

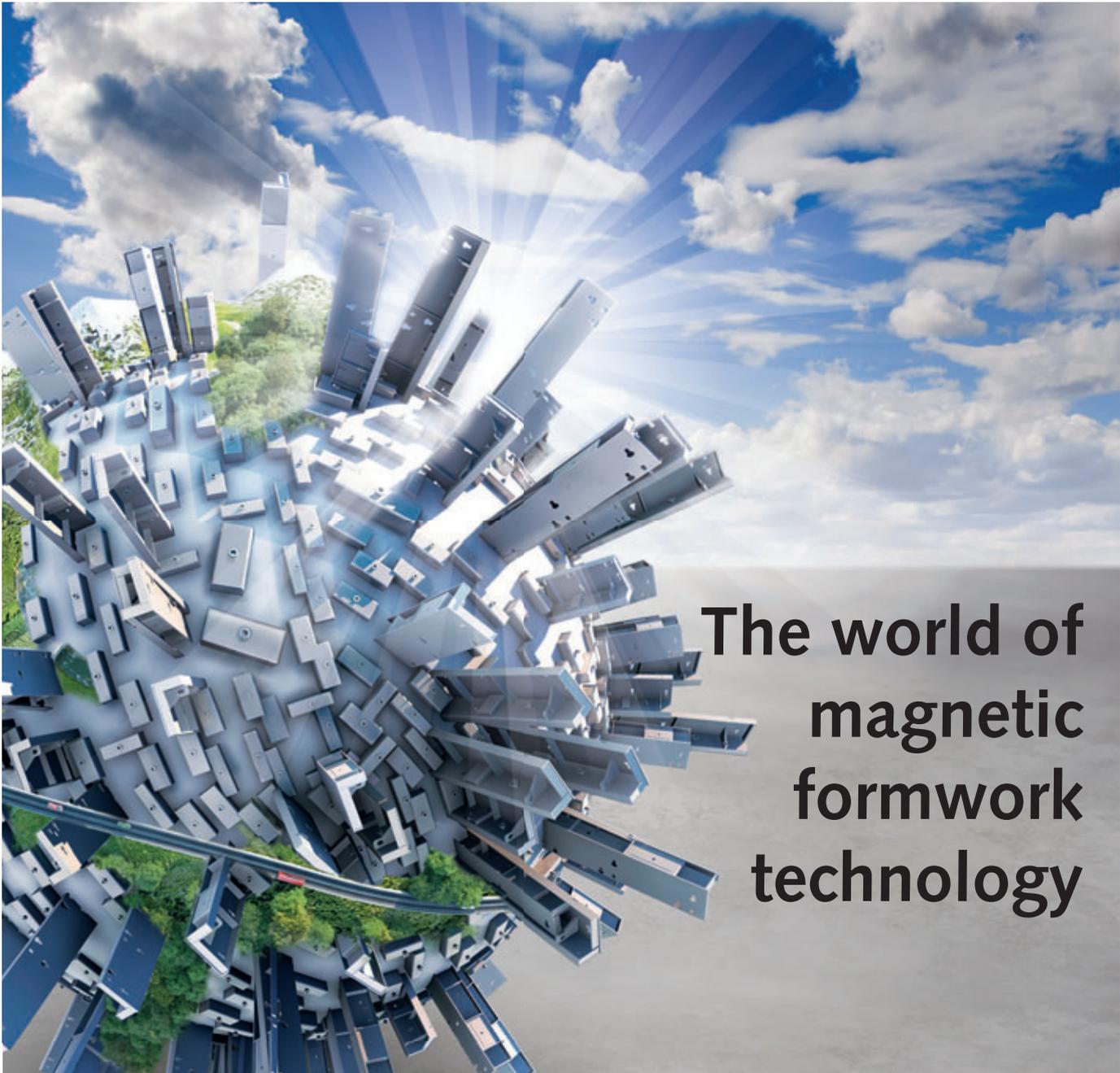
PHI

www.cpi-worldwide.com

Planta de Hormigón Internacional
Edición española

 ABRIL 2015 **2**

NOVEDADES Ventajas económicas de los elementos prefabricados de hormigón en comparación con otras alternativas de construcción **TECNOLOGIA DEL HORMIGÓN** Extrusión de hormigón textil **PRODUCTOS Y LOSAS DE HORMIGÓN** Marciano Group moderniza su línea de producción con la integración de una máquina bloquera altamente eficiente **TUBOS DE HORMIGÓN** La durabilidad y la vida útil de los tubos de hormigón están determinadas por el perfeccionamiento de la producción y del diseño del producto **PIEZAS DE HORMIGÓN PREFABRICADAS** Diseño de superficies de bloques de hormigón de más calidad gracias al HAC



The world of magnetic formwork technology

Meet the better ideas!
www.ratec.org

RATEC

 Abcic
Asociación Española de
Industria de Cemento

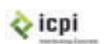
 ABTC

 ACI
American Concrete Institute

 American
Concrete Pipe
Association

 bibm

 mpa
British Precast

 icpi
International
Concrete Pipe
Institute

 OPMA
Oprema Prema
Asociación

 CSI
Concrete
Structures
Institute

 NATIONAL PRECAST

 npca
National Precast
Concrete Association

 NZCS
New Zealand
Concrete Society

 PCI
Precast/Prestressed
Concrete Institute

 PRESTRESSED CONCRETE
INSTITUTE

Cálculo de la vida útil de las tuberías de hormigón

La vida en servicio real de una estructura de hormigón es uno de los factores más importantes a la hora de cuantificar el coste de un sistema de tuberías de hormigón. En general, la vida en servicio de un sistema de tuberías de hormigón se puede estimar en más de 100 años. En este artículo se presentan dos métodos de cálculo de la vida útil del hormigón armado empleado en tuberías de sistemas sanitarios y de drenaje, con relación al periodo de iniciación de la corrosión de la armadura sometida a la penetración del ion cloruro y a una carbonatación del hormigón.

■ Miguel Ángel Sanjuán, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Madrid, España
 Cristina Argiz, profesora de materiales de construcción. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, España
 José Rodríguez Soalleiro, asesor técnico de canalizaciones de la Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón (ANDECE), Madrid, España ■

Las tuberías de hormigón se llevan utilizando en las redes de saneamiento y de drenaje de las ciudades europeas desde la segunda mitad del siglo XIX (1). Estos sistemas de tuberías ofrecen numerosas ventajas, entre otras una rápida instalación, buena resistencia mecánica y durabilidad frente a los agentes agresivos del entorno. Además los sistemas de saneamiento y drenaje de tuberías de hormigón se caracterizan por unos bajos costes de mantenimiento durante toda la vida en servicio. En la reglamentación española de hormigones, EHE-08 (2), hay dos métodos para la evaluación de la vida útil de una estructura (Fig. 1):

- i) Cumplimiento de las directivas relativas a la composición del hormigón (relación agua/cemento máxima y contenido mínimo de cemento) y, dependiendo de la clase de exposición, recubrimiento mínimo de la armadura
- ii) Modelado de las prestaciones

Tab. 1: Máxima relación agua/cemento y contenido mínimo de cemento según la Tab. 37.3.2.a, EHE-08, según las clases generales y específicas de exposición

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición												
		I	Ila	Ilb	Illa	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	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50
Mínimo contenido de cemento (kg/m ³)	Masa	200	-	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300	275
	Armado	250	275	300	300	300	325	350	325	325	350	300	325	300
	Pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300

Tab. 2: Resistencia mínimas recomendadas según la Tab. 37.3.2.b, EHE-08, en función de los requisitos de durabilidad

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición												
		I	Ila	Ilb	Illa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	QC	H	F	E
Resistencia mínima (N/mm ²)	Masa	20	-	-	-	-	-	-	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

El primer método es el procedimiento tradicional (cf. Tab. 1 y 2), previendo el modo de las prestaciones para valorar la vida útil, que está relacionada directamente in con determinadas características o prestaciones del hormigón. Aquí el planificador toma los valores correctos (clase de exposición, tipo de hormigón, etc.) de las tablas que figuran en las directivas nacionales.

El concepto de Estado Límite de durabilidad

Conforma a la norma española EHE-08 (anejo 9), se entiende por Estado Límite de

la durabilidad de una estructura el fallo producido al no alcanzarse la vida útil como consecuencia de los procesos de degradación del hormigón o de las armaduras, que impiden que se cumplan los requisitos establecidos en la planificación. Para comprobar el Estado Límite de la durabilidad, la norma contiene un procedimiento semiprobabilístico correspondiente a la comprobación de los otros estados límite. Para la comprobación del Estado Límite se debe cumplir la siguiente ecuación (1):

$$t_L > t_d \tag{1}$$



Fig. 1a y 1b: Métodos para la evaluación de la vida útil de una estructura de hormigón según EHE-08



■ Miguel Ángel Sanjuán se doctoró con la tesis "Cálculo del período de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón" en el instituto Eduardo Torroja de la Universidad Complutense de Madrid, España. Posteriormente fue colaborador científico durante dos años en el Imperial College of Science, Technology & Medicine. Actualmente es jefe del Área de Cementos y Morteros del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). Asimismo es delegado español en el Comité Europeo de Normalización CEN/TC 51 "Cementos y cales para construcción", así presidente del Comité Técnico CEN/TC 51/WG 14 "Conglomerantes hidráulicos para carreteras".



■ Cristina Argiz se doctoró en Ciencias Químicas. Participó en el grupo de investigación "Corrosión" del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Posteriormente trabajó como experta de laboratorio en la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC). Actualmente es profesora ayudante en la asignatura de materiales de construcción de la E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid (UPM).



■ José Rodríguez Soalleiro es ingeniero de canales, caminos y puertos y asesor técnico de canalizaciones de hormigón de la Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón (ANDECE). Ha pasado la mayor parte de su carrera profesional como jefe técnico de un importante fabricante de prefabricados de hormigón. Perteneció a diferentes Comités Europeos de Normalización CEN, entre ellos EN 1916 "Tubos de hormigón", EN 1917 "Pozos de registro y cámaras de inspección de hormigón", así como EN 14844 "Marcos".

Donde t_L es la vida útil estimada para el elemento y t_d , la vida útil de cálculo según la ecuación (2).

$$t_d = Y_t \cdot t_g \quad (2)$$

siendo Y_t el coeficiente parcial de seguridad para la vida útil en el caso de corrosión de la armadura, cuyo valor es 1,10, y t_g es el valor de la vida útil de proyecto. No se establece el Estado Límite que hay que tener en cuenta (depasivación de la armadura, inicio de la fisuración, ancho de fisura admisible, etc.), sin embargo, tiene la ventaja de ser generalista, lo que abre una puerta a desarrollos futuros.

El Anejo 9.º de EHE-08 solo considera el proceso de corrosión de la armadura, de modo que la vida útil de un elemento estructural se define como la suma de dos periodos: periodo de iniciación de la corrosión, t_i , y propagación de la corrosión, t_p . Por eso el Estado Límite en el caso de una corrosión de la armadura es el de la aparición de fisuras con una anchura admisible, X_g , lo que permite una pérdida de sección en la barra de acero según la ecuación (3).

$$X_g = 80 \cdot c / \varnothing \quad [\mu\text{m}] \quad (3)$$

Donde:

c Recubrimiento de hormigón, en mm
 \varnothing Diámetro de la barra, en mm

Aplicando la ecuación (3) se obtienen valores del orden de 170 a 200 μm , que equivalen a fisuras del orden de 0,8 a 1 mm.

Modelos para la estimación de la vida útil

El cálculo de la vida útil se puede realizar con ayuda de modelos empíricos o teóricos (basados en leyes físico-químicas), que sirven para estimar el avance del deterioro de la estructura de hormigón hasta que se alcanza el límite admisible (3).

En la EHE-08 (Anejo 9.º) solo se considera la acción de la corrosión de las armaduras debido a la acción de los cloruros y de la carbonatación del recubrimiento de hormigón. El modelo para calcular la vida útil del hormigón armado frente a la corrosión de las armaduras se compone de un periodo de iniciación de la corrosión

BFS

Betonfertigteilesysteme



APRECIADO EN TODO EL MUNDO



ATLANTIC Producción eficiente de pozos y de tubos con un diámetro de hasta DN 2.000 mm con la máxima calidad y un elevado volumen de producción.



SOUVERAEN Moderna tecnología para la producción de tubos de hormigón con un elevado volumen de producción y máxima calidad.



CAPITAN El sistema BFS conveniente para fabricar bases de pozos de hormigón monolíticas.

BFS Betonfertigteilesysteme GmbH · Dr.-Georg-Spohn-Str. 31
 D-89143 Blaubeuren · Tel. +49 (0) 73 44 - 96 03-0 · Fax - 47 10
 info.bfs@casagrandegroup.com · www.bfs-casagrande.de



www.casagrandegroup.com



(fase durante la cual la armadura se encuentra protegida de la corrosión) y una fase de propagación de la corrosión (fase durante la cual la corrosión de la armadura es activa). La suma de ambos periodos t_L se expresa con la ecuación (4).

$$t_L = t_i + t_p \quad (4)$$

Modelo del periodo de iniciación

Para estimar la corrosión de las armaduras existen a disposición dos tipos de modelo. Por un lado los modelos empíricos (basados en el ajuste de una serie de datos experimentales) y, por otro, los modelos teóricos basados en el proceso fisicoquímico de penetración del agresivo y reacción con el conglomerante. En los modelos teóricos, frecuentemente se emplean coeficientes empíricos para ajustar el modelo a los valores experimentales obtenidos. El modelo más empleado es una solución de la segunda ley de Fick aplicada a la difusión de gases (CO_2) y de iones agresivos (cloruros, sulfatos, etc.) a través del recubrimiento de hormigón. Esta ecuación (5) para calcular el periodo de iniciación de la corrosión, se incorporó a la EHE-08 (Anejo 9.º):

$$d = K\sqrt{t} \quad (5)$$

Donde:

- d es la profundidad de penetración de la sustancia agresiva para una edad de t,
- t el tiempo en años, y
- K el factor dependiendo del tipo del proceso agresivo, las características del material y las condiciones ambientales.

Modelo del periodo de propagación

El modelo de propagación de la corrosión procede de una velocidad de corrosión constante V_{corr} y la pérdida de material X según la ecuación (6).

$$X = V_{corr} \cdot t_p \quad [mm] \quad (6)$$

La etapa de propagación finaliza cuando se produce una pérdida de sección de la armadura inadmisibles o cuando aparecen fisuras en el recubrimiento de hormigón. Combinando las ecuaciones 3, 4 y 6 se obtiene la ecuación 7:

$$t_p = 80/\varnothing \cdot d/V_{corr} \quad [años] \quad (7)$$

Donde:

- t_p Tiempo de propagación, en años.
- d Espesor de recubrimiento en mm.
- \varnothing Diámetro de la armadura, en mm.
- V_{corr} Velocidad de corrosión, en $\mu m/año$.

Tab. 3: Velocidad de corrosión V_{corr} según la clase general de exposición

Clase general de exposición			V_{corr} ($\mu m/año$)	
Normal	Humedad alta	Ila	3	
	Humedad baja	IIb	2	
Marina	Aérea	IIIa	20	
	Sumergida	IIIb	4	
	En zona de carrera de mareas	IIIc	50	
Con cloruros de origen diferente del medio marino			IV	20

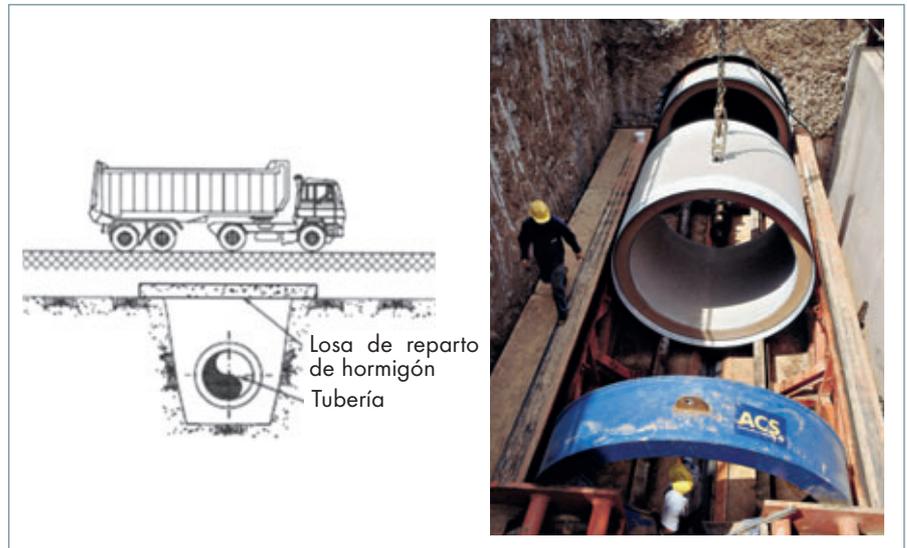


Fig. 2a y 2b: Colocación de tuberías de hormigón bajo carreteras

La velocidad de corrosión podrá obtenerse de los valores de la Tab. 3 cuando no se disponga de datos experimentales específicos para el hormigón y las condiciones ambientales de la obra.

Las tuberías de hormigón se utilizan habitualmente en los sistemas de saneamiento y drenaje de aguas residuales y pluviales. Además, están en contacto con suelos de diferente agresividad. En el caso de las tuberías de hormigón, al encontrarse enterradas la clase general de exposición sería Ila o IIb (Fig. 2). Aquí la velocidad de corrosión V_{corr} será, por tanto, 3 o 2 $\mu m/año$. A continuación, se presentan unos cálculos de la vida útil de tuberías de hormigón con relación a la carbonatación y a la difusión de iones cloruro empleando los modelos del Anejo 9.º de la EHE-08.

Modelo de carbonatación de tubos de hormigón

El hormigón es un material poroso, por lo que el CO_2 atmosférico puede penetrar a través de la red de poros hacia el interior y reaccionar con los compuestos alcalinos del hormigón (5). Este fenómeno no es importante en tuberías enterradas. Sin embargo, en las zonas en contacto con el aire se puede producir una reacción química del CO_2 con el hidróxido cálcico como se describe en la ecuación (8).



Fig. 3: Pozo de hormigón



El $Ca(OH)_2$ junto con los compuestos alcalinos mantiene un elevado valor del pH del hormigón en torno a 12. Cuando se carbona el hormigón, el valor del pH desciende por debajo de 9. El fenómeno de la carbonatación del hormigón es máximo con un 60 % de humedad relativa y prácticamente nulo en ambientes secos o saturados. En el caso del hormigón seco no tiene lugar una reacción química según la ecuación (3), y en el hormigón completamente saturado, el gas de CO_2 se debe disolver en la solución porosa del hormigón (6). El período de tiempo necesario para que se produzca la carbonatación a una distancia, d, con respecto a la superficie del hormigón se puede estimar con la ecuación (9) que deriva de la ecuación (5).

Tab. 4: Valor del coeficiente de ambiente c_{env} y el coeficiente de agente aireante c_{air}

Ambiente	C_{env}	Aire ocluido (%)	C_{air}
Protegido de la lluvia	1		
Expuesto a la lluvia	0,5		
Elementos enterrados, por encima del nivel freático	0,3 (*)	< 4,5 %	1
Elementos enterrados, por debajo del nivel freático	0,2 (*)	≥ 4,5 %	0,7

(*) Valores propuestos en el borrador del Código Estructural que reemplazará a la EHE-08.

Tab. 5: Coeficientes a y b de la ecuación 10 según el Anejo 9.º de la EHE-08

Conglomerante	Cementos de la Instrucción para la Recepción de Cementos	a	b
Cemento Portland	CEM I CEM II/A CEM II/B-S CEM II/B-L CEM II/B-LL CEM II/B-M CEM V	1800	-1,7
Cemento Portland + 28 % cenizas volantes	CEM II/B-P CEM II/B-V CEM IV/A CEM IV/B	360	-1,2
Cemento Portland + 9 % humo de sílice	CEM III/A-D	400	-1,2
Cemento Portland + 65 % escorias	CEM III/A CEM III/B	360	-1,2

$$t = (d/K_c)^2 \quad (9)$$

Donde:

K_c Coeficiente de carbonatación, en $\text{mm/año}^{0.5}$.

d Profundidad, en mm.

t Tiempo, en años.

El coeficiente de carbonatación K_c puede obtenerse con la ecuación (10), mientras que los valores del coeficiente de ambiente, c_{env} , y el coeficiente de agente aireante, C_{air} , de pueden obtener de la Tab. 4. Por otro lado, la resistencia media a compresión del hormigón, f_{cm} , expresada en N/mm^2 , se puede estimar a partir de la resistencia característica especificada (f_{ck}) con la ecuación (11).

$$K_c = c_{env} \cdot c_{air} \cdot f_{cm} \quad (10)$$

Donde

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (11)$$

Donde:

f_{cm} Resistencia media del hormigón a compresión en N/mm^2 , que puede

estimarse a partir de la resistencia característica especificada (f_{ck}).

c_{env} Coeficiente de ambiente, según Tab. 4.

C_{air} Coeficiente de aireantes, según Tab. 4.

a, b Parámetros en función del tipo de conglomerante, según Tab. 5.

Los parámetros a y b dependen del tipo de conglomerante según la Tab. 5 que está tomada del Anejo 9.º de la EHE-08. En la Tab. 5 aparecen algunos valores para estos dos parámetros. Por ejemplo, da los mismos valores a y b a un cemento sin adición, CEM I, que a un cemento con un elevado contenido de adición con escorias de horno alto y puzolanas, CEM V. Por este motivo, es muy recomendable que el proyectista obtenga experimentalmente los valores a y b.

La velocidad de carbonatación de un hormigón con una resistencia característica de 25 N/mm^2 , elaborado con los cementos de los cuatro grupos propuestos en la Tab. 5 y sin agente aireante ($C_{air} = 1$) y considerando que se trata de una tubería enterrada, por encima del nivel freático ($C_{env} = 0,3$), se obtienen los resultados según la



**DS - State-of-the-Art
in Sealing Systems**

DS Dichtungstechnik GmbH
Lise-Meitner-Straße 1
D-48301 Nottuln
Tel.: +49 (0) 2502 / 23 07-0
Fax: +49 (0) 2502 / 23 07-30
E-Mail: info@dsseals.com



Tab. 6: Resultados del coeficiente de carbonatación K_c (mm/año^{0,5}) de un hormigón con una resistencia característica de 25 N/mm² según la ecuación (10) (Anejo 9.º de la EHE-08)

	K_c (mm/año ^{0,5})	C_{env}	C_{air}	a	b	f_{ck}	f_{cm}
CEM I	1,42	0,3	1	1800	-1,7	25	33
CEM III/A-V	1,63	0,3	1	360	-1,2	25	33
CEM III/A-D	1,81	0,3	1	400	-1,2	25	33
CEM III	1,63	0,3	1	360	-1,2	25	33

ecuación (10), como se presenta en Tab. 6. La velocidad de carbonatación es de 1,42 a 1,81 mm/año^{0,5}. Partiendo de recubrimientos de hormigón de 30 mm, se obtendrían periodos de iniciación de la corrosión debido a la carbonatación de 275 a 450 años.

La mayoría de los modelos de carbonatación consideran la cantidad de cemento como un parámetro importante a considerar debido a su gran influencia en la reacción del CO₂ con el Ca(OH)₂ formado en la hidratación del cemento, por ejemplo el documento del Comité Europeo de Normalización CEN/TS 12390-10:2007 sobre la determinación de la resistencia del hormigón a la carbonatación así lo considera (Fig. 4). Por tanto, el elevado contenido de cemento que se emplea en las tuberías prefabricadas de hormigón previene el efecto de la carbonatación en cualquier caso.

Modelo de penetración de cloruros de tubos de hormigón

El período de tiempo necesario para que se produzca una concentración de cloruros C_{th} a una distancia d respecto a la superficie del hormigón puede estimarse con la ecuación (12), que es similar a la ecuación (9) ya comentada.

$$t = (d/K_{cl})^2 \tag{12}$$

Donde:

- d Profundidad de penetración de los iones cloruro, en mm.
- t Tiempo, en años.

El coeficiente de penetración de cloruros, K_{cl} , se puede calcular con la siguiente ecuación (13).

$$K_{Cl} = \alpha \sqrt{12D(t)} \left(1 - \sqrt{\frac{C_{th} - C_b}{C_s - C_b}} \right) \tag{13}$$

Donde:

- α Factor de conversión de unidades, que vale 56.157.
- $D(t)$ Coeficiente de difusión efectivo de cloruros, para la edad t , expresado en cm²/s
- C_{th} Concentración crítica de cloruros, expresada en % en peso de cemento.
- C_s Concentración de cloruros en la superficie del hormigón, expresada en % en peso de cemento. Este parámetro se calcula, normalmente, en % del peso de hormigón. Para convertirlo a % del peso de cemento s puede calcular a partir del contenido de cemento del hormigón (kg/m³) de la siguiente manera:
 C_s (% de peso de cemento) = C_s (% de peso de hormigón) * (2.300/contenido de cemento)
- C_b = Contenido de cloruros aportados por las materias primas (áridos, cemento, agua, etc.) en el momento de fabricación del hormigón

El coeficiente de difusión de cloruros varía con la edad del hormigón (7). Por eso la EHE-08 propone la ecuación (14) para obtener el coeficiente $D(t)$ a partir del coeficiente $D(t_0)$.

$$D(t) = D(t_0) \cdot (t_0/t)^n \tag{14}$$

donde $D(t_0)$ es el coeficiente de difusión de cloruros a la edad t_0 , $D(t)$ el coeficiente de difusión de cloruros a la edad t , y n el factor de edad. Este factor se puede tomar igual a 0,5, si no se dispone de valores específicos obtenidos mediante ensayos sobre el hormigón de que se trate.

El coeficiente de difusión de cloruros $D(t_0)$ se puede calcular para la utilización del modelo de penetración de cloruros mediante ensayos específicos de difusión natural de iones de cloruro (8) (t_0 sería la edad del hormigón a la que se ha realizado el ensayo) o bien emplear los valores de la Tab. 7 ($t_0 = 0,0767$).

Los métodos acelerados no se pueden utilizar para calcular los coeficientes de difusión de los cloruros (9, 10), ya que los valores son diferentes a los obtenidos con métodos naturales.

La concentración crítica de cloruros (C_{th}) la debe establecer el autor del proyecto de acuerdo con las consideraciones específicas de la estructura. Para demostrar el estado límite con respecto a la corrosión de la armadura, en condiciones normales, para las armaduras pasivas se puede emplear un valor límite, C_{th} , del 0,6 % del peso del

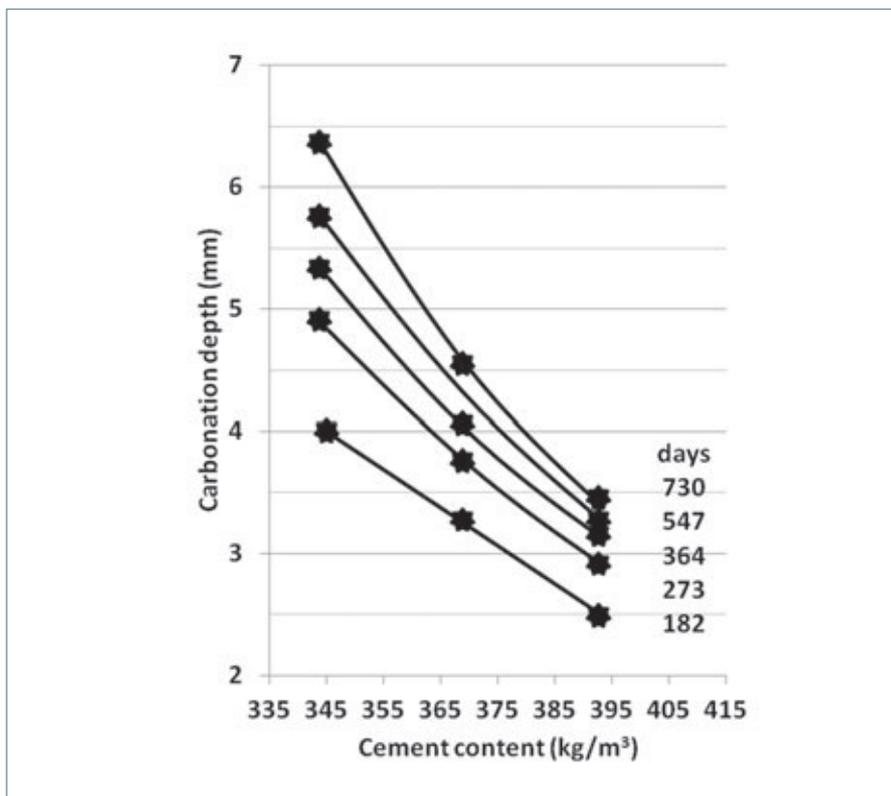


Fig. 4: Efecto del contenido de cemento en la resistencia del hormigón a la carbonatación (CEN/TS 12390-10:2007)

Tab. 7: Coeficientes $D(t_0)$ ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) obtenidos para $t_0 = 0,0767$ años (28 días)

Tipo de cemento	a/c = 0,40	a/c = 0,45	a/c = 0,50	a/c = 0,55	a/c = 0,60
CEM I	8,9	10,0	15,8	19,7	25,0
CEM III/A-V	5,6	6,9	9,0	10,9	14,9
CEM III	1,4	1,9	2,8	3,0	3,4

Tab. 8: Concentración de cloruros en la superficie de hormigón

Clase de exposición	IIIa (aérea)		IIIb (sumergida)	IIIc (carrera de mareas)	IV (cloruros no marinos)
	hasta 500 m	500 m - 5000 m	Cualquiera		No aplica
Distancia respecto a la costa	hasta 500 m	500 m - 5000 m	Cualquiera		No aplica
C_s (% peso de hormigón)	0,14	0,07	0,72	0,50	0,50

cemento y, en el caso de las armaduras activas pretesas, un valor límite, C_{th} , del 0,3 % del peso del cemento.

El valor de la concentración de cloruros en la superficie del hormigón, C_s , depende de las condiciones del entorno (orografía del terreno, régimen de vientos predominantes en ambientes próximos a la costa, etc.). Además, la concentración de cloruros superficial varía con la edad del hormigón, alcanzando su valor máximo a los 10 años (11). A falta de valores experimentales obtenidos mediante ensayos realizados en

estructuras de hormigón situadas en las proximidades de la nueva estructura, el autor del proyecto valorará la posibilidad de adoptar un valor de C_s de la Tab. 8 en función de la clase de exposición definida en el Artículo 8.2 de la EHE-08.

Con un resultado de $C_{th} \cdot C_b > C_s$ se considerará comprobado el Estado Límite de la durabilidad. En este caso no es necesaria ninguna verificación numérica.

En la Tab. 9 se presentan unos ejemplos de cálculo de alguno de los coeficientes $D(t_0)$

de tubos de hormigón armado. Para dicha estimación se tomaron los siguientes valores: un factor de conversión de unidades α = igual a 56.157; $n = 0,5$; $t_0 = 0,0767$ (equivalentes a 28 días) y $C_{th} = 0,3$ % para armaduras activas pretesas y $= 0,6$ % para armaduras pasivas. El contenido de cloruros aportado por las materias primas (áridos, cemento, agua, etc.), en el momento de fabricación del hormigón, C_b , se limita a 0,2.

Caso real: resistencia a la corrosión de la armadura embebida en el hormigón por acción de los iones cloruros y del agua de mar

En el estudio realizado en 17 instalaciones marítimas situadas en Sydney, Melbourne, Brisbane y Hobart de Australia, en base a los resultados de unas 30 inspecciones realizadas durante 69 años, se ha confirmado que las tuberías de hormigón armado expuesto a un ambiente marino de carrera de marea tienen una vida en servicio (12) de más de 100 años con un recubrimiento de la armadura de más de 15 mm. (12).

Las tuberías de hormigón tienen unos coeficientes de difusión de cloruros muy bajos. De aquí resultan unos periodos de iniciación de la corrosión de la armadura muy elevados, superiores a 50 años, y periodos de propagación igualmente largos como consecuencia del elevado contenido de

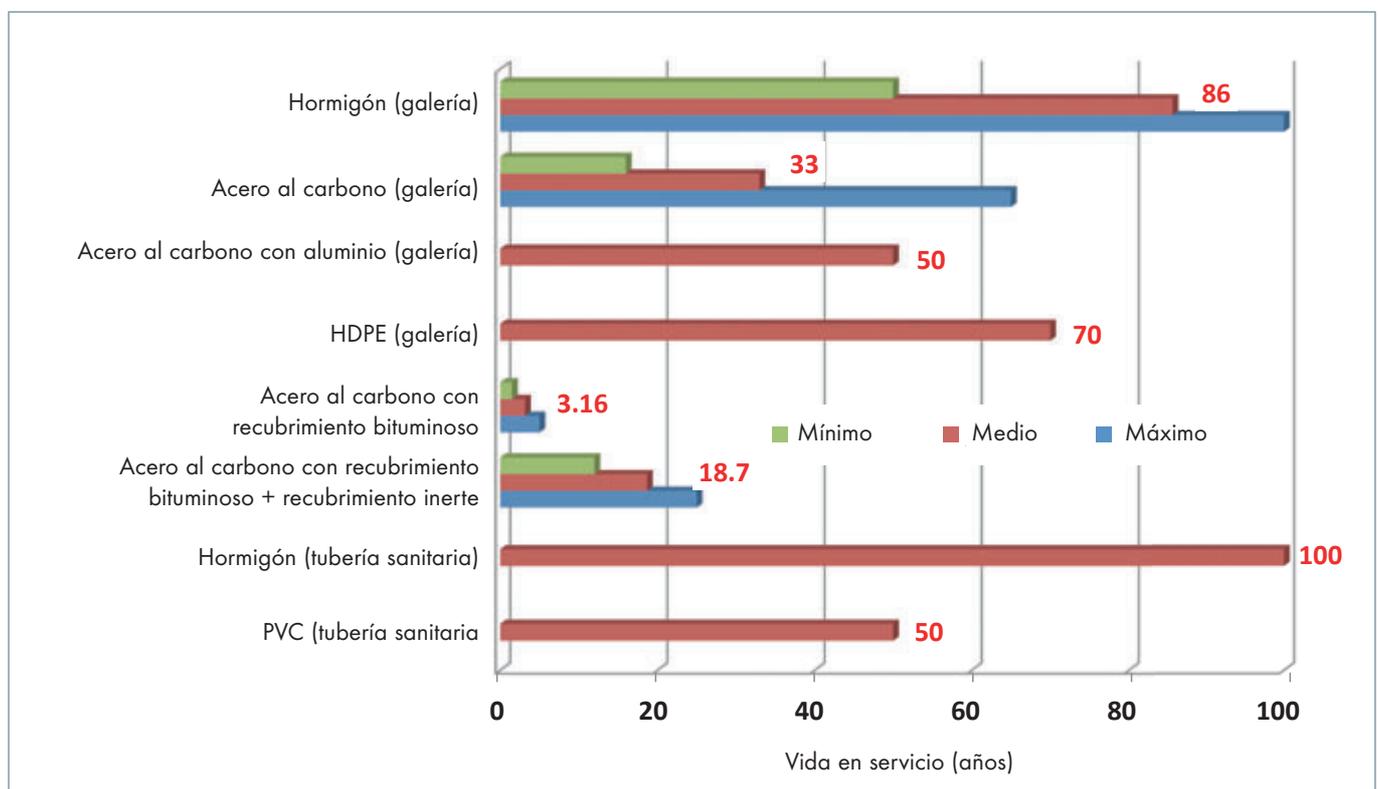


Fig. 5: Comparación de la vida en servicio de tuberías sanitarias y galerías (15).

Tab. 9: Estimación del coeficiente de difusión efectivo de cloruros, para la edad t , expresado en cm^2/s , y coeficiente de penetración de cloruros, K_{Cl} en $\text{mm}^2/\text{año}$.

Clase de exposición	Cs (% peso de hormigón)	Contenido de cemento (kg/m^3)	Cs (% peso de hormigón)	Tipo de cemento	a/c	D(t_0)	t (años)	$D(t) = D(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^2$ (cm^2/s)	Coefficiente de penetración de cloruros K_{Cl} ($\text{mm}^2/\text{año}$)	Recubrimiento, cm (vida útil de 50 años)				
IIIa (aérea) hasta 500 m	0,14	250	1,29	CEM I	0,40	8,9	50	3,49	8,00	5,66				
					0,45	10		3,92	8,48	6,00				
					0,50	15,8		6,19	10,66	7,54				
				CEM III/A-V	0,40	5,6		2,19	6,35	4,49				
					0,45	6,9		2,70	7,05	4,98				
					0,50	9		3,52	8,05	5,69				
				CEM III	0,40	1,4		0,55	3,17	2,24				
					0,45	1,9		0,74	3,70	2,62				
					0,50	2,8		1,10	4,49	3,17				
				350	0,92	CEM I		0,40	8,9	3,49	7,20	5,10		
								0,45	10	3,92	7,64	5,40		
								0,50	15,8	6,19	9,60	6,79		
		CEM III/A-V	0,40			5,6	2,19	5,72	4,04					
			0,45			6,9	2,70	6,34	4,49					
			0,50			9	3,52	7,25	5,12					
		CEM III	0,40			1,4	0,55	2,86	2,02					
			0,45			1,9	0,74	3,33	2,35					
			0,50			2,8	1,10	4,04	2,86					
		IIIb (sumergida)	0,72			250	6,62	CEM I	0,40	8,9	50	3,49	10,05	7,11
									0,45	10		3,92	10,66	7,54
									0,50	15,8		6,19	13,39	9,47
				CEM III/A-V	0,40			5,6	2,19	7,97		5,64		
					0,45			6,9	2,70	8,85		6,26		
					0,50			9	3,52	10,11		7,15		
CEM III	0,40			1,4	0,55			3,99	2,82					
	0,45			1,9	0,74			4,65	3,28					
	0,50			2,8	1,10			5,64	3,99					
CEM I	0,40			8,9	3,49			9,78	6,91					
	0,45			10	3,92			10,37	7,33					
	0,50			15,8	6,19			13,03	9,21					
CEM III/A-V	0,40			5,6	2,19	7,76	5,49							
	0,45			6,9	2,70	8,61	6,09							
	0,50			9	3,52	9,83	6,95							
CEM III	0,40			1,4	0,55	3,88	2,74							
	0,45			1,9	0,74	4,52	3,20							
	0,50			2,8	1,10	5,48	3,88							
IIIc (carrera de mareas) y IV (cloruros no marinos)	0,50			250	4,60	CEM I	0,40	8,9	50	3,49	9,75	6,90		
							0,45	10		3,92	10,34	7,31		
							0,50	15,8		6,19	13,00	9,19		
						CEM III/A-V	0,40	5,6		2,19	7,74	5,47		
							0,45	6,9		2,70	8,59	6,07		
							0,50	9		3,52	9,81	6,94		
		CEM III	0,40			1,4	0,55	3,87		2,74				
			0,45			1,9	0,74	4,51		3,19				
			0,50			2,8	1,10	5,47		3,87				
		350	3,29			CEM I	0,40	8,9		3,49	9,42	6,66		
							0,45	10		3,92	9,98	7,06		
							0,50	15,8		6,19	12,55	8,87		
				CEM III/A-V	0,40	5,6	2,19	7,47	5,28					
					0,45	6,9	2,70	8,29	5,86					
					0,50	9	3,52	9,47	6,7					
				CEM III	0,40	1,4	0,55	3,74	2,64					
					0,45	1,9	0,74	4,35	3,083,08					
					0,50	2,8	1,10	5,28	3,74					

cemento, baja relación agua/cemento y elevado grado de compactación, lo que conduce a un hormigón bastante impermeable que produce que haya un acceso de oxígeno limitado.

Finalmente, hay que remarcar que los dos factores que más afectan negativamente en la durabilidad del hormigón, tanto en masa como armado, son la presencia de agua y el mecanismo de transporte de agua, agentes agresivos disueltos y gases a través de los poros, fisuras y grietas del hormigón. Por eso cobra una importancia relativamente grande el control de algunos parámetros como el contenido de cemento y la relación a/c para conseguir una baja porosidad y permeabilidad.

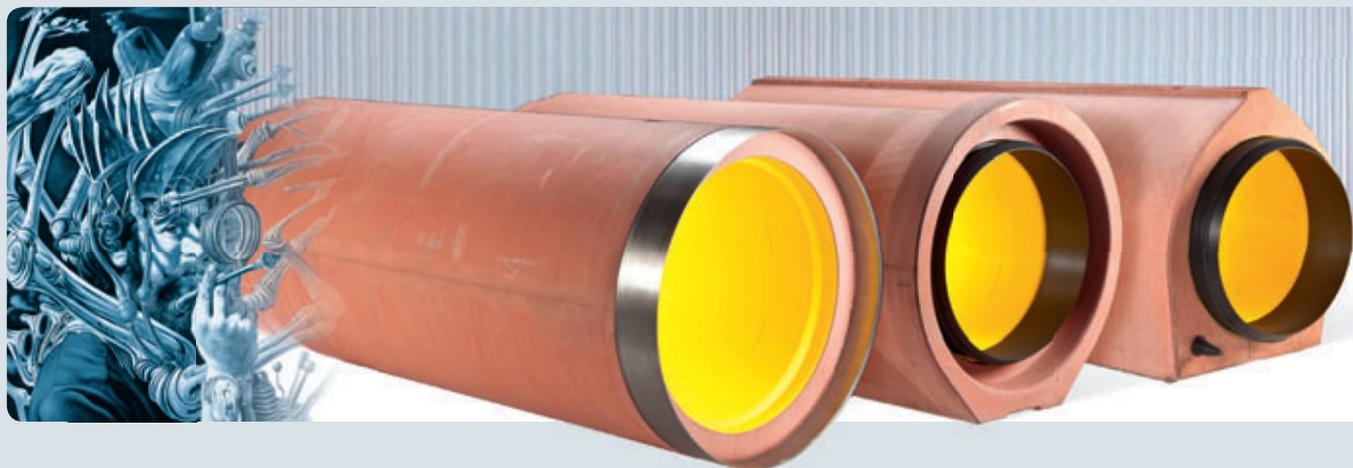
Vida en servicio

La vida en servicio real de una estructura de hormigón es un factor decisivo a la hora de cuantificar el coste de un sistema de tuberías de hormigón. La vida en servicio de un sistema de tuberías de hormigón se puede estimar en más de 100 años de acuerdo con la bibliografía actual (13, 14). El hormigón no sufre envejecimiento y pérdida de propiedades, más aún, gana resistencia mecánica con el tiempo. Esto es lo contrario de lo que sucede con las soluciones alternativas las cuales se ven afectadas negativamente con el paso de tiempo en lo relativo tanto a la durabilidad como a las propiedades mecánicas. Las tuberías termoplásticas solo llevan empleándose desde hace unos 50-60 años en sistemas sanitarios y drenaje. Este hecho, así como los cambios continuos con respecto al diseño y a la producción hacen que sea inviable la predicción de las prestaciones futuras de estos materiales a largo plazo. Aun así, para el HDPE y PVC se estiman vidas en servicio de unos 70 y 50 años, respectivamente, muy por debajo del siglo estimado para el hormigón, como se muestra en la Fig. 5 (15).

Casos particulares de tuberías de hormigón armado

Los ambientes se clasifican en función de su relación con la corrosión de la armadura del I al IV. Cuando es necesario tiene lugar una clasificación del ambiente con respecto a la agresividad química de Q_a (agresividad química leve) hasta Q_c (agresividad química elevada). Los ambientes de agresividad química del ambiente aplican cuando se supera uno o varios de los límites de los parámetros considerados en la Tab. 10. La Tab. 11 contiene las sustancias agresivas que pueden tener efectos negativos en

SCHLUSSELBAUER



PERFECT PIPE

LA TUBERIA DURADERA PARA AGUAS RESIDUALES

RESISTENTE A LA CORROSIÓN

ELEVADA CARGA ESTÁTICA

ALTO VALOR AGREGADO
EN LA PRODUCCIÓN
DE TUBOS DE HORMIGÓN



más >>



www.perfectsystem.eu
www.sbm.at · sbm@sbm.at



Tab. 10: Clasificación de la agresividad química del ambiente conforme con la EHE-08 (2)

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 (mg/l)	15-40	40-100	>100
	NH ₄ ⁺ (mg/l)	15-30	30-60	>60
	Mg ²⁺ (mg/l)	300-1000	1000-3000	>3000
	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	200-600	600-3000	>3000
	Residuo seco	75-150	50-75	<50
Suelo	Grado de acidez Baumann-Gully (mg/l)	>200	(*)	(*)
	SO ₄ ²⁻ (mgSO ₄ ²⁻ /kg de suelo seco)	2000-3000	3000-12 000	>12 000

(*) Estas condiciones no se dan en la práctica.

Tab. 11: Estructuras con clase de exposición IIa + una clase específica Q_a, Q_b o Q_c

Actuación / Parámetro	Cemento resistente a los sulfatos, SR o SRC	Relación agua/cemento y contenido de cemento	Ancho de fisura	Alcalinidad
Contenido de sulfatos, SO ₄ ²⁻	Si es necesario emplear cemento resistente a los sulfatos, SR o SRC	Valores de la Tab. 1 para clases Q _a , Q _b y Q _c	Lo condiciona el ambiente IIa:	-
pH	No es necesario emplear cemento resistente a los sulfatos, SR o SRC		Método prescriptivo o modelado con el Anejo 9.º de la EHE-08	Para Q _b , alcalinidad ≥ 0,85
CO ₂				Para Q _c , alcalinidad ≥ 0,85 y calcular espesor de sacrificio (Pomeroy)
NH ₄ ⁺ y Mg ²⁺				
Residuo seco				

las tuberías de hormigón armado, así como algunas recomendaciones para reducir estos efectos.

Conclusiones

La vida en servicio de las tuberías de hormigón armado es superior a los cien años en la mayoría de los ambientes habituales de las redes de saneamiento y drenaje. Las tuberías de hormigón se utilizan habitualmente en las redes de aguas residuales y drenaje de aguas pluviales y están en contacto con suelos de diferente agresividad. Después de evaluar los diferentes efectos mecánicos, físicos, químicos y biológicos que pueden provocar el daño de las tuberías de hormigón se concluye que las tuberías de hormigón son durables.

La actual versión del borrador de la Instrucción EHE-08 plantea la posibilidad, a través del Anejo 9.º de durabilidad, de

poder realizar comprobaciones numéricas para validar el Estado Límite de durabilidad (18) y por tanto comprobar la vida útil de una estructura de hormigón. Actualmente se están desarrollando modelos para valorar la corrosión de armaduras. Como se ha mostrado, el planteamiento de la Instrucción permite un cierto periodo de propagación que depende en gran medida de la relación C/Ø. Así los valores de pérdida de sección admitidos en la Instrucción oscilan entre 80 y 200 µm, lo que de acuerdo a los modelos existentes puede corresponder a un ancho de fisura variable entre 0,4 y 1 mm. ■

Bibliografía

- (1) Henry Reid. "Portland Cement its Manufacture and Uses", Ed. Spoon. 1877.
- (2) C.P.H., "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08". Ministerio de Fomento 2008.
- (3) SIEMES, T. S.J.M. VROUWENVELDER, "Durability of building: a reliability analysis". HERON Vol 30 nº 3. Delft University of Tech (1985).
- (4) TUUTTI, K. "Corrosion of steel in concrete". Swedish Concrete and cement research Institute (CBI), nº F04, (1982).
- (5) M.A. Sanjuán, CARMEN ANDRADE, M. CHEYREZY. ENSAYOS DE CARBONATACIÓN NATURAL Y ACCELERADA DE CONGLOMERANTES HIDRÁULICOS FABRICADOS CON CEMENTO PORTLAND. Cemento y Hormigón, nº 884. Enero 2006.
- (6) P. Castro, M.A. Sanjuán and J. Genescá "Carbonation of concretes in the Mexican Gulf". Building and Environment 35 (2)(2000) 145-149.
- (7) C. Andrade, J.L. Sagrera, M.A. Sanjuán y C. Alonso. "Difusividad de los cloruros en hormigones expuestos en carrera de marea". Cemento y Hormigón, nº 810 (Mayo 2000) 494-503.
- (8) C. Andrade, J.L. Sagrera, M.A. Sanjuán and C. Alonso "Cálculo del periodo de iniciación de la corrosión en ambientes contaminados de cloruros". En "Patología y Control de Calidad del Hormigón". Libro del congreso de la Habana, 1995. GEHO-CEB. ISBN: 84-89670-04-8. Pp.37-47.
- (9) C. Andrade, M.A. Sanjuán, A. Recuerdo y O. Río. "Calculation of Chloride Diffusivity in Concrete from Migration Experiments, Innon Steady-state Conditions". Cement and Concrete Research 7(24) (1994) 1214-1228.
- (10) C. Andrade y M.A. Sanjuán "Experimental Procedure for the Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Migration Tests". Advances in Cement Research 6(23) (1994) 127-134.
- (11) Carmen Andrade, María Castellote, Renata d'Andréa, Juan Manuel Pición y Miguel Ángel Sanjuán. DIFUSIÓN DE CLORUROS EN HORMIGONES EXPUESTOS A AMBIENTES MARINOS. ESTUDIO DE 15 AÑOS DE EXPOSICIÓN. Cemento y Hormigón, Nº 935 DICIEMBRE 2009. ISSN: 0008-8919. pp. 22-31.
- (12) C. A. Baker Concrete Technology. "Durability of Concrete Pipe in a Marine Environment". Concrete Pipe Association of Australasia. Julio, 2000. 157pp.
- (13) Building Research Establishment Special Digest-1: 2005 Concrete in aggressive ground (BRE SD-1).
- (14) DEFRA's White Paper "Water for Life" (Diciembre, 2011).
- (15) Jack Q. Zhao, S. Kuraoka, T.H.W.Baker, P. Gq, J-E. Masson, S. Boudreau, R. Brousseau. Durability and Performance of Gravity Pipes: A State-of-the-Art Literature Review. Institute for Research in Construction National Research Council of Canada (NRC), Ottawa, Canada, KIA OR6. National Research Council of Canada. August 1998. ISBN 0-660-17091-4. NRCC 42868).
- (16) José Rodríguez Soalleiro y Esteban Vaquerizo Vega. RECUBRIMIENTO MINIMO DE ARMADURAS en HORMIGÓN ESTRUCTURAL - AMPLIACION del METODO DIRECTO y APLICACIÓN del ANEJO 9 de la EHE 08. Congreso de Ávila, Noviembre 2010.
- (17) Norma UNE 127916:2014 "Tubos y piezas complementarias de hormigón en masa, de hormigón armado y hormigón con fibra de acero. Complemento nacional a la Norma EN 1916:2008".
- (18) Manuel Burón Maestro, Jaime Carlos Gálvez Ruiz, Jaime Fernández Gómez, Pedro López Sánchez, Renata D Andrea, Miguel Ángel Sanjuán Barbudo. Recubrimientos recomendables, por razones de durabilidad, a disponer en estructuras de hormigón sometidas a la clase específica de exposición Qb (ataque químico de intensidad media). CEMENTO HORMIGÓN • Nº 944 • MAYO-JUNIO 2011. ISSN: 0008-8919. PP: 60-66.

MÁS INFORMACIÓN

ANDECE - Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón
Paseo de la Castellana 226, Entrep. A
28046, Madrid, España
T +34 91 323 8275, F +34 91 315 8302
tubos@andece.org, www.andece.org, www.atha.es