

Durabilidad de hormigones en ambientes marinos. Cálculo de vida en servicio en obras civiles

Prof. Amparo Moragues Terrades

**E. T. S. I. de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid**



ESTRATEGIAS DE DURABILIDAD EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

- Definición de durabilidad y vida útil de estructuras de hormigón
- Factores que determinan una Estrategia de Durabilidad
- Estructura del hormigón: macro y micro escala
- Mecanismos de deterioro: causas físicas y reacciones químicas



DURABILIDAD

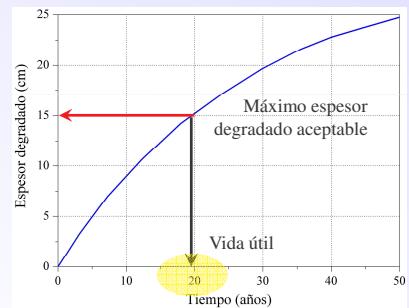
- **Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-2007)**
 - “*La durabilidad de una estructura de hormigón es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que esta expuesta y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y solicitudes consideradas en el análisis*
- **Comité Euro-International du Béton**
 - “*La mayoría de los procesos físicos y químicos que tienen influencia en la durabilidad de estructuras de hormigón están condicionados por el transporte de líquidos a través de sus poros y grietas.*”



VIDA ÚTIL DE UNA ESTRUCTURA

VIDA ÚTIL DE UNA ESTRUCTURA es el período de tiempo, a partir de su puesta en servicio, durante el que debe mantener unas condiciones de seguridad, funcionalidad y aspecto aceptables. durante este período requerirá una conservación normal adecuada, pero no requerirá operaciones de rehabilitación.

Tipo de estructura	Vida útil nominal (años)
Elementos reemplazables no estructurales	10 a 25
Edificios agrícolas, industriales y obras marítimas	15 a 50
Edif. de viviendas u oficinas, puentes < 10 m, estructuras de repercusión económica baja	50
Edificios monumentales o especiales	100
Puentes > 10 m o estructuras de repercusión económica alta	100



VIDA UTIL DE UNA ESTRUCTURA

PROTECCION SUPERFICIAL
AMBIENTES MUY AGRESIVOS



ADOPCION MEDIDAS CONTRA
CORROSION DE ARMADURAS



TIPOLOGÍA Y DISEÑO DE LAS
FORMAS ESTRUCTURALES



ESTRATEGIA DE DURABILIDAD



CONTROL DEL VALOR MAXIMO
DE ABERTURA DE FISURA

CALIDAD ADECUADA
DEL HORMIGÓN

ADOPCION DE UN ESPESOR DE RECUBRIMIENTO
PARA PROTECCION DE ARMADURA



VIDA ÚTIL EN LA FASE DE PROYECTO

- Debe incluir las medidas necesarias para que la estructura alcance la duración de la vida útil acordada, de acuerdo con las condiciones de agresividad ambiental y con el tipo de estructura.
- La agresividad a la que está sometida una estructura se identificará por el tipo de ambiente de acuerdo con:
 - Clases generales de exposición frente a la corrosión de las armaduras
 - Clases específicas de exposición relativas a los otros procesos de degradación que procedan para cada caso

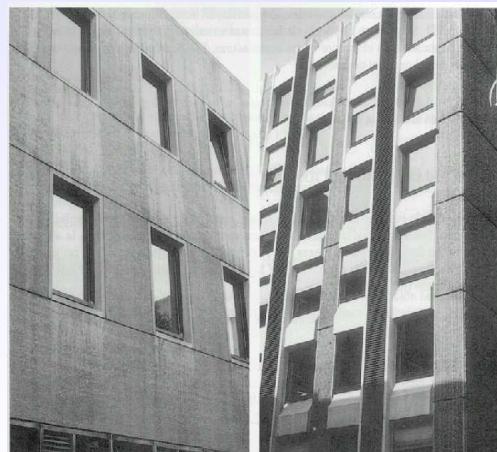


VIDA ÚTIL EN LA FASE DE PROYECTO

- En el proyecto se definirán los esquemas estructurales, las formas geométricas y los detalles que sean compatibles con la consecución de una adecuada durabilidad de la estructura.
- Se procurará evitar el empleo de diseños estructurales que sean especialmente sensibles frente a la acción del agua: evitándose en la medida de lo posible la existencia de superficies sometidas a salpicaduras o encharcamiento de agua



VIDA ÚTIL EN LA FASE DE PROYECTO



VIDA ÚTIL EN LA FASE DE EJECUCIÓN

- La buena calidad de la ejecución de la obra y, especialmente, del proceso de curado, tienen una influencia decisiva para conseguir una estructura durable.
- Las especificaciones relativas a la durabilidad deberán cumplirse en su totalidad durante la fase de ejecución. No se permitirá compensar los efectos derivados por el incumplimiento de alguna de ellas.

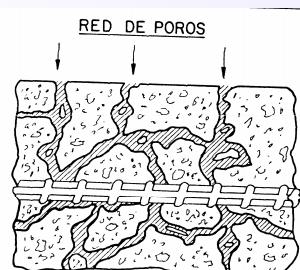


CAUSAS DE LOS PROCESOS DE DEGRADACIÓN

MECANISMOS DE DETERIORO



CAMBIOS ELEMENTOS MICRO O MACRO ESTRUCTURALES DEL HORMIGÓN



- ➔ FASES SÓLIDAS
- ➔ RED DE POROS / FASE ACUOSA
- ➔ ÁRIDOS
- ➔ ARMADURA METÁLICA



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

MICROESTRUCTURA



PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

Áridos



Matriz de cemento hidratado

- Gel CSH
- Portlandita - $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- Fases minoritarias
- Granos de cemento sin hidratar
- Red porosa



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Cemento anhidro

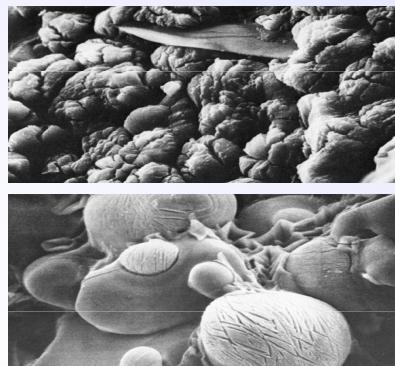
COMPOSICIÓN DE UN CEMENTO ANHIDRO

Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	45-60%
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	5-30%
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6-15%
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	6-8%
Yeso hidratado	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	C_5S	3-5%

En la química del cemento es habitual utilizar una notación particular: C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; F = Fe₂O₃; H = H₂O; S = SO₃.



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Cemento anhidro



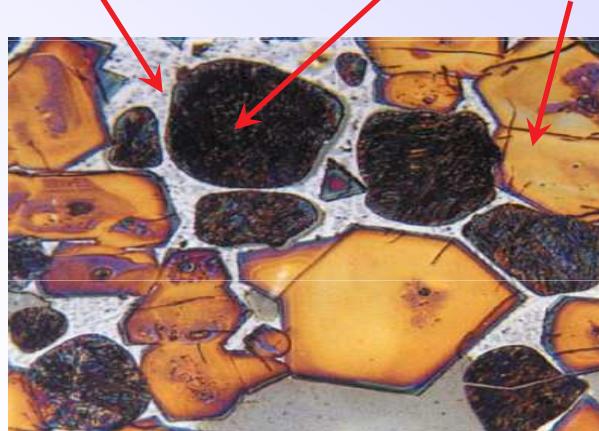
Cristales de Alita

Cristales de Belita

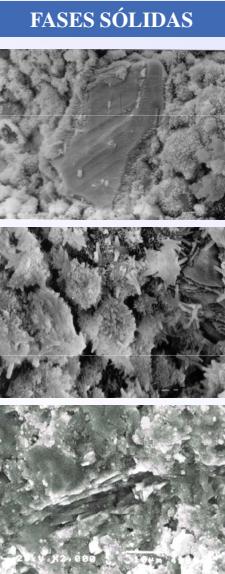


MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Cemento anhidro

Matriz de C_3A y C_4AF Belita Alita



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fases hidratadas



FASES SÓLIDAS



GEL CSH

HIDRATACIÓN
ALITA (C_3S)
BELITA (C_2S)

RESPONSABLE PROPIEDADES
MECÁNICAS DE RESISTENCIA

60% del volumen de la pasta

MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fases hidratadas

GEL DE SÍLICE

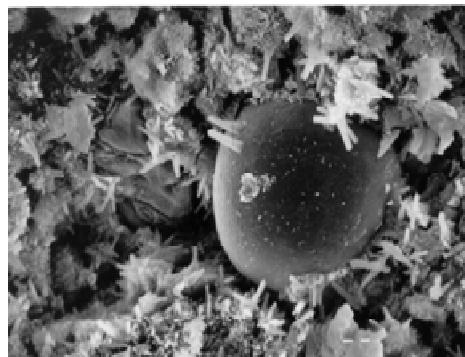


CRISTAL DE ALITA Y PRODUCTOS
DE HIDRATACION (GEL C-S-H)



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fases hidratadas

GEL DE SÍLICE



CENIZA VOLANTE Y PRODUCTOS
DE HIDRATACION



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fases hidratadas

FASES SÓLIDAS →

PORLANDITA



HIDRATACIÓN

ALITA (C_3S)

BELITA (C_2S)

RESERVA
ALCALINA DEL
HORMIGÓN

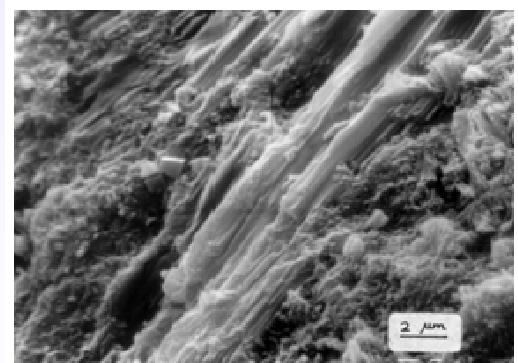
→ PROTECCIÓN
ARMADURAS
METÁLICAS

25% del volumen de la pasta



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fases hidratadas

PORLANDITA

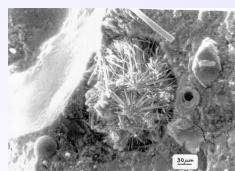


PLACAS DE PORTLANDITA



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fases hidratadas

FASES SÓLIDAS



ETRINGITA

HIDRATACIÓN

C_3A y YESO

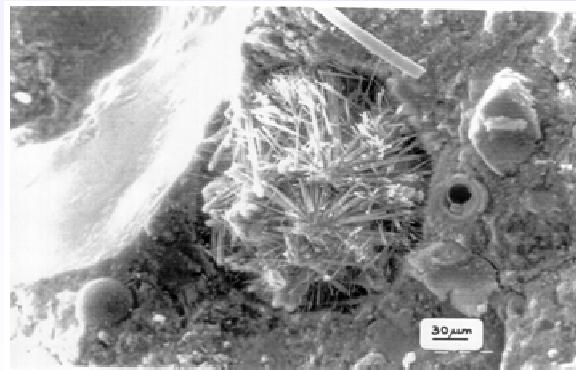
PAPEL IMPORTANTE EN
LA DURABILIDAD EN
MEDIOS SULFATADOS

15% del volumen de la pasta



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fases hidratadas

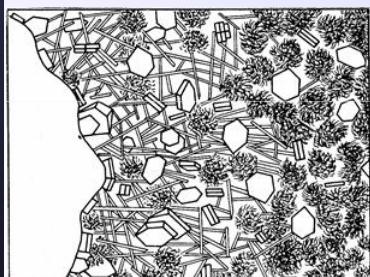
ETRINGITA



AGUJAS DE ETRINGITA EN PORO



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Áridos



ZONA DEBIL
MECÁNICAMENTE EN LA
INTERFASE CON LA PASTA

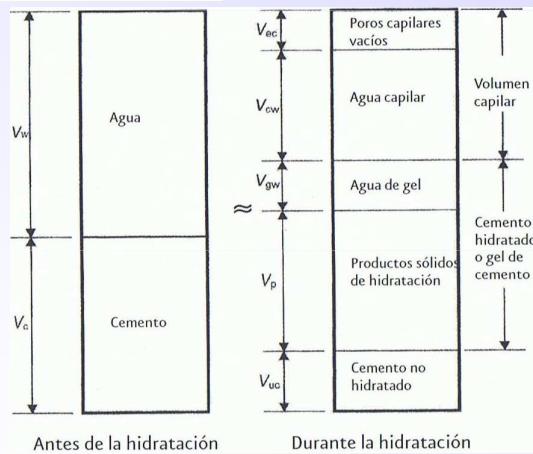


PAPEL IMPORTANTE EN LA
REACCIÓN ÁRIDO-ÁLCALI

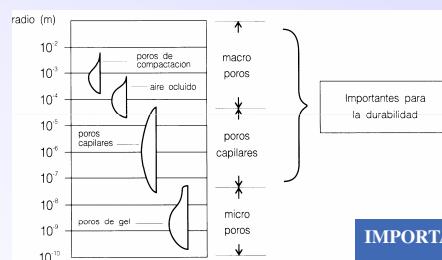


MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Porosidad

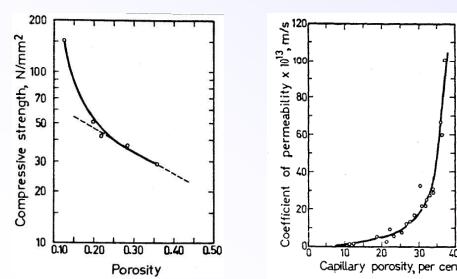
REPRESENTACIÓN VOLUMETRICA DE LA PASTA DE CEMENTO ANTES Y DESPUES DE LA HIDRATACIÓN



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Porosidad

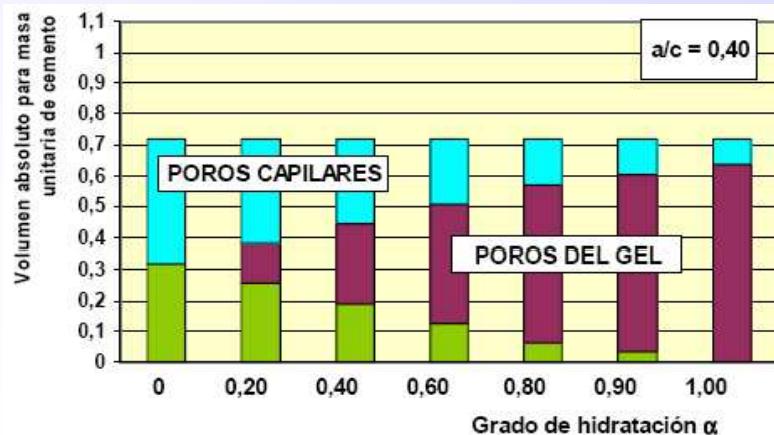


IMPORANTES PARA LA
► DURABILIDAD
► PERMEABILIDAD
► RESISTENCIAS MECÁNICAS



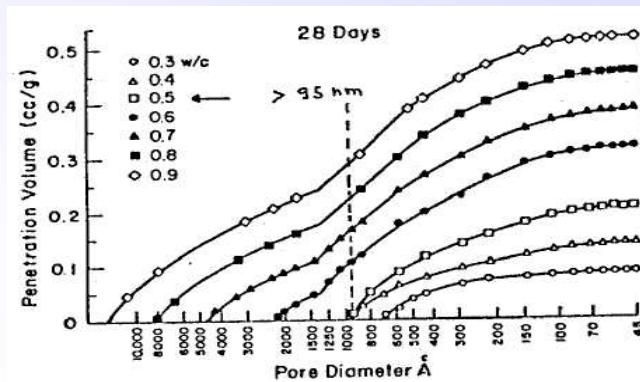
MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Porosidad

Variación del tamaño de poro en función del grado de hidratación



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Porosidad

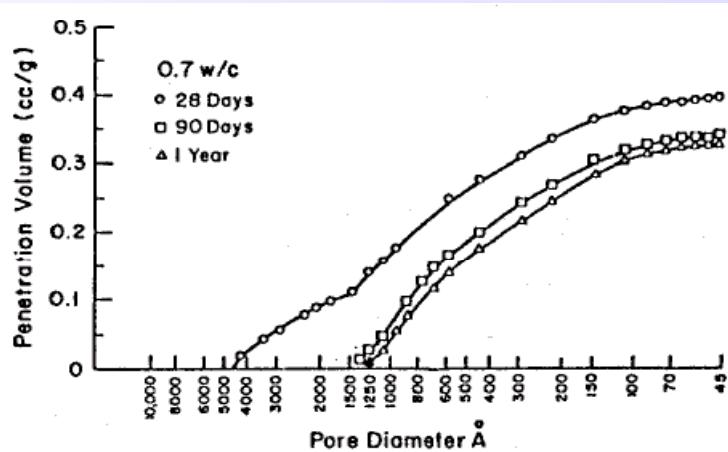
Variación de la porosidad en función de la relación agua cemento



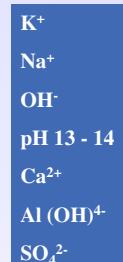
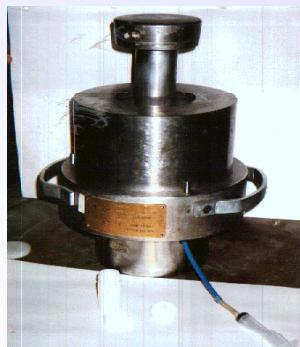
Universidad de Valladolid
Escuela Técnica Superior de Ingenieros
de Telecomunicación
y Electrónica de Computadoras

MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Porosidad

Variación de la porosidad en función del tiempo de curado



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fase acuosa



REGULA TODOS LOS
PROCESOS QUÍMICOS
Y ELECTROQUÍMICOS
DE DETERIORO



MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN: Fase acuosa

COMPOSICIÓN QUÍMICA 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	0.017
		21+28	12.4	0.0009	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	0.0006	0.009	0.003	0.022
	BWR-CO	20°	21+7	12	0.014	0.33	0.152
		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	0.006	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



CAUSAS DE LOS PROCESOS DE DEGRADACIÓN

■ Ataques físicos

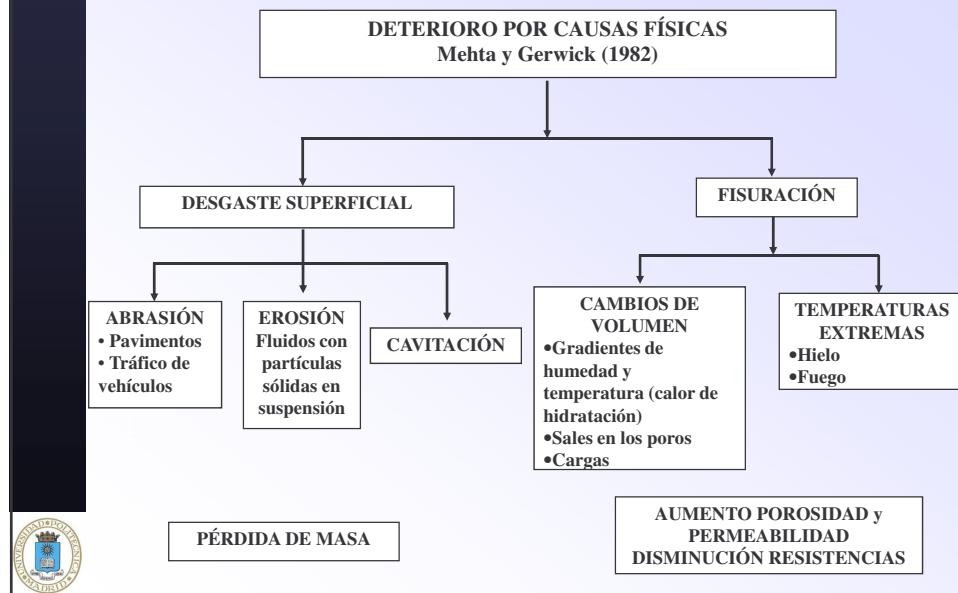
- Ciclos de hielo/deshielo
- Desgaste superficial
- Abrasión
- Erosión
- Cavitación

■ Ataques químicos

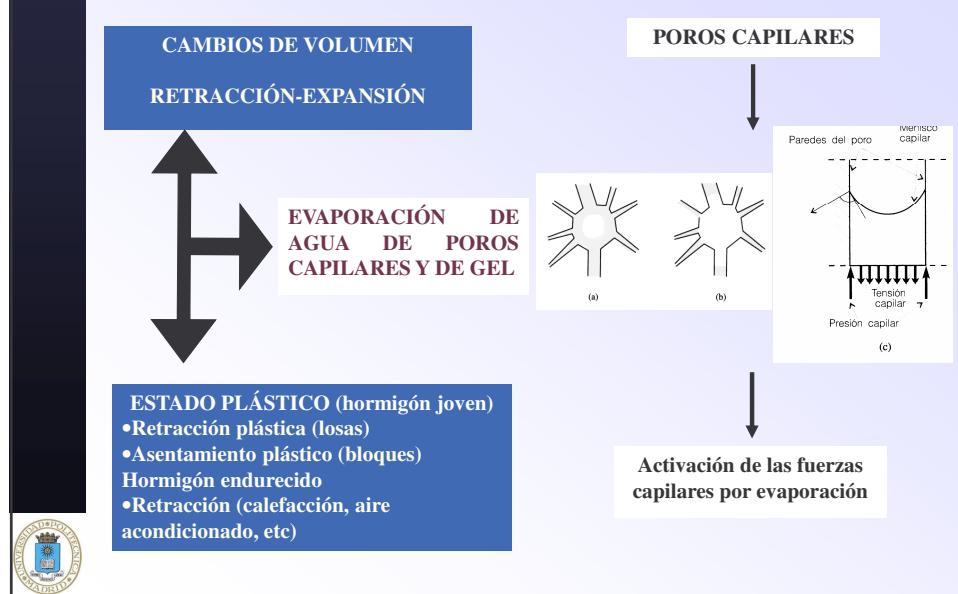
- Reacciones químicas de los áridos
- Exposición a agente químicos agresivos
- Ataque por sales
- Ataque de ácidos
- Corrosión de las armaduras



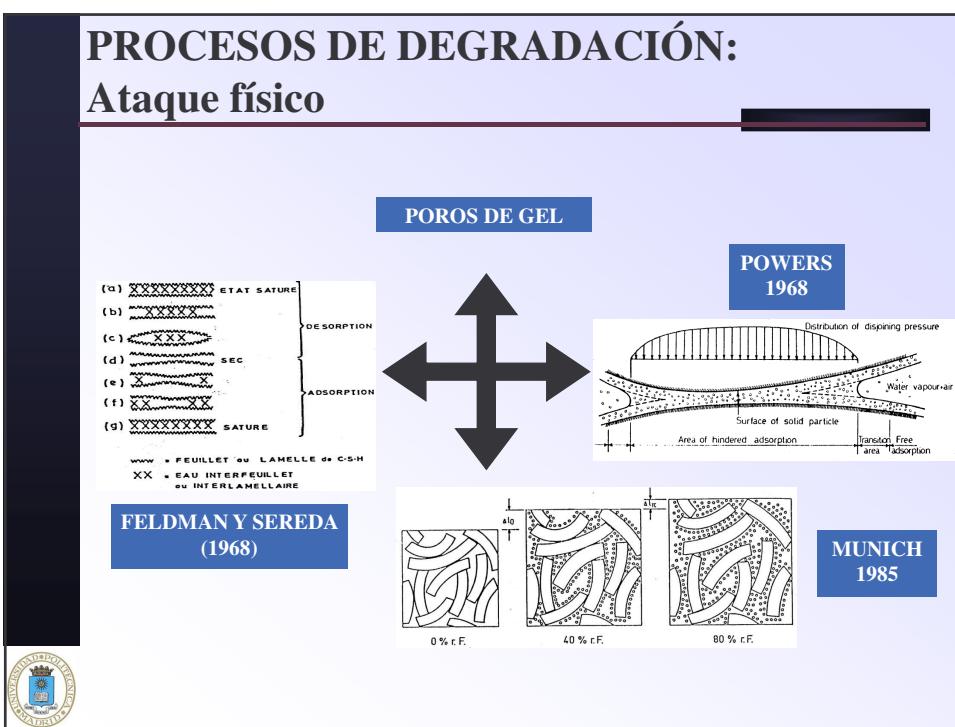
PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque físico



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque físico

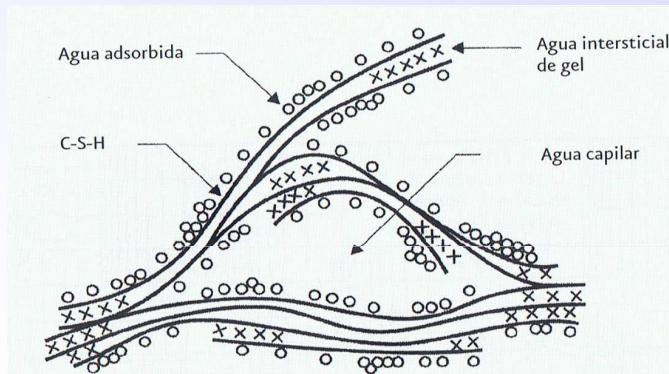


PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque físico



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque físico

FORMACIÓN FÍSICA DE LAS LAMINAS DE SILICATOS CÁLCICOS HIDRATADOS



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

■ Ataques químicos

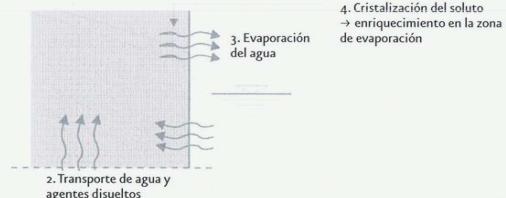
- Reacciones químicas de los áridos
 - Reacción álcali – sílice
 - Reacción álcali – carbonato
- Exposición a agentes químicos agresivos
 - Ataque por sales
 - Ataque de ácidos
- Corrosión de las armaduras



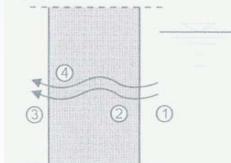
PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

MECANISMOS DE TRANSPORTE

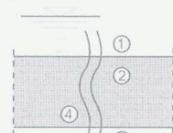
Ejemplo 1



Ejemplo 2

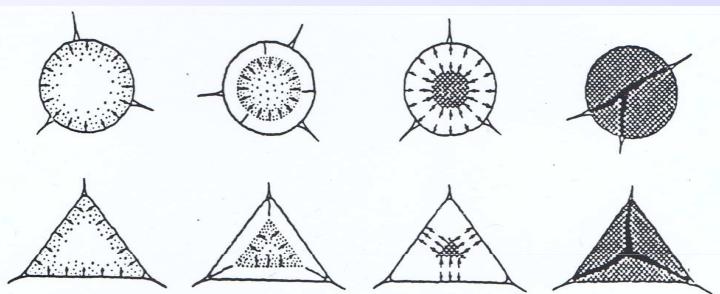


Ejemplo 3



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

ÁRIDO-ÁLCALI

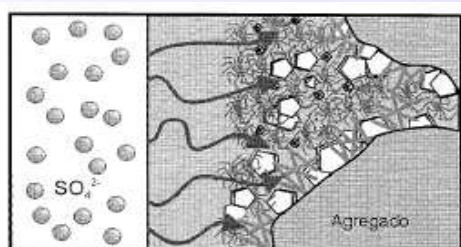


ESQUEMA DE LOS EFECTOS MECÁNICOS DE LAS REACCIONES ÁRIDO-ÁLCALI EN DIFERENTES ÁRIDOS



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

ATAQUE POR SULFATOS



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

- Formación de etringita
- Formación de yeso
- Formación de taumasita
- Formación de brúcita, yeso y descomposición de gel
- Cristalización de sales



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

ATAQUE POR SULFATOS

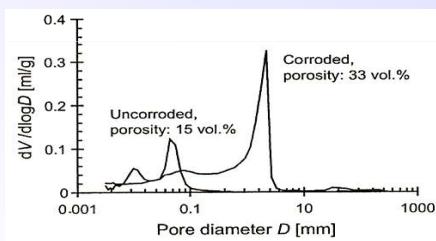
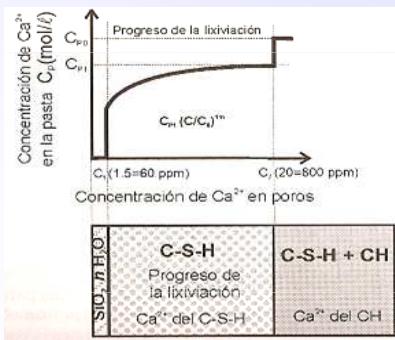
Ataque por sulfato de magnesio

- Baja concentración – formación de etringita
- Media (0,48-0,75 %) formación de etringita y yeso
- Alta :se forma yeso, brucita y un gel de sílice no cementante
- Se forma una doble capa de brucita y yeso, la brucita es muy insoluble y acidifica el interior del cemento, puede desestabilizar el gel.
- La etringita no se detecta se descompone por debajo del pH de formación de la brucita.



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

ATAQUE ÁCIDO



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

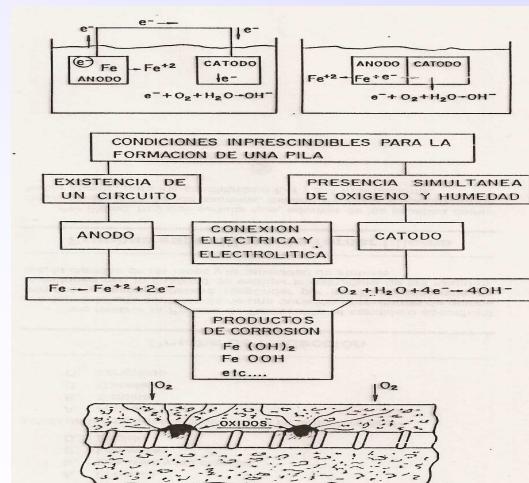
ATAQUE ÁCIDO

pH 12,5	Se disuelve la portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. 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 Gibbsita, $\text{Al}(\text{OH})_3$ y yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a expensas de la disolución de etringita.
pH 8,8	Precipita silice amorfa, SiO_2 y se disuelve el gel CSH.



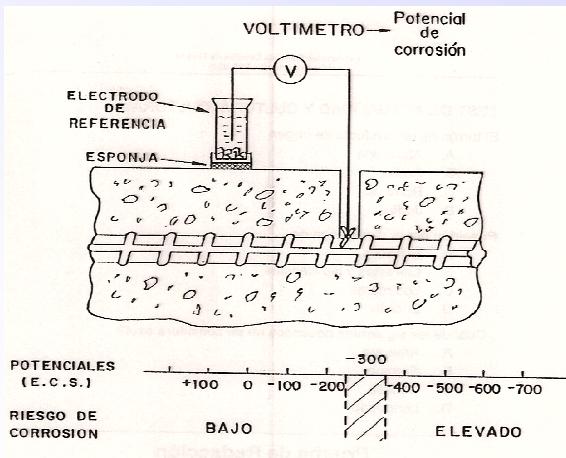
PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS



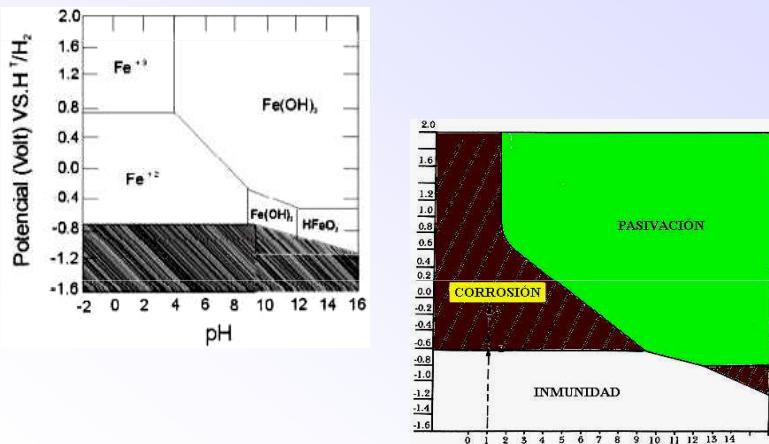
PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS



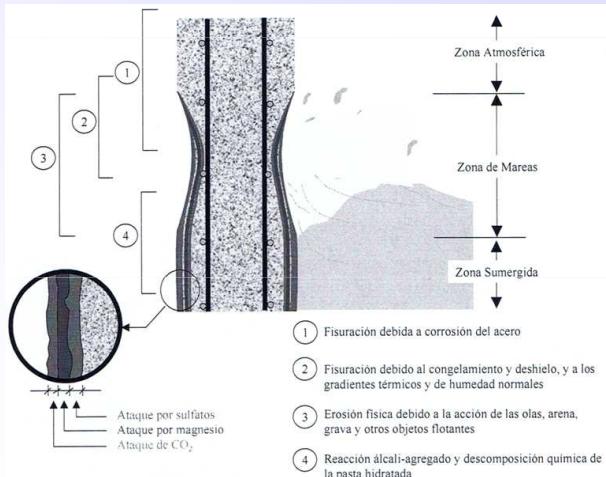
PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

EFFECTOS DEL ATAQUE POR AGUA DE MAR



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

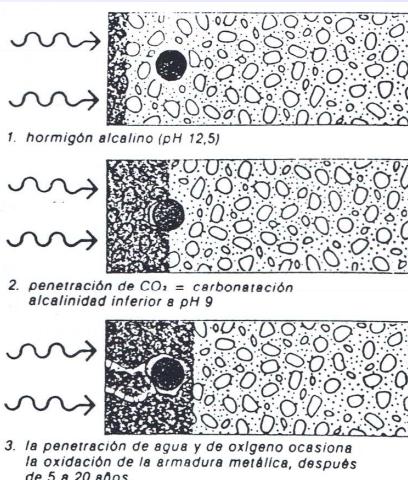
EFFECTOS DEL ATAQUE POR AGUA DE MAR



PROCESOS DE DEGRADACIÓN:

Agua de mar

CARBONATACIÓN



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

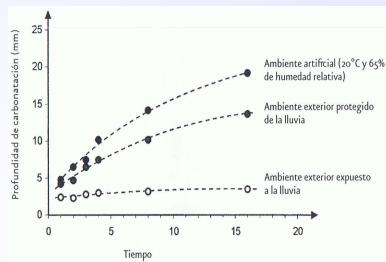
2-15mm/(año)^{1/2}



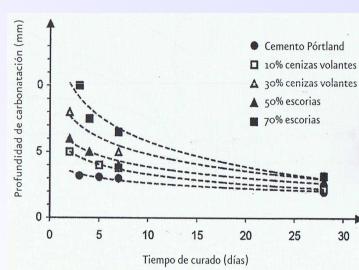
PROCESOS DE DEGRADACIÓN:

Agua de mar

CARBONATACIÓN



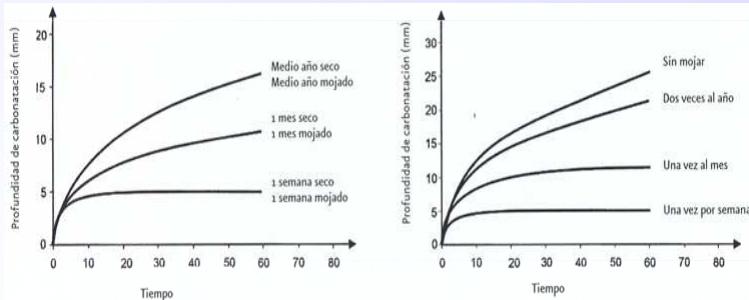
Influencia del ambiente y la composición en la carbonatación del hormigón



PROCESOS DE DEGRADACIÓN:

Agua de mar

CARBONATACIÓN



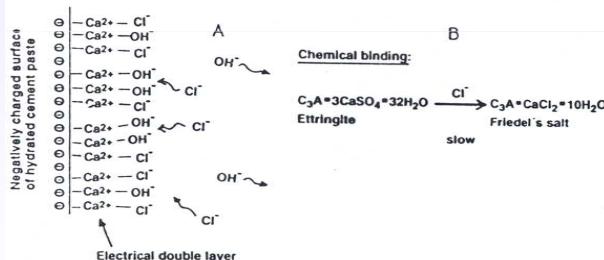
Influencia de los ciclos de mojado y secado en la carbonatación del hormigón



PROCESOS DE DEGRADACIÓN:

Agua de mar

CLORUROS



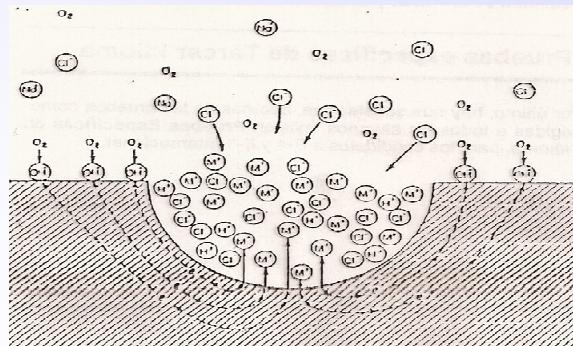
(A): Iones cloruro compiten con los iones hidroxilo por adsorberse físicamente en la superficie positivamente cargada de las paredes de los poros, dominadas por silicatos de calcio hidratados.

(B): Iones cloruro forman enlace químico por conversión lenta de la ettringita en la sal de Friedel.



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

CLORUROS



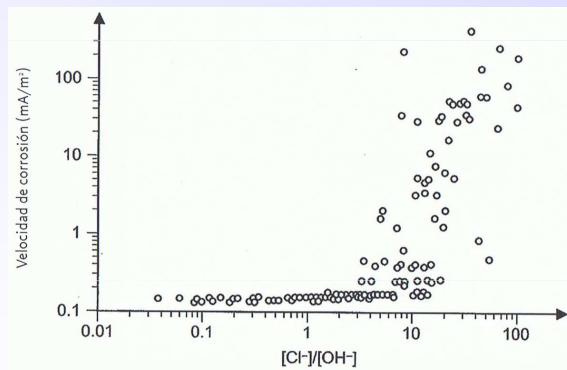
$v < 2 \mu\text{m/año}$
despreciable

ATAQUE POR PICADURAS



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

CLORUROS

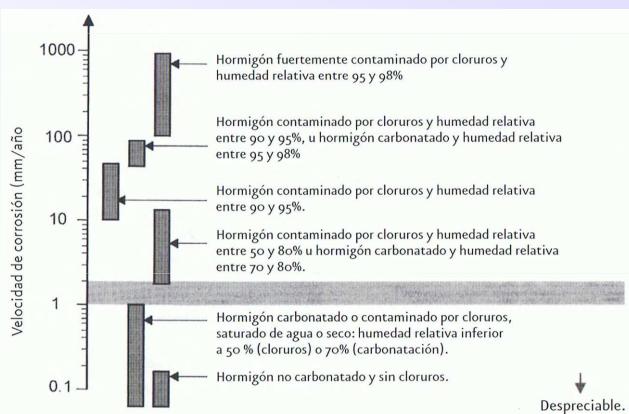


RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN Y LA RELACIÓN Cl^-/OH^-



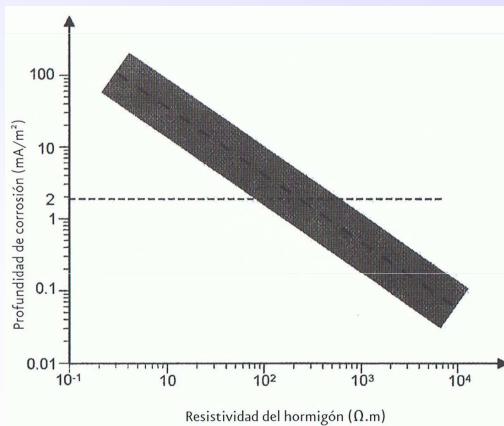
PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Ataque químico

CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS



PROCESOS DE DEGRADACIÓN: Agua de mar

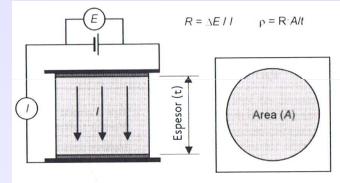
CLORUROS



PROCESOS DE DEGRADACIÓN:

Agua de mar

CLORUROS

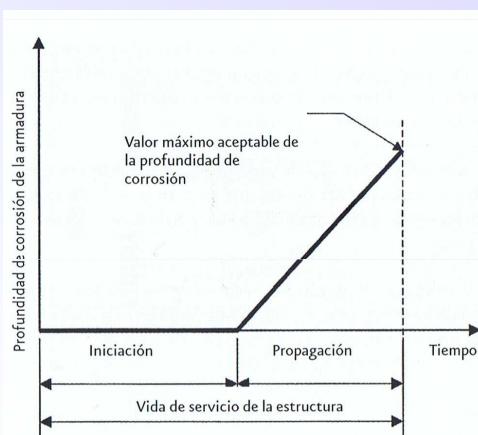


Ambiente	Cemento Pórtland común (CEM I)	Cemento de escorias CEM III/B (>65% cenizas) o cemento con cenizas volantes CEM II/B-V (>25%) o con humo de sílice (>5%)
Sumergido o mojado, zona de salpicaduras	50 - 200	300 - 1000
Exterior expuesto	100 - 400	500 - 2000
Exterior protegido y no carbonatado (20°C , $H_r=80\%$)	200 - 500	1000 - 4000
Idem carbonatado	> 1000	2000 - > 6000
Interior carbonatado (20°C , $H_r=50\%$)	> 3000	4000 - >10000



VIDA ÚTIL

Modelo de Tutti para representar las fases de iniciación y progreso de la corrosión



VIDA ÚTIL

Se entiende por Estado Límite de durabilidad el fallo producido al no alcanzarse la vida útil de proyecto de la estructura, como consecuencia de que los procesos de degradación del hormigón o de las armaduras alcancen el grado suficiente como para que impidan que la estructura se comporte de acuerdo a las hipótesis con las que ha sido proyectada.

$$t_L > t_D$$

t_L : valor estimado de vida útil
 t_D : valor calculado de vida útil

$$t_D = \gamma_t \cdot t_g$$

γ_t : coeficiente de seguridad
 t_g : vida útil de proyecto



VIDA ÚTIL

PERÍODO DE INICIACIÓN

$$t_L = t_i + t_p$$

Estimación de t_i en función
del proceso de degradación

Carbonatación

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

$$K_c = c_{env} \cdot c_{air} \cdot a \cdot f_{cm}^b$$

Cloruros

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

$$K_{Cl} = \alpha \sqrt{12 \cdot D(t)} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{C_{th} - C_i}{C_s - C_i}} \right)$$

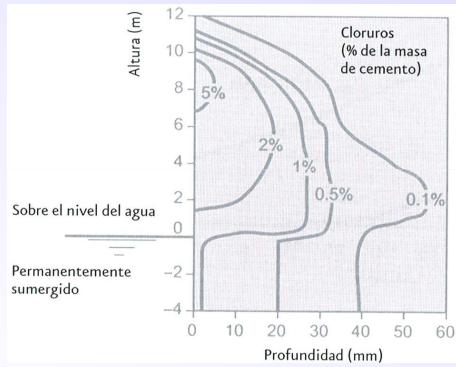


PROCESOS DE DEGRADACIÓN:

Agua de mar

EFFECTOS DEL ATAQUE POR AGUA DE MAR

Zona aérea	Aire
Zona de salpicaduras	Máximo nivel del mar
Zona de marea	Nivel medio del mar
Zona sumergida	Nivel mínimo del mar Agua del mar

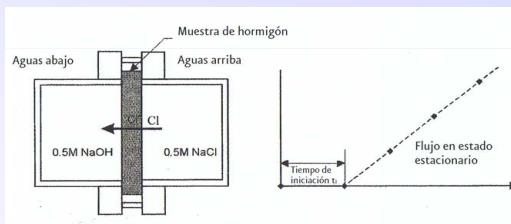


VIDA ÚTIL

PERÍODO DE INICIACIÓN

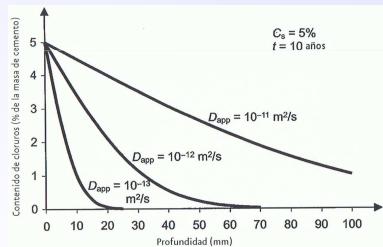
$$D(t) = D(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$$

El coeficiente de difusión varía con el tiempo



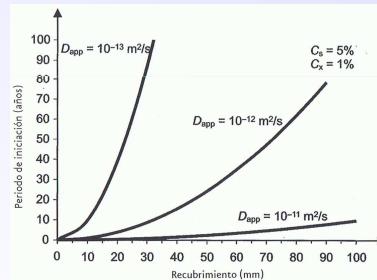
VIDA ÚTIL

PERÍODO DE INICIACIÓN



Tiempo de iniciación para distintos recubrimientos

Perfiles de cloruros para distintos coeficientes de difusión después de 10 años de exposición



VIDA ÚTIL

PERÍODO DE PROPAGACIÓN

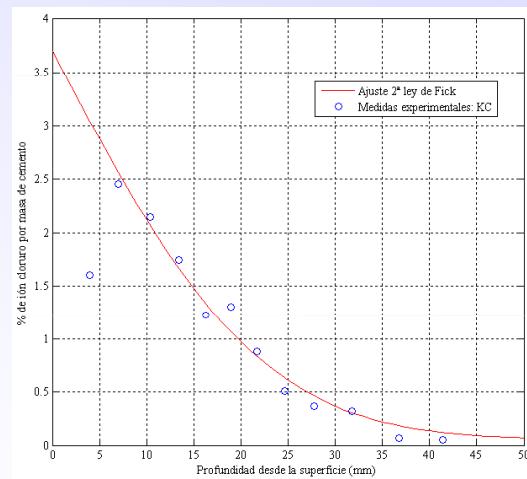
La etapa de propagación se considera concluida cuando se produce una pérdida de sección inadmisible de la armadura o cuando aparecen fisuras en el recubrimiento de hormigón.

$$t_p = \frac{80 \cdot d}{\phi \cdot v_{corr}}$$

$$t_L = t_i + t_p = \left(\frac{d}{K} \right)^2 + \frac{80 \cdot d}{\phi \cdot v_{corr}}$$

VIDA ÚTIL

- Perfil de cloruros



VIDA ÚTIL

- Proyección de vida útil

