



Universidad Politécnica de Madrid



E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

ASPECTOS GENERALES DURABILIDAD

Jaime Carlos Gálvez Ruiz

Catedrático de Universidad

Perspectivas globales sobre el desempeño del hormigón.

Puerto Rico, Enero 2010

INTRODUCCIÓN

CONCEPTO DE DURABILIDAD

- **Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-08)**
“Capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y solicitaciones consideradas en el análisis estructural .” (Art. 37.1)
- **Código Modelo 1990**
“Los factores fundamentales, desde el punto de vista de la durabilidad, son el transporte simultáneo de calor, humedad y sustancias químicas, tanto dentro de la masa de hormigón como por intercambio con el medio circundante (micro-ambiente), así como las variables que controlan los mecanismos por lo que el citado transporte se produce .” (Art. 8.1.)

Perspectivas globales sobre el desempeño del hormigón.

Puerto Rico, Enero 2010

ALGUNOS DATOS...

- Estimate of annual costs attributable to corrosion of reinforced concrete structures in the United Kingdom: **£550 million**.

Source: Web site of the National Physical Laboratory (UK)
www.npl.co.uk.

- **Road, Sidewalk and Bridge Repairs in Toronto (Canada)**

\$110 million is to be spent by this city on the repair of roads, sidewalks and bridges in 2005 ... with a backlog of \$235 million deferred due to budget constraints.

Source: K. McGran's article "On the road to ruin?", Toronto Star, February 5, 2005, pB4-B5

ALGUNOS DATOS...

- United States estimate of reinforced concrete bridges and car parks due to deicing salts: between **\$325 million and \$1 billion** per year.

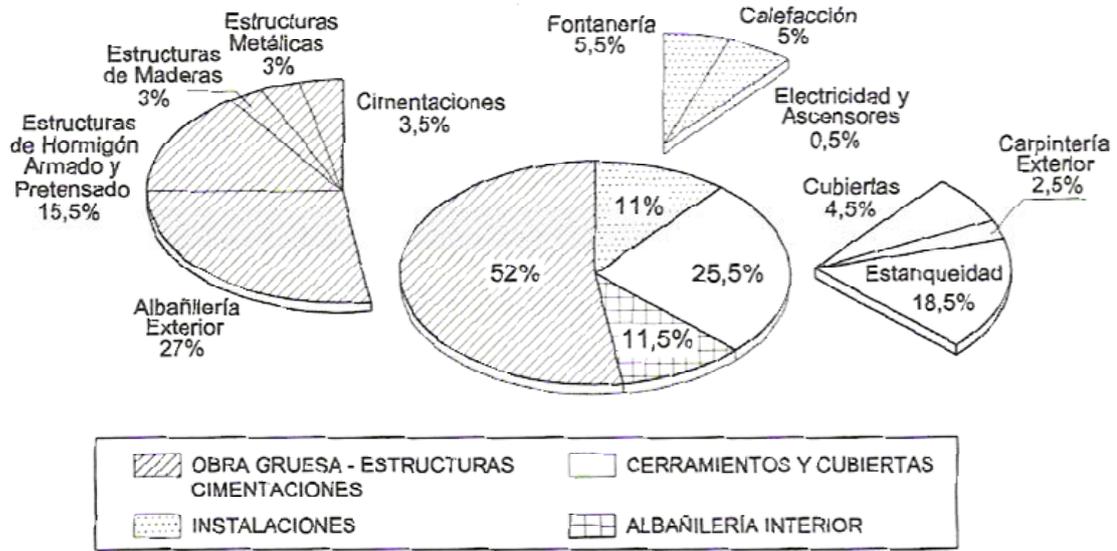
Source: Uhlig's Corrosion Handbook, Second Edition, R.W. Revie Editor, Wiley, 2000 (Chapter 36 by J.P. Broomfield).

- The estimated total cost to address bridge deficiencies in the United States: **\$78 billion to \$112 billion**, depending on time taken to meet the objective.

Source: US Department of Transportation, Federal Highway Administration Publication No. FHWA-RD-98-088, September 1998. (Internet version at <http://www.fhrc.gov/structur/corros/corros.htm>)

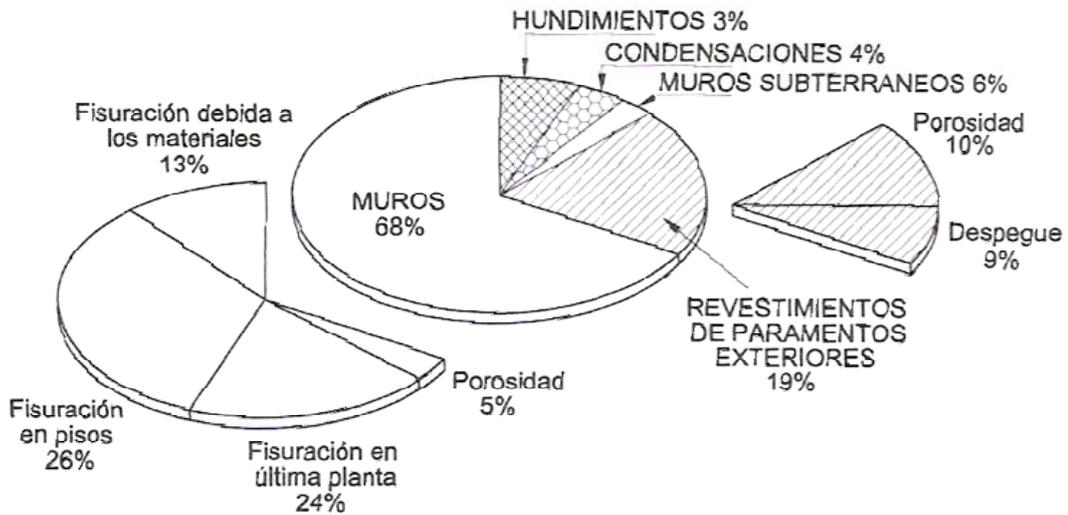
Source: Uhlig's Corrosion Handbook, Second Edition, R.W. Revie Editor, Wiley, 2000 (Chapter 36 by J.P. Broomfield).

DISTRIBUCIÓN DE LOS FALLOS SEGÚN SUS COSTES DE REPARACIÓN



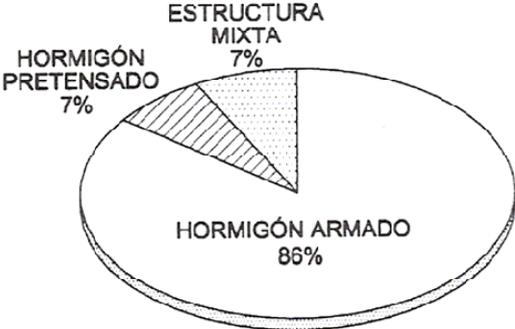
(J. Calavera, Patología de Estructuras H.A. y H.P.)

OBRA GRUESA - DISTRIBUCIÓN DE LOS FALLOS EN % DEL NÚMERO



(J. Calavera, Patología de Estructuras H.A. y H.P.)

DISTRIBUCIÓN DE LOS FALLOS SEGÚN EL MATERIAL ESTRUCTURAL

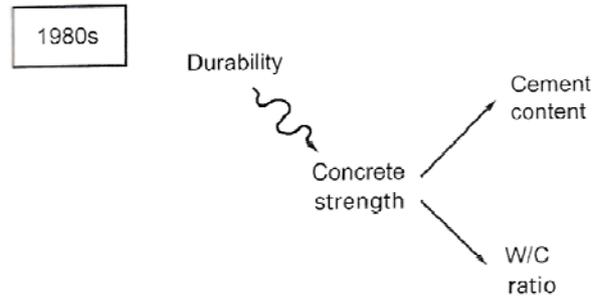
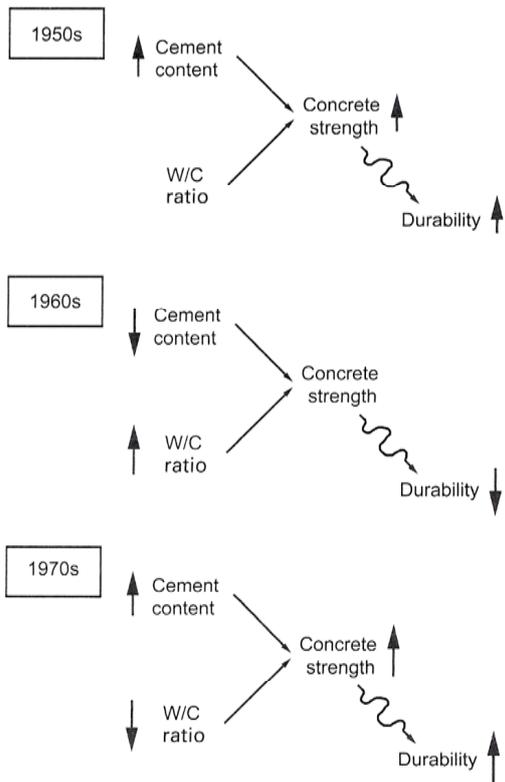


(J. Calavera, Patología de Estructuras H.A. y H.P.)



HORMI GÓN ARMADO

INTRODUCCIÓN



Evolución de los criterios de diseño en relación a la durabilidad

INTRODUCCIÓN



Corrosión debida al uso de sales fundentes (I)



Corrosión debida al uso de sales fundentes (II)



Destrucción por aumento de volumen interno

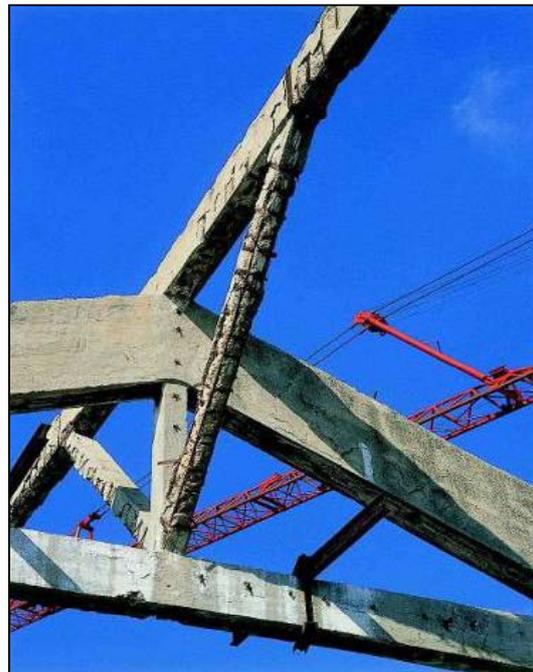
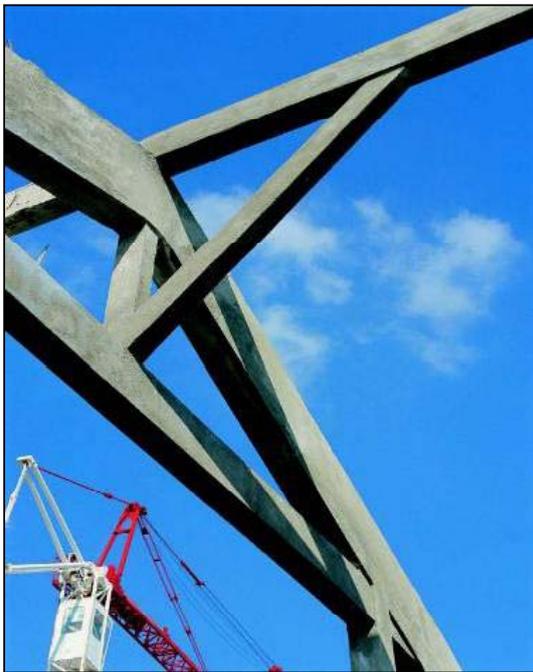


INTRODUCCIÓN



Corrosión en ambiente marino

INTRODUCCIÓN



Corrosión en ambiente marino



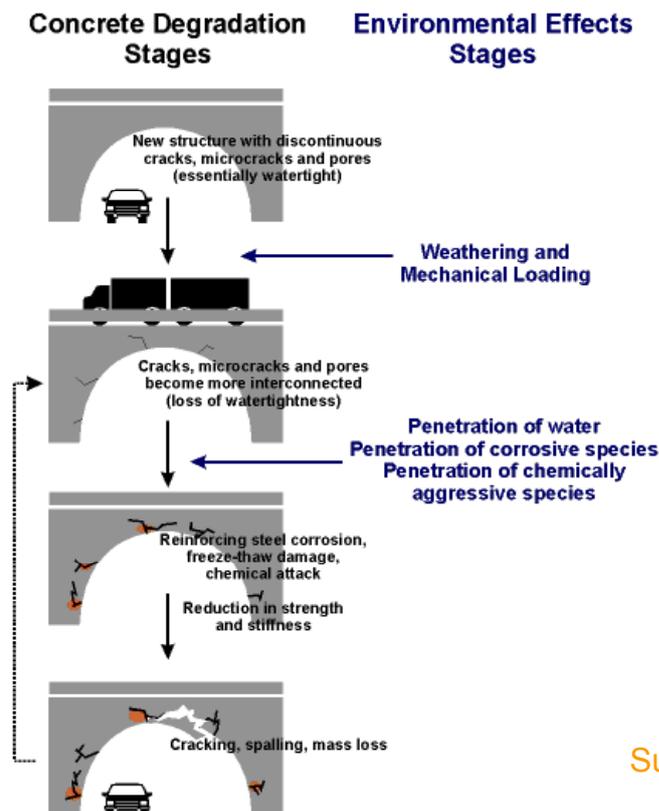
Fenómeno de “spalling”



Demolición para reparación

ALGUNOS MECANISMOS DE ATAQUE

- Ataque en zonas frías.
 - Ciclos hielo-deshielo.
 - Sales fundentes.
 - Etc.
- Ataques químicos:
 - Sulfatos.
 - Sales.
 - Carbonatación.
 - Otros: ácidos, industrias, etc.
- Abrasión:
 - Obras hidráulicas.
 - Roce en pavimentos.
 - Cadenas.
- Reacciones de expansión.
 - Arido-álcali.
 - Reactividad de los áridos.
 - Etc.
- Corrosión de la armadura:
 - Despasivación.
 - Aumento volumen.
- Ataques biológicos.
- Acciones mecánicas.
- Otros.



Sucesivos estados de deterioro



Stage 1: Initially, the concrete appears to be sound with relatively little macroscopic cracking and no reddish discoloration from corrosion product formation.



Stage 2: Macroscopic cracks have appeared and the concrete surface is stained by reddish corrosion products.



Stage 3: Spalling of the concrete cover over the reinforcing steel is clearly visible, due to the formation of voluminous corrosion products.

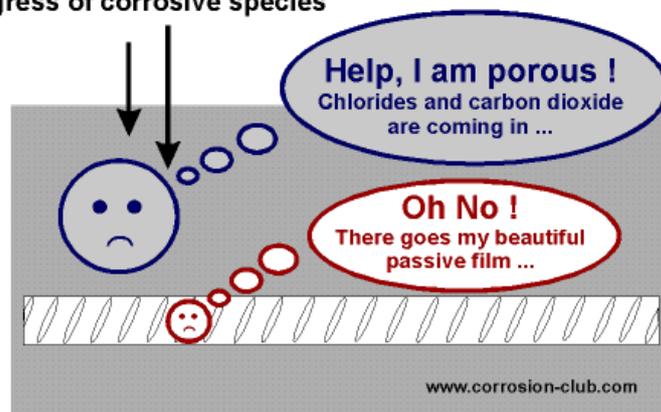


Stage 4: Severe spalling of the concrete cover over the reinforcing steel is evident, leaving the reinforcing steel bars directly exposed to the atmosphere.

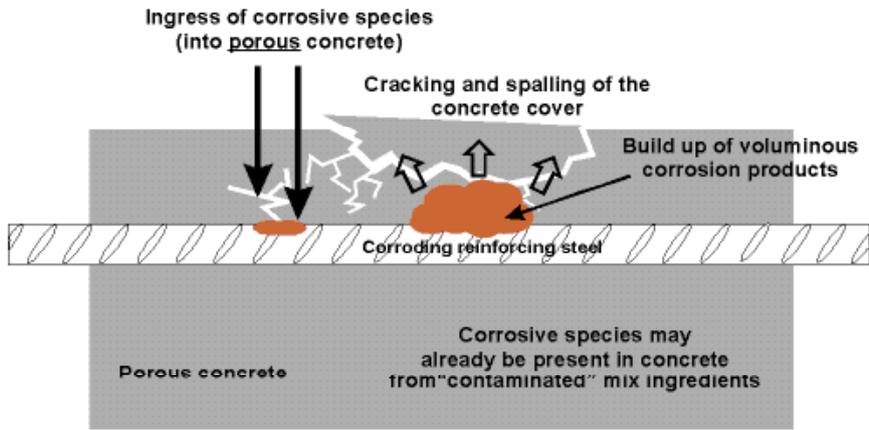
Sucesivos estados de deterioro

Once Upon a Time - inside a troubled aging reinforced concrete structure

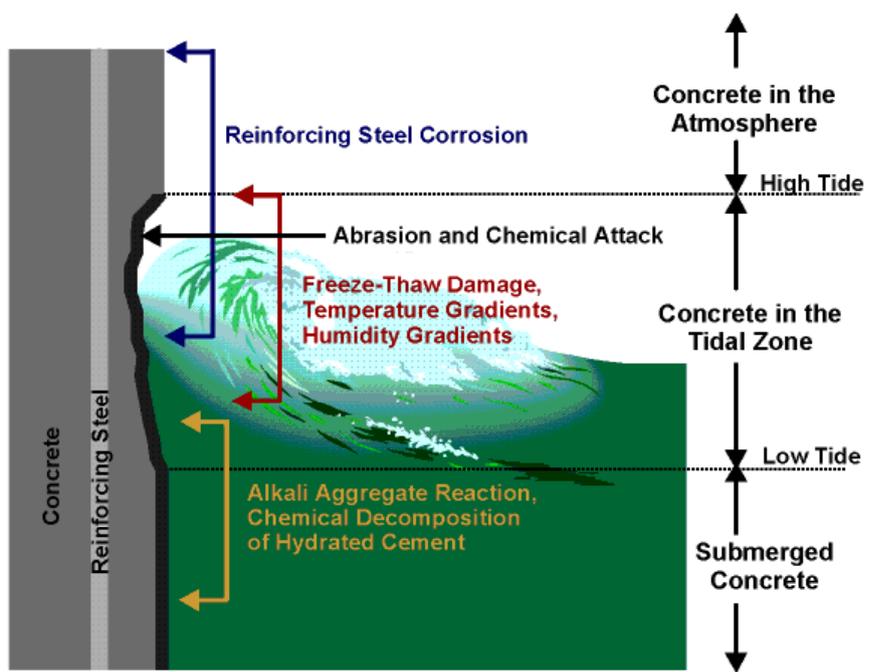
Ingress of corrosive species



Corrosión inducida por la carbonatación y penetración de cloruros



Corrosión de la armadura



Mecanismos de deterioro del hormigón en contacto con agua



HORMI GÓN PRETENSADO



Ensayo FIP (UNE 36-464-86) de Corrosión bajo Tensión

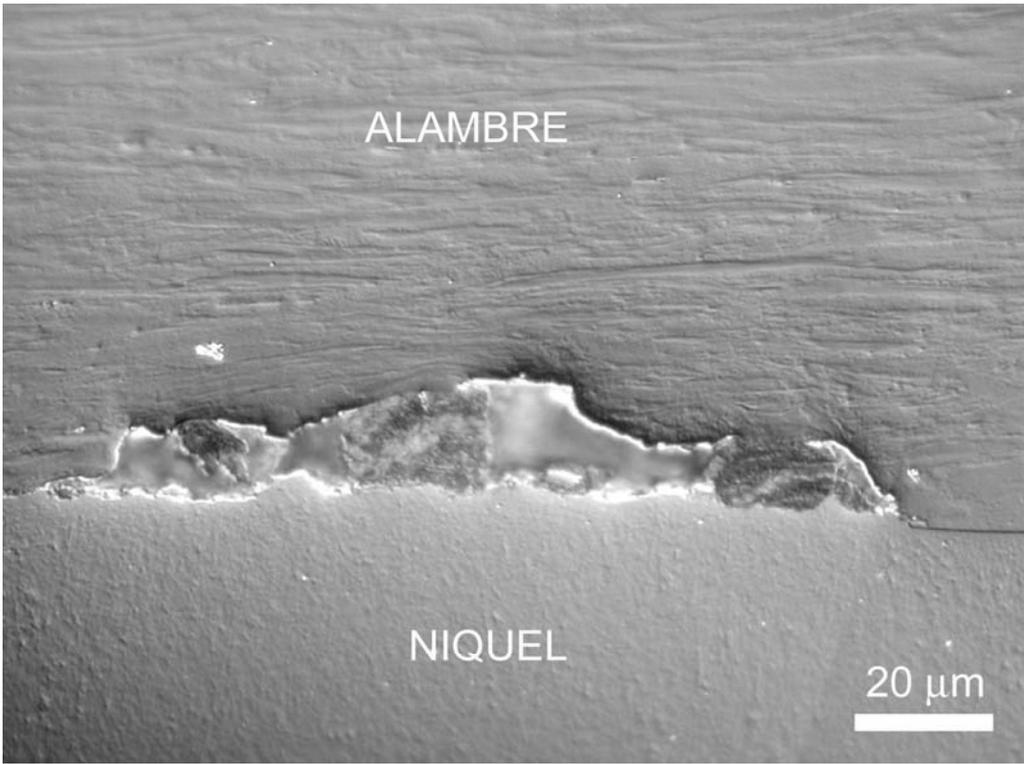
Tiempos de rotura mínimos cbt

Tipo armadura	Tiempo rotura mínimo (horas)	Tiempo rotura medio (horas)
Alambre	1,5	4
Cordón	1,5	4
Barra (ϕ : 16 a 25 mm)	60	250
Barra ($\phi > 25$ mm)	100	400

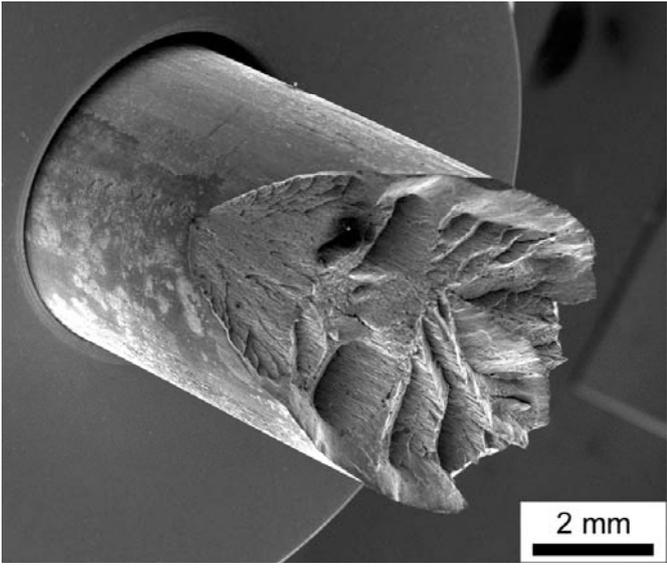
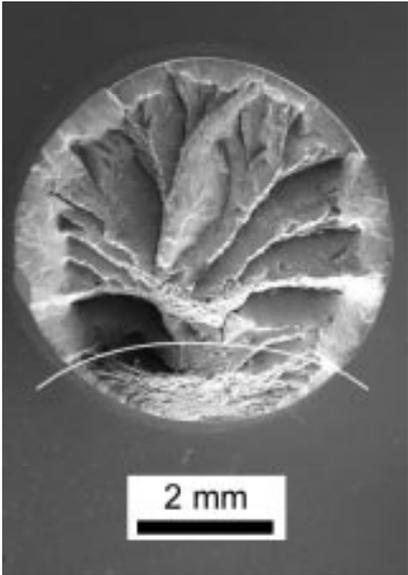
Ensayo FIP (UNE 36-464-86) de Corrosión bajo Tensión



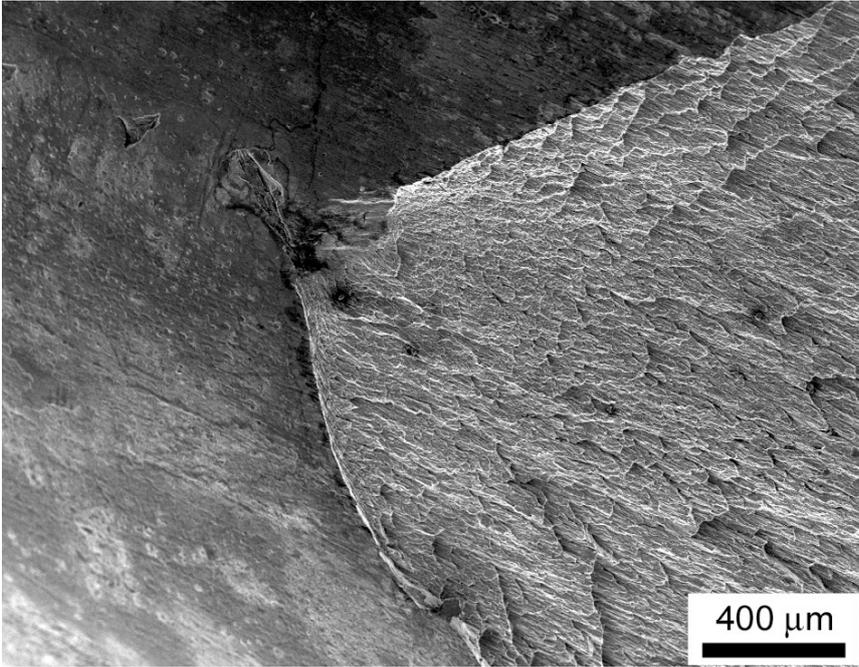
Defectos en el alambre



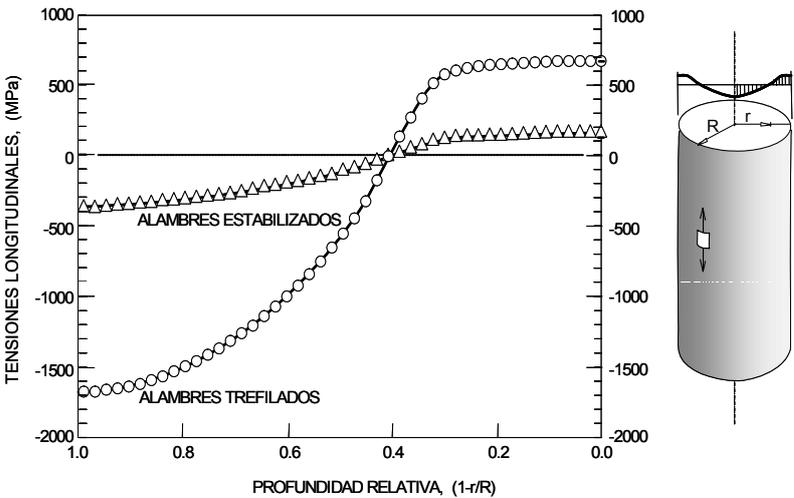
Defectos en el alambre



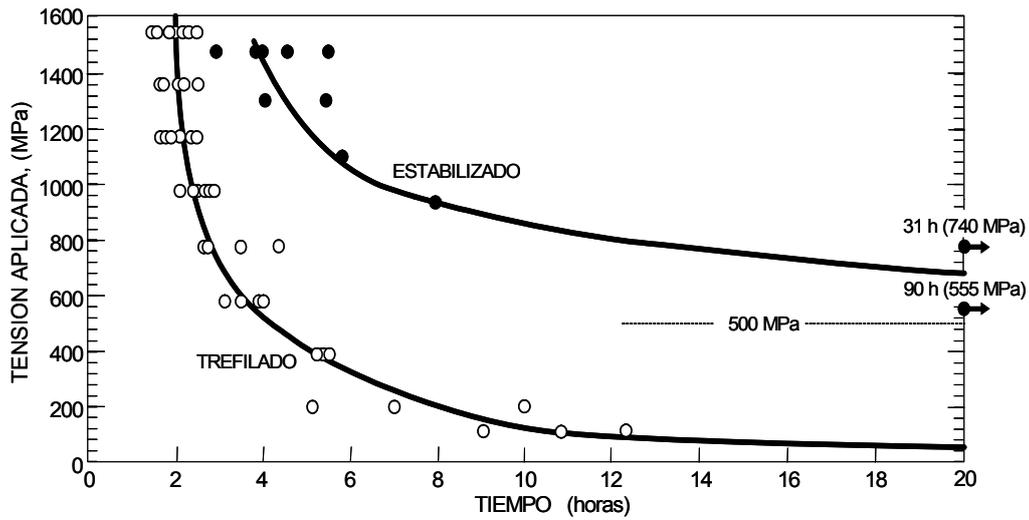
Rotura de una alambre ensayo CBT FIP



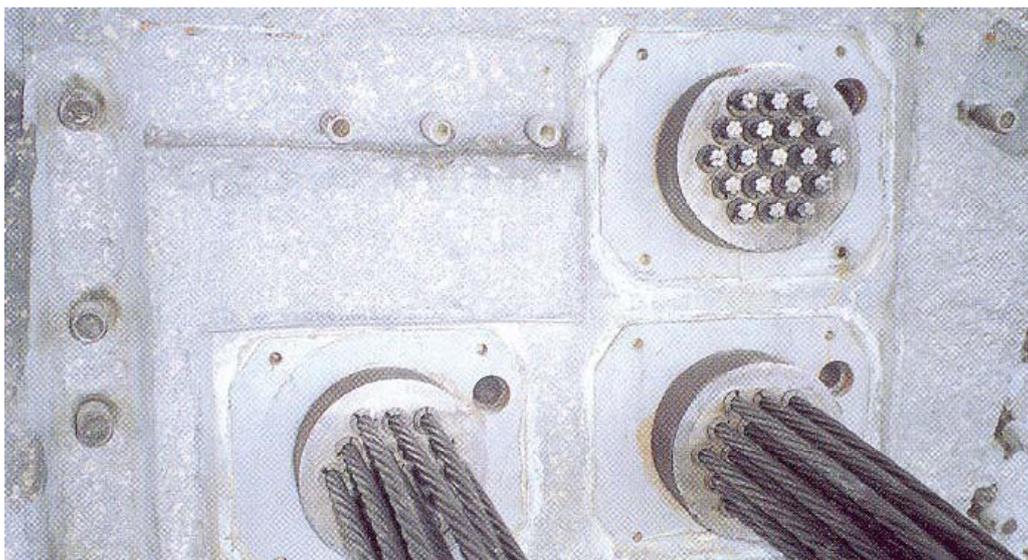
Iniciación rotura alambre ensayo CBT FIP



Tensiones residuales

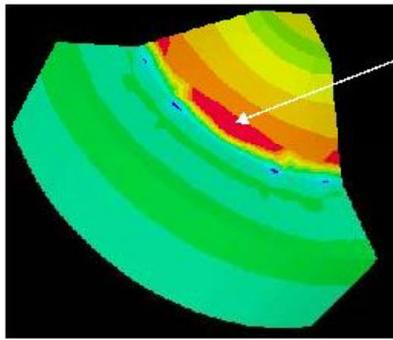


Tiempos de rotura en el ensayo de tiocianato amónico (FIP) de alambres trefilados (sin tratamiento de alivio de tensiones) y estabilizados en función de la carga inicial aplicada en el ensayo. Según Norma la carga inicial debería ser el 80% de la de rotura (en torno a 1.500 MPa en ambos casos)

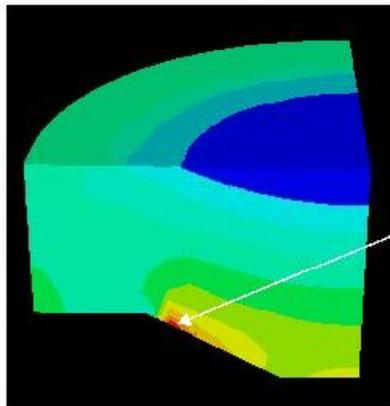


Bloques de anclaje de tendones de postesado

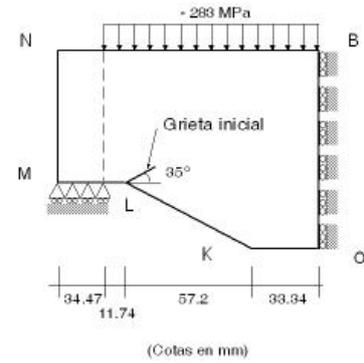
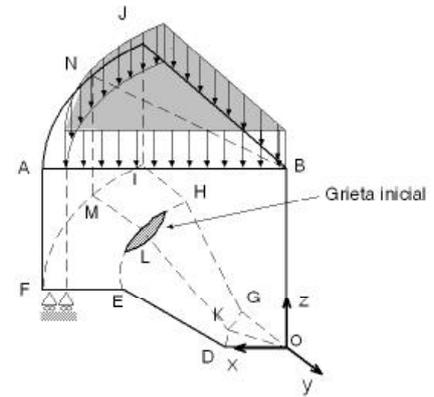
INTRODUCCIÓN



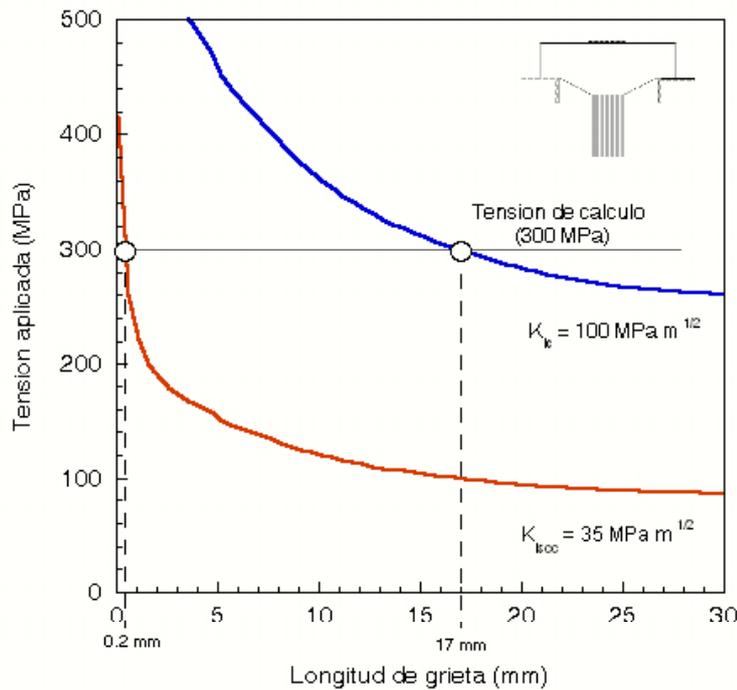
Máximas tracciones



Máximas tracciones



INTRODUCCIÓN



Tolerancia al daño del bloque de anclaje

ESTRUCTURA

BIEN PROYECTADA
+
BIEN CONSTRUIDA
+
BIEN CONSERVADA



SIN PROBLEMAS
DE DURABILIDAD



Universidad Politécnica de Madrid

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos



DURABILIDAD DEL HORMIGÓN *Deterioro en ambiente marino*

Jaime Carlos Gálvez Ruiz

Catedrático de Universidad

DURABILIDAD EN LAS INSTRUCCIONES

VIDA ÚTIL EHE-08

Tabla 5.1. Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructura ⁽¹⁾

Tipo de estructura	Vida útil nominal
Estructuras de carácter temporal ⁽²⁾	Entre 3 y 10 años
Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal (por ejemplo, barandillas, apoyos de tuberías)	Entre 10 y 25 años
Edificios (o instalaciones) agrícolas o industriales y obras marítimas	Entre 15 y 50 años
Edificios de viviendas u oficinas, puentes u obras de paso de longitud total inferior a 10 metros y estructuras de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica baja o media	50 años
Edificios de carácter monumental o de importancia especial	100 años
Puentes de longitud total igual o superior a 10 metros y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta	100 años

valores de vida útil, siempre en función del tipo y características de la construcción de las mismas.

⁽²⁾ En función del propósito de la estructura (exposición temporal, etc.). En ningún caso se considerarán como estructuras de carácter temporal aquellas estructuras de vida útil nominal superior a 10 años.

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
CLASE	SUBCLASE	Designación	TIPO DE PROCESO		
no agresiva		I	ninguno	<ul style="list-style-type: none"> interiores de edificios, no sometidos a condensaciones elementos de hormigón en masa 	interiores de edificios, protegidos de la intemperie
normal	humedad alta	Ila	corrosión por carbonatación	<ul style="list-style-type: none"> interiores sometidos a humedades relativas medias altas (> 65%) o a condensaciones exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. elementos enterrados o sumergidos 	<ul style="list-style-type: none"> sótanos no ventilados cimentaciones tableros y pilas de puentes en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. elementos de hormigón en cubiertas de edificios
	humedad media	Ilb	corrosión por carbonatación	<ul style="list-style-type: none"> exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> Construcciones exteriores protegidas de la lluvia tableros y pilas de puentes, en zonas de precipitación media anual inferior a 600 mm.
marina	aérea	IIla	corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 km) 	<ul style="list-style-type: none"> edificaciones en las proximidades de la costa puentes en las proximidades de la costa zonas aéreas de diques, pantanales y otras obras de defensa litoral instalaciones portuarias
	sumergida	IIlb	corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar 	<ul style="list-style-type: none"> zonas sumergidas de diques, pantanales y otras obras de defensa litoral cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en el mar
	en zonas de mareas	IIlc	corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> elementos de estructuras marinas situadas en la zona de carrera de mareas 	<ul style="list-style-type: none"> zonas situadas en el recorrido de marea de diques, pantanales y otras obras de defensa litoral zonas de pilas de puentes sobre el mar, situadas en el recorrido de marea
con cloruros de origen diferente del medio marino		IV	corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas 	<ul style="list-style-type: none"> piscinas pilas de pasos superiores o pasarelas en zonas de nieve estaciones de tratamiento de agua

EHE-08

CLASE ESPECÍFICA DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
CLASE	SUBCLASE	Designación	TIPO DE PROCESO		
química agresiva	débil	Qa	ataque químico	<ul style="list-style-type: none"> elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad lenta (ver cuadro 11.3) 	<ul style="list-style-type: none"> instalaciones industriales, con sustancias débilmente agresivas según cuadro 11.3 construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad débil según cuadro 11.3
	media	Qb	ataque químico	<ul style="list-style-type: none"> elementos en contacto con agua de mar elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad media (ver cuadro 11.3) 	<ul style="list-style-type: none"> dolos, bloques y otros elementos para diques estructuras marinas, en general instalaciones industriales con sustancias de agresividad media según cuadro 11.3 construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad media según cuadro 11.3 instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales con sustancias de agresividad media según cuadro 11.3
	fuerte	Qc	ataque químico	<ul style="list-style-type: none"> elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con intensidad rápida (ver cuadro 11.3) 	<ul style="list-style-type: none"> instalaciones industriales, con sustancias de agresividad alta de acuerdo con cuadro 11.3 instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales, con sustancias de agresividad alta de acuerdo con cuadro 11.3
con heladas	sin sales fundentes	H	ataque hielo-deshielo	<ul style="list-style-type: none"> elementos situados en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno superior al 75%, y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5°C 	<ul style="list-style-type: none"> construcciones en zonas de alta montaña estaciones invernales
	con sales fundentes	F	ataque por sales fundentes	<ul style="list-style-type: none"> elementos destinados al tráfico de vehículos o peatones en zonas con más de 5 nevadas anuales o con valor medio de la temperatura mínima en los meses de invierno inferior a 0°C 	<ul style="list-style-type: none"> puentes o pasarelas en zonas de alta montaña
erosión		E	abrasión cavitación	<ul style="list-style-type: none"> elementos sometidos a desgaste superficial elementos de estructuras hidráulicas en los que la cota piezométrica pueda descender por debajo de la presión de vapor de agua 	<ul style="list-style-type: none"> pilas de puente en cauces muy torrenciales elementos de diques, pantanales y otras obras de defensa litoral que se encuentren sometidos a fuertes oleajes pavimentos de hormigón tuberías de alta presión

EHE-08

TIPO DE MEDIO AGRESIVO	PARÁMETROS	TIPO DE EXPOSICIÓN		
		Qa	Qb	Qc
		ATAQUE DÉBIL	ATAQUE MEDIO	ATAQUE FUERTE
AGUA	VALOR DEL PH	6,5 - 5,5	5,5 - 4,5	< 4,5
	CO ₂ AGRESIVO (mg CO ₂ / l)	15 - 40	40 - 100	> 100
	IÓN AMONIO (mg NH ₄ ⁺ / l)	15 - 30	30 - 60	> 60
	IÓN MAGNESIO (mg Mg ²⁺ / l)	300 - 1000	1000 - 3000	> 3000
	IÓN SULFATO (mg SO ₄ ²⁻ / l)	200 - 600	600 - 3000	> 3000
	RESIDUO SECO (mg / l)	> 150	50 - 150	< 50
SUELO	GRADO DE ACIDEZ BAUMANN GULLY	> 20	(*)	(*)
	IÓN SULFATO (mg SO ₄ ²⁻ / Kg de suelo seco)	2000 - 3000	3000 - 12000	> 12000

EHE-08

Tabla 37.2.4.1.a Recubrimientos mínimos (mm) para las clases generales de exposición I y II

Clase de exposición	Tipo de cemento	Resistencia característica del hormigón [N/mm ²]	Vida útil de proyecto (t _g). (años)	
			50	100
I	Cualquiera	$f_{ck} \geq 25$	15	25
II a	CEM I	$25 \leq f_{ck} < 40$	15	25
		$f_{ck} \geq 40$	10	20
	Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al hormigón	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	30
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
II b	CEM I	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	30
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
	Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al hormigón	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	35
		$f_{ck} \geq 40$	20	30

EHE-08

Tabla 37.2.4.1.b Recubrimiento mínimo (mm) para las clases generales de exposición III y IV

Hormigón	Cemento	Vida útil de proyecto (t_p) (años)	Clase general de exposición			
			IIIa	IIIb	IIIc	IV
Armado	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM III/B-S, B-P, B-V, A-D u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de	50	25	30	35	35
		100	30	35	40	40
	Resto de cementos utilizables	50	45	40	*	*
		100	65	*	*	*
Pretensado	CEM III/A-D o bien con adición de humo de sílice superior al 6%	50	30	35	40	40
		100	35	40	45	45
	Resto de cementos utilizables, según el Artículo 26 ^a	50	65	45	*	*
		100	*	*	*	*

* Estas situaciones obligarían a unos recubrimientos excesivos, desaconsejables desde el punto de vista de la ejecución del elemento. En estos casos, se recomienda comprobar el Estado Límite de Durabilidad según lo indicado en el Anejo nº 9, a partir de las características del hormigón prescrito en el Pliego de las prescripciones técnicas del proyecto.

EHE-08

Tabla 37.2.4.1.c Recubrimientos mínimos para las clases específicas de exposición

Clase de exposición	Tipo de cemento	Resistencia característica del hormigón [f_{ck}] [N/mm ²]	Vida útil de proyecto (t_p), (años)	
			50	100
H	CEM III	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	50
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
	Otros tipos de cemento	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	35
		$f_{ck} \geq 40$	10	20
F	CEM I II/A-D	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	50
		$f_{ck} \geq 40$	15	35
	CEM III	$25 \leq f_{ck} < 40$	40	75
		$f_{ck} \geq 40$	20	40
	Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al hormigón	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	40
		$f_{ck} \geq 40$	10	20
E ⁽¹⁾	Cualquiera	$25 \leq f_{ck} < 40$	40	80
		$f_{ck} \geq 40$	20	35
Qa	CEM III, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%	-	40	55
	Resto de cementos utilizables	-	*	*
Qb, Qc	Cualquiera	-	(2)	(2)

⁽¹⁾ Estas situaciones obligarían a unos recubrimientos excesivos

⁽²⁾ Estos valores corresponden a condiciones moderadamente duras de abrasión. En el caso de que se prevea una fuerte abrasión, será necesario realizar un estudio detallado.

EHE-08

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
máxima relación a/c	masa	0,65	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	pretensado	0,60	0,60	0,55	0,50	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50
mínimo contenido de cemento (kg/m³)	masa	200	-	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300	275
	armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300
	pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300

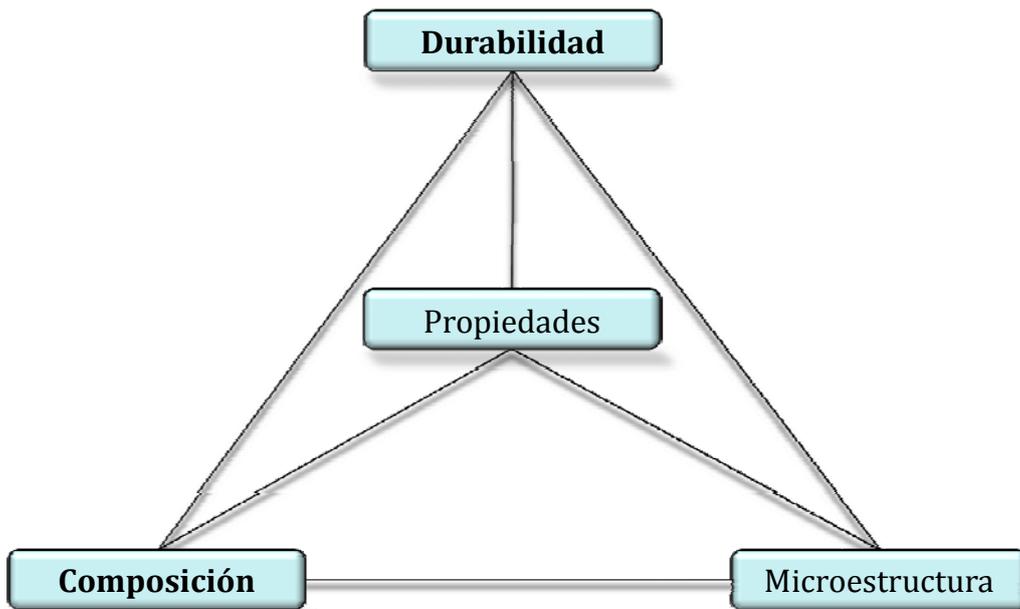
Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
resistencia mínima (N/mm²)	masa	25	-	-	-	-	-	-	30	30	35	30	30	30
	armado	25	25	30	30	30	35	30	30	30	35	30	30	30
	pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30

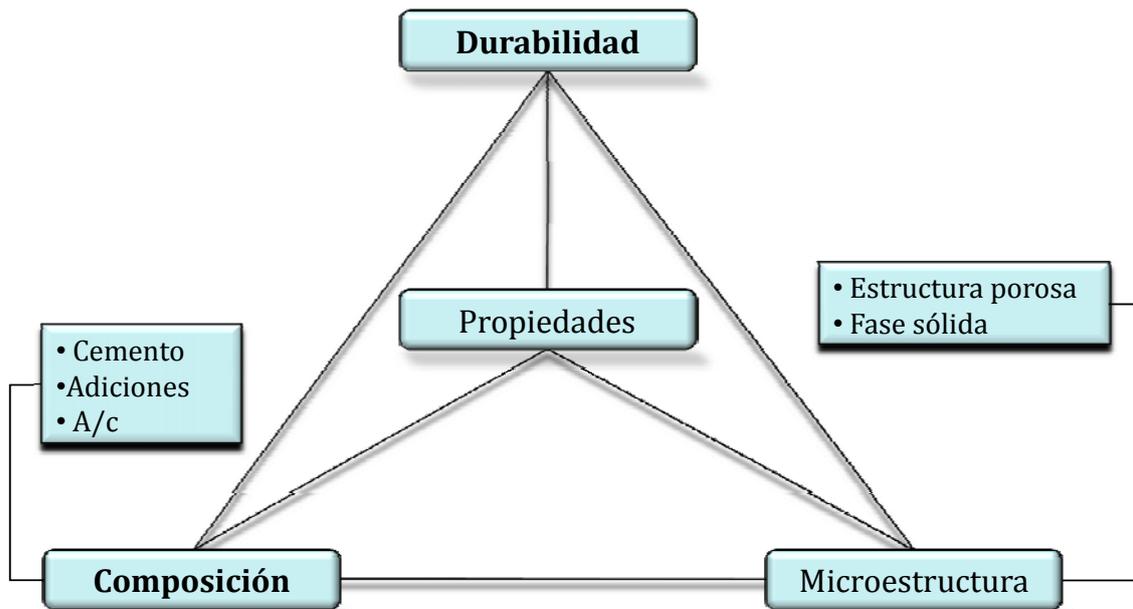
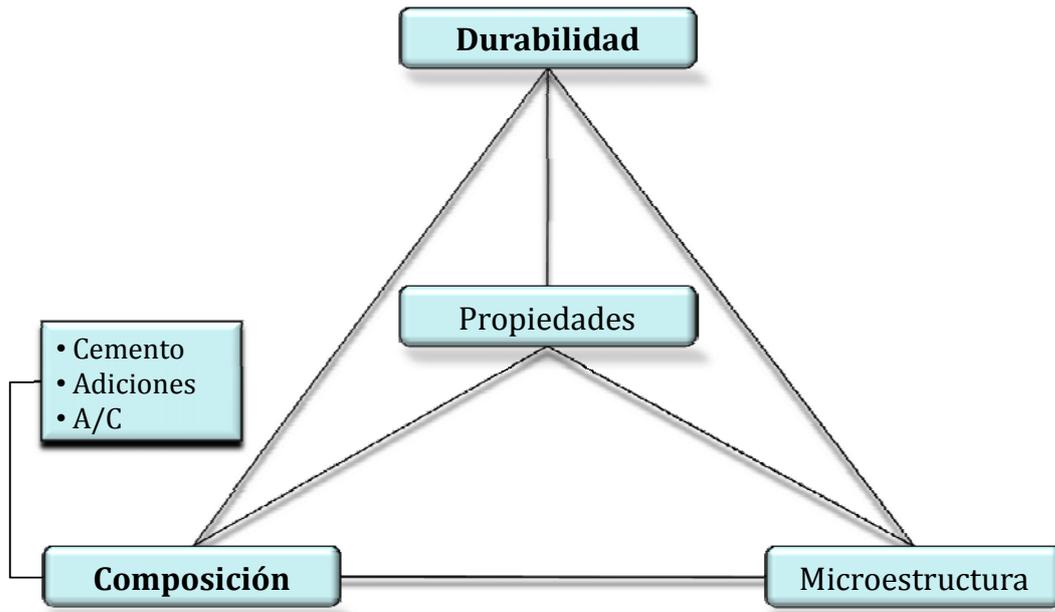
EHE-08

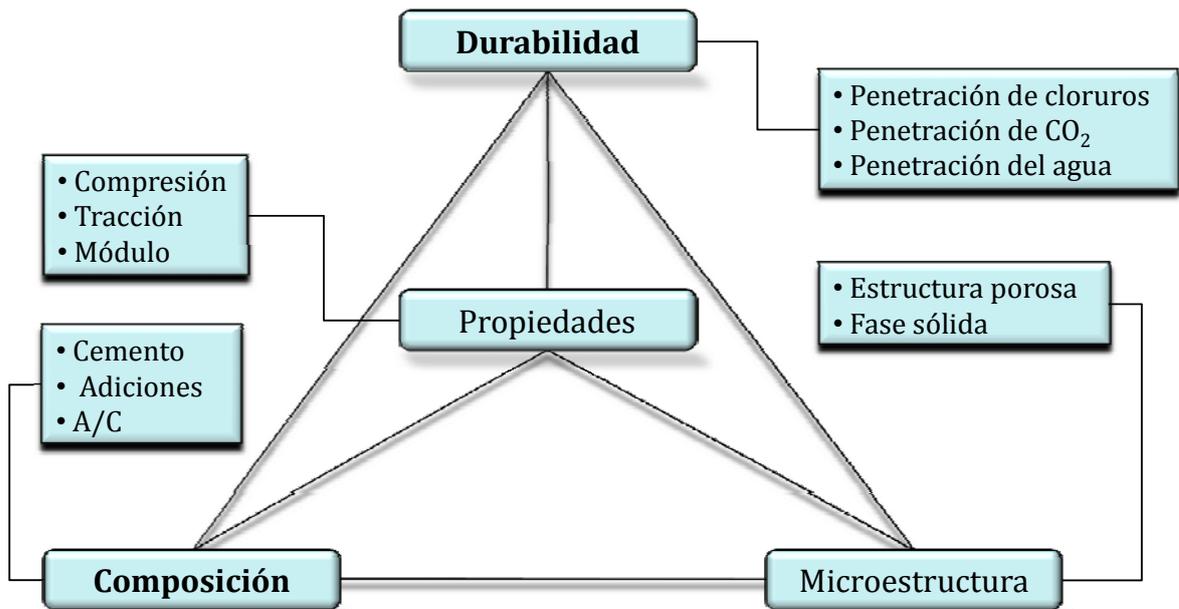
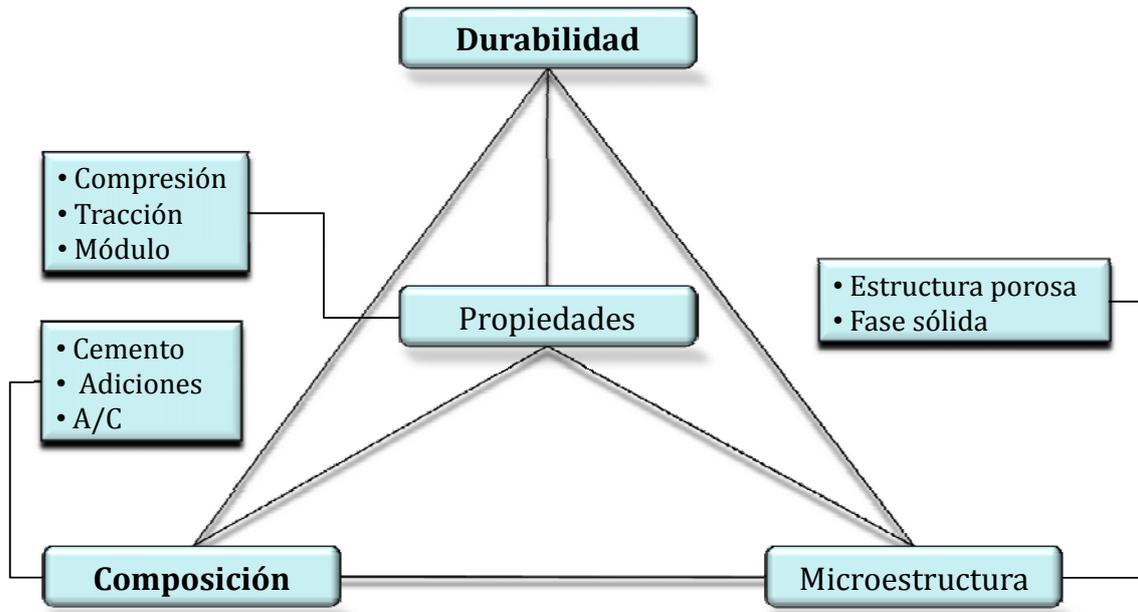
Impermeabilidad EHE-08

Clase de exposición ambiental	Especificación para la profundidad máxima	Especificación para la profundidad media
IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F, Qb (en el caso de elementos en masa o armados)	50 mm	30 mm
IIIc, Qc Qb (solo en el caso de elementos pretensados)	30 mm	20 mm

MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES







ENSAYOS

Descripción de los ensayos mecánicos

Ensayos para determinar las propiedades mecánicas.

- Resistencia a compresión (UNE-EN 12390-3:2003).
- Módulo de elasticidad a compresión (UNE 83316:1996).
- Resistencia a tracción (UNE-EN 12390-6:2001).
- Edad: 7, 28 y 91 días.



Ensayo de resistencia a compresión



Ensayo de módulo de elasticidad a compresión



Ensayo de resistencia a tracción

Ensayos de retracción y fluencia



Ensayo de retracción



Ensayo de fluencia



Medición

Ensayos de retracción y fluencia

Hormigón	4	6	7
Duración del ensayo (días)	333	200	200
Tensión aplicada (bares) (*)	135	175	160
Edad del hormigón cuando comenzó el ensayo (días)	70	104	76

(*) La tensión corresponde al 40% de la resistencia a compresión a 28 días para los hormigones 6 y 7, y un tercio de dicha resistencia para el caso del hormigón 4.

$$\epsilon_c = \epsilon_t - (\epsilon_i + \epsilon_s) \quad \phi(t, t_0) = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_i}$$

ϵ_i Deformación inicial

ϵ_t Deformación total

ϵ_s Retracción

$\phi(t, t_0)$ Coeficiente de fluencia

Ensayos de durabilidad

ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN

- Según norma UNE-EN 12390-8:2001.
- Edad: 91 días.



Ensayos de durabilidad

ENSAYO DE DIFUSIÓN DE CLORUROS

- Según norma Nordtest Method NT BUILD 443.
- Edad: 28 días.

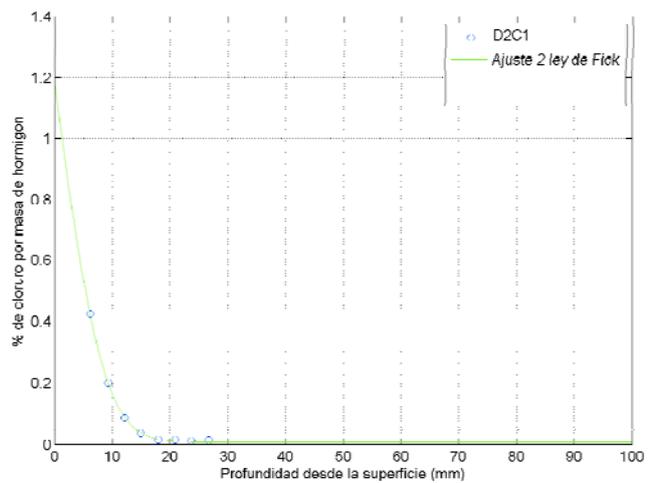


ENSAYO DE DIFUSIÓN DE CLORUROS (Cont.)



ENSAYO DE DIFUSIÓN DE CLORUROS (Cont.)

Muestra	Prof. (mm.)	% Cl
D2C1-L1	6.14	0.43
D2C1-L2	9.26	0.20
D2C1-L3	12.13	0.09
D2C1-L4	14.98	0.04
D2C1-L5	17.93	0.02
D2C1-L6	20.85	0.02
D2C1-L7	23.73	0.01
D2C1-L8	26.68	0.01



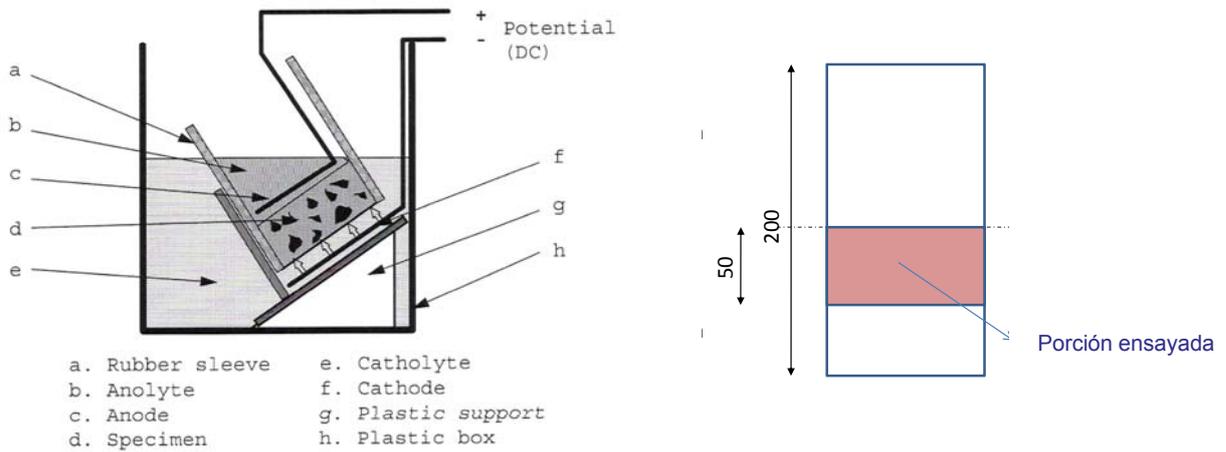
$$C(x,t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_e \cdot t}} \right)$$

Edad/Probeta	7 días			Valor medio
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	
Coef. Difusión (m ² /s)	5,7 x 10 ⁻¹²	5,4 x 10 ⁻¹²	5,6 x 10 ⁻¹²	5,6 x 10 ⁻¹²

Ensayos de durabilidad

ENSAYO DE MIGRACIÓN DE CLORUROS

- Según norma Nordtest Method NT BUILD 492.
- Edad: 28 días.



ENSAYO DE MIGRACIÓN DE CLORUROS (Cont.)



ENSAYO DE MIGRACIÓN DE CLORUROS (Cont.)

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t}$$

$$E = \frac{U - 2}{L}$$

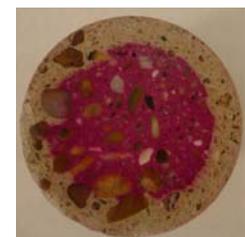
$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - 2 \frac{c_d}{c_0} \right)$$

D : coeficiente de migración no estacionario, m²/s
z : valor absoluto de la valencia de los iones, para cloruros *z* = 1
F : constante de Faraday, *F* = 9.648x10⁴ J/(V·mol)
U : valor absoluto del potencial aplicado, V
R : constante de gas, *R* = 8.314 J/(K·mol)
T : temperatura media de la temperatura inicial y final en el anolito.
L : espesor de la probeta, m
x_d : valor medio de las profundidades de penetración, m
t : duración del ensayo, s
erf⁻¹ : función error inversa
c_d : concentración de cloruro con la cual el color cambia
c₀ : concentración de cloruro en el catolito.

Probeta	401			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Valor medio
Coef. Migración (m ² /s)	8.9129x10 ⁻¹²	9.3875x10 ⁻¹²	8.4568x10 ⁻¹²	8.9352x10⁻¹²
Probeta	404			
	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Valor medio
Coef. Migración (m ² /s)	6.5152x10 ⁻¹²	9.9817x10 ⁻¹²	9.0921x10 ⁻¹²	8.5297x10⁻¹²

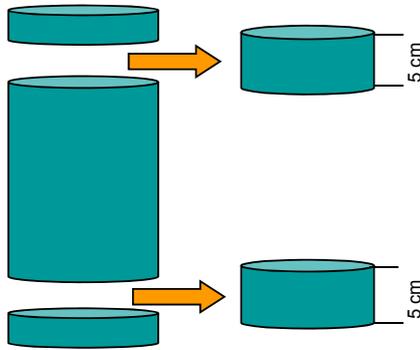
ENSAYO DE CARBONATACIÓN ACELERADA

- Cámara hermética según norma UNE-EN 13295:2005.
- Medición según norma UNE 112011:1994.
- Edad: 91 días.
- Duración del ensayo: 3 meses.



ENSAYO DE PERMEABILIDAD A LOS GASES

Este ensayo tiene como objeto determinar el Coeficiente de permeabilidad al oxígeno del hormigón en estado endurecido. [UNE-83981]



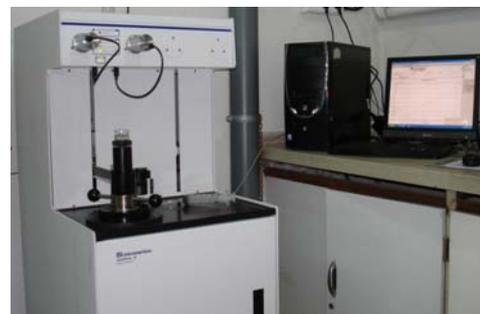
$$K = \frac{2 \cdot Q \cdot p_o \cdot L \cdot \eta}{A \cdot (p^2 - p_a^2)}$$

- K Coeficiente de permeabilidad al oxígeno (m^2)
- Q Flujo de oxígeno que atraviesa la probeta (m^3/s)
- p_o Presión en la cual se determina Q (N/m^2)
- L Espesor de la probeta (m)
- η Viscosidad del oxígeno ($2,02 \times 10^{-5}$ N.s. m^{-2})
- A Sección de la probeta (m^2)

Ensayos de caracterización microestructural

POROSIMETRÍA POR INTRUSIÓN DE MERCURIO

- Según norma ASTM D4404-84 (2004).
- Edad: 91 días.

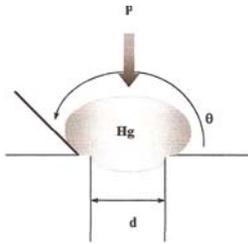


Micromeritics, modelo Autopore IV 9500



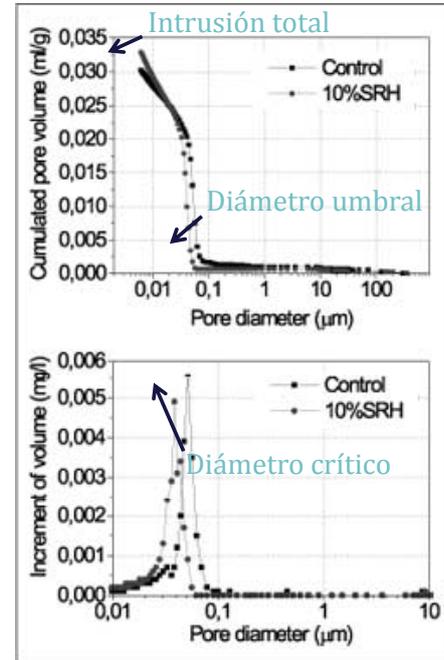
POROSIMETRÍA POR INTRUSIÓN DE MERCURIO

Relación entre la presión de mercurio aplicada y el tamaño de poro en el que penetra dada por la ecuación de Washburn (1921)



$$p = \frac{-4\gamma \cos \theta}{d}$$

- γ tensión superficial (N/nm)
- θ ángulo de contacto
- d diámetro de poro (nm)
- p presión necesaria para que el Hg penetre un poro de diámetro d (N/nm²)

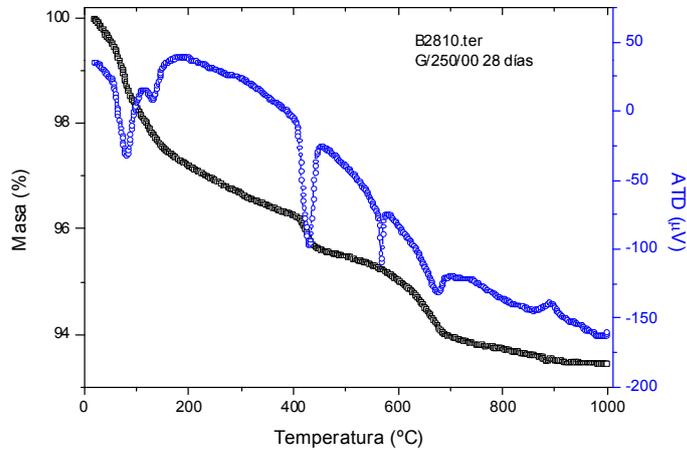


ANÁLISIS TÉRMICO (ATD/TG)

- Análisis térmico diferencial-termogravimétrico.
- Según norma ASTM E1131-03.
- Edad: 7, 28 y 91 días.



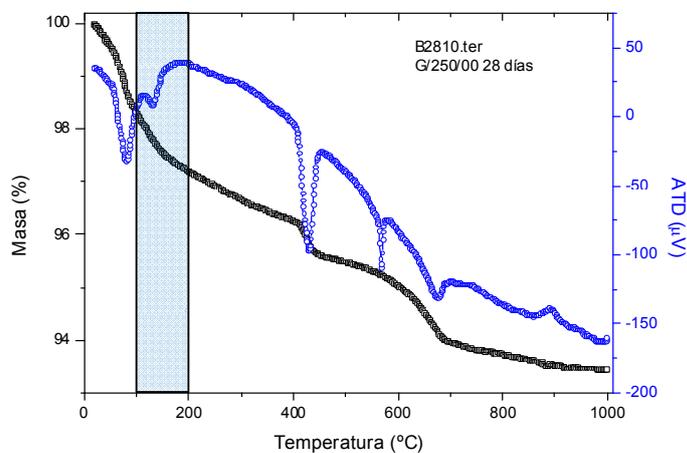
ANÁLISIS TÉRMICO (ATD/TG)



- Termogravimétrico
- **Térmico-diferencial**

- Zona 1 (*Agua Gel*)
- 100 - 200 °C
- Zona 2 (*Agua CH*)
- 410 - 580 °C
- Zona 3 (CaCO_3)
- 700 - 900 °C

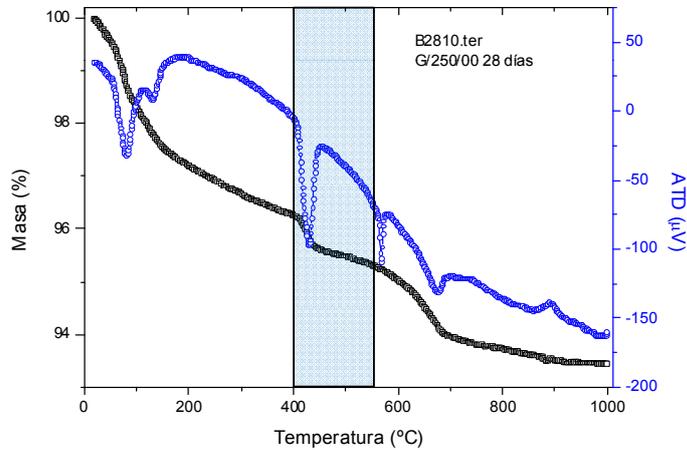
ANÁLISIS TÉRMICO (ATD/TG)



- Termogravimétrico
- **Térmico-diferencial**

- Zona 1 (*Agua Gel*)
- 100 - 200 °C
- Zona 2 (*Agua CH*)
- 410 - 580 °C
- Zona 3 (CaCO_3)
- 700 - 900 °C

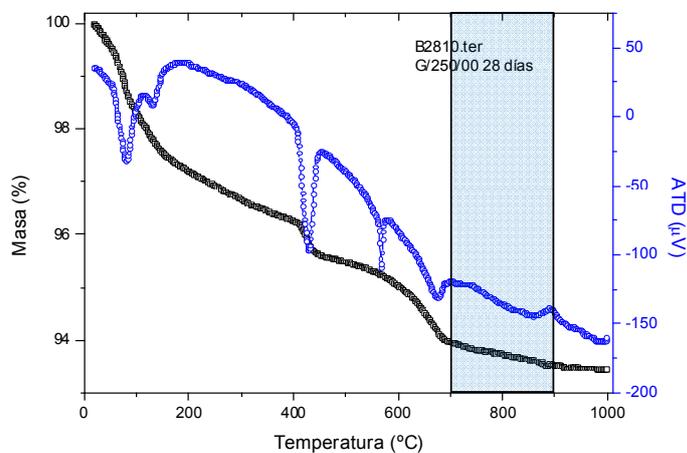
ANÁLISIS TÉRMICO (ATD/TG)



- Termogravimétrico
- **Térmico-diferencial**

- Zona 1 (*Agua Gel*)
– 100 – 200 °C
- Zona 2 (*Agua CH*)
– 410 – 580 °C
- Zona 3 (CaCO_3)
– 700 – 900 °C

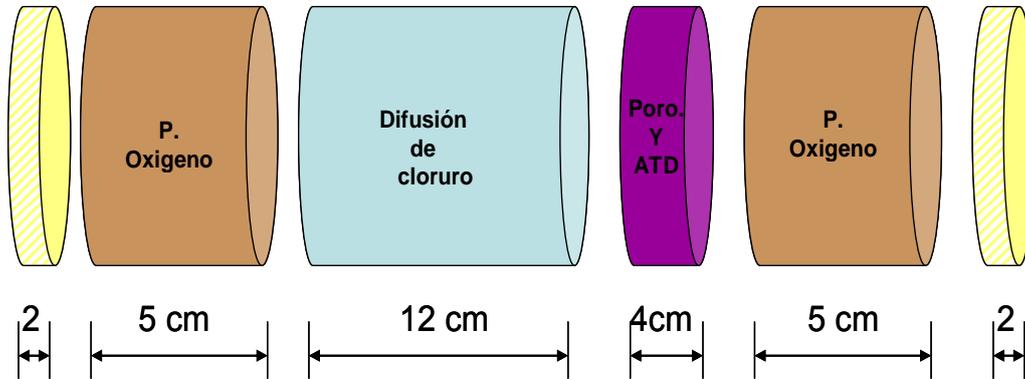
ANÁLISIS TÉRMICO (ATD/TG)



- Termogravimétrico
- **Térmico-diferencial**

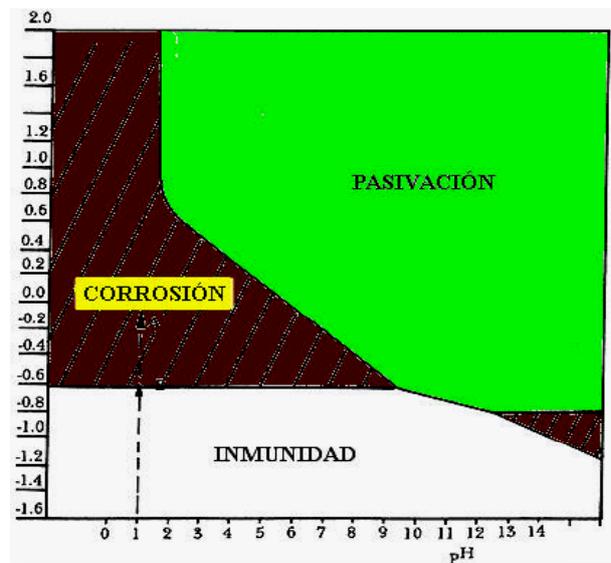
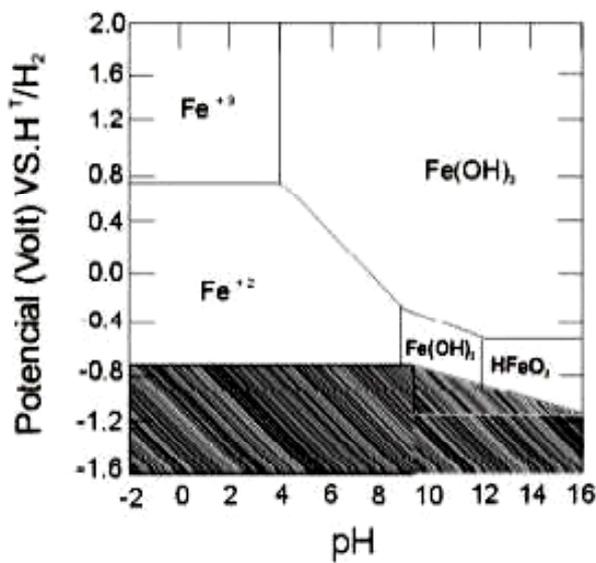
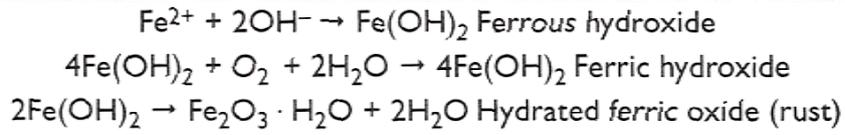
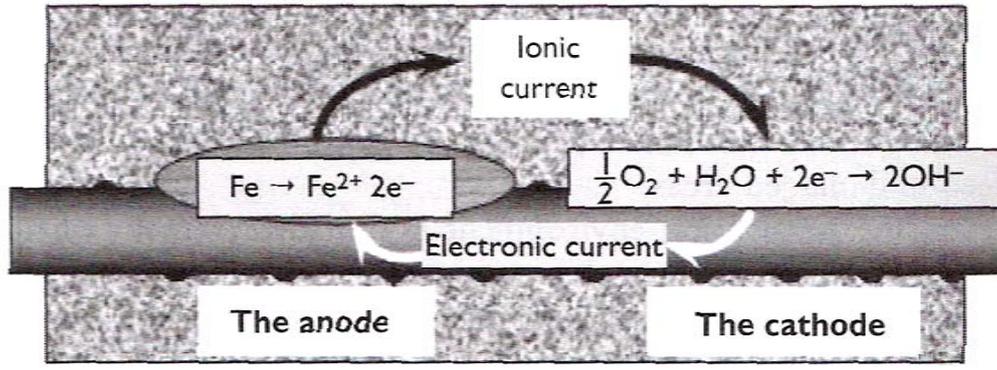
- Zona 1 (*Agua Gel*)
– 100 – 200 °C
- Zona 2 (*Agua CH*)
– 410 – 580 °C
- Zona 3 (CaCO_3)
– 700 – 900 °C

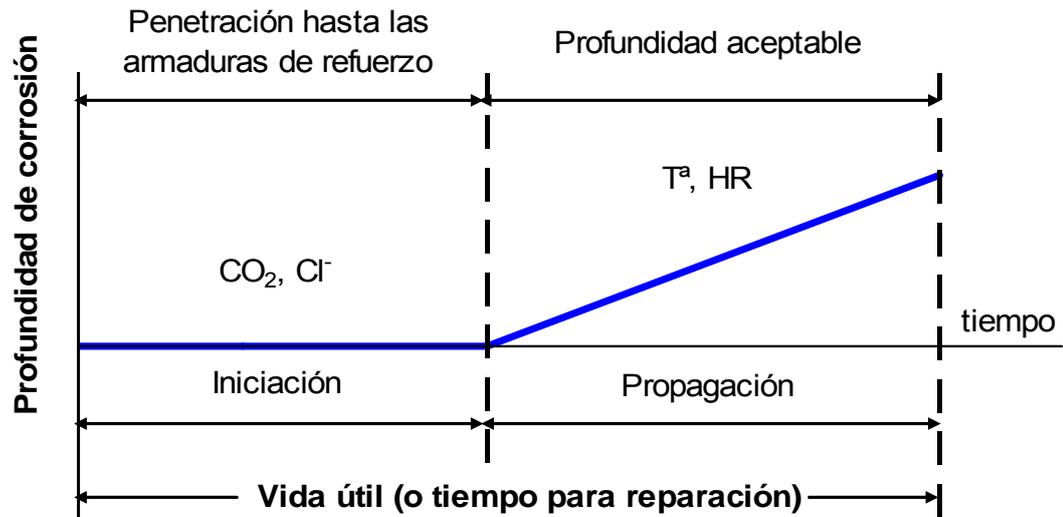
Esquema de la probeta para los ensayos de durabilidad



CORROSIÓN ARMADURA

CORROSIÓN DE LA
ARMADURA





Fases de iniciación y propagación según modelo de Tutti (1982)

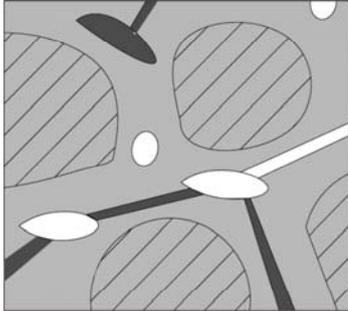
DIFUSIÓN DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN

Mecanismos de transporte:

- Absorción capilar
 - Capilaridad por tensión superficial
- Permeabilidad
 - Gradiente de presión
- Difusión
 - Gradiente de concentración
- Migración
 - Gradiente de potencial eléctrico

DIFUSIÓN DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN

Ecuaciones de transporte (1/3)



$$\phi^{\alpha} = \frac{dv^{\alpha}}{dv}$$

$$\phi^s + \phi^l + \phi^g = 1$$

α = fase constituyente; y v = volumen

Variables fundamentales:

- Concentración de cloruros, C_c
- Fracción de agua en los poros, w_e
- Temperatura, T

$$C_{tc} = C_{bc} + \omega_e C_{fc}$$

DIFUSIÓN DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN

Ecuaciones de transporte (2/3)

Difusión:

$$J_F = -D_F \nabla C$$

$$J_d = -\omega_e (D_c \nabla C_{fc})$$

Absorción capilar:

$$q_{\omega} = -K \nabla \omega$$

$$q_{\omega} = -D_h \nabla h$$

$$\frac{\partial \omega_e}{\partial t} = \text{div}(D_h \nabla h)$$

DIFUSIÓN DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN

Ecuaciones de transporte (3/3)

Transferencia de calor:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) = \text{div}(\lambda \nabla T)$$

Transporte de cloruros:

$$J_{fc} = -\omega_e D_c \nabla C_{fc} - C_{fc} D_h \nabla h$$

$$\left(\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} + \omega_e \right) \frac{\partial C_{fc}}{\partial t} + C_{fc} \frac{\partial \omega_e}{\partial t} = \text{div}(\omega_e D_c \nabla C_{fc}) + \text{div}(C_{fc} D_h \nabla h)$$

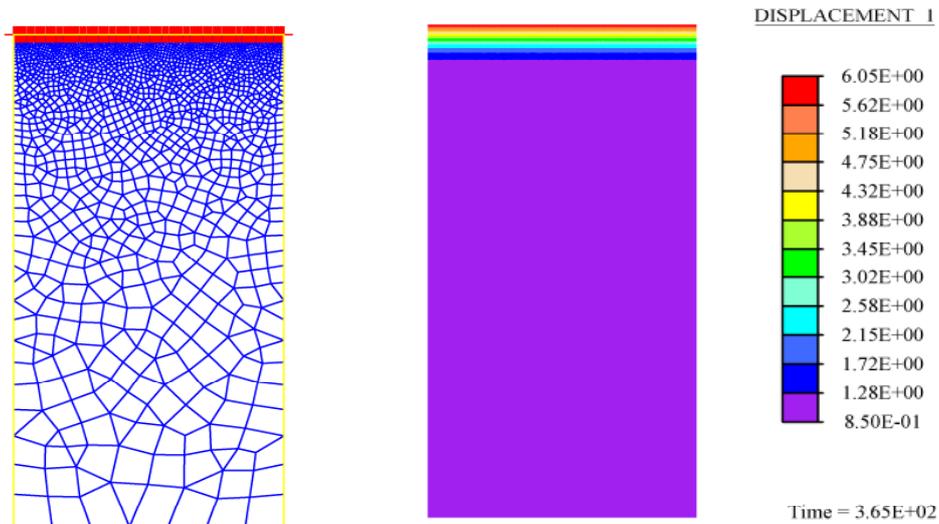
DIFUSIÓN DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN

Solución analítica unidimensional:

$$C(x,t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \left[\text{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right]$$

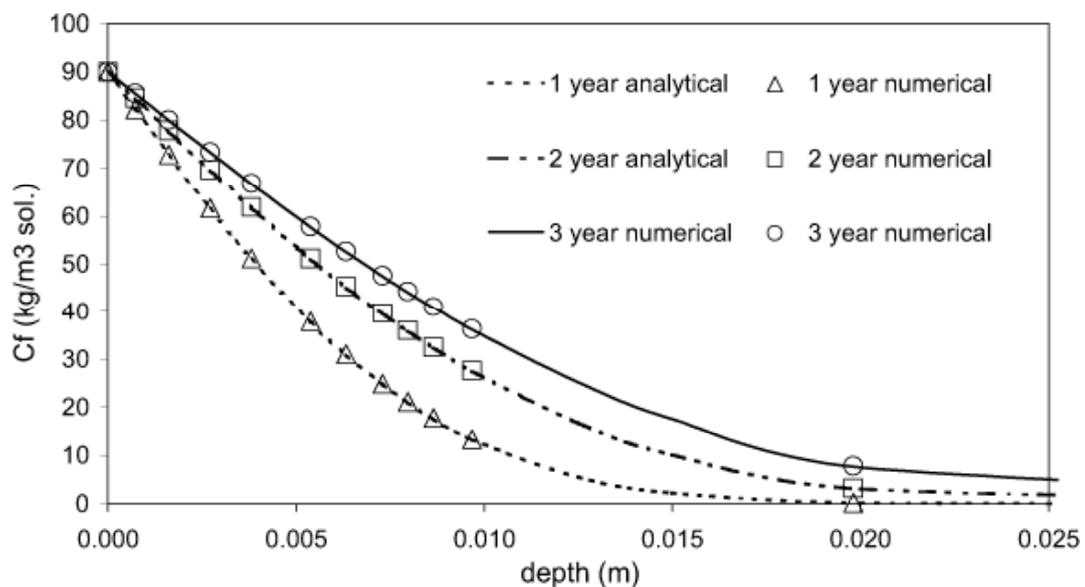
Concentración máxima de 90 kg/m³ de solución acuosa debido al empleo de las sales fundentes en épocas de hielo (2.5M NaCl).

DIFUSIÓN DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN



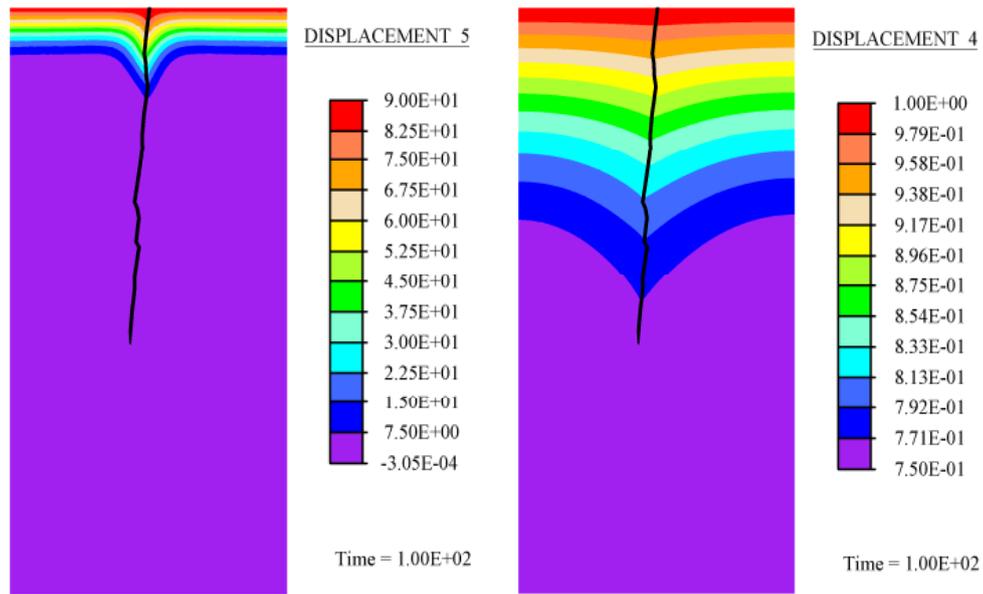
Perfil de concentración de cloruros en la probeta de referencia
(h = 100%; T = 23°; t = 1 año)

DIFUSIÓN DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN



Perfiles de concentración de cloruros libres
 $C_{superficial} = 90 \text{ kg/m}^3(\text{sol.}); C_{inicial} = 0; h = 0.95; T = 25^\circ\text{C}$

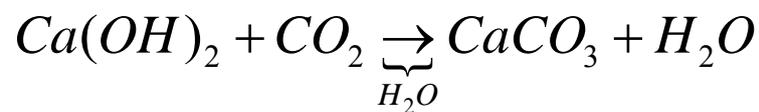
DIFUSIÓN DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN



Perfiles de (a) concentración de cloruros (kg/m³) y (b) de humedad para el ejemplo de fisura superficial

CARBONATACIÓN DEL HORMIGÓN

Reacción principal



Factores fundamentales:

- Difusión/permeabilidad.
- Reserva alcalina.
- Concentración de CO₂.
- Condiciones de exposición: humedad relativa

PERIODO 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

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

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

PERIODO DE PROPAGACIÓN

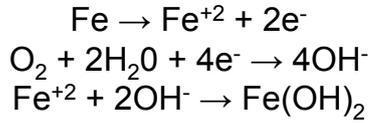
La etapa de propagación se considera concluida cuando se produce una pérdida de sección inadmisibles de la armadura o cuando aparecen fisuras en el recubrimiento de hormigón.

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

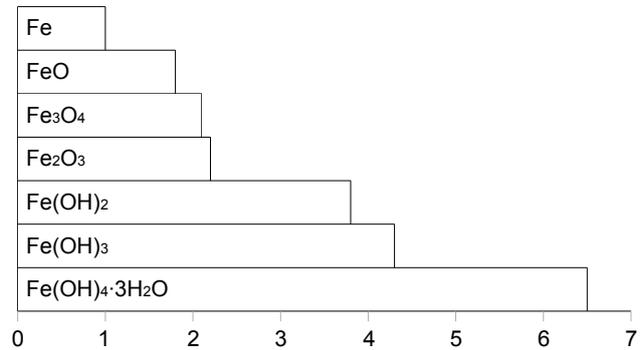
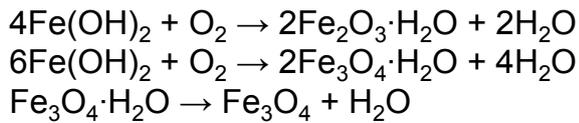
$$t_L = t_i + t_p = \left(\frac{d}{K} \right)^2 + \frac{80 \cdot d}{\phi \cdot v_{corr}}$$

CORROSIÓN DE LA ARMADURA

Primer producto:

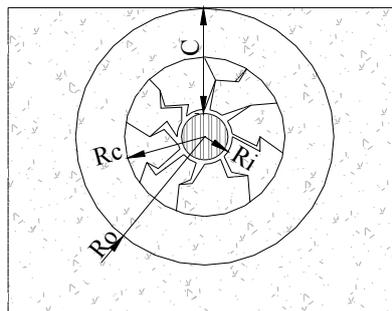


Otros productos:

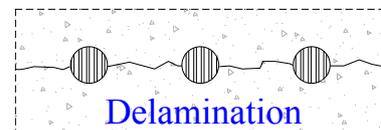


Volúmenes relativos de los productos de corrosión respecto al metal hierro (Liu, 1996)

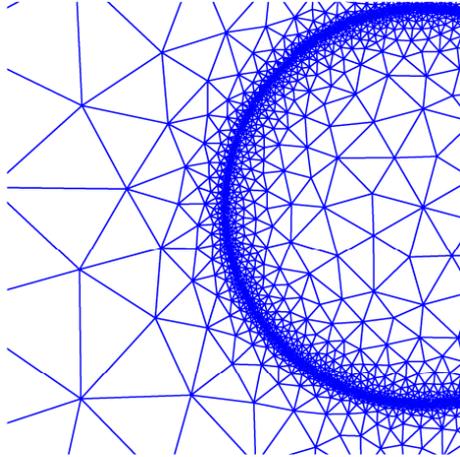
FISURACION DEL HORMIGÓN



$$u_c = d_c \frac{E_1 \left[(1 - \nu_2) R_c^2 + (1 + \nu_2) R_o^2 \right] 2R_i R_c}{E_1 \left[(1 + \nu_1) R_c^2 + (1 - \nu_1) R_i^2 \right] \left[(1 - \nu_2) R_c^2 + (1 + \nu_2) R_o^2 \right] - E_2 (R_c^2 - R_i^2) (R_c^2 - R_o^2) (1 - \nu_1^2)}$$



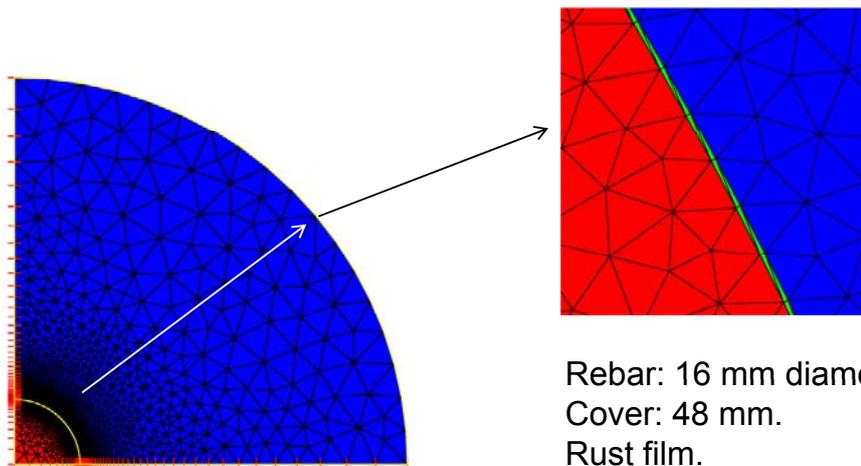
FISURACION DEL HORMIGÓN



Rebar: 16 mm diameter.
Cover: 48 mm.
No rust film.

Thickness of the rust (0.01 mm)

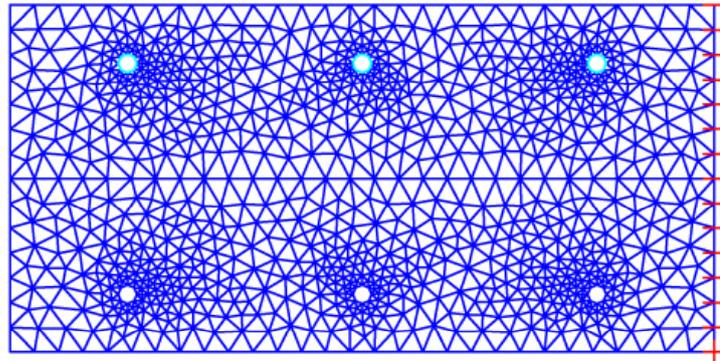
FISURACION DEL HORMIGÓN



Rebar: 16 mm diameter.
Cover: 48 mm.
Rust film.

Thickness of the rust (0.01 mm)

FISURACION DEL HORMIGÓN



Rebar: 20 mm diameter.
 Cover: 50 mm.
 Distance between bars: 200 mm.
 No rust film.



FISURACION DEL HORMIGÓN

Patrones de fisuración en el período de propagación (de arriba abajo y de izquierda a derecha: 0.43, 0.60, 0.76, 0.93, 1.10, 1.27, 1.44, 1.60, 1.77, 1.94 años)

REACCIÓN ÁRIDO-ALCALI

REACCIÓN ÁRIDO-ÁLCALI

Áridos reactivos + álcalis del cemento + agua en los poros.

Áridos reactivos:

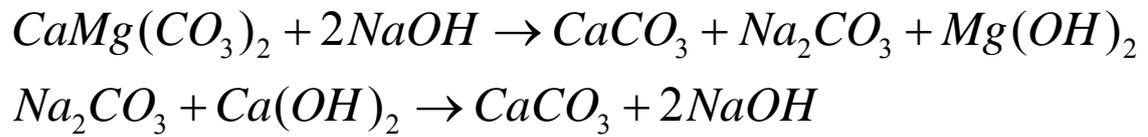
- Sílice amorfa (ópalos).
- Sílice parcialmente cristalizada (calcedonias y tridimitas).

Reacción principal: *silicato alcalino gelatinoso expansivo*



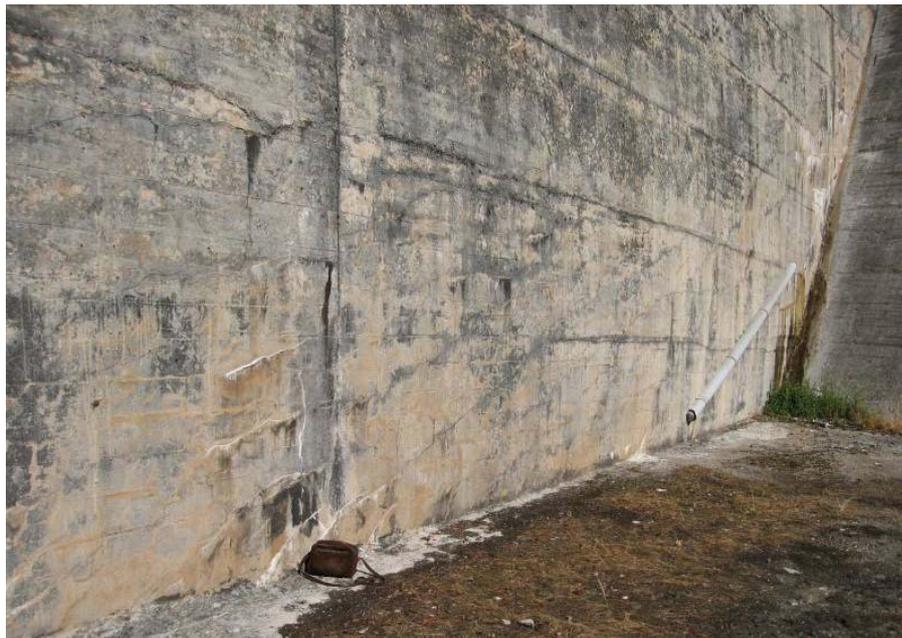
REACCIÓN ÁRIDO-ÁLCALI

Posible reacción con áridos de naturaleza carbonato:



Recomendaciones:

- Limitación de los álcalis en el cemento:
 - $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O} < 0,6 \%$
- Empleo de áridos no reactivos.
- Evitar la saturación del hormigón.
- Usar adiciones en el cemento y/o hormigón (no calizas).



Cortesía CEDEX

REACCIÓN ARIDO-ALCALI

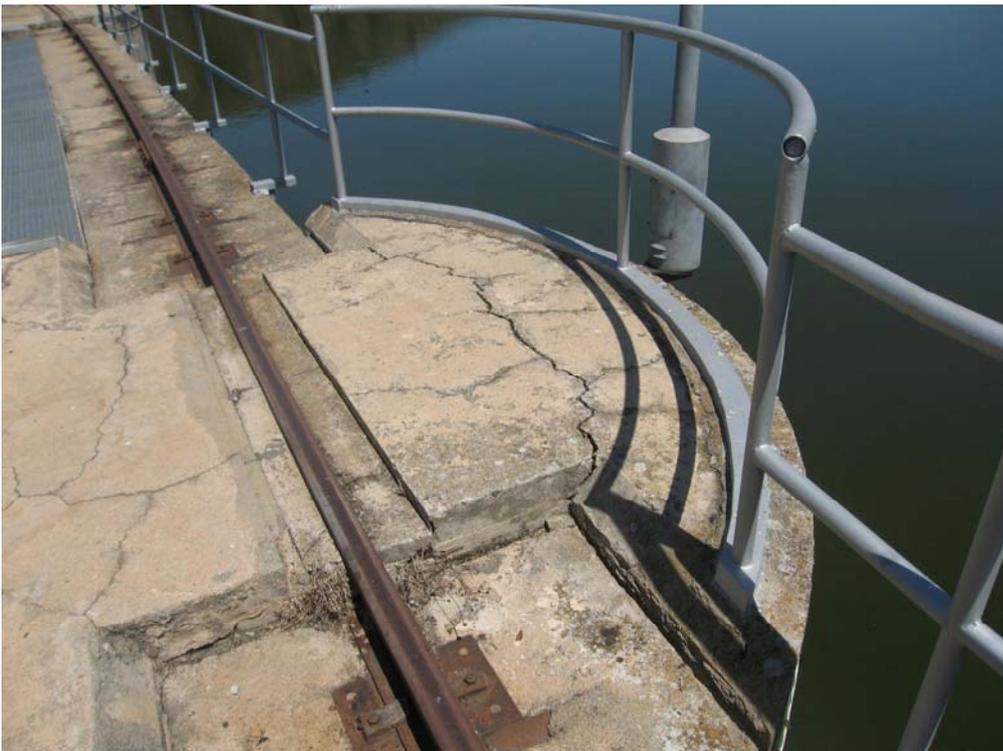


Cortesía CEDEX

Perspectivas globales sobre el desempeño del hormigón.

Puerto Rico, Enero 2010

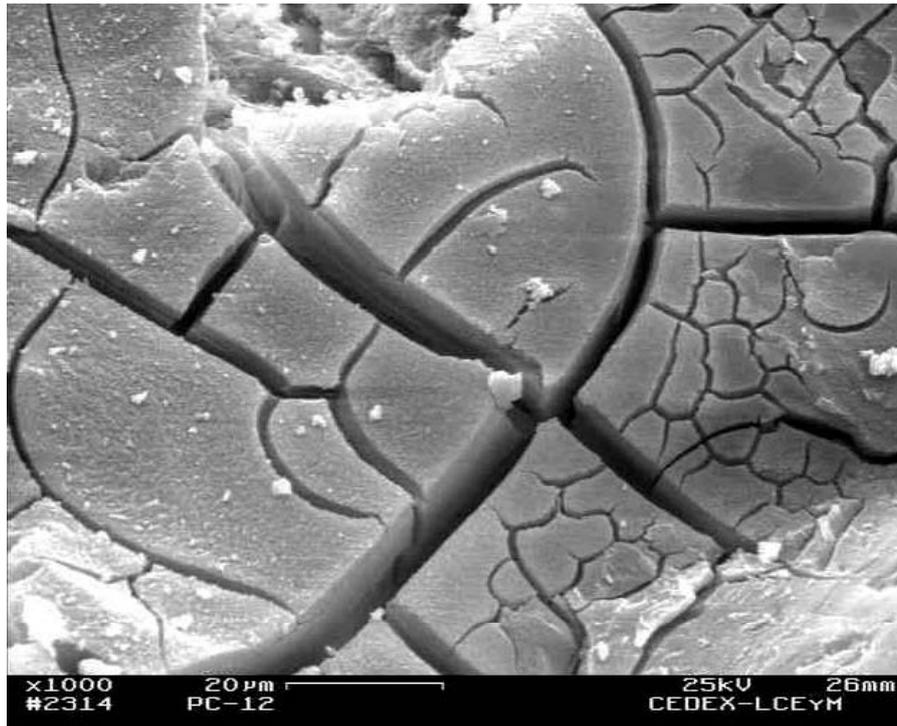
REACCIÓN ARIDO-ALCALI



Cortesía CEDEX

Perspectivas globales sobre el desempeño del hormigón.

Puerto Rico, Enero 2010



Cortesía CEDEX



Cortesía CEDEX



Cortesía CEDEX

PROTECCIÓN DE LA ARMADURA

PROTECCIÓN DE LA ARMADURA

Medidas especiales de protección:

- Empleo de acero inoxidable.
- Revestimientos continuos no metálicos
- Galvanizado
- Protección catódica (corrientes impresas o ánodos de sacrificio)



PROTECCIÓN DE LA ARMADURA



PROTECCIÓN DE LA ARMADURA

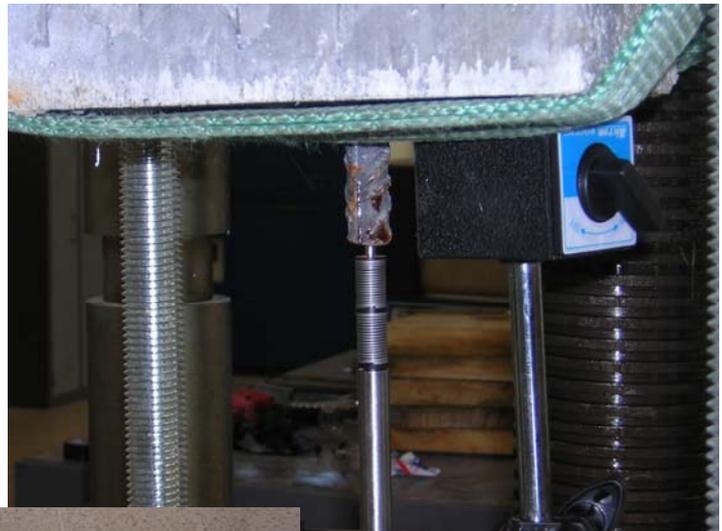


PROTECCIÓN DE LA ARMADURA

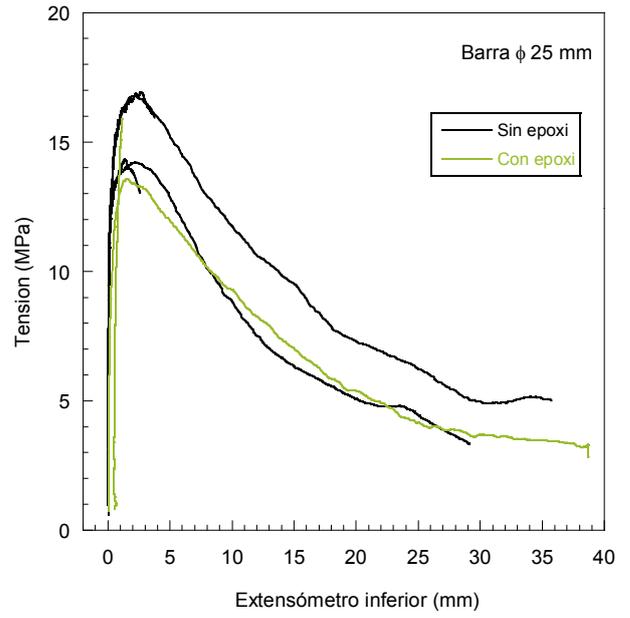
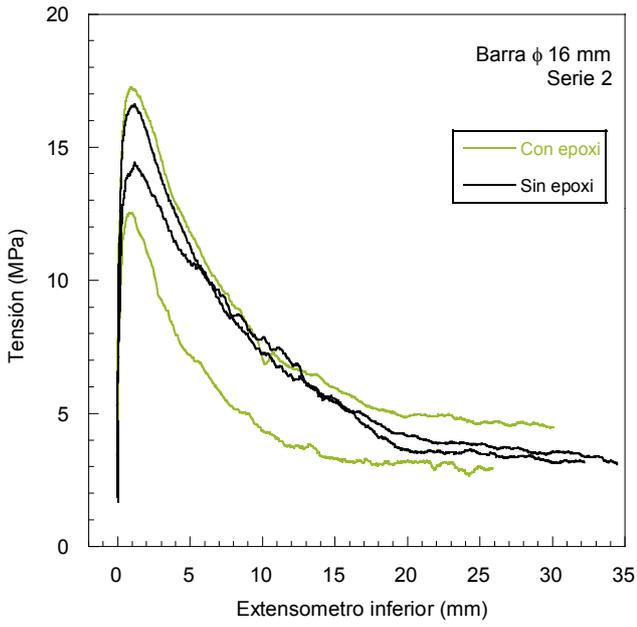


Diámetro (mm)	Punto	Espesor (mm)	Espesor medio (mm)
8	1	0,243	0,252
	2	0,321	
	3	0,165	
	4	0,280	
16	1	0,234	0,286
	2	0,247	
	3	0,374	
	4	0,287	
25	1	0,332	0,280
	2	0,233	
	3	0,262	
	4	0,291	

PROTECCIÓN DE LA ARMADURA



PROTECCIÓN DE LA ARMADURA



PROTECCIÓN DE LA ARMADURA



PROTECCIÓN DE LA ARMADURA



Perspectivas globales sobre el desempeño del hormigón.

Puerto Rico, Enero 2010

PROTECCIÓN DE LA ARMADURA



Perspectivas globales sobre el desempeño del hormigón.

Puerto Rico, Enero 2010