



ANEJO 9º

Consideraciones adicionales sobre durabilidad

1. Cálculos relativos al Estado Límite de durabilidad

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.

Para la comprobación del Estado Límite de durabilidad, esta Instrucción contempla un procedimiento de carácter semiprobabilista de forma análoga al adoptado para el resto de los Estados Límite.

En la comprobación del Estado Límite, se debe satisfacer la condición:

$$t_L > t_d$$

donde:

t_L Valor estimado de la vida útil
 t_d Valor de cálculo de la vida útil

Se define la vida útil de cálculo, como el producto de la vida útil de proyecto por un coeficiente de seguridad:

$$t_d = \gamma_t t_g$$

donde:

t_d Vida útil de cálculo
 γ_t Coeficiente de seguridad de vida útil, para cuyo valor se adoptará $\gamma_t = 1,10$
 t_g Vida útil de proyecto

1.1 Método general

El método general de cálculo comprende las siguientes fases:

- 1 Elección de la vida útil de proyecto, según 5.1.
- 2 Elección del coeficiente de seguridad de vida útil,
- 3 Identificación de las clases de exposición ambiental a las que puede estar sometida la estructura. Para cada clase, identificación del proceso de degradación predominante.
- 4 Selección del modelo de durabilidad correspondiente a cada proceso de degradación. El Apartado 1.2 de este Anejo recoge algunos de los modelos aplicables para los procesos de corrosión de las armaduras.

- 5 Aplicación del modelo y estimación de la vida de servicio de la estructura t_L .
- 6 Comprobación del Estado Límite para cada uno de los procesos de degradación identificados relevantes para la durabilidad de la estructura.

1.2. Modelos de durabilidad para los procesos de corrosión

1.2.1 Generalidades

En el caso de la corrosión, tanto por carbonatación como por cloruros, el tiempo total t_L necesario para que el ataque o degradación sean significativos se puede expresar como:

$$t_L = t_i + t_p$$

donde:

- t_i Período de iniciación de la corrosión, entendido como el tiempo que tarda el frente de penetración del agresivo en alcanzar la armadura provocando el inicio de la corrosión.
- t_p Período de propagación (tiempo de propagación de la corrosión hasta que se produzca una degradación significativa del elemento estructural).

Este apartado recoge algunos de los modelos aplicables para la estimación del desarrollo de los procesos de deterioro relacionados con la corrosión de las armaduras. El Autor del proyecto podrá optar por cualquier otro modelo avalado por la bibliografía especializada.

En el caso de comprobación del Estado Límite en el caso de armaduras activas, se considerará un período de propagación, $t_p=0$.

En el caso de armaduras activas postesas, con trazados que sean conformes con los recubrimientos mínimos establecidos en el articulado, no suele ser necesaria la comprobación de este Estado Límite.

1.2.2 Período de iniciación

Tanto la carbonatación como la penetración de cloruros son procesos de difusión en el hormigón a través de sus poros, que pueden ser modelizados de acuerdo con la siguiente expresión:

$$d = K \cdot \sqrt{t}$$

donde:

- d Profundidad de penetración del agresivo, para una edad t .
- K Coeficiente que depende del tipo de proceso agresivo, de las características del material y de las condiciones ambientales

1.2.2.1 Modelo de carbonatación

El período de tiempo necesario para que se produzca la carbonatación a una distancia d respecto a la superficie del hormigón puede estimarse con la siguiente expresión:



$$t = (d/K_c)^2$$

donde:

d Profundidad, en mm.
 t Tiempo, en años.

El coeficiente de carbonatación K_c puede obtenerse como:

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

donde:

f_{cm} Resistencia media del hormigón a compresión, en N/mm², que puede estimarse a partir de la resistencia característica especificada (f_{ck}).

$$f_{cm} = f_{ck} + 8$$

c_{env} Coeficiente de ambiente, según tabla A.9.1.
 c_{air} Coeficiente de aireantes, según tabla A.9.2.
 a, b Parámetros función del tipo de conglomerante, según tabla A.9.3.

Tabla A.9.1 Coeficiente c_{env}

Ambiente	c_{env}
Protegido de la lluvia	1
Expuesto a la lluvia	0,5

Tabla A.9.2 Coeficiente c_{air}

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



Tabla A.9.3 Coeficientes *a* y *b*

Conglomerante	Cementos de la Instrucción RC 03	<i>a</i>	<i>b</i>
Cemento Portland	CEM I CEM II/A CEM II/B-S CEM II/B-L CEM II/B-LL CEM II/B-M CEM IV	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 II/A-D	400	-1,2
Cemento Portland + 65 % escorias	CEM III/A CEM III/B	360	-1,2

1.2.2.2 Modelo de penetración de cloruros

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 siguiente expresión:

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

donde:

- d* Profundidad, en mm.
- t* Tiempo, en años.

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

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

donde:

- α Factor de conversión de unidades que vale 56157.
- $D(t)$ 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/m³) como:

C_s (% peso de cemento) = C_s (% peso de hormigón) * (2300/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 de acuerdo con la siguiente expresión:

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

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 puede tomarse, a falta de valores específicos obtenidos mediante ensayos sobre el hormigón de que se trate, igual a 0,5.

Para la utilización del modelo de penetración de cloruros puede emplearse el valor de $D(t_0)$ obtenido mediante ensayos específicos de difusión (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 siguiente tabla (obtenidos para $t_0 = 0,0767$)

Tabla A.9.4. Coeficientes $D(t_0)$ ($\times 10^{-12}$ m²/s)

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

La concentración crítica de cloruros (C_{th}) deberá ser establecida por el Autor del proyecto de acuerdo con las consideraciones específicas de la estructura. En condiciones normales, puede adoptarse un valor del 0,6% del peso de cemento para la comprobación del Estado Límite en relación con la corrosión de las armaduras pasivas. En el caso de armaduras activas pretensas, puede adoptarse un valor límite de C_{th} de 0,3% del peso de cemento.

El valor de C_s depende de las condiciones externas, especialmente de la orografía del terreno y el régimen de vientos predominantes en la zona, en el caso de ambientes próximos a la costa. Además, C_s varía con la edad del hormigón, alcanzando su valor máximo a los 10 años. A falta de valores obtenidos a partir de ensayos en estructuras de hormigón situadas en las proximidades, el Autor del proyecto valorará la posibilidad de adoptar un valor de C_s de acuerdo con tabla A.9.4, en función de la clase general de exposición, según 8.2.2:

Tabla A.9.4.
Concentración de cloruros en la superficie de hormigón

Clase general de exposición	IIIa		IIIb	IIIc	IV
Distancia respecto a la costa	Hasta 500 m	500m – 5000m	Cualquiera		---
C_s (% peso de hormigón)	0,14	0,07	0,72	0,50	0,50

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



1.2.3 Periodo de propagación

La etapa de propagación se considera concluida cuando se produce una pérdida de sección de la armadura inadmisibles o cuando aparecen fisuras en el recubrimiento de hormigón. El período de tiempo para que se produzca puede obtenerse de acuerdo con la siguiente expresión:

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

donde

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

A falta de datos experimentales específicos para el hormigón y las condiciones ambientales concretas de la obra, la velocidad de corrosión podrá obtenerse de la tabla A.9.5.

Tabla A.9.5 Velocidad de corrosión V_{corr} según la clase general de exposición

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

1.2.4 Estimación de la vida útil debida a la corrosión de las armaduras

Por tanto, el tiempo total, suma del período de iniciación y el de propagación de la corrosión, será, en el caso de la corrosión por carbonatación:

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

En el caso de la corrosión por cloruros será:

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

2. Contribución de los morteros de revestimiento al recubrimiento de las armaduras

El Articulado permite tener en cuenta la contribución de revestimientos que sean compactos impermeables, definitivos y permanentes. A este respecto, en las clases generales de exposición IIa, IIb y IIIa, sin clase específica de exposición, pueden emplearse diversas alternativas. En el caso de uso de morteros de revestimiento, se define como “factor de equivalencia de recubrimiento (λ)” el valor por el que hay que multiplicar el espesor colocado de mortero para determinar el recubrimiento equivalente que puede sumarse al recubrimiento real de hormigón. Las tablas A.9.6 y A.9.7 presentan los valores de λ para los ambientes más habituales en el caso de estructuras de edificación. En ningún caso, podrán emplearse espesores de revestimiento superiores a 20 mm.

Tabla A.9.6. Factor de equivalencia de recubrimiento para morteros en ambientes IIa y IIb

Velocidad de carbonatación, (mm/día ^{1/2})	λ
$\leq 2,0$	0,5
$\leq 1,0$	1,0
$\leq 0,7$	1,5
$\leq 0,5$	2,0

Tabla A.9.7. Factor de equivalencia de recubrimiento para morteros en ambiente IIIa

Velocidad de penetración de cloruros, (mm/día ^{1/2})(*)	λ
$\leq 3,4$	0,5
$\leq 1,7$	1,0
$\leq 1,1$	1,5
$\leq 0,9$	2,0

(*) Para la determinación de la velocidad de penetración de cloruros, y a falta de una normativa específica, se recomienda seguir las condiciones de ensayo descritas en el capítulo 3 de la norma AASTHO T259-80, manteniendo las mismas hasta edades no inferiores a 90 días y determinando la velocidad de penetración de cloruros mediante algún procedimiento adecuado (como por ejemplo, mediante la determinación colorimétrica del frente de penetración de cloruros con AgNO_3 , a diferentes edades intermedias).

Alternativamente, para el ambiente IIIa puede emplearse también el criterio de factor de equivalencia establecido en la tabla A.9.8.

Tabla A.9.8 Factor de equivalencia de recubrimiento para morteros en ambiente IIIa

Capilaridad (kg/m ² h ^{1/2}) según Recomendación RILEM CPC 11.2.	λ
$\leq 0,40$	0,5
$\leq 0,20$	1,0
$\leq 0,15$	1,5
$\leq 0,10$	2,0

Para que un mortero pueda ser empleado de acuerdo con lo indicado en este Artículo, sus componentes (cemento, áridos, aditivos, adiciones, etc.) deberán cumplir, en su caso, lo especificado para cada uno de ellos en la presente Instrucción. Además, independientemente del valor de su factor de equivalencia, deberá cumplir también las especificaciones de la tabla A.9.9.



Tabla A.9.9 Características del mortero a emplear en revestimientos, para poder ser considerado a los efectos de este Anejo.

Característica	Requisito
Resistencia a flexotracción, según UNE-EN 1015-11	$\geq 2 \text{ N/mm}^2$
Módulo de elasticidad, según ASTM C 469	$\leq 25000 \text{ N/mm}^2$
Retracción de secado, a los 28 días, según ASTM C157	$\leq 0,04\%$
Resistencia de adherencia, según UNE-EN 1542	$\geq 0,8 \text{ N/mm}^2$
Coefficiente de dilatación térmica, según UNE-EN 1770	$\leq 11,7 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

En el caso de empleo de otros revestimientos, o en ambientes distintos de los anteriores, el proyectista debe justificar documentalmente que la protección a las armaduras en el elemento prefabricado es similar a la que proporcionaría el espesor de hormigón sustituido. Para ello el fabricante de productos de revestimientos distinto de los anteriores deberá garantizar documentalmente sus prestaciones y entre ellas, al menos el factor de equivalencia del revestimiento.

Los requisitos del articulado corresponden estrictamente a exigencias de durabilidad del forjado. Otros criterios, como por ejemplo, los estéticos o los de protección contra el fuego, pueden requerir mayores espesores de recubrimiento o la aplicación de otras protecciones específicas.

En el caso de ambientes fuertemente agresivos, el valor de los recubrimientos y las demás disposiciones de proyecto deberán establecerse, previa consulta de la literatura técnica especializada, en función de la naturaleza del ambiente, del tipo de elemento estructural de que se trate, etc.