

Conductos prefabricados de hormigón. Cálculo de la vida útil

1. Introducción

La durabilidad que deben garantizar los conductos de hormigón es un aspecto esencial a considerar con el fin de que mantengan sus cualidades durante, al menos, la vida útil proyectada. 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. 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 del tubo sometida a la penetración del ion cloruro a través del recubrimiento de hormigón y a la carbonatación.

Como ya se ha comentado en un artículo anterior [1], los sistemas de tuberías de hormigón han ofrecido a lo largo del tiempo un importante número de ventajas de las que se puede destacar su rápida instalación, buena resistencia mecánica y durabilidad frente a los agentes agresivos del entorno.

En la reglamentación española de hormigones (EHE-08) [2] hay dos métodos para la evaluación de la vida útil de una estructura (Figura 1):

- I) Por prescripción de la dosificación (relación agua/cemento máxima y contenido mínimo de cemento) y recubrimiento mínimo (capítulo 7°).
- II) Por prestaciones (Anejo 9°).

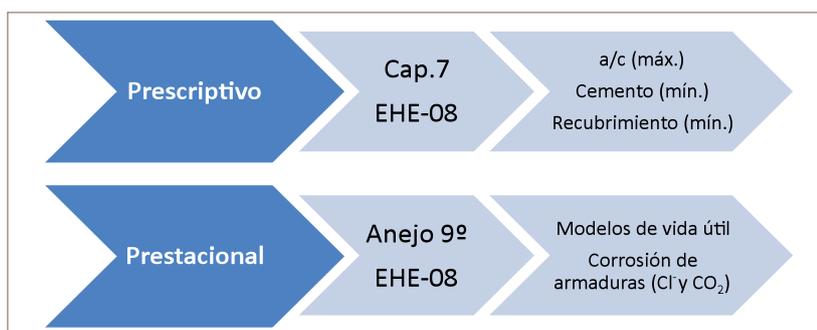
Miguel Ángel Sanjuán. Jefe del Área de Cementos y Morteros. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).

Cristina Argiz. Profesora Ayudante. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

José Rodríguez Soalleiro. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Asesor Técnico de Canalizaciones de ANDECE.

En este artículo se aplica el modelo de la EHE-08 de carbonatación y de penetración de cloruros a la determinación de la vida útil de conductos de hormigón utilizados en sistemas de saneamiento y drenaje. Asimismo, se presentan de forma sencilla una serie de reglas que pueden contribuir a la mejora del comportamiento de los conductos de hormigón en las condiciones de servicio más frecuentes.

■ Figura 1. Métodos para la evaluación de la vida útil de una estructura.



■ Tabla 1. Máxima relación agua/cemento y contenido mínimo de cemento de la Tabla 37.3.2.a de la EHE-08 según las clases generales y específicas de exposición (EHE-08, 2008).

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Q _a	Q _b	Q _c	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	325	350	325	325	350	350	300	325	300
	Pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300

■ **Tabla 2. Resistencias mínimas recomendadas en la Tabla 37.3.2.b de la EHE-08 en función de los requisitos de durabilidad (EHE-08, 2008).**

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición												
			IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Q _a	Q _b	Q _c	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 método prescriptivo es el sistema tradicional (Tablas 1 y 2), mientras que el método prestacional del Anejo 9º sirve para la estimación de la vida útil cuyo resultado está relacionado directamente con determinadas características o prestaciones del hormigón.

2. El concepto de Estado Límite de durabilidad

Conforme con el Anejo 9º de la EHE-08, 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 [2]. Es decir, un Estado Límite es aquel que separa un estado deseable en la estructura de un estado indeseable. La variedad de los Estados Límite existentes es todo lo amplia que, por un lado el propietario y por otro la propia sociedad establezca. Por lo general, los Estados Límite se agrupan en dos clases, Estados Límite últimos y Estados Límite de servicio. En los Estados Límite últimos se debe garantizar que la estructura no pierda la capacidad portante necesaria para soportar las acciones a que se encuentra sometida, es decir, se trata de Estados Límite de fallo estructural. Los Estados Límite de servicio incluyen a todos aquellos condicionantes que debe cumplir la estructura y que de no cumplirse harían que ésta no fuera completamente funcional (vibraciones, deformaciones y fisuración, entre otros). La EHE-08 plantea la comprobación del Estado Límite de durabilidad en su aspecto más amplio establecido en términos de vida útil conforme con la ecuación [1].

$$t_L > t_d \quad [1]$$

Donde, t_L es la vida útil estimada para el elemento y, t_d es la vida útil de cálculo obtenida de la ecuación [2].

$$t_d = \gamma_t t_g \quad [2]$$

Siendo γ_t el coeficiente parcial de seguridad para la vida útil, establecido para el caso de corrosión de armaduras, el cual tiene un valor de 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 (despasivación 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 9º de la Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08, sólo considera el proceso de la corrosión de armaduras y se de-

fine la vida útil de un elemento estructural como la suma de dos periodos, uno de iniciación, t_i y otro de propagación, t_p . Por tanto, en el caso de la corrosión de las armaduras, el Estado Límite planteado en la EHE-08 es el de la aparición de fisuras con una anchura admisible, X_{adm} , permitiéndose una pérdida de sección en la barra de acero que se determina con la ecuación [3].

$$X_{adm} = 80 \times \frac{C}{\emptyset} \quad [\mu\text{m}] \quad [3]$$

Donde:

C Recubrimiento dispuesto en la estructura, en mm.

\emptyset 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 de ancho.

3. Modelos para la estimación de la vida útil

Para la determinación de la vida útil de la estructura se establecen unos modelos matemáticos empíricos o teóricos (basados en leyes físico-químicas) que sirven para estimar el avance del deterioro en la estructura hasta que se alcanza el límite admisible [3].

El Anejo 9º de la EHE-08 sólo 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 de vida útil de un elemento de hormigón armado frente a la corrosión de las armaduras se compone de un periodo de iniciación (fase durante el cual la armadura se encuentra protegida de la corrosión) y otro de propagación (fase durante el cual la corrosión de la armadura es activa) [4]. La vida útil total del elemento será la suma de ambos periodos tal y como se muestra en la ecuación [4].

$$t_L = t_i + t_p \quad [4]$$

3.1 Modelo del periodo de iniciación

En el caso de la corrosión de las armaduras, existen dos tipologías de modelos. Por un lado, los empíricos (basados en el ajuste a una serie de datos experimentales) y, por otro, los basados en el proceso fisicoquímico de penetración del agresivo y reacción con el conglomerante. En estos últimos, frecuentemente, se emplean coeficientes empíricos para ajustar el modelo con 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. Una de las soluciones de la segunda ley de Fick se puede expresar de forma simplificada relacionando la profundidad, d , alcanzada por una concentración dada de agente agresivo con el tiempo, t (ecuación [5]). Esta expresión es la que se incorporó al Anejo 9º de la EHE-08 para calcular el periodo de iniciación, dado un recubrimiento y una velocidad de difusión del agente agresivo, K , que es una función del tipo de ambiente y de las características del material.

$$d = K\sqrt{t} \quad [5]$$

3.2 Modelo del periodo de propagación

En el modelo del periodo de propagación, se supone una velocidad de corrosión constante V_{corr} , en donde la pérdida de material, X en mm, se obtiene con la ecuación [6].

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

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] que permite el cálculo del periodo de propagación de la corrosión de la armadura del hormigón.

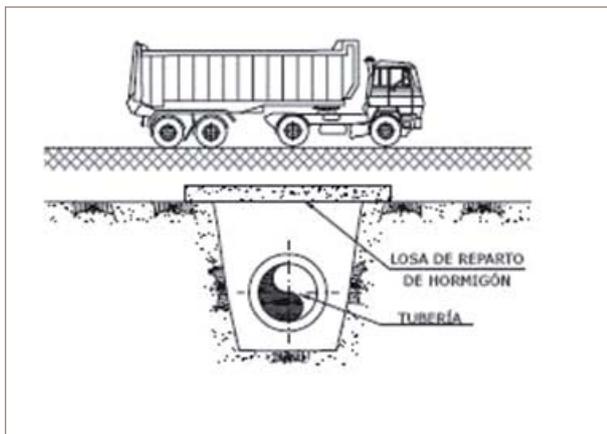
$$t_p = \frac{80}{\emptyset} \times \frac{d}{V_{\text{corr}}} \quad [\text{años}] \quad [7]$$

Donde:

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

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

■ Figura 2. Colocación de tuberías de hormigón bajo carreteras.



■ Tabla 3. Velocidad de corrosión V_{corr} según la clase general de exposición.

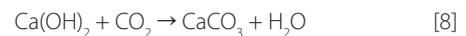
Clase general de exposición			V_{corr} ($\mu\text{m}/\text{año}$)	
Normal	Humedad alta	Ila	3	
	Humedad baja	Ilb	2	
Marina	Aérea	IIla	20	
	Sumergida	IIlb	4	
	En zona de carrera de mareas	IIlc	50	
Con cloruros de origen diferente del medio marino			IV	20

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 Ilb (Figura 2), según sea el contenido de humedad alto o bajo. Por tanto, la velocidad de corrosión V_{corr} será 3 ó 2 $\mu\text{m}/\text{año}$, respectivamente.

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 9º de la EHE-08.

4. Modelo de carbonatación en 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 atmosférico con el hidróxido cálcico como se describe en la ecuación [8].



El Ca(OH)_2 junto con los compuestos alcalinos mantiene un elevado valor del pH del hormigón en torno a 12. Cuando se carbo-



■ **Figura 3. Elementos de hormigón: galería (sistema de saneamiento, drenaje y drenaje transversal de carreteras y líneas férreas o para la ejecución de pasos inferiores) y pozo.**



nata 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 debido a que la difusión del CO_2 está impedida en poros totalmente saturados de agua y no reacciona si el poro está muy seco [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].

$$t = \frac{d}{K_c} \quad [9]$$

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], en donde los valores del coeficiente de ambiente, c_{env} , y el coeficiente de agente aireante, c_{air} , se pueden obtener de la Tabla 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].

$$K_c = c_{env} \times c_{air} \times a \times f_{cm}^b \quad [10]$$

donde:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad [11]$$

■ **Tabla 4. Valores del coeficiente de ambiente, c_{env} y el coeficiente de agente aireante, c_{air} .**

Ambiente	c_{env}
Protegido de la lluvia	1
Expuesto a la lluvia	0,5
Elementos enterrados, por encima del nivel freático	0,3(*)
Elementos enterrados, por debajo del nivel freático	0,2(*)

Aire ocluido (%)	c_{air}
<4,5 %	1
≥4,5 %	0,7

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

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 Tabla 4.

c_{air} Coeficiente de aireantes, según Tabla 4.

a, b Parámetros que son una función del tipo de conglomerante, según Tabla 5.

Los parámetros a y b dependen del tipo de conglomerante según la Tabla 5 que está tomada del Anejo 9º de la EHE-08. En ella aparecen algunos parámetros que pueden parecer contradictorios, por ejemplo, da los mismos valores a y b un cemento sin adición, CEM I, que 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 .

Aplicando la ecuación [10] a un hormigón de resistencia característica de 25 N/mm^2 elaborado con los cementos de los 4 grupos propuestos en la Tabla 5 y considerando que se trata de una tubería enterrada, por encima del nivel freático ($C_{env}=0,3$), y no tiene agente aireante ($C_{air}=1$) se obtienen los resultados de la velocidad de carbonatación presentados en la Tabla 6.

Se observan velocidades de carbonatación que van desde $1,42$ a $1,81 \text{ mm/año}^{0.5}$; por tanto, con recubrimientos de 30 mm se obtendrían periodos de iniciación de la corrosión debido a la carbonatación de 275 a 450 años.

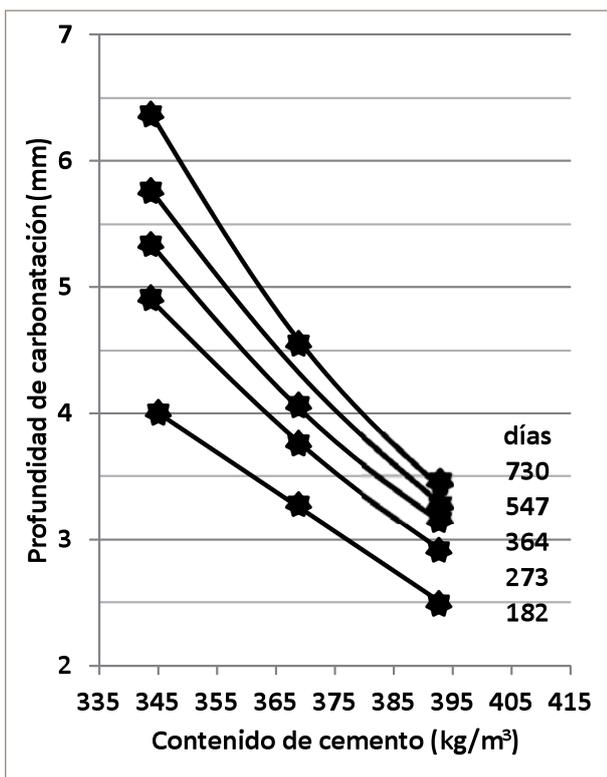
■ **Tabla 5. Coeficientes a y b de la ecuación [10] según el Anejo 9º de la EHE-08.**

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	1.800	-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 II/A-D	400	-1,2
Cemento portland + 65 % escorias	CEM III/A CEM III/B	360	-1,2

■ **Tabla 6. Resultados del coeficiente de carbonatación, K_c (mm/año^{0,5}), al aplicar la ecuación [10] a un hormigón de resistencia característica de 25 N/mm² según el Anejo 9º 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 II/A-V	1,63	0,3	1	360	-1,2	25	33
CEM II/A-D	1,81	0,3	1	400	-1,2	25	33
CEM III	1,63	0,3	1	360	-1,2	25	33

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



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 (Figura 4). Por tanto, el elevado contenido de cemento que se emplea en las tuberías prefabricadas de hormigón reduce el efecto de la carbonatación en cualquier caso.

5. Modelo de penetración en cloruros en 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.

$$t = \left(\frac{d}{K_{Cl}} \right)^2 \quad [12]$$

donde:

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

El coeficiente de penetración de cloruros K_{Cl} tiene la siguiente expresión:

$$K_{cl} = \alpha \sqrt{12D(t)} \left(1 - \sqrt{\frac{C_{th} - C_b}{C_s - C_b}} \right) \quad [13]$$

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 cm^2/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. Dado que esta concentración de cloruros suele obtenerse en % en peso de hormigón, su equivalente en peso de cemento se puede calcular a partir del contenido de cemento del hormigón (en kg/m^3) como:
 C_s (% peso de cemento) = C_s (% peso de hormigón) * (2.300/contenido de cemento).
- C_b Contenido de cloruros aportado 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] y la EHE-08 propone la ecuación [14] para obtener el coeficiente $D(t)$ a partir del coeficiente $D(t_0)$.

$$D(t) = D(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \quad [14]$$

Donde $D(t_0)$ es el coeficiente de difusión de cloruros a la edad t_0 , $D(t)$ el coeficiente a la edad t , y n es el factor de edad, que pue-

de tomarse igual a 0,5, si no se dispone de valores específicos obtenidos mediante ensayos sobre el hormigón de que se trate. Para la utilización del modelo de penetración de cloruros puede emplearse el valor de $D(t_0)$ obtenido mediante ensayos específicos de difusión natural de iones cloruro [8] (en cuyo caso t_0 sería la edad del hormigón a la que se ha realizado el ensayo), o bien emplear los valores de la Tabla 7 (obtenidos para $t_0=0,0767$). No se podrán utilizar coeficientes de difusión obtenidos con métodos acelerados [9 y 10] ya que los valores son diferentes a los obtenidos con los 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. El cual, en condiciones normales, puede tomar un valor límite de C_{th} de 0,6% del peso de cemento para la comprobación del Estado Límite en relación con la corrosión de las armaduras pasivas y un valor límite de C_{th} de 0,3% del peso de cemento en el caso de armaduras activas pretesas.

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 C_s 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 acuerdo con Tabla 8, en función de la clase de exposición definida en el artículo 8.2 de la EHE-08.

■ **Tabla 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 II/A-V	5,6	6,9	9,0	10,9	14,9
CEM III	1,4	1,9	2,8	3,0	3,4

■ **Tabla 8. Concentración de cloruros en la superficie de hormigón.**

Clase de exposición	IIIa (aérea)		IIIb (sumergida)	IIIc (carrera de mareas)	IV (cloruros no marinos)
Distancia respecto a la costa	Hasta 500 m	500 m – 5.000 m	Cualquiera		No aplica
C_s (% peso de hormigón)	0,14	0,07	0,72	0,50	0,50

■ **Figura 5. Tuberías de hormigón expuestas a la acción de aguas residuales y agua de mar.**



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

Clase de exposición	C_s (% peso de hormigón)	Contenido de cemento (kg/m^3)	C_s (% peso de cemento)	Tipo de cemento	a/c	$D(t_0)$	t (años)	$D(t)$ (cm^2/s)	coeficiente 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 II/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		50	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 II/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 II/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							
350		4,73	CEM I		0,40	8,9	50	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 II/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 II/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	50	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 II/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	3,08		
			0,50	2,8	1,10		5,28	3,74		

En el caso de que $C_{th}-C_b > C_s$, se considerará comprobado el Estado Límite sin necesidad de efectuar ninguna comprobación numérica.

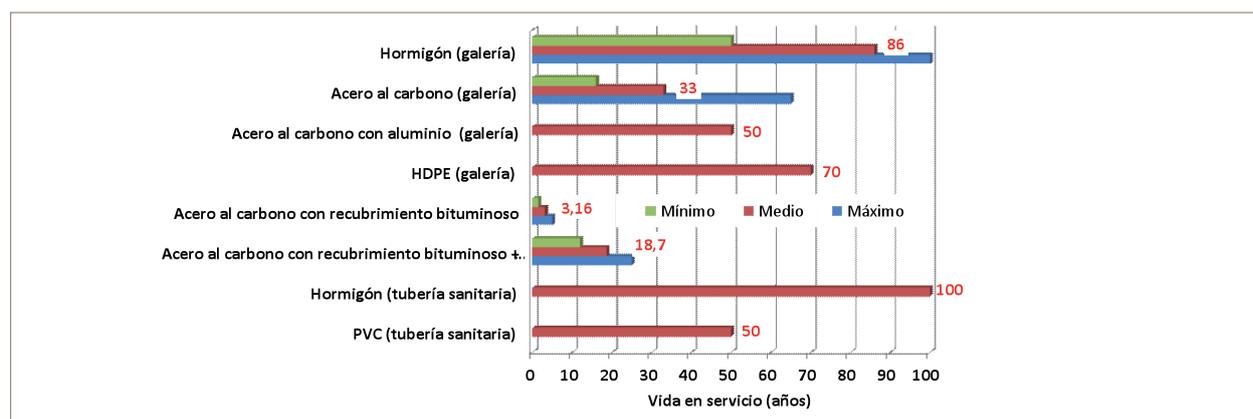
En la Tabla 9 se presentan unos ejemplos de cálculo de alguno de los coeficientes $D(t_v)$ de tubos de hormigón armado. Para dicha estimación se toman los valores del factor de conversión de unidades, α , igual a 56.157; n igual a 0,5; t_0 igual a 0,0767 (0,0767 años equivalentes a 28 días) y C_{th} igual a 0,3% para armaduras activas pretensas 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_v , se limita a 0,2.

6. Vida en servicio de tuberías de hormigón armado

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 [12 y 13]. 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. Las tuberías termoplásticas sólo llevan empleándose desde hace unos 50–60 años en sistemas sanitarios y drenaje, además, los continuos cambios de diseño y fabricación en el tiempo hacen que sea inviable la predicción de las prestaciones futuras de estos materiales a largo plazo, aún 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 (Figura 6) [14].

■ Figura 6. Comparación de la Vida en servicio de tuberías sanitarias y galerías [14].



7. 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 y, si aplica, con relación a la agresividad química del ambiente del Q_a (agresividad química leve) al 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 Tabla 10.

Como resumen, en la Tabla 11 se combinan los agentes agresivos con las actuaciones que se pueden realizar en tuberías

de hormigón armado para evitar o, al menos, minimizar su efecto.

A continuación se exponen unas tablas-resumen de 4 casos de tuberías de hormigón armado: tubos para desaladoras, emisarios submarinos, conductos de drenaje transversal para carreteras o ferrocarriles y conductos de saneamiento [15].

7.1 Tubos para desaladoras

La Tabla 12 propone una serie de recomendaciones para el diseño de tubos para desaladoras.

■ **Tabla 10. Clasificación de la agresividad química del ambiente conforme con la EHE-08 [2].**

Tipo de medio agresivo	Parámetros	Tipo de exposición		
		Q _a	Q _b	Q _c
		Ataque débil	Ataque medio	Ataque fuerte
Agua	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)	300-1.000	1.000-3.000	>3.000
	SO ₄ ⁻ (mg/l)	200-600	600-3.000	>3.000
	Residuo seco	75-150	50-75	<50
Suelo	Acidez Baumann-Gully (mg/l)	>200	(*)	(*)
	SO ₄ ⁻ (mgSO ₄ ⁻ /kg suelo seco)	2.000-3.000	3.000-12.000	>12.000

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

■ **Tabla 11. Estructuras con clase de exposición IIa más una clase específica Q_a, Q_b o Q_c.**

Actuación	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⁻	Sí es necesario emplear cemento resistente a los sulfatos, SR o SRC	Valores de la Tabla 1 según sea Q _a , Q _b y Q _c .	Lo condiciona el ambiente IIa: Método prescriptivo o modelado con el Anejo 9º de la EHE-08	-
pH	No es necesario emplear cemento resistente a los sulfatos, SR o SRC			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				

■ **Tabla 12. Recomendaciones para el diseño de tubos para desaladoras.**

	Tubo de toma	Tubo de vertido
Clasificación	IIIc + Q _b	IIIc + Q _c
Cemento	SR o SRC	SR o SRC
Contenido mínimo de cemento	Según Q _b	Según Q _c
Relación agua/cemento máxima	Según Q _b	Según Q _c
Ancho de fisura máximo admisible (mm)	0,1	0,1
Recubrimiento mínimo	Calculado aplicando el modelo de difusión de cloruros del Anejo 9º de la EHE-08 (véase el capítulo 5º de este artículo).	

7.2 Emisarios submarinos

En la Tabla 13 se resumen las recomendaciones para el diseño de emisarios submarinos.

7.3 Conductos de drenaje transversal para carreteras o ferrocarriles

Aplicar lo recogido en la Tabla 12 del apartado 7.1.

7.4 Conductos de saneamiento

La 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 UNE-EN 1916:2008' [16], da en sus apartados 4.3.8 y 4.3.9 las condiciones

de uso de los tubos de hormigón y prescribe las medidas a tomar para garantizar su durabilidad en esas condiciones. Ahí se recoge que las condiciones de uso más comunes de los tubos de hormigón son las que corresponden a la clase general de exposición no correspondiente a un ataque químico específico.

La Norma UNE 127916:2014 define un ambiente con ataque químico débil y un ataque químico medio, dando los valores de concentraciones tanto en efluentes como del suelo recogidos en la Tabla 14.

Asimismo, en el apartado 4.3.9 especifica valores para los dos tipos de agresividad química del ambiente considerados y para el caso de que no exista un ambiente químico específico. La Tabla 15 da las especificaciones para el diseño de conductos de saneamiento conforme con la Norma UNE 127916:2014.

■ **Tabla 13. Recomendaciones para el diseño de emisarios submarinos.**

	Tubo de toma
Clasificación	IIIc + Q _b
Cemento	SR o SRC
Contenido mínimo de cemento	Según Q _b
Relación agua/cemento máxima	Según Q _b
Ancho de fisura máximo admisible (mm)	0,1
Recubrimiento mínimo	Calculado aplicando el modelo de difusión de cloruros del Anejo 9º de la EHE-08. (Véase el capítulo 5º de este artículo).

■ **Tabla 14. Clasificación de la agresividad química del ambiente conforme con la UNE 127916: 2014 [16].**

	Ataque químico débil	Ataque químico medio
Efluente		
pH	≥5,5	5,5 ≥pH ≥4,5
SO ₄ ²⁻	≤600 mg/l	3.000 mg/l ≥SO ₄ ²⁻ ≥600 mg/l
Cl ⁻	≤750 mg/l	≤750 mg/l
NH ₄ ⁺	≤30 mg/l	60 mg/l ≥NH ₄ ⁺ ≥30 mg/l
Mg ²⁺	≤1.000 mg/l	3.000 mg/l ≥Mg ²⁺ ≥1.000 mg/l
Suelo		
CO ₂ agresivo	≤40 mg/l	100 mg/l ≥CO ₂ ≥40 mg/l
pH	≥5,5	5,5 ≥pH ≥4,5
SO ₄ ²⁻	≤3.000 mg/l (sulfatos solubles del suelo)	12.000 mg/l ≥SO ₄ ²⁻ ≥3.000 mg/l (sulfatos solubles del suelo)
Cl ⁻	≤750 mg/l	≤750 mg/l

■ **Tabla 15. Especificaciones para el diseño de conductos de saneamiento conforme con la Norma UNE 127916:2014 [16].**

	Ambiente químicamente NO agresivo	Ataque químico débil	Ataque químico medio
Resistencia del hormigón (MPa)	30		
Absorción de agua máxima (%)	6		
Contenido mínimo de cemento (kg/m ³)	275	325	350
Tipo de cemento	-	A criterio del proyectista	Resistente a los sulfatos (SR o SRC)
Alcalinidad [OH ⁻]	-	A criterio del proyectista	≥0,85
Recubrimiento mínimo (mm)	20	30	30

Cemento Hormigón



**Ya estamos en Facebook
y en Twitter. ¡SÍGUENOS!**

- Una ventana digital a nuestra redacción 2.0
- Toda la información y novedades internacionales del sector cementero
- Un punto de encuentro para profesionales, empresas, estudiantes, instituciones...



REVISTA TÉCNICA
hc

Revista Técnica Cemento Hormigón
Ediciones Técnicas Pauta S.L.
Cea Bermúdez, 14B · 4ªA · 28003 Madrid
Tel.: +34 91 553 72 20
Email: redaccion@cemento-hormigon.com
Web: www.cemento-hormigon.com

8. Conclusión

La Instrucción EHE-08 plantea la posibilidad, a través del Anejo 9º de durabilidad, de poder realizar comprobaciones numéricas para validar el Estado Límite de durabilidad [17] y, por tanto, comprobar la vida útil de una estructura de hormigón. Los modelos más desarrollados en la bibliografía se concentran en la durabilidad por corrosión de armaduras, si bien, el planteamiento de comprobación de la vida útil es extensible a cualquier otro problema de durabilidad del hormigón. El planteamiento de la Instrucción permite un cierto periodo de propagación que resulta ser impreciso pues depende de la relación C/\emptyset siendo los valores de pérdida de sección admitidos en la Instrucción de entre 80 y 200 μm , que trasladados a los modelos existentes corresponde a un ancho de fisura admisible que va de 0,4 a 1 mm.

Los conductos de hormigón ofrecen una elevada fiabilidad y durabilidad, siendo su vida útil muy elevada, incluso en ambientes químicos hostiles. Se puede decir que 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.

9. Referencias

- [1] M. A. Sanjuán, C. Argiz y J. Rodríguez-Soalleiro. Acciones mecánicas, físicas y químicas en conductos prefabricados de hormigón. *Cemento Hormigón*, nº 969. Julio-agosto, 2015. Pp. 10-17.
- [2] C.P.H. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. Ministerio de Fomento, 2008.
- [3] T. Siemes y S. J. M. Vrouwenvelder. "Durability of building: a reliability analysis". *HERON*. Vol 30 nº 3. Delft University of Tech (1985).
- [4] K. Tuutti. "Corrosion of steel in concrete". Swedish Concrete and cement research Institute (CBI), nº F04, (1982).
- [5] M. A. Sanjuán, C. Andrade y M. Cheyzy. Ensayos de carbonatación natural y acelerada de conglomerantes hidráulicos fabricados con cemento portland. *Cemento Hormigón*, nº 884. Enero, 2006. pp. 14-31.
- [6] P. Castro y M. A. Sanjuán y 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 Hormigón*, nº 810 (Mayo 2000) 494-503.

- [8] C. Andrade, J. L. Sagrera, M. A. Sanjuán y 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. Recuero y O. Río. "Calculation of Chloride Diffusivity in Concrete from Migration Experiments", en "Non-Steady-state Conditions". Cement and Concrete Research 7(24) (1994) 1214-1228.
- [10] C. Andrade, 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] C. Andrade, M. Castellote, R. d'Andréa, J. M. Picón y M. A. Sanjuán. Difusión de cloruros en hormigones expuestos a ambientes marinos. Estudio de 15 años de exposición. Cemento Hormigón, nº 935 Diciembre 2009. ISSN: 0008-8919. Pp. 22-31.
- [12] "Building Research Establishment Special Digest-1". 2005, Concrete in aggressive ground (BRE SD-1).
- [13] DEFRA's White Paper 'Water for Life' (Diciembre, 2011).
- [14] J. Q. Zhao, S. Kuraoka, T.H.W. Baker, P. Gq, J-E. Masson, S. Boudreau y 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.
- [15] J. Rodríguez-Soalleiro y E. Vaquerizo. Recubrimiento mínimo de armaduras en hormigón estructural-ampliación del método directo y aplicación del Anejo 9º de la EHE 08. Congreso de Ávila, Noviembre 2010.
- [16] 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 UNE-EN 1916:2008.
- [17] M. Burón, J. C. Gálvez, J. Fernández, P. López, R. D'Andrea y M. A. Sanjuán. 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.

www.capacitacioncemento.com

**BECAS 2015
CEMENTO
HORMIGÓN**

Matrícula abierta (80 horas on-line)
INSCRIPCIÓN: 676 € (IVA incluido)

- **CURSO DE EXPERTO EN GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL, RECICLADO Y RECUPERACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS EN FÁBRICAS DE CEMENTO**
- **CURSO DE EXPERTO EN PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES EN PLANTAS DE FABRICACIÓN DE CEMENTO**

**CURSOS
ON-LINE**

Para más información sobre las Becas 2015 y el programa del curso: www.capacitacioncemento.com