

TÓPICO 1 – (Patología de las Construcciones)

Comprobación del Estado Límite de Durabilidad en Medios con Cloruros

Luis Fernández Luco^{1,a}, Lilian Eperjesi^{2,b}

¹ Dr. Ing. Civil, Coordinador Grupo Materiales Compuestos Granulares, Laboratorio de Materiales y Estructuras, INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina

² Director Ejecutivo Departamento de Construcciones. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata, Argentina

^aemail: lfernandez@fi.uba.ar

^bemail: eperjesi@ing.unlp.edu.ar

Palabras-clave: Estado límite de durabilidad, corrosión por cloruros, vida útil de las estructuras.

Resumen

La vida útil de las estructuras de hormigón se ha transformado en uno de los pilares en que apoya el desarrollo sustentable de la industria de la construcción. Al respecto la nueva Instrucción del Hormigón Estructural, EHE-08, que regula el proyecto y ejecución de las estructuras de hormigón, contiene aportes relevantes vinculados a la durabilidad. En un Anexo (Anejo 9) se dan las pautas para la comprobación del estado límite de durabilidad cuando la degradación se debe a la corrosión inducida por cloruros o carbonatación del recubrimiento.

En este trabajo se analiza el estado límite de durabilidad siguiendo las recomendaciones prestacionales y el modelo de penetración de cloruros propuesto por la EHE-08. Se realiza un análisis de las variables involucradas en dicho modelo, ponderando la influencia de cada una de ellas en la resistencia del hormigón frente al ingreso de cloruros. En forma simultánea se discute el grado de validez de los espesores de recubrimientos recomendados para estructuras emplazadas en medios cuya concentración de cloruros resulta potencialmente agresiva para las armaduras (clases de exposición III y IV).

Los resultados obtenidos han puesto en evidencia la sensibilidad del modelo respecto de algunos de los parámetros involucrados, en particular la razón agua/cemento y la disminución del coeficiente de difusión de cloruros con la edad. La información respecto de la vida útil inferida resulta valiosa siempre que se interprete con criterio.

Introducción

Resulta evidente que el diseño por durabilidad está atravesando una etapa de transición, es necesario que las experiencias derivadas de la investigación sean incluidas en los Códigos y Reglamentos para que adquieran validez. Algunos Reglamentos han comenzado a incorporar, a modo de

requisitos prestacionales, exigencias destinadas a evaluar la calidad del hormigón de recubrimiento a través de propiedades que aportan información sobre la conectividad de la estructura porosa. Tal es el caso de nuestro reglamento CIRSOC 201-05, en el que se fija un valor límite para la velocidad de succión capilar de hormigones en estructuras emplazadas en ambientes con cierto tipo de exposición [1]. Otros Reglamentos han introducido modelos que permiten inferir la velocidad de ingreso del agresivo a través del hormigón para estimar, mediante enfoques probabilísticas, la vida en servicio de las estructuras, en particular de aquellas en las que el proceso de degradación que prevalece es la corrosión de las armaduras.

La Federación Internacional del Hormigón (fib) ha publicado en el Boletín 34 [2] un enfoque probabilístico para el diseño por durabilidad según distintos procesos de deterioro, los modelos propuestos resultan accesibles para aquellos que investigan sobre el tema, no así para el común de los proyectistas debido a la gran cantidad de variables involucradas sobre las cuales existe aún poca información. Otro avance a tener en cuenta es el introducido por la Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08, [3] que regula el proyecto y ejecución de las estructuras de hormigón en España.

La nueva Instrucción EHE presenta distintos aspectos relevantes vinculados a la durabilidad. Todos los requisitos prescriptivos que adopte el Proyecto de Ejecución con el objetivo de conseguir una determinada durabilidad están condicionados por la vida útil que se ha fijado en el proyecto. Los espesores de recubrimiento dependen de la resistencia característica del hormigón, de la clase de exposición, del tipo de cemento utilizado y de la vida útil prevista en el proyecto. Además, en un Anexo (Anejo 9), referido a consideraciones adicionales sobre durabilidad, se dan las pautas para la comprobación del estado límite de durabilidad cuando la degradación se debe a la corrosión inducida por cloruros o carbonatación del recubrimiento.

En un trabajo anterior [4] se ha presentado la aplicación del modelo propuesto por la EHE para inferir el avance de la carbonatación. Los resultados obtenidos han sido contrastados con los frentes carbonatados determinados en estructuras en servicio y se ha comprobado que los valores teóricos de la constante y profundidad de carbonatación calculados con el modelo se aproximan de forma aceptable a los determinados experimentalmente.

En este trabajo se analiza el estado límite de durabilidad siguiendo las recomendaciones prestacionales y el modelo de penetración de cloruros propuesto por la EHE-08. Se realiza un análisis de las variables involucradas en dicho modelo, ponderando la influencia de cada una de ellas en la resistencia del hormigón frente al ingreso de cloruros. En forma simultánea se aplica el modelo a valores obtenidos en experiencias propias.

Cálculo del Estado Límite de Durabilidad

La EHE introduce el concepto de *estado límite de durabilidad* y lo define como la falla producida al no alcanzarse la vida útil de proyecto de la estructura, como consecuencia de los procesos de degradación del hormigón o de las armaduras, que impiden que la estructura se comporte de acuerdo con las hipótesis con las que ha sido proyectada.

Para la definición y comprobación del estado límite de durabilidad la EHE-08 contempla un procedimiento semiprobabilístico, similar al utilizado en

los otros estados límite. El método general de cálculo comprende las fases que se mencionan a continuación.

Elección de la vida útil de proyecto. La vida útil nominal o de proyecto (t_g) se fija en función del tipo, destino e implicancia económica de la estructura. La EHE-08 sugiere un valor de 50 años para edificios de vivienda u oficinas, puentes pequeños, estructuras civiles de repercusión económica baja o media y de 100 años para edificios de gran envergadura, estructuras de importancia especial y repercusión económica alta.

Identificación de las clases de exposición ambiental a las que puede estar sometida la estructura. El tipo de exposición se clasifica de acuerdo a los factores agresivos presentes en el medio. La Instrucción española presenta una clasificación similar a la propuesta por los distintos Códigos y Reglamentos (CIRSOC 201-05; EN-206) en especial cuando se refiere a los factores agresivos que conducen a la corrosión de las armaduras.

Selección del modelo de durabilidad correspondiente a cada proceso de degradación. Una vez que se ha identificado el proceso de degradación que prevalece y el mecanismo de transporte que rige el ingreso del agresivo a través del hormigón, se debe modelar la velocidad de avance del deterioro. La EHE-08, en el Anejo 9 referido a “Consideraciones adicionales sobre durabilidad”, propone dos modelos, uno aplicable a la corrosión de las armaduras inducida por cloruros y otro por carbonatación del recubrimiento, a través de los cuales es posible estimar la vida útil (t_L).

Selección del estado límite. A los estados límite último y de servicio la Instrucción EHE-08 incorpora el *estado límite de durabilidad*, que contempla las acciones físicas y químicas que pueden degradar al hormigón o a las armaduras hasta valores máximos admisibles. Conviene recordar que los estados límite se definen como aquellas situaciones que al ser superadas, la estructura no cumple con alguna de las funciones para las que ha sido proyectada.

Comprobación del estado límite. Para el proceso de degradación identificado como relevante para la durabilidad de la estructura, la Instrucción contempla un procedimiento de carácter semiprobabilístico, de forma análoga al adoptado para el resto de los estados límite, en el que se debe satisfacer la condición:

$$t_L > t_d$$

t_L : Valor estimado de la vida útil.

t_d : Valor de cálculo de la vida útil, se lo define como el producto de la vida útil de proyecto por un coeficiente de seguridad: $t_d = \gamma_t \cdot t_g$

γ_t : Coeficiente de seguridad de vida útil, se propone adoptar $\gamma_t = 1.10$, valor que se corresponde con una probabilidad de falla de 0.50 en el caso de una función de distribución log-normal y un coeficiente de variación de la vida útil del 50% (el valor exacto sería 0.12).

t_g : Vida útil de proyecto.

Modelo Propuesto por la Instrucción EHE-08 para el Ingreso de Cloruros

Para estimar la vida útil (t_L), cuando el proceso de degradación que prevalece es la corrosión inducida por cloruros, la EHE se basa en el modelo general propuesto por Tuutti. De acuerdo a este modelo la vida en útil incluye dos períodos bien diferenciados, el de iniciación (t_i), que corresponde al tiempo que tarda el frente de penetración del agresivo en alcanzar una concentración crítica sobre la armadura provocando el inicio de la corrosión; y el de

propagación (t_p), que es el tiempo durante el cual la armadura se deteriora hasta llegar a un valor inaceptable para la seguridad, funcionalidad o estética de la estructura.

Para calcular el *período de iniciación* se utiliza la ley de la raíz cuadrada del tiempo, relación que es aplicable de manera estricta a los procesos en los que el factor agresivo ingresa por difusión pero que también permite ajustar satisfactoriamente a los perfiles obtenidos de estructuras reales.

$$t_i = (d/K_{cl})^2 \quad (1)$$

Donde t_i representa el tiempo, en años, para que la concentración de cloruros alcance un valor crítico (C_{th}) a una profundidad d expresada en mm y K_{cl} es el coeficiente o constante de ingreso que depende del factor agresivo, características del material y condiciones ambientales. El valor de K_{cl} se lo puede obtener mediante la ecuación (2).

$$K_{cl} = \alpha (12 \cdot D_{(t)})^{0.5} \cdot (1 - ((C_{th} - C_b)/(C_s - C_b))^{0.5} \quad (2)$$

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:

$$D_{(t)} = D_{(t_0)} \cdot (t_0/t)^n \quad (3)$$

$D_{(t_0)}$ es el coeficiente de difusión aparente de cloruros a la edad t_0 y n es un factor que busca reflejar la disminución del coeficiente de difusión con la edad (envejecimiento).

El *período de propagación* se considera concluido cuando se produce una pérdida de sección de la armadura inadmisibles o cuando aparecen fisuras en el recubrimiento de hormigón. Se lo puede calcular con la expresión (4) que resulta de evaluar la disminución del diámetro de la armadura a partir de la ley de Faraday, considerando que la tasa de corrosión es proporcional a la intensidad de corrosión.

$$t_p = (80 r)/(\Phi V_{corr}) \quad (4)$$

donde t_p representa el tiempo de propagación en años, r es el espesor de recubrimiento en mm, Φ el diámetro de la armadura en mm y V_{corr} la velocidad de corrosión en $\mu m/año$.

Una vez determinados los valores de t_i y t_p se obtiene el valor estimado para la vida útil ($t_L = t_i + t_p$) que luego se debe comparar con la vida útil de cálculo (t_d) para ver si se cumple con el estado límite de durabilidad ($t_L > t_d$).

Análisis de los Valores Sugeridos para las Variables del Modelo

Cuando no se dispone de valores específicos referidos al hormigón que se diseña, la Instrucción EHE propone valores de referencia para las distintas variables involucradas en el modelo.

Valores propuestos para C_b , C_{th} y C_s

Respecto del contenido de cloruros aportado por las materias primas (C_b), en el Anejo 9 no se mencionan valores máximos permitidos, los que si figuran en el Capítulo VII, Artículo 37° Durabilidad del hormigón y de las armaduras, en el que se sugiere que el contenido total de cloruros en el hormigón deberá ser inferior al 0.4% y 0.2% del peso del cemento en caso de armaduras pasivas y activas, respectivamente. Estos valores resultan similares a los incorporados en la EN 206, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Contenido crítico de cloruros según distintos reglamentos o normativa.

| País | Reglamento | Contenido crítico de Cl^- | | Referido a |
|-------------|------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------|
| | | Armado | Pretensado | |
| Brasil | NBR 6118 | 0.05% | | Agua de amasado |
| | NBR 9062 | | 0.05% | |
| España | EHE-08 | 0.4% | 0.2% | Cemento |
| EEUU | ACI 222 | 0,2% | 0,08 % | Cemento |
| | ACI 318 | 0,3 % | 0,06 % | Cemento |
| Europa | EN 206 | 0,4 % | 0,2 % | Cemento |
| Reino Unido | BS 8110 | 0,2 % | 0,1 % | Cemento |
| Japón | JPSE SP-2 | 0,6 kg/m ³ | 0,3 kg/m ³ | Hormigón |

Para la concentración crítica de cloruros (C_{th}) la EHE sugiere un valor de 0.6% y de 0.3% del peso de cemento en relación con la corrosión de las armaduras pasivas y activas, respectivamente. Estos valores se hallan dentro del intervalo sugerido en las investigaciones, aunque la mayoría de los Códigos aún no los han incorporado.

La concentración de cloruros en la superficie del hormigón (C_s) define la sollicitación ambiental. Se ha comprobado a través de experiencias personales [5] e internacionales [6] que C_s depende del microclima generado en las proximidades de la estructura y está condicionado por la dirección de vientos predominantes, intensidad de las precipitaciones, distancia a la costa y para la estructura emplazada en el mar C_s varía según se trate de zona sumergida, de marea o aérea. Por resultar sensible a muchas variables no hay consenso a nivel internacional respecto de los valores de C_s . En la Tabla 2 se presentan los valores de C_s propuestos por la Instrucción, donde puede observarse que están vinculados a las clases generales de exposición en las que el medio aporta cloruros: Clase III, cloruros de origen marino y Clase IV, cloruros de origen diferente al medio marino. Debe destacarse que aún existen discordancias con

respecto a las distancias respecto a la costa a partir de la cual se aplica el cambio en los valores de C_s .

Tabla 2: Concentración de cloruros en la superficie del hormigón (C_s)

| Clase general de exposición | IIIa marina aérea | | IIIb marina sumergida | IIIc zona de marea y salpicaduras | IV Cloruros de origen diferente al marino |
|------------------------------|-------------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------------------|--|
| | Distancia respecto a la costa | Hasta 500 m | 500m a 5000 m | Cualquiera | |
| C_s % en peso del hormigón | 0.14 | 0.07 | 0.72 | 0.50 | 0.50 |

Valores propuestos para $D_{(t_0)}$ y n

El coeficiente de difusión $D_{(t)}$ es la variable que refleja la calidad del hormigón. La EHE lo incorpora en el modelo propuesto y además considera, a través de la Ec. 3, la variación del coeficiente de difusión con la edad del hormigón. Cuando no se han determinado los valores de n y $D_{(t_0)}$ para el hormigón en estudio, sugiere adoptar para n un valor igual a 0.5 y para $D_{(t_0)}$ los valores indicados en la Tabla 3, obtenidos para un t_0 de 0.0767 de año (28 días).

Tabla 3: 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 |

Conforme a la nomenclatura que adopta la normativa española para los cementos, el CEM I contiene un máximo de un 5% de adiciones. El CEM II/A-V entre 6-20% de ceniza volante silíceas. El CEM III es un cemento de escorias de alto horno que presenta tres variantes: CEM III/A, CEM III/B y CEM III/C, las diferencias radican en los porcentajes de escoria que varían entre el 36 al 95%, en la Tabla 3 no se especifica la composición del CEM III.

Si se analizan los valores presentados en la Tabla 3, surgen distintas consideraciones a tener en cuenta:

- La influencia de la razón agua/cemento en el valor del coeficiente $D_{(t_0)}$ resulta más significativa en el cemento sin adiciones (CEM I), hecho que se visualiza mejor en la Figura 1.

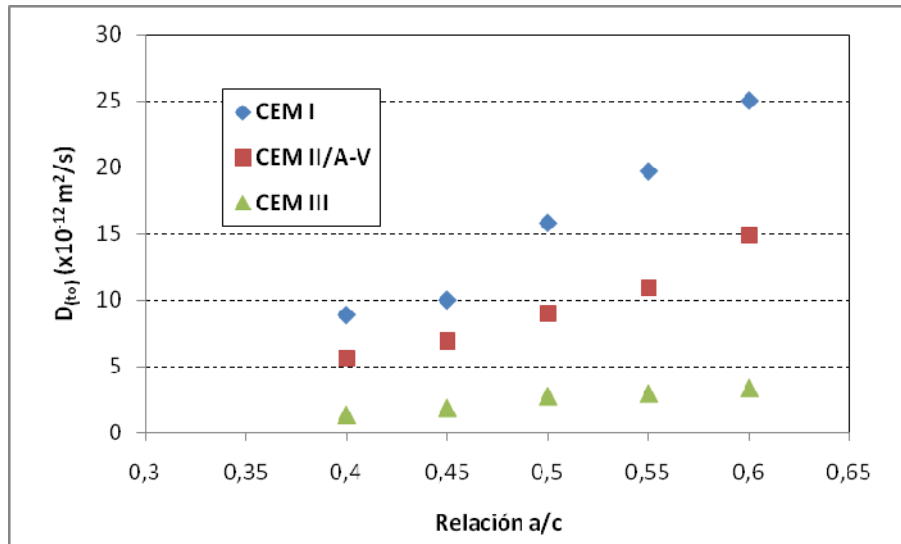


Fig. 1: Valores sugeridos de $D_{(t_0)}$ en función de a/c

- Los cementos con adiciones permiten reducir notablemente el $D_{(t_0)}$, en particular el cemento que contiene escoria. Al pasar del CEM I a CEM III, la reducción del $D_{(t_0)}$ supera el 80% para las distintas razones agua/cemento. Además, para CEM III y a/c de 0.60 el coeficiente $D_{(t_0)}$ resulta un 62% menor que el correspondiente al CEM I y razón a/c igual a 0.40.

Los valores del $D_{(t_0)}$ sugeridos en la Tabla 3 reflejan, con buena aproximación, los resultados obtenidos en experiencias propias [7] y a nivel internacional, en las que se ha comprobado que en medios con cloruros se le debe prestar más atención al tipo de cemento que a la razón agua/cemento.

Respecto del valor del factor de edad n , en principio puede variar entre 0 (cuando se considera que el coeficiente de difusión de cloruros permanece constante en el tiempo) y 1 (cuando el hormigón ha sido bloqueado a futuros ingresos de cloruros). De acuerdo a las experiencias n depende del tipo de cemento y de la razón a/c . Datos publicados por Bamforth [8] indican valores de n próximos a 0.25 cuando se utilizan cementos sin adiciones, y entre 0.6 y 0.8 para cementos con escorias de alto horno, cenizas volantes o humos de sílice. Estos valores resultan similares a los recomendados por el Boletín N° 34 del fib para zona de marea [2]. Estudios realizados en Noruega en las últimas tres décadas y sobre estructuras en servicio [9] confirman la variación de n con el tipo de cemento.

Para analizar el valor propuesto por la EHE al factor n , se determina la reducción del $D_{(t)}$ según la Ec. 3, considerando n igual a 0.5 y t igual a 50 o 100 años, valores que se corresponden con la vida útil de proyecto a la que hace referencia la EHE. Con los reemplazos mencionados surge que el coeficiente de difusión $D_{(t=50\text{años})}$ representa tan sólo un 3,9% y $D_{(t=100\text{años})}$ un 2.8% del valor asignado al $D_{(t_0)}$ determinado a la edad de 28 días. Tal como está planteada la Ec. 3, dicha reducción resulta independiente de la razón agua/cemento y del tipo de cemento, ya que depende únicamente del factor $(t_0/t)^n$. En la Tabla 4 se presentan los valores del $D_{(t_0)}$ y del $D_{(t=50\text{años})}$ para los distintos tipos de cemento y razones agua/cemento.

Tabla 4: Coeficientes $D_{(t_0)}$ ($\times 10^{-12}$ m²/s) y $D_{(t=50)}$ ($\times 10^{-12}$ 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 | |
|-----------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | $D_{(t_0)}$ | $D_{(t=50)}$ | $D_{(t_0)}$ | $D_{(t=50)}$ | $D_{(t_0)}$ | $D_{(t=50)}$ | $D_{(t_0)}$ | $D_{(t=50)}$ | $D_{(t_0)}$ | $D_{(t=50)}$ |
| CEM I | 8.9 | 0.35 | 10.0 | 0.30 | 15.8 | 0.62 | 19.7 | 0.77 | 25.0 | 0.98 |
| CEM II/A-V | 5.6 | 0.22 | 6.9 | 0.27 | 9.0 | 0.35 | 10.9 | 0.43 | 14.9 | 0.58 |
| CEM III | 1.4 | 0.05 | 1.9 | 0.07 | 2.8 | 0.11 | 3.0 | 0.12 | 3.4 | 0.13 |

La reducción del $D_{(t=50)}$ resulta, a criterio de los autores del presente trabajo, excesiva. Como n está asociado a una función exponencial, cuanto mayor es n menor será el valor del $D_{(t)}$, puede que considerar n igual a 0.5 resulte un valor alto para situarse del lado de la seguridad cuando se utilizan cementos sin adiciones ya que conduciría a sobrevalorar la vida útil inferida por el modelo.

Aplicación del Modelo al Diseño de Hormigones en Ambientes con Cloruros

Conforme a la metodología propuesta por la EHE-08 se ha evaluado, en forma teórica, la resistencia al ingreso de cloruros de hormigones armados con armaduras pasivas y diseñados de acuerdo a los requisitos prescriptivos que surgen de considerar el medio en contacto con la estructura. En la Tabla 5 se presentan, para las distintas clases de exposición, los requisitos sugeridos por la normativa española.

Tabla 5: Parámetros de dosificación para las clases de exposición III y IV.

| Clase de exposición | Subclase | Máxima razón a/c | Mínimo contenido de cemento [kg/m ³] | Resistencia mínima [MPa] |
|--|----------|------------------|--|--------------------------|
| Medio marino | IIIa | 0.50 | 300 | 30 |
| | IIIb | 0.50 | 325 | 30 |
| | IIIc | 0.45 | 350 | 35 |
| Cloruros de origen diferente al medio marino | IV | 0.50 | 325 | 30 |

Los requisitos prescriptivos vinculados a la dosificación del hormigón resultan similares a los que figuran en los distintos Reglamentos. El aspecto innovador de la EHE-08 es el que se refiere a los recubrimientos mínimos, ya que los define en función de la clase de exposición, tipo de cemento y vida útil de proyecto, tal como se aprecia en la Tabla 6.

Tabla 6: Recubrimiento mínimo (mm) para las clases de exposición III y IV.

| Cemento | Vida útil de proyecto (tg) [años] | Clase general de exposición | | | |
|---|--------------------------------------|-----------------------------|------|------|-----|
| | | IIIa | IIIb | IIIc | IV |
| CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%. | 50 | 25 | 30 | 35 | 35 |
| | 100 | 30 | 35 | 40 | 40 |
| Resto de los cementos | 50 | 45 | 40 | (*) | (*) |
| | 100 | 65 | (*) | (*) | (*) |

Las situaciones indicadas con (*) se corresponden con recubrimientos excesivos, desaconsejables desde el punto de vista de la ejecución del elemento. En estos casos se recomienda comprobar el estado límite de durabilidad a partir de las características del hormigón prescrito en el Pliego de Especificaciones Técnicas del Proyecto.

Con los valores sugeridos por el modelo y considerando los requisitos de las Tablas 5 y 6, para una vida útil de proyecto de 50 años, se han calculado los tiempos de inicio (t_i) y propagación (t_p) de la corrosión y el valor estimado de la vida útil (t_L), para los cementos CEM I y CEM III. Los resultados obtenidos se indican en la Tabla 7. Para calcular el t_p las velocidades de corrosión (V_{corr}) utilizadas son las que se corresponden con los valores sugeridos por el Anejo 9 según las distintas clases de exposición y para la armadura se ha considerado un diámetro nominal de 20 mm.

Tabla 7: Vida útil estimada por el modelo para los cementos CEM I y CEM III.

| Clase de exposición | Tipo de cemento | t_i [años] | t_p [años] | t_L [años] |
|---------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| IIIa | CEM I | 43 | 9 | 52 |
| | CEM III | 74 | 5 | 79 |
| IIIb | CEM I | 11 | 40 | 51 |
| | CEM III | 35 | 30 | 65 |
| IIIc | CEM I | 25 | 4 | 29 |
| | CEM III | 84 | 3 | 87 |
| IV | CEM I | 15 | 9 | 24 |
| | CEM III | 52 | 7 | 59 |

A simple vista se observa que la vida útil estimada por el modelo cuando se utiliza cemento CEM I no cumple, para las clases de exposición analizadas, con el estado límite de durabilidad, ya que no supera el valor de cálculo de la

vida útil (t_d) igual a 55 años. Situación que se revierte para el CEM III que en todos los medios verifica $t_L > t_d$.

Si se analizan los valores de los tiempos de inicio y propagación de la corrosión, surge que para las clases de exposición IIIa, IIIc y IV el t_i supera ampliamente al t_p , hecho que se vincula directamente al contenido de humedad en el hormigón como consecuencia del medio de exposición. En las clases IIIa, IIIc y IV, el hormigón no está saturado, razón por la cual los cloruros se demoran en alcanzar a las armaduras, una vez que se inicia la corrosión el contenido de humedad y oxígeno en los poros del hormigón proporcionan las condiciones óptimas para el avance de la corrosión. Cuando el hormigón está sumergido y por lo tanto saturado, clase IIIb, la reducción del t_i se debe a la mayor velocidad de difusión de los cloruros, una vez que se inicia la corrosión la menor disponibilidad de oxígeno en los poros del hormigón reduce la velocidad de corrosión prolongado el t_p .

Los tiempos de vida útil inferidos por el modelo resultan aceptables respecto del conocimiento disponible en el proceso de corrosión de las armaduras inducida por cloruros. Para definir el grado de acierto del modelo resulta indispensable compararlo con el comportamiento de estructuras en servicio, tarea que permitirá mejorar el valor propuesto para las distintas variables, en particular la sollicitación ambiental (C_s) y el coeficiente de difusión a edad avanzada ($D_{(t)}$).

Aplicación del Modelo a Valores Experimentales

En el modelo propuesto por la EHE para el ingreso de cloruros, se han reemplazado los valores de C_s y $D_{(t_0)}$ sugeridos en la Instrucción por valores obtenidos en experiencias propias de laboratorio en las que se han evaluado hormigones elaborados con cemento pórtland normal (CPN) y cemento pórtland con escoria (CPE), denominados HCPN y HCPE, respectivamente. En ambos tipos de hormigones se ha mantenido constante la razón agua/cemento (0.50), el contenido de cemento (360 kg/m^3) y de agregados.

La resistencia de los hormigones al ingreso de cloruros fue evaluada a través de un ensayo convencional de inmersión en una solución de NaCl al 3% en peso, durante 120 días, edad en la que se determinaron C_s y $D_{(t_0)}$ a partir de los perfiles de cloruros.

Los valores de $D_{(t)}$ surgen de aplicar la Ec. 3, considerando un factor de edad igual a 0.5 y una vida útil de proyecto de 50 años. En la Tabla 8 se informan los valores de C_s , $D_{(t_0)}$ y $D_{(t)}$ obtenidos para los hormigones en estudio.

Tabla 8: Valores de C_s , $D_{(t_0)}$ y $D_{(t)}$ correspondientes a los hormigones diseñados en laboratorio.

| Tipo de Hormigón | C_s [% en peso de hormigón] | $D_{(t_0)}$ [$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$] | $D_{(t)}$ [$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$] |
|------------------|----------------------------------|---|---|
| HCPN | 0.21 | 17.3 | 1.40 |
| HCPE | 0.74 | 3.9 | 0.32 |

Para calcular los tiempos de inicio de la corrosión se utilizaron las ecuaciones 1 y 2, en las que se han reemplazado los valores sugeridos para C_s

y D_{t_0} por los obtenidos experimentalmente, asumiendo para el resto de las variables los valores propuestos por la EHE para la clase de exposición IIIb. Los resultados se presentan en la Tabla 9 en la que también se incluyen, a modo de comparación, los tiempos obtenidos para los CEM I y CEM III informados en la Tabla 7.

Tabla 9: Vida útil estimada para los hormigones diseñados en laboratorio y para los sugeridos por el modelo considerando CEM I y CEM III.

| Tipo de Hormigón | | t_i [años] | t_p [años] | t_L [años] |
|--------------------------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Diseñados en laboratorio | HCPN | 10 | 40 | 50 |
| | HCPE | 12 | 30 | 42 |
| Sugeridos por el modelo | CEM I | 11 | 40 | 51 |
| | CEM III | 35 | 30 | 65 |

En los hormigones elaborados con CPN y CEM I los t_i resultan prácticamente iguales, la diferencia es de tan sólo un año. En los hormigones con escoria, el HCPE presenta un t_i significativamente menor que el correspondiente al CEM III debido a la diferencia en los coeficientes de difusión $D_{(t)}$, $0.32 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ para el HCPE y de $0.11 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ para el CEM III. Esta diferencia seguramente se vincula al porcentaje de escoria presente en el cemento. La EHE al proponer valores del coeficiente D_{t_0} para el CEM III, no especifica la composición (CEM III/A, CEM III/B o CEM III/C), por lo tanto se desconoce el porcentaje de escoria, que puede variar entre el 36 al 95%. En el hormigón diseñado en laboratorio con cemento CPE el contenido de escoria no supera el 30%.

Los valores del tiempo de propagación que se informan en la Tabla 8 se han calculado con la Ec. 4, expresada en función de variables que no incluyen las determinadas experimentalmente, razón por la cual coincide el t_p de los hormigones HCPN y CEM I, lo mismo sucede para el HCPE y CEM III.

Cuando se suman los tiempos de inicio y propagación de la corrosión, la vida útil inferida alcanza valores razonables para los requisitos prescriptivos adoptados en el diseño de los hormigones de laboratorio. No obstante, si se comparan los tiempos de inicio de la corrosión de los hormigones HCPN y HCPE, no se evidencian los beneficios derivados del empleo de cemento con escoria. Probablemente, para obtener el coeficiente de difusión a edad avanzada $D_{(t)}$, se debería ajustar el factor de edad n al tipo de cemento, tal como lo sugieren las experiencias [8], [9].

Conclusiones

La incorporación del estado límite de durabilidad y los modelos para inferir la vida útil en servicio respecto del proceso de corrosión de las armaduras, propuestos por la Instrucción EHE-08, representan un logro importante en el diseño por durabilidad. No obstante, estos avances deben ser considerados con precaución ya que las variables involucradas están sujetas a cambios y ajustes permanentes que derivan de la retroalimentación del desempeño de las estructuras en servicio.

En el análisis realizado en el presente trabajo, referido a la corrosión inducida por cloruros, se ha comprobado que los valores sugeridos para el coeficiente de difusión de cloruros a corta edad ($D_{(t_0)}$) reflejan, con buena aproximación, los resultados obtenidos en experiencias propias y a nivel internacional en las que se ha comprobado que en medios con cloruros se le debe prestar más atención al tipo de cemento que a la razón agua/cemento.

Hasta que no se disponga de mayor información respecto del factor de edad n , los valores sugeridos deben ser elegidos de manera conservativa, en especial cuando se utilizan cementos sin adiciones, para evitar sobrevalorar la vida útil inferida por el modelo.

La propuesta de la EHE-08 respecto de los recubrimientos mínimos resulta innovadora al definirlos en función de la clase de exposición, tipo de cemento y vida útil de proyecto.

Referencias

- [1] Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón CIRSOC 201. Capítulo 2. Especificaciones por Resistencia y Durabilidad. (2005).
- [2] Fib Bulletin 34. Model Code for Service Life Design. Technical Report. Task Group 5.6. ISSN 1562-3610. (2006).
- [3] Instrucción del Hormigón Estructural, EHE-08. Anejo 9. Consideraciones adicionales sobre durabilidad. (2008).
- [4] L. Eperjesi, E. Ferreira Hirschi, A. Vicente. *Avances en la Normalización de la Resistencia a la Carbonatación de Estructuras de Hormigón Armado*. Congreso Hormigón 2010. IV Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón. 18ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, pp. 299-306. (2010).
- [5] L. Eperjesi, E. Ferreira Hirschi, A. Giovambattista. *Consideraciones a tener en cuenta en el diseño de estructuras en ambientes con cloruros*. 15º Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. CD, Trabajo N° 70. (2003).
- [6] Finn Fluye. *Service Life Design of Concrete Structures. From Theory to Standardisation*. Dura Net, Third Workshop, Marine chlorides. pp. 47-68. Tromsø, June (2001).
- [7] A. Giovambattista, L. Eperjesi, L. Traversa, G. Saralegui, E. Ferreira Hirschi. *Performance de hormigones elaborados con distintos tipos de cementos*. Proc. Congreso de Ingeniería 2000. CD, pp. 421-432. (2000).
- [8] P. B. Bamforth. *The derivation on input data for modelling chloride ingress from eighth year UK coastal exposure trials*. Mag. of Concrete Research. Vol 51, N° 2, pp 87-96. (1999).
- [9] G. Markeset, O. Skjølsvold. *Time dependent chloride diffusion coefficient-field studies of concrete exposed to marine environment in Norway*. Eds. K. Van Breugel, G. Ye, Y. Yuan. Proc. 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure, pp. 83-90. (2010).