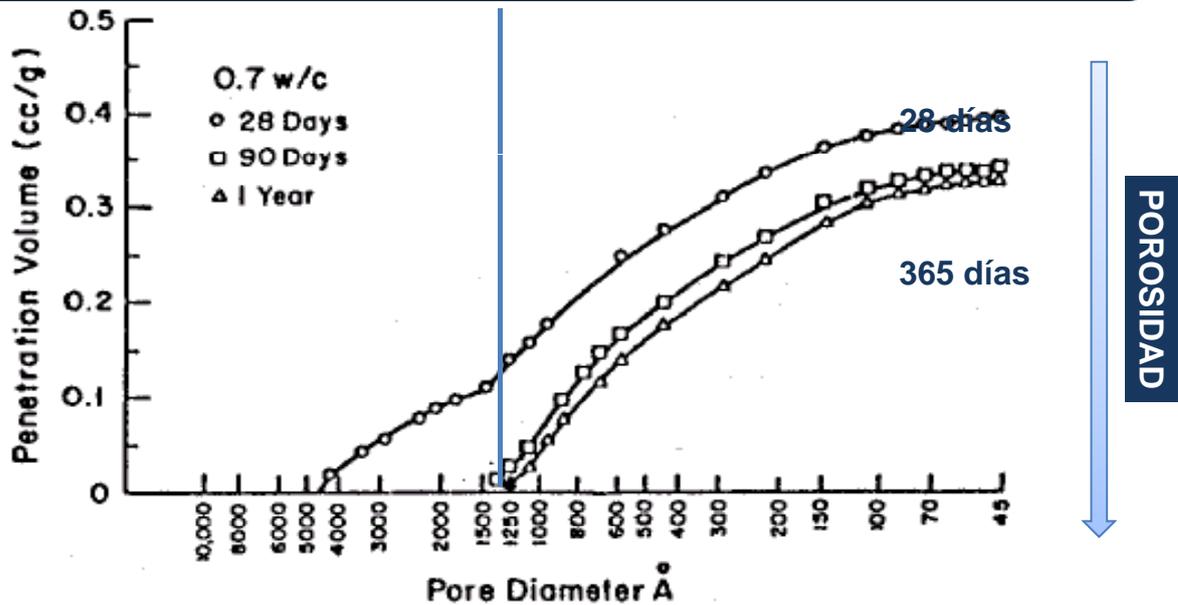
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Variación del tamaño de poro en función del grado de hidratación



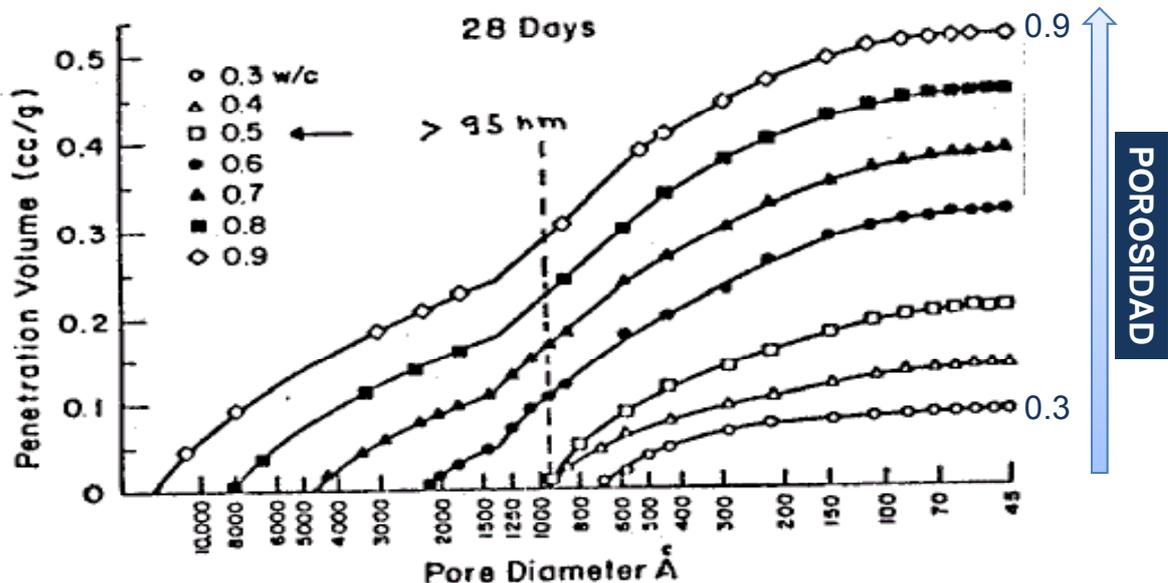
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Variación de la porosidad en función del tiempo de curado



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Variación de la porosidad en función de la relación agua/cemento



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Estructura porosa de materiales base cemento

Agua reacciones de hidratación ($a/c = 0.39$)
 Parte inherente a la estructura del CSH
 Reología que permita trabajabilidad

Microestructura porosa

Red porosa

Porosidad: volumen total de la muestra ocupado por poros
Superficie específica interna de los poros: área o superficie accesible por unidad de volumen o masa de una sustancia dada.
Segregación de poros en función de sus tamaños: delimitación del volumen total de poros en rangos de poros de tamaños definidos

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

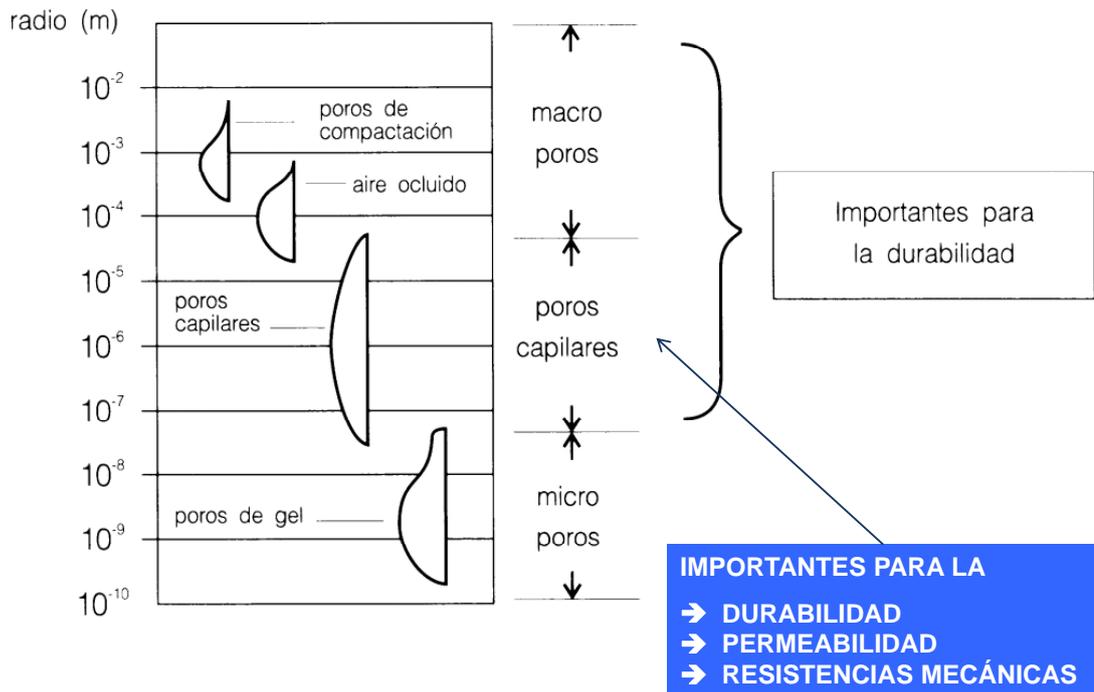
Estructura porosa de pasta de cemento

Clasificación de tamaño de poro

IUPAC		P.Metha, 1986		S. Mindess, 2002		EFECTO
Nombre	Tamaño	Nombre	Tamaño	Nombre	Tamaño	
Microporos	< 2nm	Espacio interparticular entre láminas de CSH	1-3 nm	Microporos "intercapa"	>0.5nm	RETRACCIÓN Y FLUENCIA
				Microporos	0.5-2.5 nm	RETRACCIÓN Y FLUENCIA
Mesoporos	2-50 nm			Poros capilares (a/c baja)	10-50 nm	Capilares pequeños (gel)
		Capilares medianos	10-50 nm			RESISTENCIA, PERMEABILIDAD Y CONTRACCIÓN
Macroporos	> 50 nm	Poros capilares	3-50 μ m	Capilares grandes	50-10 μ m	RESISTENCIA Y PERMEABILIDAD
		Aire atrapado	50 μ m-1 mm	Aire atrapado	0.1-1 mm	RESISTENCIA

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Estructura porosa del hormigón



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Estructura porosa de pasta de cemento

Clasificación de tamaño de poro

Poros de gel

microporos

- Se forman por la hidratación del cemento
- Espacio entre las fibras de gel CSH (poros interlaminares)
- Constituyen el 28% de la pasta hidratada

Poros capilares

mesoporos

- Exceso de agua durante el amasado
- Relación a/c por encima de 0.44
- Influencia en las propiedades de los materiales (permeabilidad, durabilidad, resistencia mecánica)

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Estructura porosa de pasta de cemento

Clasificación de tamaño de poro

Macroporos

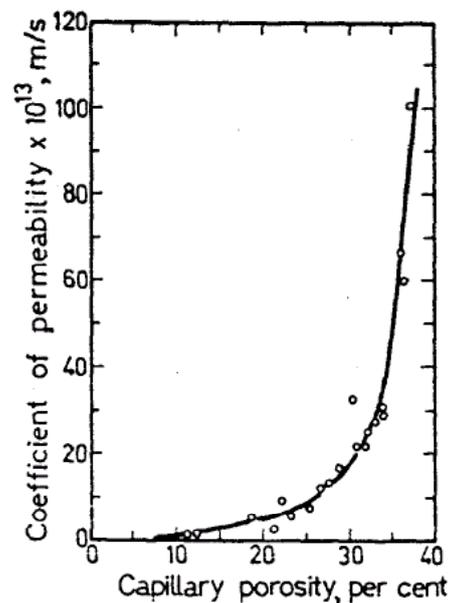
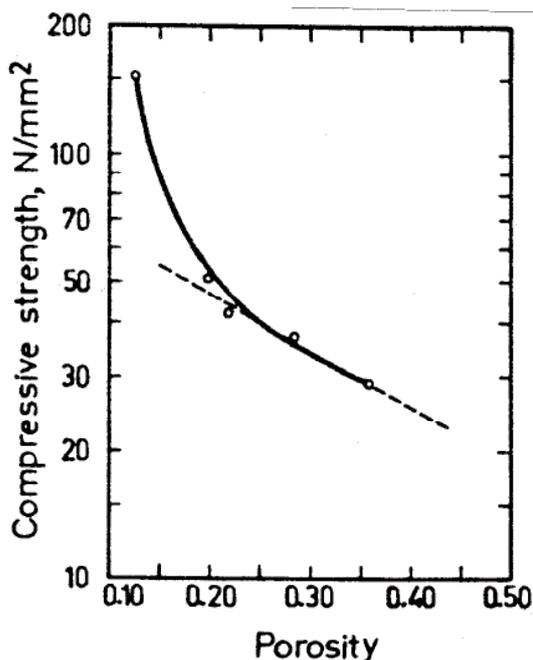
- Proviene de las burbujas de aire atrapadas durante amasado
- Forma esférica
- Tamaño superior a 50 nm
- Amasado y deficiente compactación (3-50 μm)
- Aditivos, mejorar prestaciones del material (50 μm -1 mm)

Granos de Hadley

- Se denominan *hollow-shell pores*.
- Se forman en espacios ocupados anteriormente por granos de cemento
- Tamaño 1-20 μm
- Parcial o totalmente huecos
- Productos de hidratación con corteza externa formada en la superficie de los granos.

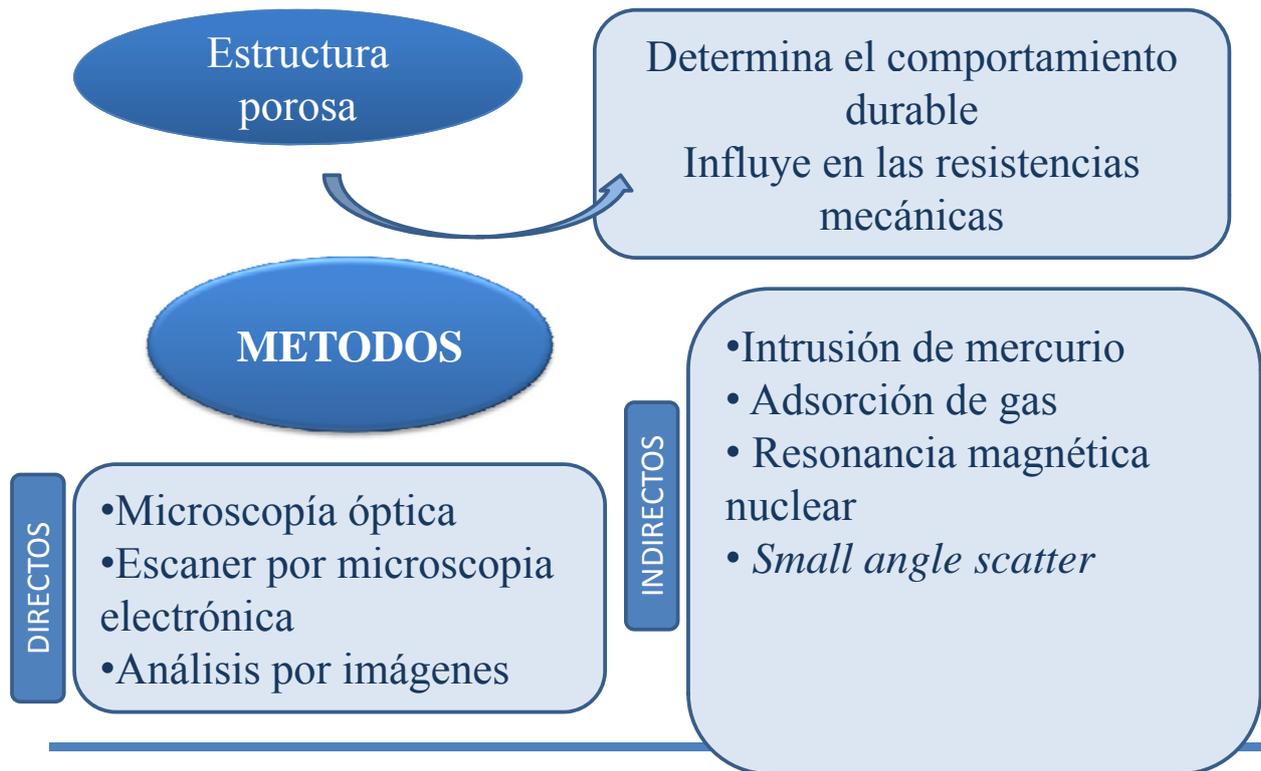
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Estructura porosa del hormigón



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Determinación de la estructura porosa



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Porosimetría de intrusión de mercurio

El ingreso de un líquido “que no moja” en un sólido poroso fue descrito por E. W. Washburn en 1921
Aplicada por primera vez por Edel’man en 1961



FUNDAMENTO

Mojado de los sólidos por parte de los líquidos

Líquido no mojante de sólidos



Por presión penetrará en los poros de un sólido poroso

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Porosimetría de intrusión de mercurio

MERCURIO

- ✓ Líquido no mojante
- ✓ Tensión superficial alta: 0.485 N/m
- ✓ Angulo de contacto elevado varia 112-142°
- ✓ Angulo de avance 130°
- ✓ Angulo de retroceso 100°
- ✓ Líquido a temperatura ambiente

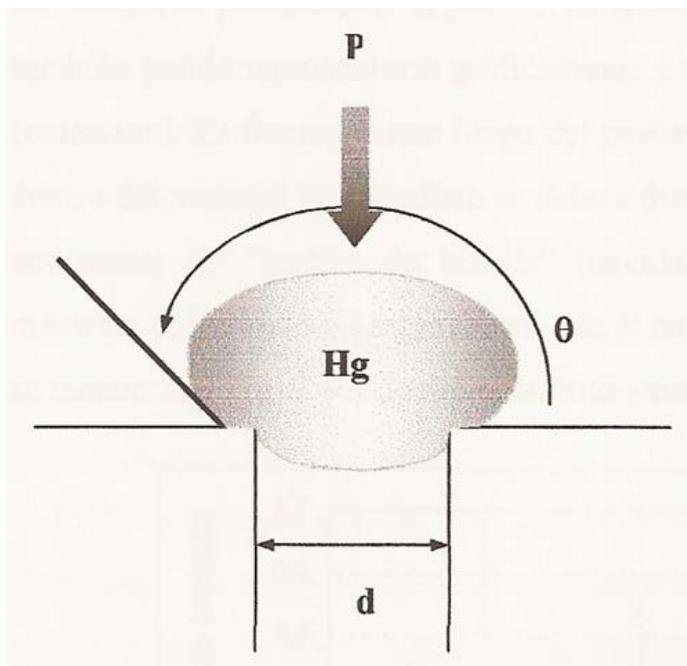
Ventajas

Inconveniente

- ✓ Elevada toxicidad
- ✓ Manejo con extremo cuidado

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Porosimetría de intrusión de mercurio



$$F_1 = -\pi d \gamma \cos \theta$$

$$F_2 = P \pi d^2 / 4$$

$$F_1 = F_2$$

$$d = -4 \gamma \cos \theta / P$$

(Ec. de Washburn)

γ tensión superficial

θ ángulo de contacto

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Porosimetría de intrusión de mercurio

$$d = - 4 \gamma \cos \theta / P$$

A cada presión le corresponde un diámetro

A cada presión le corresponde un volumen

$$A = 4 V / D$$

A cada presión le corresponde una longitud de poro

$$L = A_p / \pi \cdot d$$

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Porosimetría de intrusión de mercurio

Propiedades físicas del material

Porosidad total

Volumen total de poros (V_p)
con respecto al volumen total
del material (V_m)

$$P_t = V_p / V_m$$

Distribución e interconexión de poros

Diámetro crítico

Diámetro umbral

Hormigón fresco: 20-25%
Hormigón endurecido: 10-15%
Límite mínimo porosidad total: 10%

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Porosimetría de intrusión de mercurio

Propiedades físicas del material

Distribución e interconexión de poros

Diámetro crítico

Tamaño de poro interconectado que más se repite de forma continua
Corresponde a la pendiente máxima de la curva de porosidad acumulada

Diámetro umbral

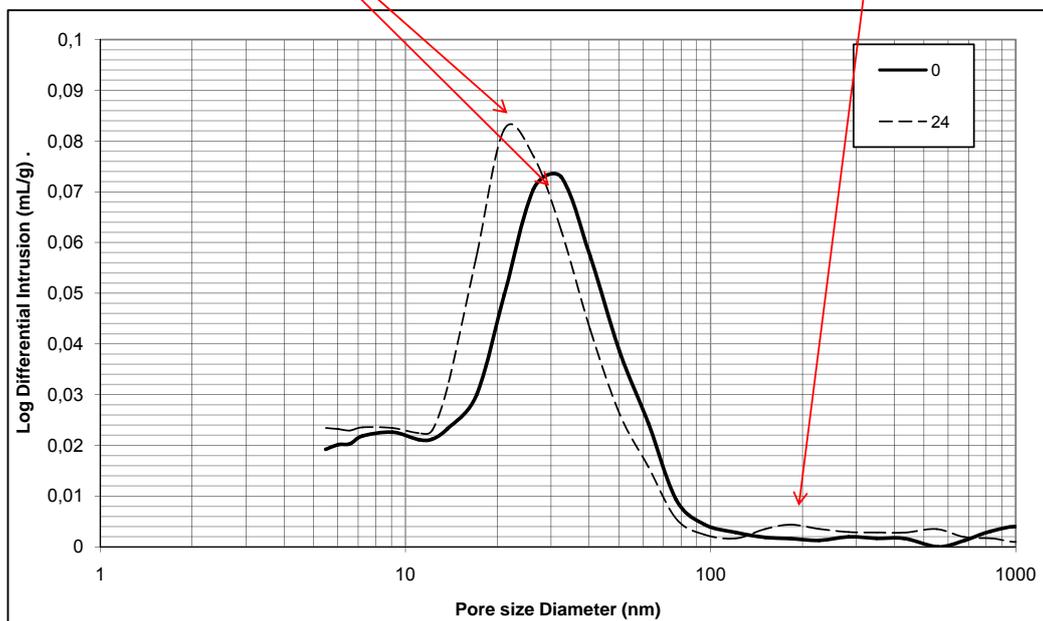
Tamaño de poro más grande donde un volumen significativo de intrusión puede ser detectado
Corresponde al primer aumento de intrusión considerable en la curva del logaritmo de la intrusión diferencial

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Porosimetría de Intrusión de Mercurio

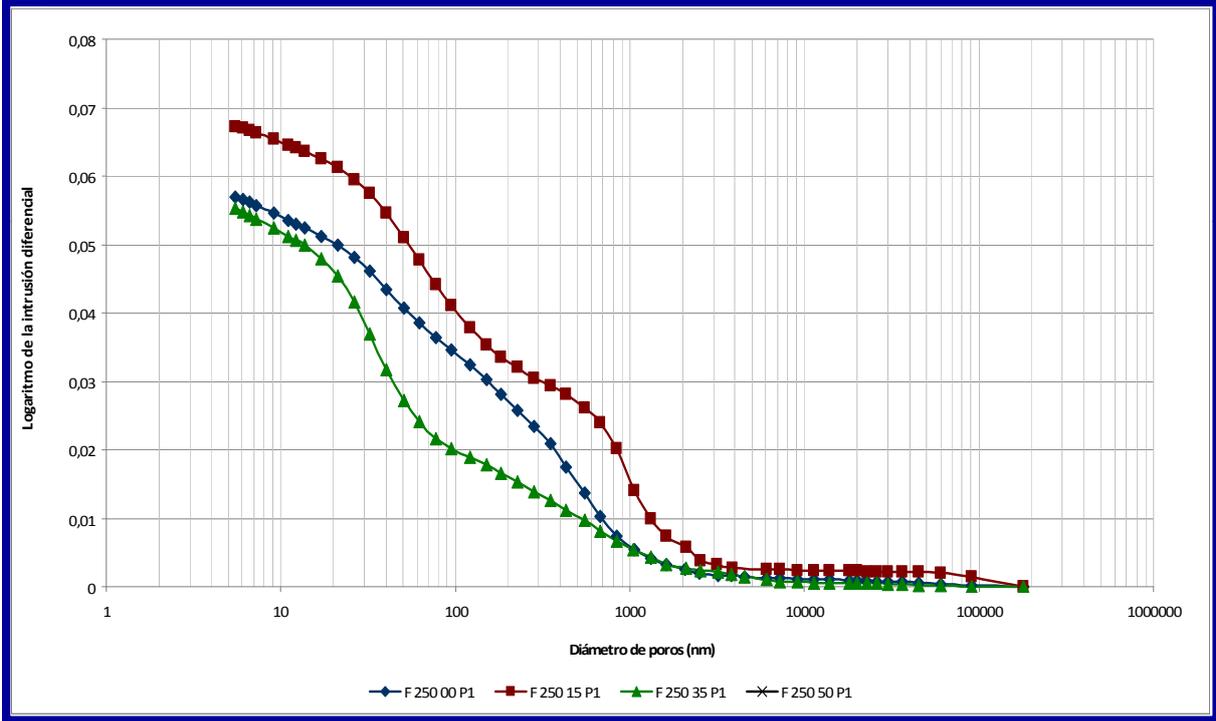
Diámetro crítico

Diámetro umbral



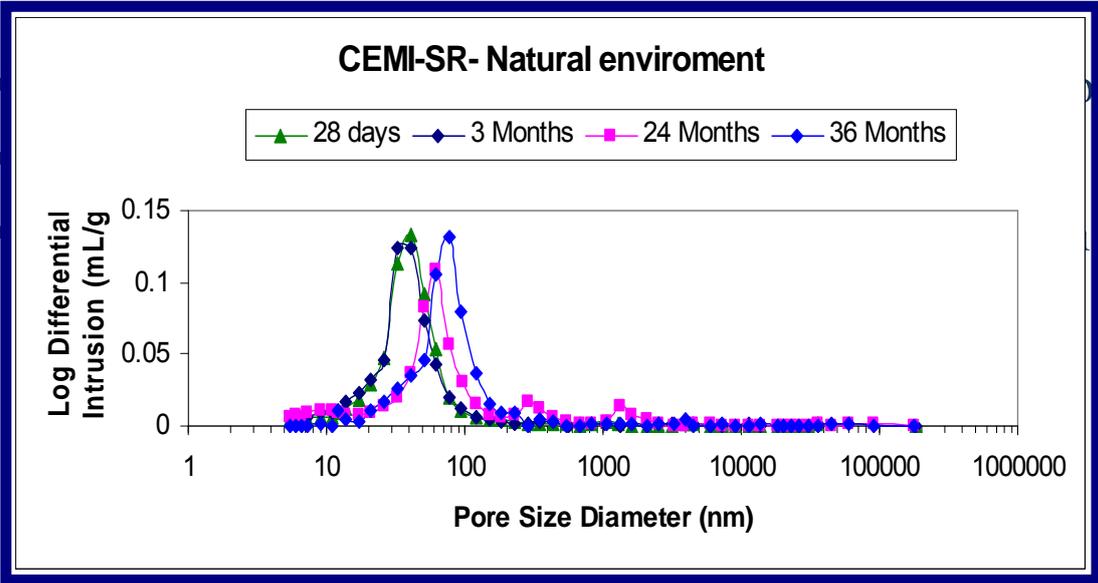
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Porosimetría de Intrusión de Mercurio



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Porosimetría de Intrusión de Mercurio



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Porosimetría de Intrusión de Mercurio

Pretratamiento de las muestras



Elección de la parte de la probeta a ensayar y corte

Tamaño de la muestra
PENETRÓMETRO

Muestra entorno a 2.5-3 g

Precalentamiento a 40° C hasta peso constante $\pm 0.1\%$ en masa

Desgasificado en desecador con bomba vacio de 40 kPa durante 30 minutos

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Porosimetría de Intrusión de Mercurio

Toma de valores de masa de la muestra y del penetrómetro



intrusión de mercurio a baja y posteriormente alta presión

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Porosimetría de Intrusión de Mercurio

Limitaciones a la técnica

S. Diamond publicó en *Cement and Concrete Research* 30, pp. 1517-1525, 2000 . *Mercury porosimetry an inappropriate method for the measurement of pore size distribution in cement based materials*

- ✓ Los datos respecto al ángulo de contacto y la tensión superficial
- ✓ Tratamiento de la muestra
- ✓ Validez de la ecuación
- ✓ Cuellos de botella

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN



MECANISMOS DE TRANSPORTE Y ATAQUE QUIMICO AL HORMIGÓN

Amparo Moragues Terrades
E.T.S I. Caminos, Canales y Puertos

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Caracterización microestructural

Penetración del agua: PERMEABILIDAD

POROSIDAD

- Porosidad total
- Distribución de tamaño de poro
- Estructura del poro
- Grado de conectividad entre poros

MECANISMOS

- Succión capilar
- Convección
- Difusión
- Migración

CEMENTO

- Composición química y mineralógica del cemento
- Grado de hidratación
- Interfaz pasta-árido

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

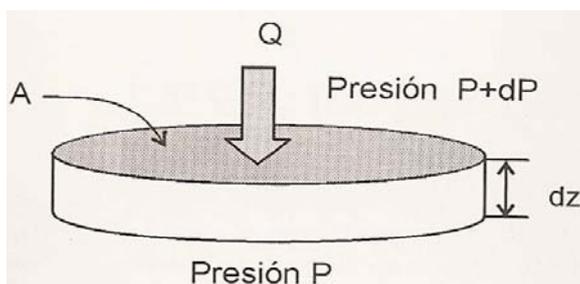
Permeabilidad a un gas

Poros conectados

$$Q = \frac{\pi(P_1 - P_2)r^4}{8\mu L} = \frac{r^2}{8\mu} \pi r^2 \frac{(P_1 - P_2)}{L} = -\left(\frac{K}{\mu}\right) A \frac{dP}{dz}$$

Ec. Hagen-Poiseuille

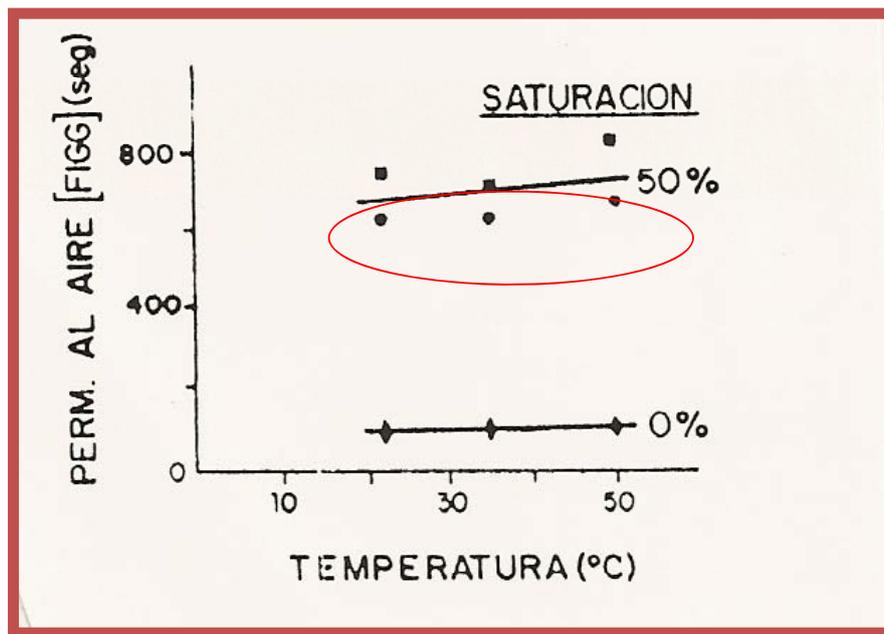
Ec. Darcy



Q caudal de un fluido
 μ viscosidad
 A área de la sección
 r radio del poro
 dz espesor de la sección
 dP gradiente de presión

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Factores que influyen en la permeabilidad



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Permeabilidad al agua

PERMEABILIDAD

$$V = \frac{Q}{A} \quad Q = -\left(\frac{k}{\mu}\right) \frac{dP}{dz} \quad dP = P_e \frac{dh}{dz} \quad V = -\left(\frac{kP_e}{\mu}\right) \frac{dh}{dz}$$

$$k_w = \frac{kP_e}{\mu} \quad \text{coeficiente de permeabilidad} \quad [\text{longitud/tiempo}]$$

Q caudal de un fluido

V velocidad de flujo aparente

A área de la sección

Pe peso específico agua

μ viscosidad

dz espesor de la sección

dP gradiente de presión hidráulico

$$10^{-11} - 10^{-12} \text{ m/s}$$

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Permeabilidad al agua

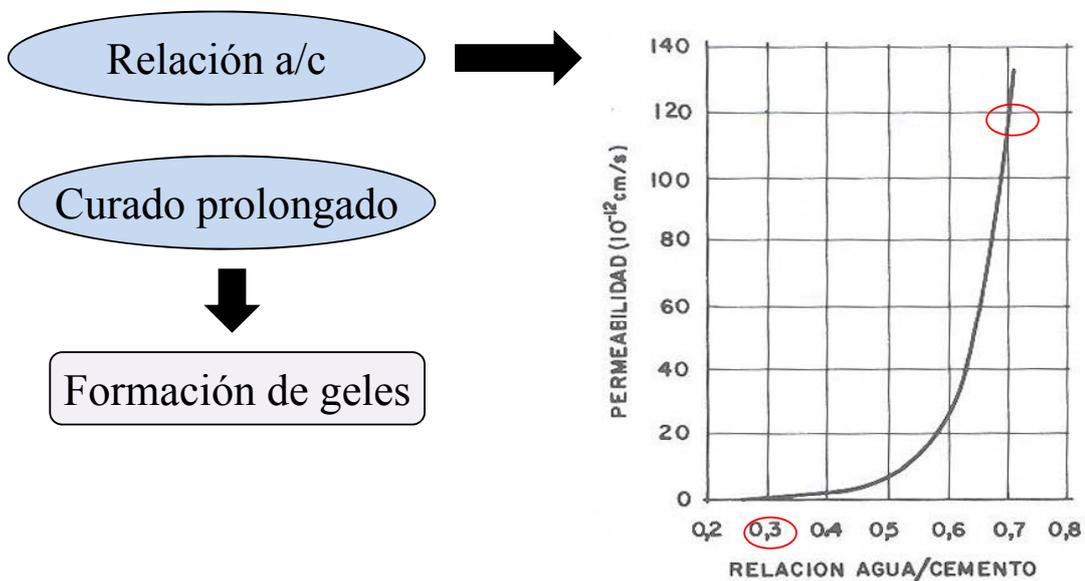
Valores de profundidad de penetración de agua a presión máxima y media

Clase de exposición ambiental	Especificaciones para las profundidades máxima	Especificaciones para las profundidades medias
IIIc, Qc, Qb (solo en el caso de elementos pretensados)	$Z_m = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3}{3} \leq 30 \text{ mm}$ $Z_3 \leq 40 \text{ mm}$	$T_m = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \leq 20 \text{ mm}$ $T_3 \leq 27 \text{ mm}$
IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F, Qb (en el caso de elementos en masa o armados)	$Z_m = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3}{3} \leq 50 \text{ mm}$ $Z_3 \leq 65 \text{ mm}$	$T_m = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \leq 30 \text{ mm}$ $T_3 \leq 40 \text{ mm}$

Siendo Z_1 , Z_2 y Z_3 las profundidades máximas de penetración y T_1 , T_2 y T_3 las profundidades medias de penetración

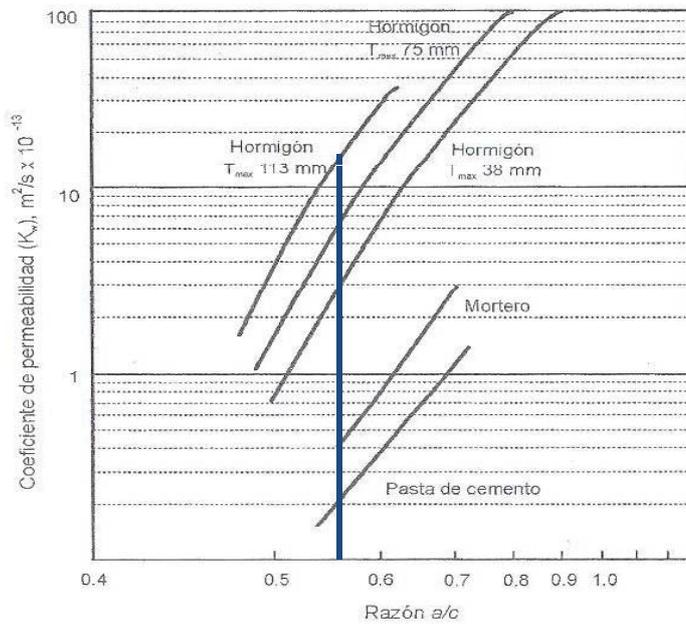
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Factores que influyen en la permeabilidad: a/c



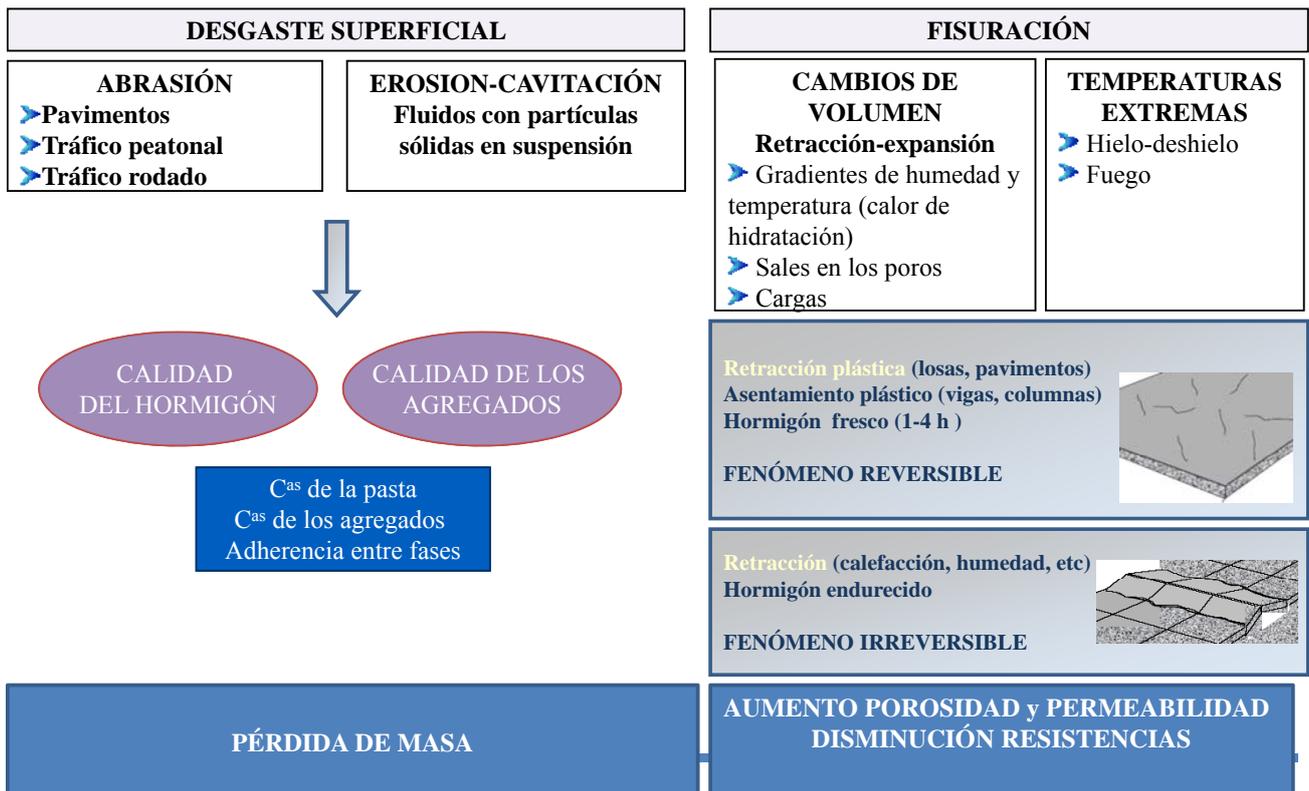
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Factores que influyen en la permeabilidad: a/c



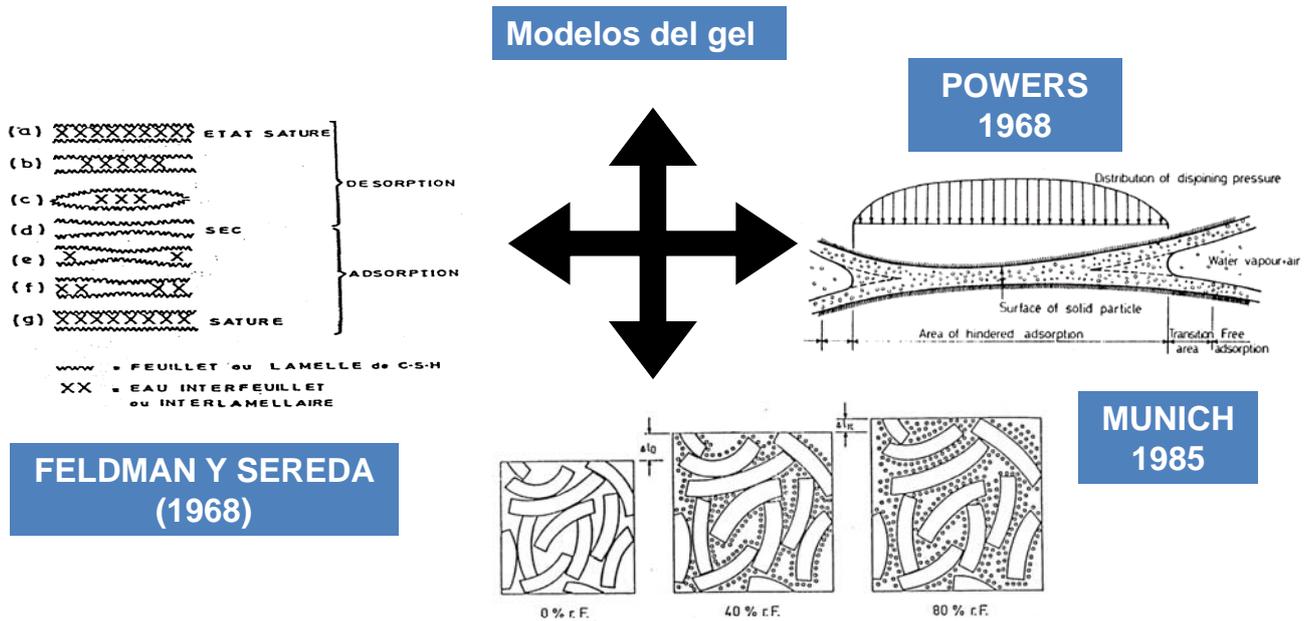
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Proceso de degradación: ataque físico



PROCESOS DE HIDRATACION DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGON

Formación física de laminas de silicatos cálcicos hidratados.



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Proceso de degradación: ataque químico

Proceso de degradación causado por agentes agresivos en el ambiente externo a la estructura que se transportan en solución hacia su interior y reaccionan con algún constituyente de la pasta de cemento

Penetración del agua: PERMEABILIDAD

POROSIDAD	MECANISMOS	CEMENTO
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Porosidad total ➤ Distribución de tamaño de poro ➤ Estructura del poro ➤ Grado de conectividad entre poros 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Succión capilar ➤ Convección ➤ Difusión ➤ Migración 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Composición química y mineralógica del cemento ➤ Grado de hidratación ➤ Interfaz pasta-árido

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Mecanismos de transporte

Succión capilar

Fuerza intermolecular líquido < fuerza de adhesión líquido-material

$$h = \frac{2\gamma}{rg\rho} \cos\theta$$

γ tensión superficial
 ρ densidad líquido
 r radio poro
 θ ángulo de contacto
 g aceleración gravedad

Condiciones de secado: (solo poros pequeños llenos)

- absorción capilar hacia esos poros

Condiciones de saturación:

- absorción capilar de la parte húmeda a la seca

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Mecanismos de transporte

Convección

Proceso de transporte cuya fuerza impulsora del movimiento del agua está provocada por gradientes de temperatura

Difusión

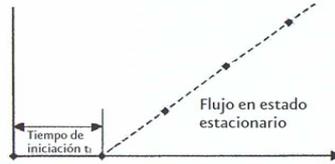
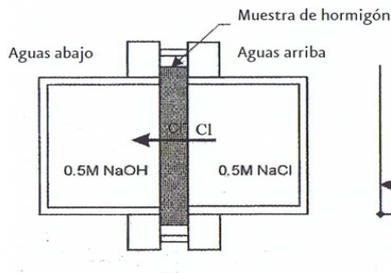
Proceso de transporte de un constituyente cuya fuerza impulsora del transporte es el gradiente de concentración

Difusividad: capacidad de transporte por diferencia de concentraciones en la fase acuosa del hormigón

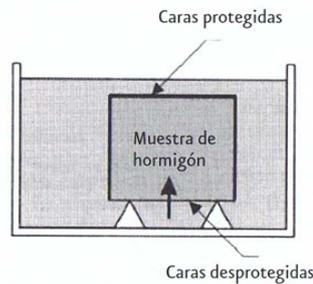
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Mecanismos de transporte

Difusión



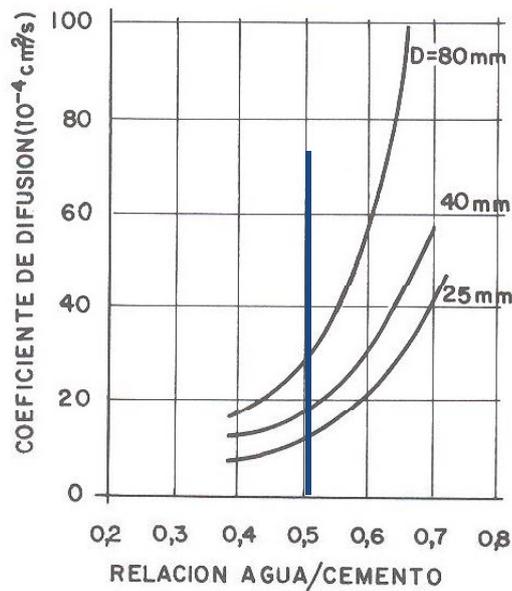
Difusión estacionaria



Difusión no estacionaria

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Mecanismos de transporte

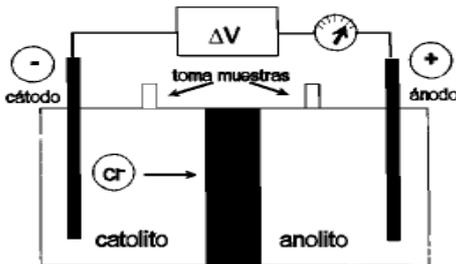


PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Mecanismos de transporte

Migración

Fuerza impulsora del transporte está provocada por una diferencia de potencial.

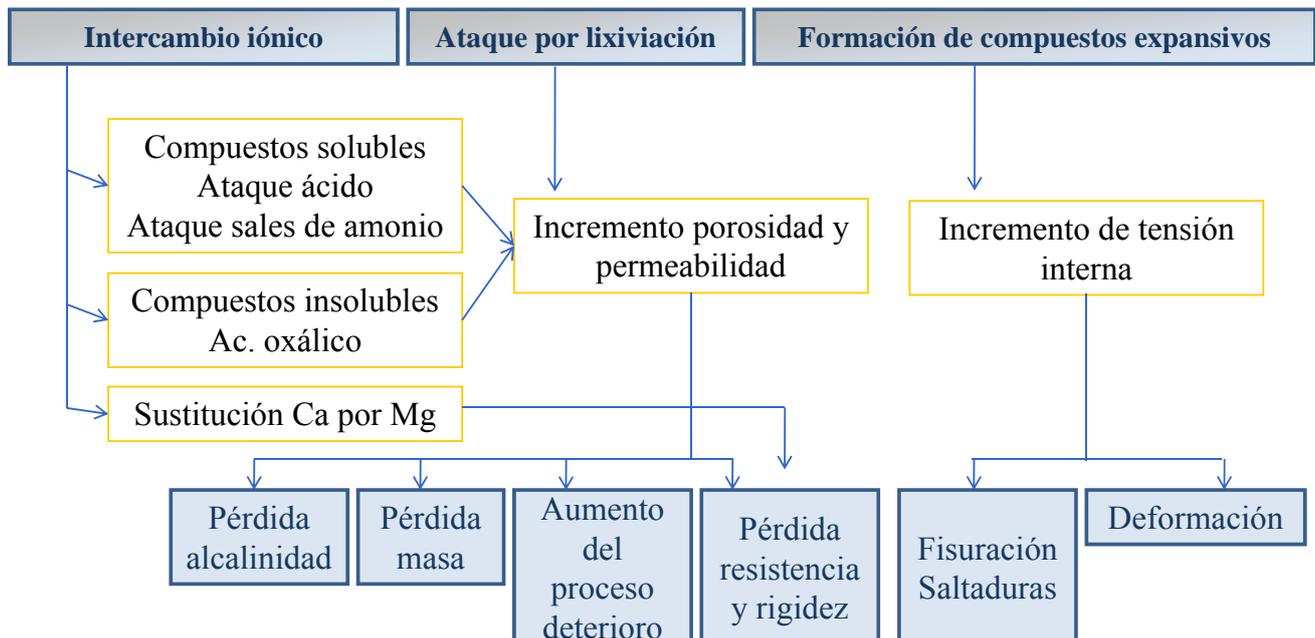


Célula de difusión /migración estacionaria

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Proceso de degradación: ataque químico

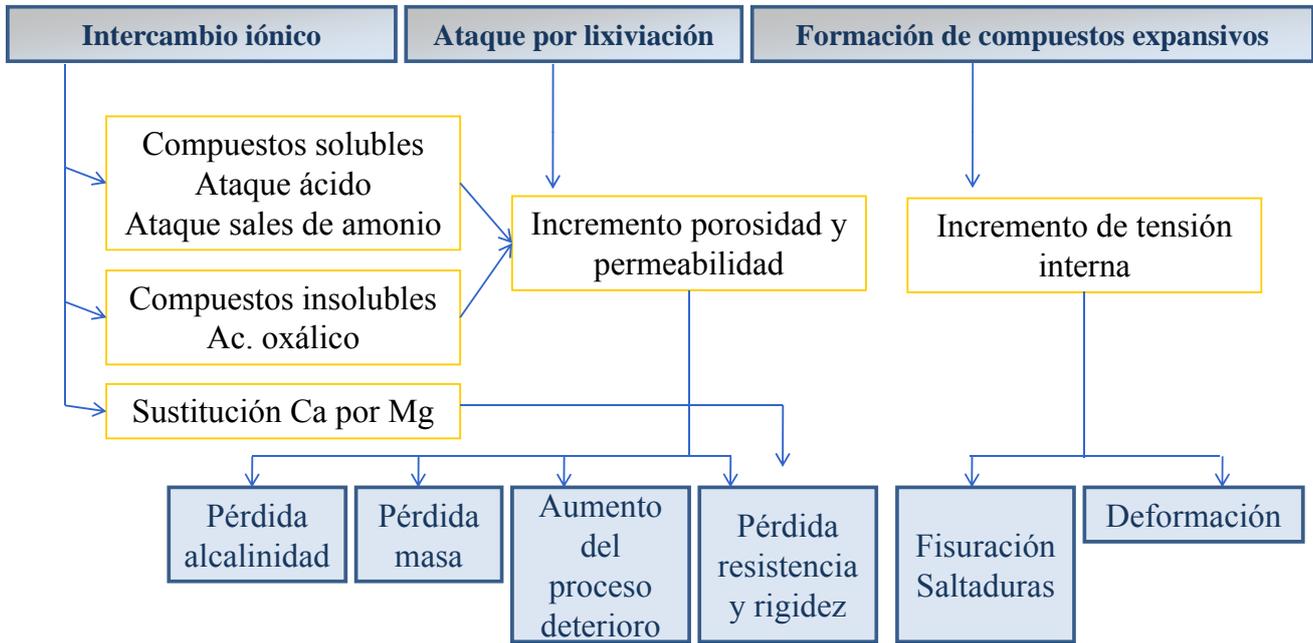
Mehta (1986)



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Proceso de degradación: ataque químico

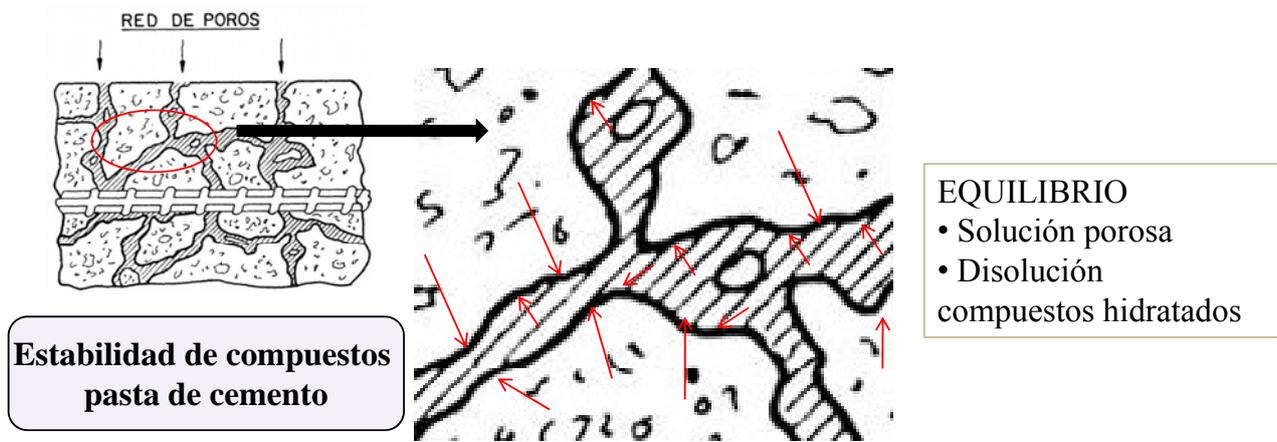
Mehta (1986)



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque químico. Tipos de ataque

Ataque ácido



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

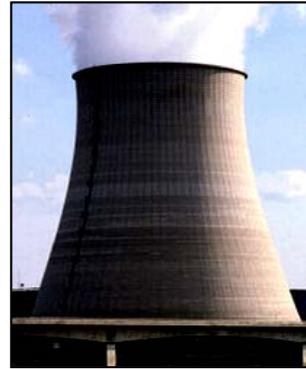
Ataque químico. Tipos de ataque

Ataque ácido: lixiviación de compuestos cálcicos



Ataque de Agua (H₂O)

Descomposición (hidrolizan) los productos hidratados
Sales de calcio cristalizadas en superficie (evaporación o carbonatación)



Ataque de la matriz cementicia por disolución progresiva
El agua, debilmente mineralizada, reacciona con los iones Ca²⁺ y destruye progresivamente el hormigón

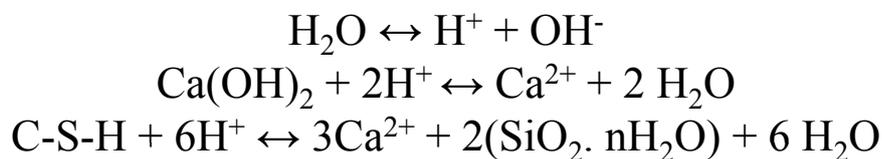
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque químico. Tipos de ataque

Ataque por intercambio iónico

- Aguas con productos orgánicos en descomposición
- Aguas con contenidos en pirita (sulfuro de hierro)
- Aguas con sulfuros
- Aguas con contenido óxidos de azufre (SO₃) (lluvia ácida)
- Aguas con contenido disuelto de CO₂

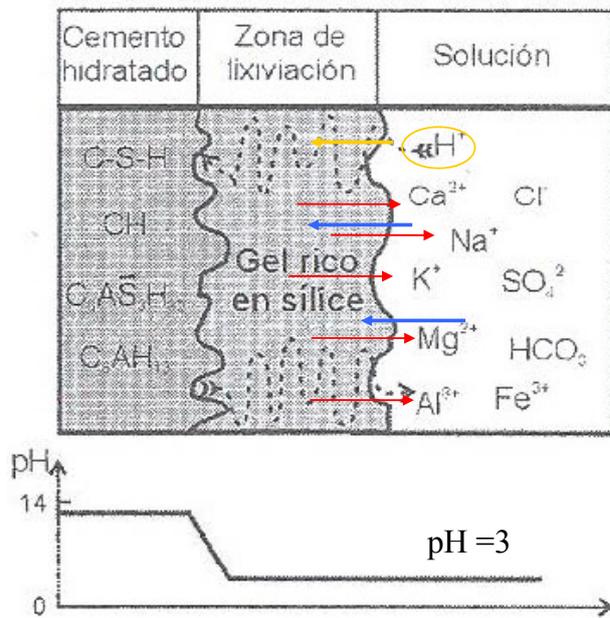
Ácido + Compuestos cálcicos (base) → Sal cálcica + Agua



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque químico. Tipos de ataque

Ataque por intercambio iónico



Esquema de ataque ácido en la pasta de cemento

Formación de sales solubles

Reducción alcalinidad

Pérdida resistencia

- Eflorescencias
- Disolución pasta
- Desprendimiento de masa de hormigón

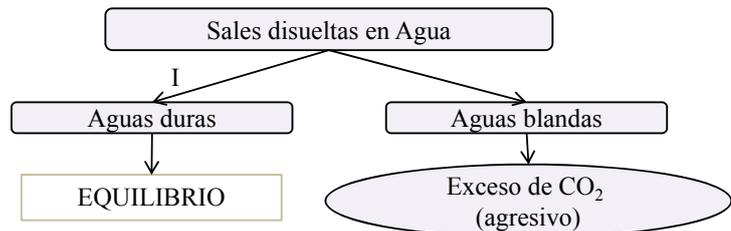
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque químico. Tipos de ataque

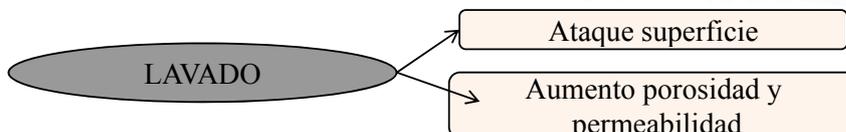
Ataque por ácido carbónico



Uso de cemento con adiciones



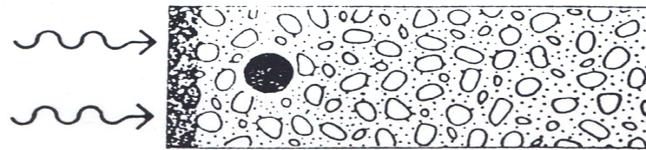
Dureza en CaCO ₃ (mg/l)	CO ₂ agresivo (mg/l)	Agresividad
< 3.5	+ de 15	Alta
	- de 15	Baja
3.5 - 35	+ de 15	Alta
	- de 15	Baja
> 35	+ de 15	Alta
	- de 15	Baja



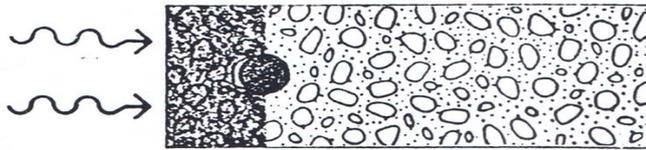
PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque químico. Tipos de ataque

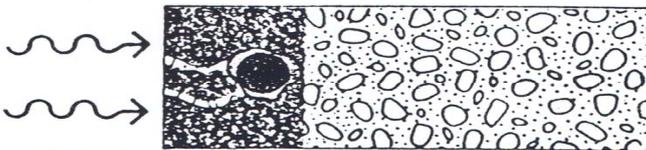
Ataque por ácido carbónico



1. hormigón alcalino (pH 12.5)



2. penetración de CO₂ = carbonatación
alcalinidad inferior a pH 9



3. la penetración de agua y de oxígeno ocasiona la oxidación de la armadura metálica, después de 5 a 20 años.

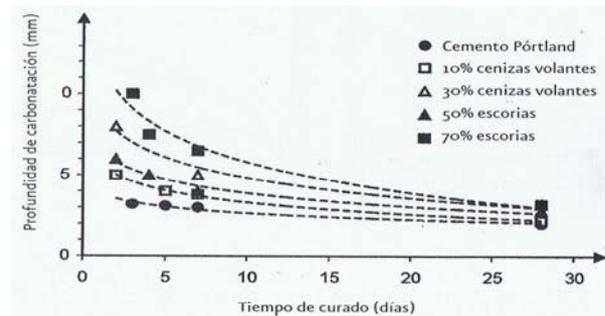
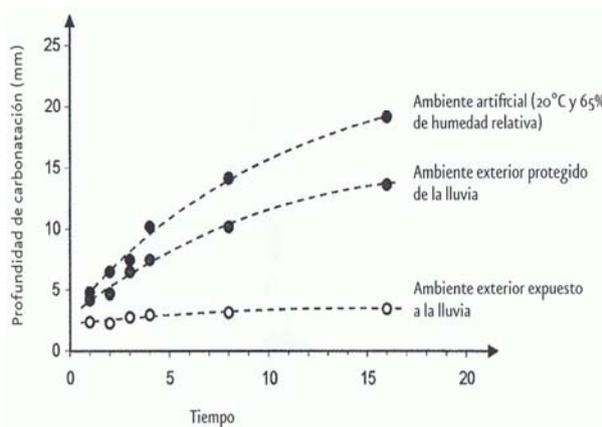
$$t_i = \left(\frac{d}{K_c} \right)^2$$

$$2-15\text{mm}/(\text{año})^{1/2}$$

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque químico. Tipos de ataque

Ataque por ácido carbónico

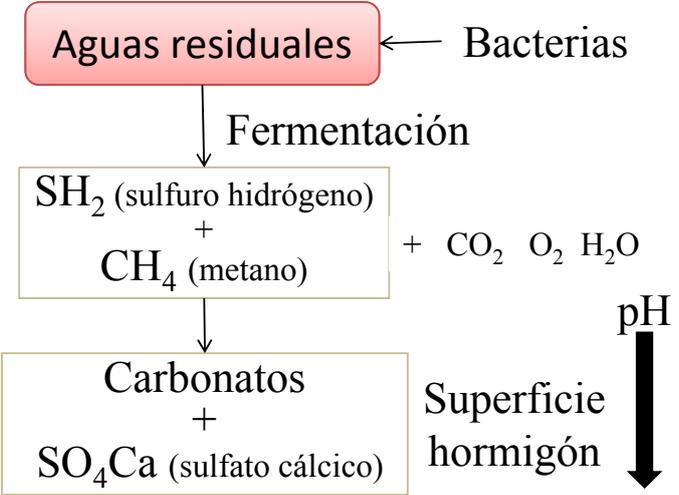


PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque ácido en desagües



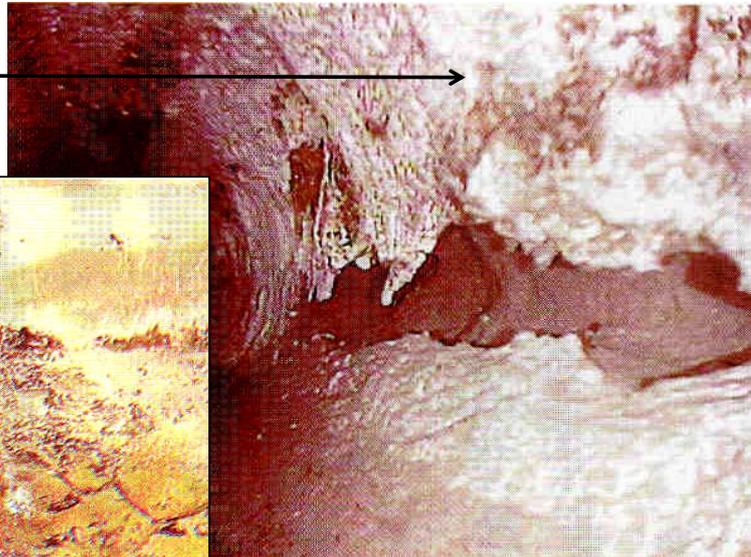
USO DE CEMENTOS CON HUMO DE SÍLICE



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque ácido en desagües

Carbonatos
+
SO₄Ca (sulfato cálcico)



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque ácido

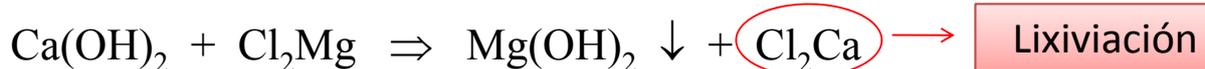
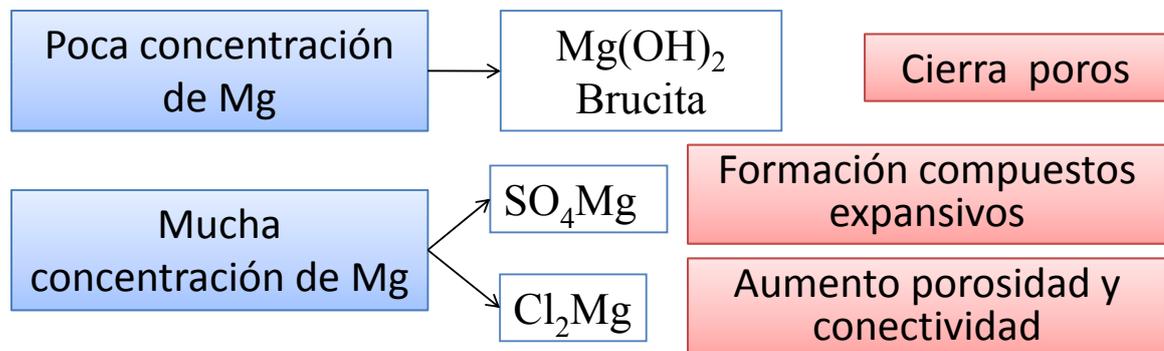
Estabilidad de los distintos compuestos

pH 12,5	Se disuelve la portlandita, Ca(OH)_2 Precipita la etringita: $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$.
pH 12,5-12,0	Se disuelve la fase $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 13\text{H}_2\text{O}$.
pH 11,6-10,0	Precipita el yeso, $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$
pH 10,6	Precipita Gipsita, Al(OH)_3 y yeso, $\text{CaSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$ a expensas de la disolución de etringita.
pH 8,8	Precipita sílice amorfa, SiO_2 y se disuelve el gel CSH.

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

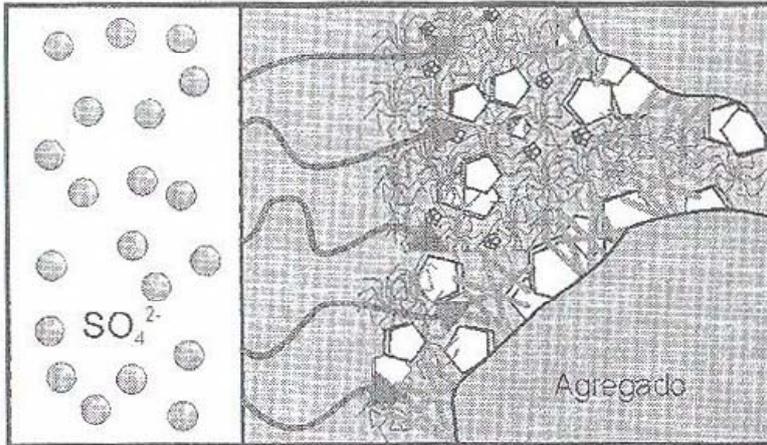
Ataque de soluciones conteniendo magnesio

Cloruros, sulfatos y bicarbonatos se encuentran en agua de mar, industriales y subterráneas. El ataque depende del anión



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque por sulfatos



- ✓ Terrenos con yeso
- ✓ Sulfatos alcalinos
 - Sulfato sódico
 - Sulfato potásico
 - Sulfato de magnesio
- ✓ Sulfato de aluminio
- ✓ Sulfato de amonio

Ambiente con sulfatos	Proceso de transporte	Reacción con los hidratos de la pasta
-----------------------	-----------------------	---------------------------------------

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque por sulfatos

Solo ocurre cuando el agua transporta los iones SO_4^{2-} en solución dentro del hormigón

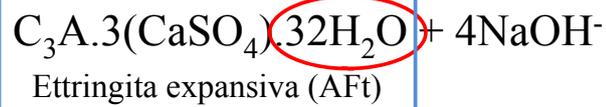
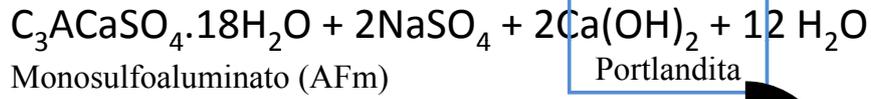
Mecanismos de ataque

- ✓ Formación de ettringita
- ✓ Formación de yeso
- ✓ Formación de thaumasita
- ✓ Formación de brucita, yeso y descomposición del gel de sílice C-S-H
- ✓ Cristalización de sales

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque por sulfatos

Formación de ettringita

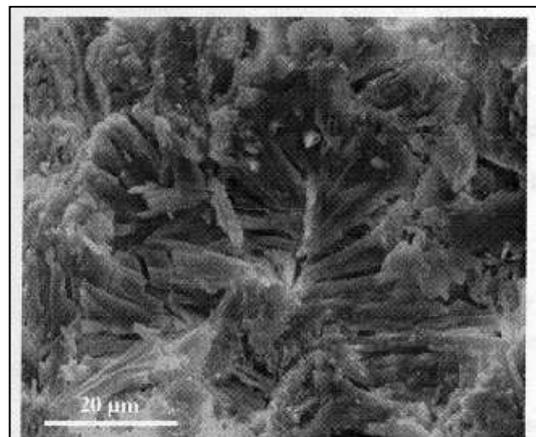
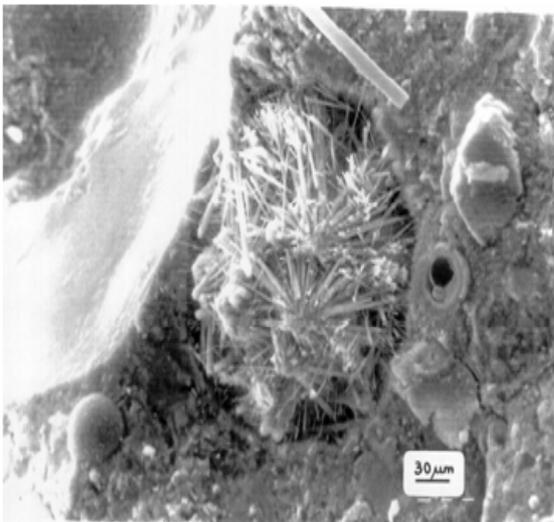


Fisuración progresiva
Aumento porosidad
Disminución resistencia

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque por sulfatos

Ettringita primaria



Ettringita secundaria fuertemente comprimida en la interfase (x2000)

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque por sulfatos

Prevención del ataque

Reducción permeabilidad

Baja relación a/c
Alto contenido en cemento
Correcto compactado
Curado prolongado

Uso de adiciones activas

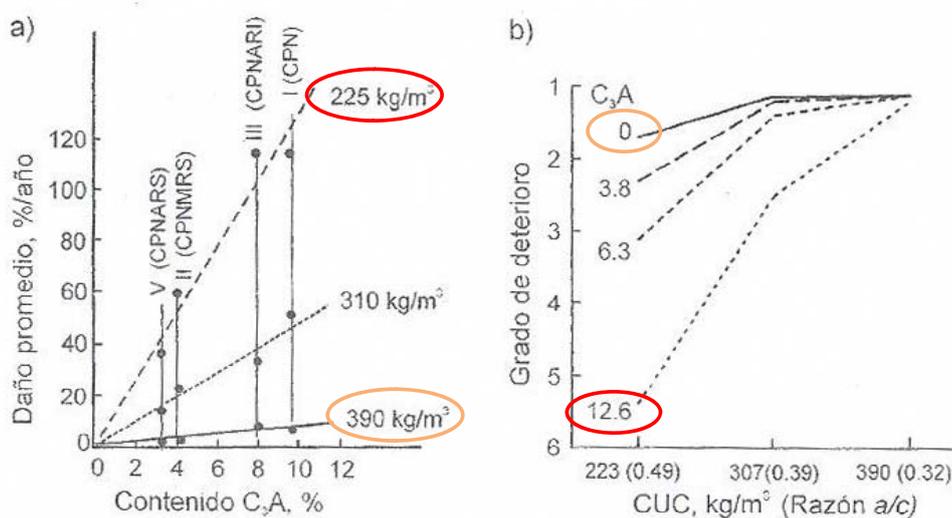
Cenizas volantes de bajo calcio
Escorias de alto horno
Puzolanas naturales
Humo de sílice

Reducción C₃A

Cementos con características
adicionales SR

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque por sulfatos

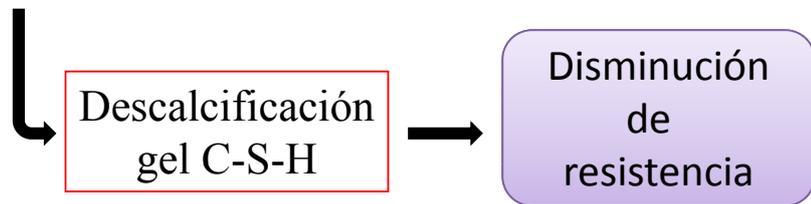
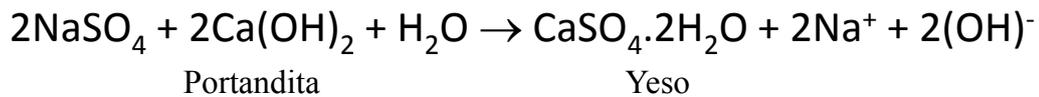


PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque por sulfatos

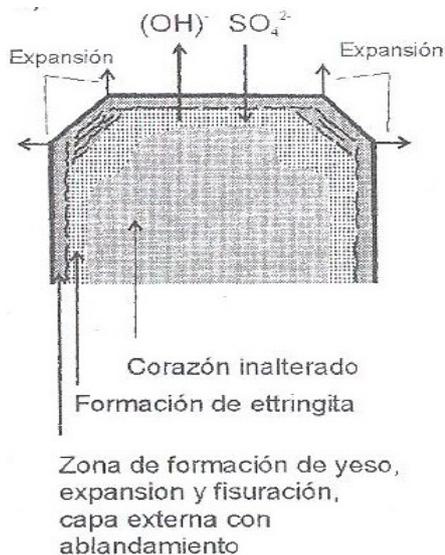
Formación de yeso

- Reacción intercambio iónico
- Soluciones concentradas (> 1000 mg/l)
- Cristalización en los poros y en la interfase pasta-agregado



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque por sulfatos



Esquema del ataque por sulfato sódico sobre pasta de cemento

Formación de ettringita

Formación de yeso

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque por sulfatos

Formación de brucita, yeso y descomposición del gel C-S-H

Ataque de sulfato de magnesio

Concentración baja
 $MgSO_4 < 0.48\%$

Formación ettringita

Concentración media
 $0.48\% < MgSO_4 < 0.75\%$

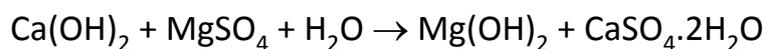
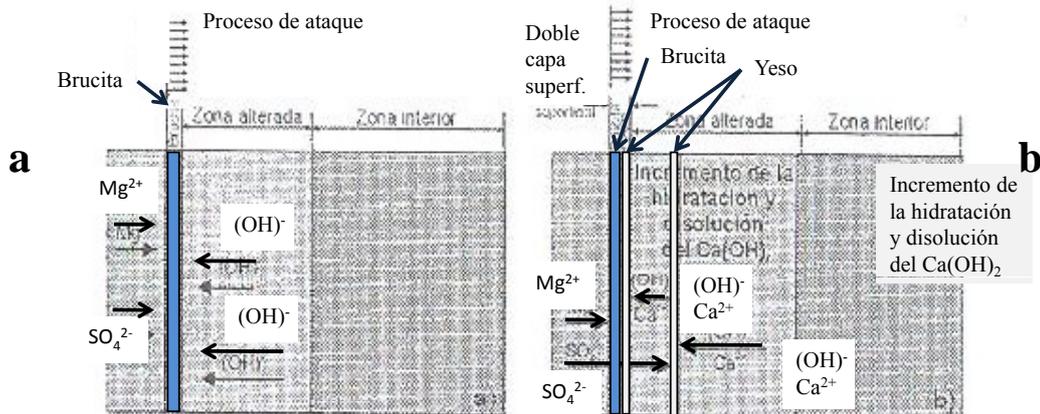
Formación ettringita y yeso

Concentración alta
 $MgSO_4 > 0.75\%$

Descalcificación del gel C-S-H

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

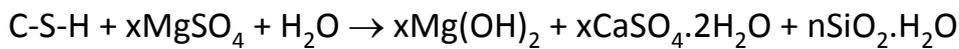
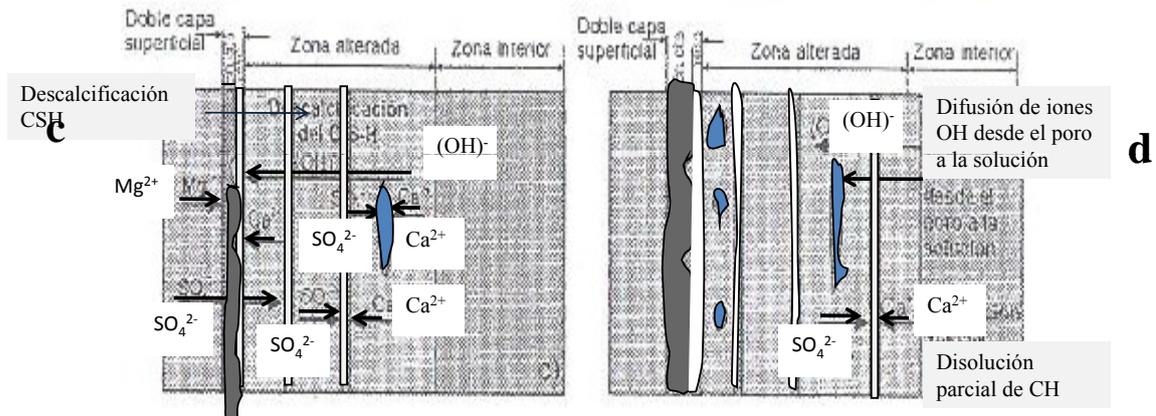
Ataque por sulfatos



- a) Difusión OH^- hacia fuera y SO_4^{2-} hacia dentro pasta. Brucita en superficie
- b) Disociación CH y aceleración hidratación de silicatos de calcio (Ca^{2+} y $(OH)^-$). Formación capa de yeso

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque por sulfatos



- c) Descalcificación del C-S-H y formación continua de capas de yeso
- d) Disociación parcial CH en zona interior y estabilidad de la microestructura por supresión de la difusión como resultado del crecimiento de la doble capa

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Ataque por sulfatos

RESULTADO DEL ATAQUE

Degradación progresiva de la matriz de cemento

Masa granular no cohesiva

Cementos con elevado contenido en adiciones minerales activas susceptibles al ataque, debido a la falta de disponibilidad de portlandita

Cementos compactos y ricos en CH
Curados muy cuidadosos

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Casos prácticos

- Perspectiva general de la situación
- Definición del problema



Descripción del tipo de muestras a analizar



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

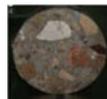
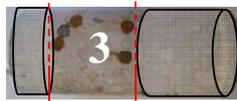
Casos prácticos: ensayos propuestos



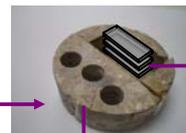
- Resistencia a compresión
- Resistencia a tracción



Permeabilidad



- Tinción de áridos
- Análisis ICP-OES



PIM

- Análisis Químico
- DRX
- Perfiles de Cloruro



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Casos prácticos: resultados

Ensayo de áridos potencialmente reactivos

Ataque con HCl
+
Tinción con Rojo de Alizarina S



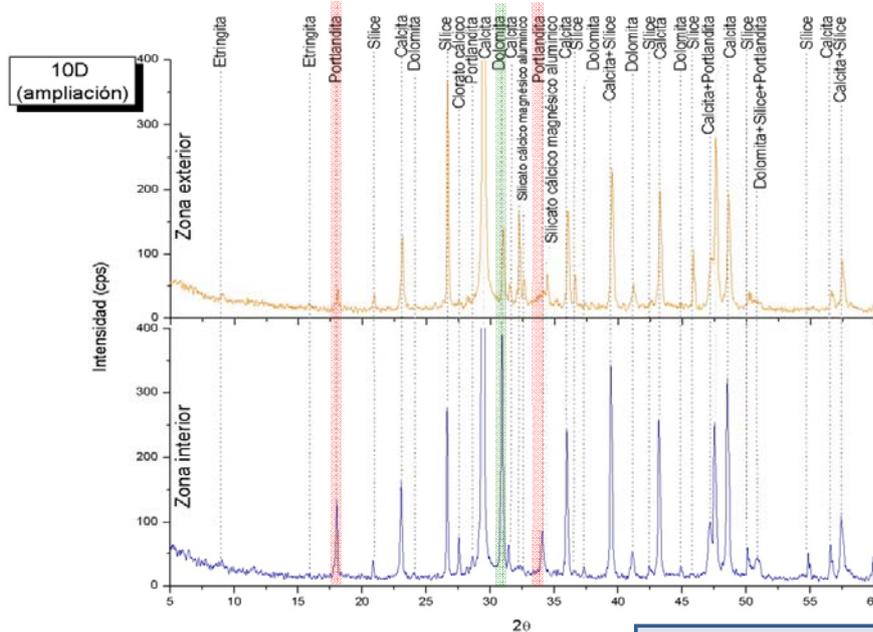
Análisis de los áridos extraídos mediante ICP-OES

Muestra	CaO (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Rel. CaO/MgO	Calificación [1]
63052-TH-0002-7	33.5	14.8	0.19	2.26	No reactivo
63052-TH-0002-11	3.0	0.1	0.2	30	No reactivo
63052-TH-0002-13	26.1	0.24	0.49	108.75	No reactivo
63052-TH-0004-1	2.10	0.32	0.32	6.56	Potencialmente reactivo
63052-TH-0004-6	4.27	0.83	0.27	5.14	Potencialmente reactivo
63052-TH-0004-11	9.76	1.20	1.27	8.13	Potencialmente reactivo

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Casos prácticos: resultados

Difracción de rayos X

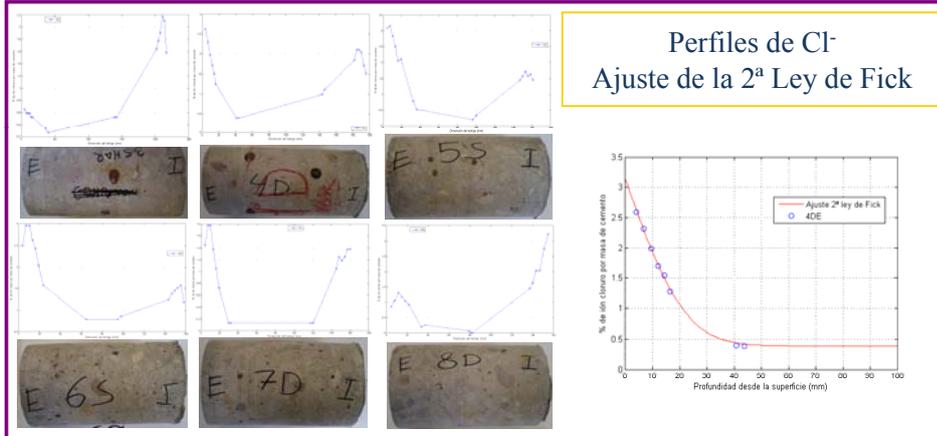


Disolución de portlandita
Variación de la cantidad de dolomita

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Casos prácticos: resultados

Perfiles de cloruro Cálculo del coeficiente de difusión



$$C(x,t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_a \cdot t}}\right)$$

Testigo	D_a (cm ² /s)	C_s (% masa de cemento)
3SE	3.86·10 ⁻⁹	0.7815
3SI	1.29·10 ⁻⁸	2.1258
4DE	3.11·10 ⁻⁹	3.1395
4DI	7.53·10 ⁻⁹	2.7662
5SE	3.08·10 ⁻⁹	4.5299
5SI	9.50·10 ⁻⁹	2.4955
6SE	2.32·10 ⁻⁹	4.0893
6SI	8.36·10 ⁻⁹	1.8557
7DE	2.58·10 ⁻⁹	3.0519
7DI	8.48·10 ⁻⁹	1.7366
8DE	1.96·10 ⁻⁹	2.6104
8DI	6.79·10 ⁻⁹	3.8030

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Casos prácticos

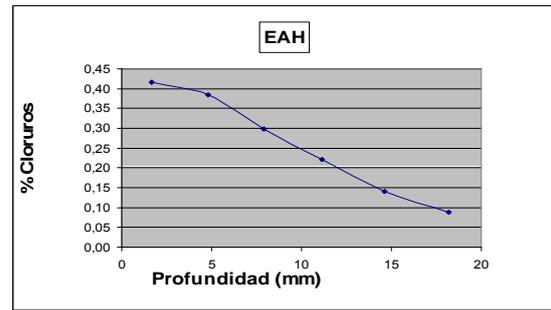
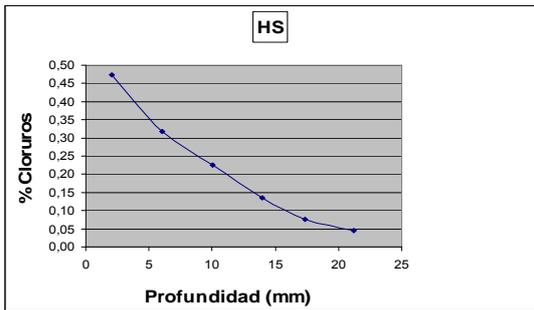
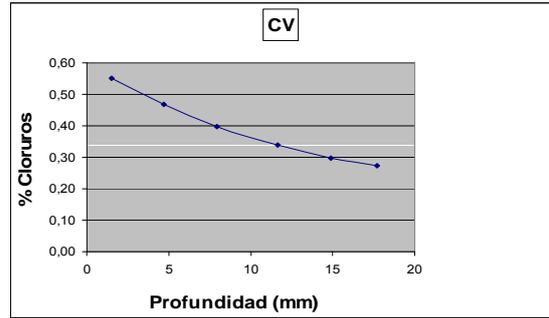
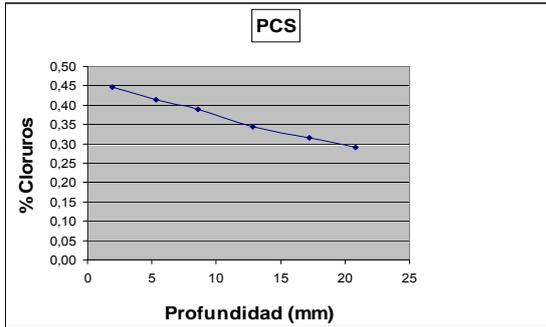
Hormigones en medio marino

Mixtures	Compressive strength (MPa)		Splitting tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)
	7 days	28 days	28 days	28 days
PCS	45	49	5	36
PCS+10%SF	51	57	4.5	38
PCS+20%FA	36	47	4	31
BS	43	53	5	38

PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

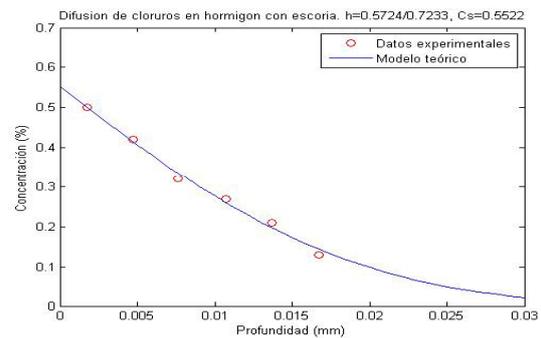
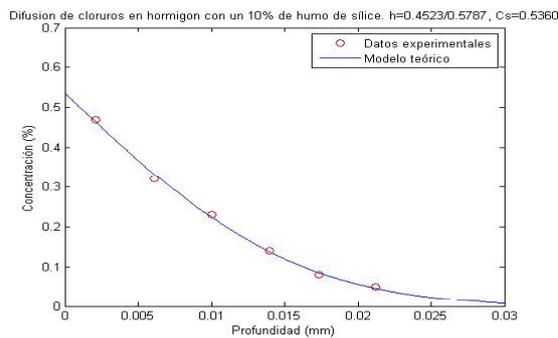
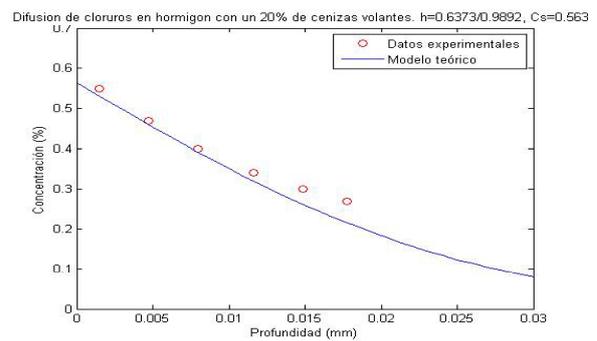
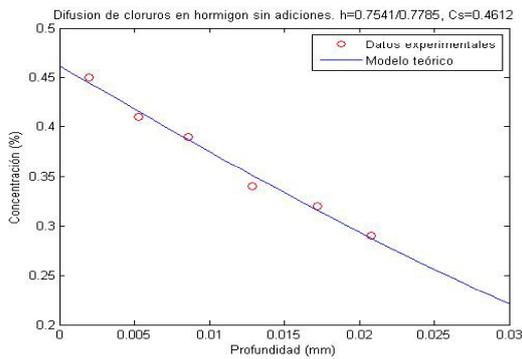
Casos prácticos

Hormigones en medio marino



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Casos prácticos



PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN