Anejo 12

Estimación de la vida útil de elementos de hormigón

Contenidos del anejo

1. INTRODUCCIÓN 636

2. ESTIMACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE LOS ELEMENTOS DE HORMIGÓN 636

3. MODELOS PARA EL PERÍODO DE INICIACIÓN EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN 636

3.1 CARBONATACIÓN DEL HORMIGÓN 636
3.2 INGRESO DE IONES CLORURO EN EL HORMIGÓN 637
3.2.1 CONTENIDO LÍMITE DE IONES CLORURO EN EL HORMIGÓN QUE PROVOCA EL INICIO DE LA CORROSIÓN EN LA ARMADURA 639

4. MODELOS PARA EL PERÍODO DE PROPAGACIÓN EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN 640

4.1 TIEMPO DE CORROSIÓN PARA LA FISURACIÓN DEL RECUBRIMIENTO 640
4.2 TIEMPO DE CORROSIÓN PARA UNA PÉRDIDA DE DIÁMETRO INADMISIBLE EN LA 641
armadura 641

1 Introducción

Este anejo, de carácter informativo, sirve como ejemplo de algunos de los modelos que el autor del proyecto puede utilizar, bajo su responsabilidad y buen criterio, para la estimación de la vida útil de las estructuras y/o elementos de hormigón.

El objeto de este anejo es proporcionar una herramienta que facilite la estimación de la vida útil residual de las estructuras existentes, así como ayudar en los siguientes casos:

- Que el autor del proyecto especifique un hormigón con una dosificación más estricta que la indicada en el articulado (por ejemplo con una relación a/c menor o con un mayor contenido de cemento).
- En el caso de estructuras en ambientes muy agresivos donde el articulado no proporciona una estrategia de durabilidad totalmente definida.

En ambos casos este anejo permite estimar la posible reducción de los recubrimientos recogidos en el Artículo 44 del Código cuando se mejoran las prestaciones relativas a la durabilidad del hormigón.

En ningún caso puede utilizarse para reducir los recubrimientos de las tablas 44.2.1.1.a y b en hormigones con las dosificaciones estrictas de la tabla 43.2.1.a.

2 Estimación de la vida útil de los elementos de hormigón

En general, la vida útil de los elementos de hormigón se puede obtener de acuerdo con la siguiente expresión:

$$t_{\text{est}} = t_{\text{inic}} + t_{\text{prop}}$$

siendo:

t_{inic}: período de iniciación, definido como el tiempo transcurrido hasta que se inicia el daño según se indica en el apartado 3, y

t_{prop}: período de propagación, definido como el de tiempo desde que se inicia el daño hasta que se alcanza el umbral inadmisible, según se indica en el apartado 4.

3 Modelos para el período de iniciación en elementos de hormigón

3.1 Carbonatación del hormigón

En el caso de elementos ubicados en clases de exposición XC, se tendrá que:

$$t_{\text{inic}} = \text{t}_{\text{inic,desp}}$$

siendo $\text{t}_{\text{inic,desp}}$ el período de tiempo transcurrido hasta que se inicia la corrosión, que vendrá definido por:

$$t_{inic,desp} = \left(\frac{c}{k_{ap,carb}}\right)^2$$

donde:

c: recubrimiento mínimo, en mm

$k_{\text{ap,carb}}$: coeficiente de carbonatación aparente, expresado en mm/año$^{1/2}$.

El valor de $k_{ap,carb}$ se determinará, preferentemente, de forma experimental, según la norma UNE 83993-1. En su caso, a falta de datos experimentales, el autor del proyecto podrá estimar su valor a partir de la siguiente expresión:

$$k_{ap,carb} = c_{env} \cdot c_{air} \cdot a(f_{ck} + 8)^b$$

siendo:

c_{env} y c_{air} los coeficientes de ambiente y de utilización de aireantes, respectivamente, que se obtendrán de acuerdo con las tablas A12.3.1.a y A12.3.1.b

f_{ck} resistencia característica especificada para el hormigón, en N/mm^2

a, b parámetros adimensionales, de acuerdo con la tabla A12.3.1.c.

Tabla A12.3.1.a Coeficientes c_{env} para estimar el coeficiente de carbonatación aparente

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

Tabla A12.3.1.b Coeficientes c_{air} para estimar el coeficiente de carbonatación aparente

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

Tabla A12.3.1.c Parámetros a y b para estimar el coeficiente de carbonatación aparente

Conglomerante	a	b
Cemento portland	1800	-1,7
Cemento portland + 28% cenizas volantes	360	-1,2
Cemento portland + 9% humo de sílice	400	-1,2

3.2 Ingreso de iones cloruro en el hormigón

En el caso de elementos ubicados en clases de exposición XS o XD, a los efectos de la determinación del avance de los iones cloruro en el interior del hormigón en función del tiempo, el autor del proyecto podrá utilizar la siguiente expresión:

$$C_{th}=C_b + (C_S - C_b) \cdot \left[1 - erf\left(\frac{c}{2\sqrt{D_{app,C,}(t)\cdot t}}\right)\right]$$

donde:

C_{th} contenido límite de iones cloruro en el hormigón que provoca el inicio de la corrosión en la armadura, expresado en porcentaje del peso de cemento y definido a una profundidad x, expresada en mm, y a una edad t, expresada en años

C_{b} contenido de cloruros aportados por los materiales utilizados en la fabricación del hormigón, expresados en porcentaje respecto al peso de cemento, de acuerdo con:

$$C_b = \sum_{i=1}^{n} C_{b,i}$$

siendo $C_{\text{b},i}$ los contenidos de iones cloruros de cada uno de los materiales componentes (cemento, áridos, adiciones, aditivos, etc.)

C_S contenido de cloruros en la superficie del hormigón, expresada en porcentaje del peso de cemento. A falta de información específica adicional, puede obtenerse de la tabla A12.3.2.a.

Tabla A12.3.2.a Estimación del contenido de cloruros Cs en la superficie del hormigón

Clases de exposición	Distancia L respecto a la costa (m)	C_S (% sobre peso de hormigón)
XS1	Zona de spray, próxima a la zona de salpicaduras	0,25
	Resto hasta L ≤ 5000	0,15
XS2	n/a	0,40
XS3	n/a	0,50
XD1, XD2, XD3	n/a	0,40

c recubrimiento, expresado en mm

t el período de tiempo (en años) transcurrido hasta que se inicia la corrosión, siendo t = t_{inic}

$D_{app,C}(t)$ coeficiente de difusión de cloruros aparente, expresado en mm^2/año, a la edad t, obtenido experimentalmente del siguiente modo:

a) En estructuras existentes, a partir de determinaciones experimentales del contenido de cloruros a distintas profundidades sobre testigos extraídos del elemento estructural.
b) En fase de diseño para hormigones en clase de exposición XS3, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$D_{app,C}(t) = k_e \cdot D_{app,C}(t_0)\left(\frac{t_0}{t}\right)^n$$

siendo $D_{app,C}(t_0)$ el coeficiente de difusión de cloruros aparente a la edad t_0 = 28 días (0,0767 años), cuya determinación se debe realizar a partir de ensayos específicos de difusión de cloruros, según la norma UNE-EN 12390-11.

A efectos orientativos y de evaluación meramente preliminar, se incluyen en la tabla A12.3.2.b los valores de $D_{app,C}(t_0)$ obtenidos a partir del ensayo definido en la norma NT BUILD 492.

Tabla A12.3.2.b Valores indicativos del coeficiente de difusión de cloruros aparente obtenidos con la norma NT BUILD 492

Valores de $D_{app,C}(t_0)$ [10^{-12} (m^2/s)]				
Tipo de conglomerante	relación $(a/c)_{eq}$(*)			
	0,35	0,40	0,45	0,50
CEM I	-	8,9	10,0	15,8
CEM II/B-V, CEM I con adición de más del 22% de cenizas volantes	-	5,6	6,9	9,0
CEM I con adición de humo de sílice por encima del 5%	4,4	4,8	-	-
CEM III/B	-	1,4	1,9	2,8

(*) La relación agua/conglomerante efectiva $(a/c)_{eq}$ se obtendrá considerando tanto el contenido de clínker, como los de las adiciones, ponderados en este caso por sus correspondientes coeficientes de eficacia.

n coeficiente de envejecimiento que, a falta de valores experimentales, puede obtenerse de la tabla A12.3.2.c, para las clases de exposición XS2 y XS3:

Tabla A12.3.2.c Coeficiente de envejecimiento

Relación a/c	Tipo de cemento	Coeficiente de envejecimiento, n
Entre 0,40 y 0,50	CEM I	0,30
Otros casos		0,50

k_e coeficiente que depende de la temperatura media ambiental, T_{real}, expresada en ºC, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$k_e = e^{4800\left(\frac{1}{293}-\frac{1}{273+T_{real}}\right)}$$

3.2.1 Contenido límite de iones cloruro en el hormigón que provoca el inicio de la corrosión en la armadura

El autor del proyecto podrá considerar un contenido límite de ion cloruro C_{th} para las armaduras pasivas como el indicado, a título orientativo, en la tabla A12.3.2.1.a en función de la clase de exposición y referido al contenido de cemento.

Tabla A12.3.2.1.a Contenido límite de ion cloruro C_{th}

Clase de exposición	C_{th} [% sobre peso de cemento]
XS1	0,60
XS2	0,80
XS3	0,60
XD1	0,60
XD2	0,60
XD3	0,40

En el caso de armaduras activas, el valor límite del contenido de cloruros a la altura de la armadura de pretensado será $C_{th,\mathrm{pret}}$ = 0,30 en el caso general y 0,20 en el caso de la clase XD3, expresado en porcentaje del peso de cemento.

4 Modelos para el período de propagación en elementos de hormigón

4.1 Tiempo de corrosión para la fisuración del recubrimiento

El tiempo transcurrido desde el inicio de la corrosión hasta la fisuración del recubrimiento, se puede obtener de acuerdo con la siguiente expresión:

$$t_{fis,corr} = \frac{P_{corr}}{v_{corr}} = \frac{80 \cdot c}{\emptyset \cdot v_{corr}}$$

donde:

$t_{fis,\mathrm{corr}}$	tiempo desde el inicio de la corrosión hasta la fisuración de recubrimiento, en años
P_{corr}	penetración de corrosión límite, en µm
c	espesor del recubrimiento de hormigón, expresado en mm
$\emptyset$	diámetro de la armadura, expresado en mm
v_{corr}	velocidad de corrosión, expresado en µm/año, de acuerdo con la tabla A12.4.1.

Tabla A12.4.1 Velocidad de corrosión

Clase de exposición			v_{corr} (µm/año)
Ambiente normal	Seco o permanentemente húmedo	XC1	1
	Humedad alta	XC2	4
	Humedad moderada	XC3	2
	Ciclos humedad – secado	XC4	5
Ambiente marino	Expuesto a aerosoles marinos	XS1	20
	Sumergido permanentemente	XS2	4
	Zona de mareas o salpicaduras	XS3	50
Ambiente con sales fundentes	Humedad moderada	XD1	35
	Humedad alta	XD2	20
	Ciclos humedad - secado	XD3	35

4.2 Tiempo de corrosión para una pérdida de diámetro inadmisible en la armadura

El tiempo transcurrido desde el inicio de la corrosión hasta la pérdida de sección de armadura definida por un espesor Δ∅, se puede obtener de acuerdo con la siguiente expresión:

$$t_{secc,corr} = \frac{\Delta\emptyset_{lim}}{v_{corr}}$$

donde:

$t_{\text{secc,corr}}$ tiempo desde el inicio de la corrosión hasta la pérdida de diámetro definido como inadmisible en la armadura, en años

$\Delta\emptyset_{\text{lim}}$ variación de diámetro debido a la corrosión de la armadura, que se considera inadmisible, expresada en µm

v_{corr} velocidad de corrosión, expresado en µm/año, de acuerdo con la tabla A12.4.1.