

El Espesor de Recubrimiento como Parámetro de Diseño por Durabilidad

Lilian Eperjesi, Luis Fernández Luco

Laboratorio de Estudios de Materiales y Estructuras para la Ingeniería Civil
(LEMEIC), Facultad de Ingeniería, UNLP.

Laboratorio de Materiales y Estructuras (INTECIN), Facultad de Ingeniería,
UBA

eperjesi@ing.unlp.edu.ar

lfernandez@fi.uba.ar

RESUMEN

El diseño de hormigón estructural por durabilidad involucra la definición de diferentes parámetros, entre los que se destacan las características del hormigón, representadas básicamente por su capacidad de transporte y el dimensionado adecuado del espesor de recubrimiento.

En situaciones en las que la clase resistente del hormigón está definida, el ajuste de la vida de diseño puede efectuarse modificando el espesor de recubrimiento, porque esto no provoca cambio alguno en los aspectos estructurales, introduciendo así una interferencia nula con el dimensionado previo. Para el cálculo de los espesores recomendados pueden emplearse modelos que permiten inferir la vida útil a partir de ciertos parámetros vinculados a requisitos prestacionales que relacionan la performance del hormigón con las características del medio de emplazamiento.

En este trabajo se presentan ejemplos de dimensionado de espesores de recubrimiento según modelos de avance de la corrosión inducida por cloruros y por carbonatación, que involucran tanto el período de iniciación como el de propagación. Los espesores determinados teniendo en cuenta las prestaciones del hormigón se comparan con los recubrimientos mínimos según diferentes reglamentos y se identifican situaciones para las que es conveniente proceder al cálculo y dimensionado de los espesores de recubrimiento a partir de modelos de deterioro.

Introducción

La paulatina transición de los Códigos y Reglamentos hacia modelos mixtos, prescriptivos – prestacionales, está modificando la aplicación práctica de los criterios de durabilidad en estructuras convencionales. Aunque parezca un detalle menor, la consideración de la durabilidad del hormigón estructural (es decir, del hormigón y de las armaduras) en un esquema de importancia equivalente, es un aporte significativo para que se armonicen ambos requisitos desde el diseño, condición “sine qua non” para optimizar la solución final.

La adopción de modelos puramente prestacionales, estrategia adoptada por el modelo japonés, resulta difícil de implementar en la mayoría de las construcciones “convencionales”, por lo que muchos de los reglamentos han optado por modelos mixtos prescriptivos – prestacionales.

Por un lado, se mantienen pautas prescriptivas de espesores mínimos de recubrimiento y calidad del hormigón a emplear, mientras que se admite la aplicación de criterios basados en las prestaciones efectivas de los hormigones y modelos de deterioro.

Tal es el caso de la Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE-08), que introduce el concepto de Estado Límite de Durabilidad para los procesos de corrosión de armaduras, como alternativa a las tablas de dimensionado directo (prescriptivo).

Resulta interesante entonces identificar las posibilidades de optimización que provee el uso de modelos de deterioro frente a la adopción del dimensionado directo, para establecer luego en qué condiciones se justifica uno u otro modo de proceder.

Estrategia para la durabilidad

Los recursos disponibles para alcanzar una durabilidad acorde con la vida útil proyectada son múltiples, y comprenden aspectos como la calidad del hormigón de recubrimiento, el espesor de recubrimiento, control del ancho máximo de fisuras, diseño que evite la acumulación de agua, curado eficiente, etc. Por lo tanto, es necesario el manejo simultáneo de todos estos recursos para obtener los resultados esperados.

Por su complejidad, la influencia de la calidad del hormigón, a través de su capacidad de transporte de fluidos, como parámetro relevante de durabilidad se trata en numerosos trabajos, pero hay escasas menciones al rol del espesor de recubrimiento, quizás porque se trate de un parámetro geométrico sencillo. Sin embargo, su importancia no es menor.

El hormigón de recubrimiento aporta un efecto de barrera físico-química para el ingreso de agresivos al hormigón y las armaduras, barrera que mejora su eficacia cuando aumenta el espesor de recubrimiento y se reduce su capacidad para el transporte de fluidos. Por este motivo, puede alcanzarse vidas útiles equivalentes modificando uno u otro parámetro.

En el proceso de diseño estructural, es habitual adoptar una clase resistente para el hormigón, respetar los recubrimientos mínimos reglamentarios y proceder luego a la verificación de que se respetan las exigencias relativas a la durabilidad.

Ante la necesidad de obtener vidas útiles más largas, está claro que resultará más sencillo incrementar los espesores de recubrimiento que mejorar la calidad del hormigón, porque esta última alternativa conduce a un recálculo completo de la estructura.

En consecuencia, en este trabajo se centra el enfoque en el dimensionamiento del espesor de recubrimiento, como parte integral de una estrategia para la durabilidad.

Consideración simultánea de los períodos de iniciación y propagación

Las primeras consideraciones sobre estados límites por durabilidad se enfocaron en el período de iniciación, ya que la calidad del hormigón y el espesor del recubrimiento tienen una incidencia de primer orden en este período, mientras que el de propagación está controlado básicamente por las condiciones de exposición.

En la actualidad, aunque escasas, hay algunas propuestas para considerar también el período de propagación, que puede ser suficientemente prolongado en determinadas situaciones, en especial, de climas secos. En ambientes con cloruro, las velocidades de corrosión pueden ser suficientemente altas como para determinar períodos de propagación suficientemente cortos como para contabilizar su incidencia de manera significativa en la vida útil.

En el caso de la Instrucción EHE-08, el período de propagación se determina como una función directa de la relación entre el espesor de recubrimiento y el diámetro de la barra e inversamente proporcional a la velocidad de corrosión, como se muestra en la Ec. (1).

$$t_p = \frac{80}{V_{corr}} \frac{C}{\phi} \quad (1)$$

Estimación del recubrimiento necesario

Los recubrimientos mínimos pueden establecerse conforme a criterios prescriptivos o basándose en enfoques prestacionales. En este último caso, para la estimación del espesor de recubrimiento, partiremos de la definición del Estado Límite de Durabilidad (ELD) considerado, ya sea que éste involucre solamente al período de iniciación o también al de propagación.

Una vez definido el ELD, se procede según la clásica expresión que vincula al avance del agresivo con la raíz cuadrada del tiempo y, en función de los datos disponibles, se encuentra el espesor necesario correspondiente a la calidad del hormigón y la condición de exposición, que se muestra en la Ec. (2). Para estimar el valor de la constante K puede emplearse la Ec. (3) que se muestra más adelante.

$$X = K \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

Este trabajo describe la aplicación del modelo que aparece en el Anejo 9 de la EHE-08, para la estimación del recubrimiento mínimo, en función tanto de

datos experimentales propios como los provistos por defecto por ese reglamento, situación que admite luego su comparación.

Para estimar el valor de la constante K , la Instrucción española [EHE, 2008] propone una ecuación simplificada basada en la 2ª ley de Fick, originada de la ecuación de Selmer-Poulsen desarrollada en los años 80, que se basa en la raíz cuadrada del tiempo y propone para el cálculo de la velocidad K la función parabólica como una aproximación de la función error [Acosta, 2004] (Ec. (3)).

$$K = \alpha \cdot \sqrt{12 \cdot D_t} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{C_{th} - C_b}{C_s - C_b} \right)} \quad (3)$$

Siendo α : factor de conversión de unidades, toma el valor de 56157.

$D_{(t)}$: coeficiente de difusión aparente de cloruros a 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.

C_b : contenido de cloruros aportado por las materias primas (áridos, cemento, agua, etc.) en el momento de la fabricación del hormigón.

$D_{(t)}$: coeficiente de difusión aparente de cloruros que varía con la edad del hormigón de acuerdo con la siguiente expresión:

También considera que el coeficiente de difusión de cloruros experimenta un envejecimiento, expresado por la Ec. (3), donde t_0 es la edad a la que se mide el coeficiente de difusión de cloruros y t es una edad genérica. Esta expresión es genérica y los diferentes autores proponen distintos valores para el factor de edad, como se ilustra en la Tabla 1.

$$D_t = D_0 \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \quad (4)$$

Tabla 1: Valores propuestos por distintos autores para el factor de edad n_{Cl}

Tipo de cemento	n	Referencia
CEM I / CPN	0,43	Izquierdo, 2003
	0,5	Bamforth, 1998
Cemento con adiciones	0,6	Bamforth, 1998
	0,8	Izquierdo, 2003
Para cualquier cemento	0,3	Tang & Gulikers
	0,5	EHE-08 Anejo 9

El procedimiento es aparentemente sencillo, ya que basta definir el ELD, ya se

trate del período de iniciación solamente o incluyendo el período de propagación y encontrar el valor del espesor de recubrimiento para el tiempo t establecido, ya sea $ELD=t_i$ o $ELD=t_i+t_p$, como se ilustra en la Ec. (5) y (6) respectivamente.

$$t_i = 50 \text{ años} \tag{5}$$

$$t_i = 50 \text{ años} - t_p \tag{6}$$

Análisis del significado del factor de envejecimiento del coeficiente de difusión

El factor de envejecimiento representa, de manera simplificada, la evolución temporal del coeficiente de difusión, es decir que éste se reduce con el avance del tiempo, según el coeficiente n que se aplique a la Ec. (4). La Fig. 1 ilustra la variación relativa del coeficiente de difusión con el tiempo para diferentes valores de n .

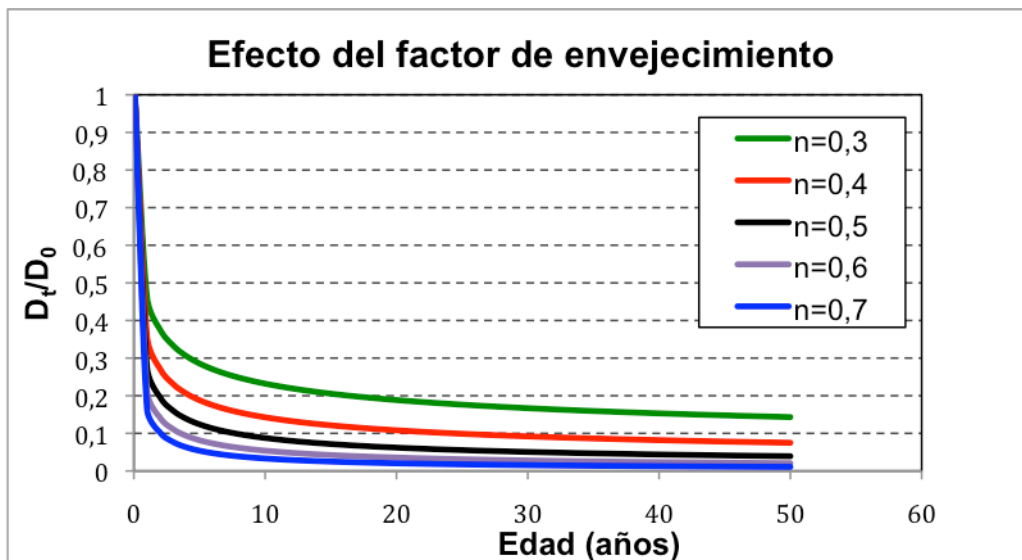


Fig. 1: Reducción relativa del coeficiente de Difusión D_t en función del factor de envejecimiento “ n ”.

Por lo tanto, debería aplicarse un proceso iterativo en el que, para cada intervalo temporal, se modifiquen no sólo el valor del coeficiente de difusión sino también las condiciones de borde que aparecen en la Ec. (3), que evidentemente también serán funciones temporales. Esta metodología es ciertamente complicada y, en consecuencia, la Instrucción EHE-08 adopta el coeficiente C_t constante.

Cuando se piensa en un período de 50 años, suele aplicarse directamente el coeficiente D_{50} , lo que equivaldría a considerar que este valor se mantuvo constante durante los 50 años de vida útil, contradiciendo la Ec. 4. Por el contrario, utilizar para el período de 50 años el valor del coeficiente de difusión de cloruros D_0 medido a la edad de 28 días (o la edad que se trate), tampoco

sería razonable porque determina espesores de recubrimiento poco razonables, como se muestra en la Tabla 3.

En este trabajo se propone el empleo de un coeficiente de difusión medio temporal, calculado como la media geométrica de los coeficientes entre el momento “cero” y el momento (t), con intervalos anuales. La Tabla 3 resume el cálculo del avance del frente de cloruros para los años 1 a 10 y al año 50, cuando se emplea D constante y D variable, a partir de la media geométrica total. Por ejemplo, para el año 10, se calcula la media geométrica para D(t) en todo el período comprendido entre el año 1 y el año 10. Los datos que se indican en Tabla 3 corresponden a considerar un CEM I y las condiciones de borde que se muestran en Tabla 2, extraídas del Anejo 9 de la EHE-08:

Tabla 2: Datos para la estimación del avance del frente de cloruros de Tabla 3

CEM I	
D_{to}	$15,8 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$
C_s	16,56 % / cem
C_o	1,44 % / cem
C_{th}	2,16 % / cem
n	0,5

Tabla 3: cálculo del avance del frente de cloruros

Edad [años]	$D_{Cl}(t) \cdot 10^{-8}$ [cm ² /s]	K(t) [cm/s ^{0,5}]	Kmg [cm/s ^{0,5}]	Avance estimado (mm)		
				D(t)mg	D(t) cte =D ₀	D(t) cte =D ₅₀
0,0767	1,0000	15,8000				
1	0,2770	4,3761	31,8145	32	60	12
2	0,1958	3,0944	26,7527	41	85	17
3	0,1599	2,5266	24,1738	47	105	21
4	0,1385	2,1881	22,4962	52	121	24
5	0,1239	1,9571	21,2756	56	135	27
6	0,1131	1,7865	20,3277	59	148	29
7	0,1047	1,6540	19,5592	62	160	32
8	0,0979	1,5472	18,9170	65	171	34
9	0,0923	1,4587	18,3681	67	181	36
10	0,0876	1,3839	17,8906	69	191	38
...
50	0,0392	0,6189	11,9642	111	427	85

Los valores que se muestran en la columna D(t)mg del avance estimado del frente de cloruros se calculan con las medias geométricas de la constante K, indicados en celeste, en la columna correspondiente.

Los valores del avance estimado del frente de cloruros columnas D_0 y D_{50} se calculan con D constante, e igual a los indicados en celda gris (correspondiente al valor inicial t_i) y celda verde (correspondiente a $t=50$) respectivamente.

El avance del frente de cloruros para la concentración crítica puede representarse gráficamente, como se muestra en la Fig. 2, donde se representan las tres situaciones calculadas en la Tabla 3.

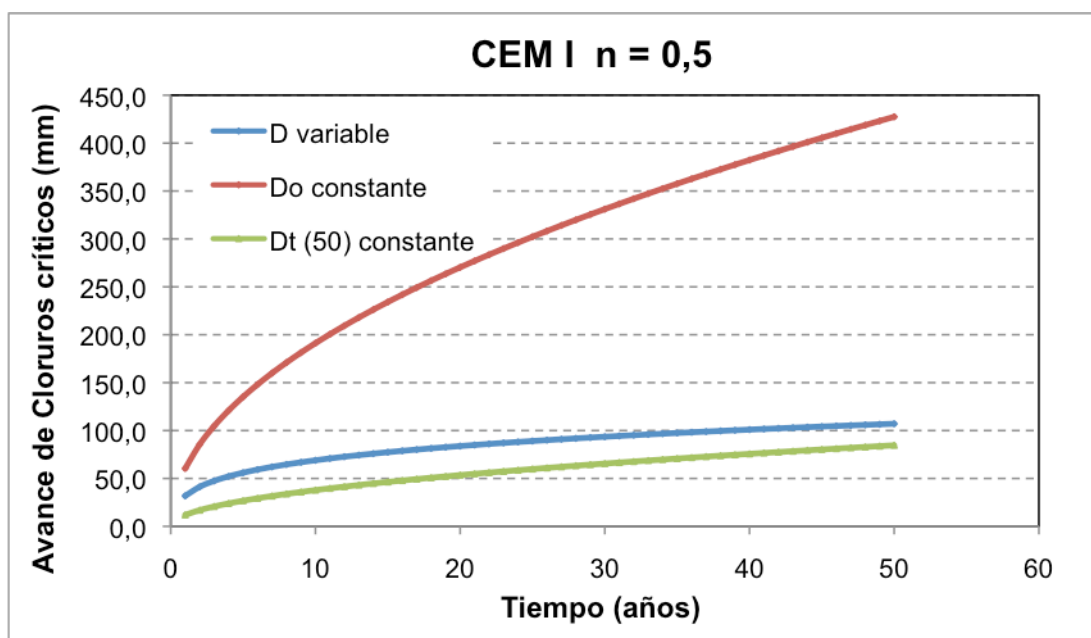


Fig. 2: avance del frente de la concentración crítica de cloruros en función del tiempo t (en años).

Cálculo del recubrimiento mínimo considerando el tiempo de propagación

Considerando que la Instrucción considera un tiempo de propagación de 40 años para hormigones elaborados con CEM I y de 30 años para hormigones elaborados con CEM III, expuestos al ambiente clasificado como IIIb (hormigón sumergido en agua de mar), puede deducirse que el tiempo de iniciación en cada caso será de 10 y 20 años respectivamente.

Entonces, si se repite análisis, empleando diferentes valores de n (indicados en la Tabla 1), para cemento sin adiciones (CEM I) y para cemento con escoria (CEM III) y empleando como valores de partida los datos por defecto que aparecen en el Anejo 9 de la Instrucción EHE-08 los resultados experimentales, que se muestra en la Tabla 4, es posible encontrar los avances del frente de concentración crítica de cloruros para estas dos edades, como se ilustra en la Tabla 5.

De la comparación de estos espesores mínimos de recubrimiento con los valores mínimos especificados en el procedimiento simplificado (tablas prescriptivas), que corresponden a 30 mm para el CEM III y 40 mm para el CEM I, según la Instrucción EHE, surgen diferentes conclusiones.

Tabla 4: Datos de partida para el cálculo del avance del frente crítico de cloruros

	Según EHE-08		Según datos experimentales	
	CEM I	CEM III	CEM I	CEM III
$D_{to} \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	15,8	2,8	17,3	3,9
$C_s \text{ \% /cem}$	16,56	16,56	4,82	17,03
$C_o \text{ \% /cem}$	1,44		1,44	
$C_{th} \text{ \% /cem}$	2,16		2,16	
n	0,3; 0,4; 0,5	0,5; 0,6; 0,7	0,3; 0,4; 0,5	0,5; 0,6; 0,7

Tabla 5: Calculo del avance del frente crítico de cloruros para diferentes coeficientes D y n

		CEM I			CEM III		
		n= 0,3	n= 0,4	n= 0,5	n= 0,5	n= 0,6	n= 0,7
EHE	D variable	111,5	93,2	77,9	37,8	30,3	30,3
	D = D_0 = cte	191,2	191,2	191,2	113,8	113,8	113,8
	D = D_{50} = cte	72,3	52,3	37,8	22,5	16,3	16,3
Experim	D variable	93,3	81,4	71,1	41,0	34,8	29,5
	D = D_0 = cte	140,2	140,0	140,0	136,0	136,0	136,0
	D = D_{50} = cte	65,9	51,2	39,8	26,5	20,6	16,0

Conclusiones

De los resultados obtenidos, es posible concluir lo siguiente:

- Los resultados obtenidos a partir de datos experimentales son sensiblemente semejantes a los que se obtienen por adopción de los coeficientes por defecto indicados en el Anejo 9 de la EHE-08
- La instrucción EHE-08 no establece un procedimiento detallado para la verificación de espesores de recubrimiento según el criterio prestacional, al no indicar cómo considerar el factor de envejecimiento.
- La utilización de coeficiente de difusión constante, e igual al $D_{(50)}$ conduce a valores menores aunque razonablemente coherentes con los recubrimientos mínimos prescriptivos, pero no sería lógico aplicar este coeficiente si se tienen en cuenta la duración de los períodos de propagación en cada caso.
- La aplicación de coeficientes de difusión variables, a partir de la media geométrica temporal ofrece buena coherencia con los valores prescritos para los CEM III, cuando el exponente del factor de envejecimiento n es 0,6 o 0,7, en la línea de lo propuesto por Bamforth e Izquierdo.
- La aplicación de criterios prestacionales a los cementos sin adición (CEM I) no permite obtener valores razonables excepto cuando se aplica $D_{(50)}$ a un período de 10 años, lo que es un evidente contrasentido, por lo que se considera que el enfoque propuesto por la Instrucción EHE-08 debería ser revisado.

