

AVANCES EN LA NORMALIZACION DE LA RESISTENCIA A LA CARBONATACION DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO

Eperjesi, Lilian N.; Ferreira Hirschi, Enrique S.; Vicente, Ariel A.

Laboratorio de Estudio de Materiales y Estructuras para la Ingeniería Civil (LEMEIC).
Departamento de Construcciones. Facultad de Ingeniería. UNLP.
Calle 115 y 48. E-Mail: eperjesi@ing.unlp.edu.ar

Resumen

La nueva Instrucción del Hormigón Estructural, EHE-08, que regula el proyecto y ejecución de las estructuras de hormigón, ha generado un fuerte impacto en el medio por su voluntad de dar respuesta a las demandas sociales de sustentabilidad. A tal efecto contempla el desarrollo de estrategias pro-activas para disminuir y amortiguar los impactos en el tiempo mediante la extensión de la vida útil de las estructuras, a partir de los postulados de durabilidad.

En este trabajo se evalúa el avance de la carbonatación en estructuras existentes y se lo compara con el modelo de carbonatación sugerido por la EHE-08, propuesto en el Anexo referido a las consideraciones adicionales sobre la durabilidad. También 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 a la carbonatación. En función de la resistencia característica del hormigón y del tipo de cemento utilizado se discute el grado de validez de los espesores de recubrimientos recomendados por la EHE-08 para distintas clases de exposición.

Los resultados obtenidos conducen a interpretaciones valiosas. El coeficiente de seguridad de vida útil propuesto e involucrado en la comprobación del estado límite de durabilidad permite estimaciones que deben complementarse y retroalimentarse con la evaluación del desempeño de las estructuras en servicio.

Palabras claves: corrosión, carbonatación, estado límite de durabilidad, modelos de deterioro.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha tomado conciencia que la industria del hormigón consume una gran cantidad de recursos naturales y energía, y es responsable de grandes emisiones de dióxido de carbono, gas que contribuye al calentamiento global. En la búsqueda de un desarrollo sustentable han surgido distintas propuestas tales como promover el empleo de importantes volúmenes de adiciones minerales activas, incorporadas en cementos mezcla o directamente al hormigón; difundir el uso de agregados reciclados y prolongar la vida en servicio de las estructuras. No hay dudas que el ahorro energético, la durabilidad de las estructuras y la preservación del medio ambiente son pilares importantes en los que se apoya el desarrollo sustentable de la industria de la construcción.

En tal sentido, prolongar la vida en servicio de las estructuras constituye una estrategia interesante a través de la cual se reduce el consumo de materiales, hecho que a su vez permite conservar recursos naturales no renovables, disminuir el consumo energético y la contaminación derivada de la industrialización de los distintos materiales de construcción.

Es mucho lo que se ha avanzado en el diseño por durabilidad, no existen dudas que los postulados en los que se basa resultan indiscutibles. En la actualidad estamos atravesando una etapa de transición, para que las experiencias derivadas de la investigación tengan

validez deben ser reglamentadas y quedar incluidas en los Códigos. Al respecto, la mayoría de los Reglamentos cuentan ya con una extensa clasificación del medio de exposición en función del proceso de deterioro que puede afectar al hormigón y a las armaduras. 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 de transporte que aportan información sobre la conectividad de la estructura porosa y del factor de retardo. 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).

El punto más cuestionado en el diseño por durabilidad, quizás por lo difícil que resulta implementarlo en la práctica, es el referido a definir la velocidad de ingreso del agresivo a través del hormigón mediante modelos sencillos y accesibles que permitan inferir, con cierta fiabilidad, la vida en servicio conforme al proceso de deterioro que prevalece. No obstante existen avances al respecto. 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, con la intención que el material contenido en dicho documento pueda ser incorporado en el nuevo Código Modelo de la fib. Los modelos presentados en el Boletín 34 resultan accesibles para quienes 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 este trabajo se realiza un análisis de las variables involucradas en el modelo propuesto por la EHE-08, ponderando la influencia de cada una de ellas en la resistencia del hormigón frente a la carbonatación. También se evalúa el avance de la carbonatación en estructuras existentes con más de treinta años en servicio y se lo compara con el modelo propuesto por la Instrucción.

MÉTODO GENERAL PARA EL CÁLCULO DEL ESTADO LÍMITE DE DURABILIDAD

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, 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 anexo referido a Consideraciones adicionales sobre durabilidad, propone dos modelos para la corrosión de las armaduras inducida por cloruros y 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, puede considerarse que 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 define la vida útil de cálculo, 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 DE CARBONATACIÓN PROPUESTO POR LA INSTRUCCIÓN EHE-08

El modelo que sugiere aplicar la EHE-08 para estimar la vida útil (t_L), cuando el proceso de degradación que prevalece es la corrosión por carbonatación, se basa en el modelo general propuesto por Tutti. 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 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 aplica la ley de la raíz cuadrada del tiempo:

$$(1) \quad t_i = (d/Kc)^2 \quad \text{ecuación}$$

Donde t_i representa el tiempo, en años, para que la carbonatación penetre una profundidad d expresada en mm y Kc es el coeficiente o constante de carbonatación que depende del proceso agresivo, características del material y condiciones ambientales. El valor de Kc se lo puede obtener mediante la ecuación (2).

$$K_c = C_{env} \cdot C_{air} \cdot a \cdot (f_{cm})^b \quad \text{ecuación}$$

(2)

C_{env} : Coeficiente de ambiente, tiene en cuenta el contenido de humedad en contacto con el hormigón. Se le asigna un valor de 1 para ambientes protegidos de la lluvia y 0.5 para expuestos a la lluvia.

C_{air} : Coeficiente de aireantes, contempla el contenido de aire intencionalmente incorporado al hormigón. Se le asigna un valor de 1 y de 0.7 para contenidos de aire menores, y mayores o iguales al 4.5%, respectivamente.

f_{cm} : Resistencia media del hormigón a compresión, en MPa, puede estimarse a partir de la resistencia característica especificada (f_{ck}), considerando que $f_{cm} = f_{ck} + 8$.

a, b: Parámetros que dependen del tipo de ligante.

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 (3).

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

(3)

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 $\mu\text{m/año}$. A falta de datos experimentales específicos para el hormigón y las condiciones ambientales concretas de la obra, la velocidad de corrosión puede considerarse igual a 3 $\mu\text{m/año}$ para ambientes con humedad elevada y 2 $\mu\text{m/año}$ para humedad media.

De acuerdo al planteo efectuado, la vida útil estimada resulta de la suma de los períodos de iniciación y propagación. Este tiempo t_L es el que interviene en la comprobación del estado límite de durabilidad, debe ser comparado con el valor de cálculo de la vida útil t_d .

APLICACIÓN Y ANÁLISIS DEL MODELO DE CARBONATACIÓN

Conforme a la metodología propuesta por la EHE-08 se ha evaluado, en forma teórica, el avance de la carbonatación para una vida útil de proyecto de 50 años, en hormigones con valores de resistencia de diseño (f_{ck}) de 20, 25, 30 y 35 MPa, elaborados con cemento pórtland normal y contenidos de aire incorporado inferior y superior al 4.5%.

En la Tabla 1 se presentan los valores de profundidad de carbonatación y el coeficiente o constante de carbonatación para cada resistencia de diseño, según la combinación de variables referidas al contenido de aire incorporado y al tipo de ambiente.

Tabla 1: Profundidad de carbonatación y coeficiente de carbonatación para distintas resistencias de diseño.

| Resistencia de Diseño [MPa] | Avance de la Carbonatación [mm] / Coeficiente de Carbonatación [mm/año ^{0.5}] | | | |
|-----------------------------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Protegido de la lluvia | | Expuesto a la lluvia | |
| | Contenido de aire < 4.5% | Contenido de aire ≥ 4.5% | Contenido de aire < 4.5% | Contenido de aire ≥ 4.5% |
| 20 | 44 / 6.24 | 31 / 4.37 | 22 / 3.12 | 15 / 2.18 |
| 25 | 33 / 4.72 | 23 / 3.30 | 17 / 2.36 | 12 / 1.65 |
| 30 | 26 / 3.71 | 18 / 2.60 | 13 / 1.86 | 9 / 1.30 |
| 35 | 21 / 3.01 | 15 / 2.11 | 11 / 1.50 | 7 / 1.05 |

Del análisis surge que el microclima es la variable que más afecta el avance de la carbonatación, ya que para un mismo contenido de aire se duplica al pasar de un ambiente

expuesto a la lluvia a otro protegido de la lluvia, hecho que puede hacerse extensivo a todos los niveles de resistencia analizados.

El contenido de aire incorporado es otra de las variables a la que se le atribuye un peso importante. Para un mismo microclima y nivel de resistencia, los hormigones con un contenido de aire igual o superior al 4.5% reducen en un 30 % la profundidad de carbonatación, respecto de los que presentan contenidos inferiores al 4.5%.

Para un mismo microclima y contenido de aire, al pasar de un nivel resistente al siguiente la carbonatación se reduce, en términos medio, un 22%.

Sin abrir juicio sobre los valores asignados a las variables involucradas en la determinación de la constante K_c , conviene resaltar la importancia que se le atribuye al microclima, en particular al contenido de humedad que rodea a la estructura.

También se ha comparado el avance de la carbonatación con los recubrimientos mínimos sugeridos por la EHE-08. Al respecto conviene tener presente que la Instrucción fija valores de recubrimientos mínimos en función de la resistencia característica del hormigón, tipo de cemento, clase de exposición y vida útil prevista en el proyecto. El recubrimiento mínimo de una armadura pasiva es el que debe cumplirse en cualquier punto de la misma. Para garantizar estos valores mínimos se define un recubrimiento nominal que resulta de la suma del valor mínimo más un margen que depende del nivel de control de ejecución, este valor nominal es el que debe figurar en los planos y que servirá para definir los separadores.

Considerando una vida útil de proyecto de 50 años, para los hormigones con resistencias características iguales o mayores a 25 MPa y menores a 40 MPa, en los que se ha utilizado cemento pórtland normal; los recubrimientos mínimos sugeridos para las clases de exposición en las que el proceso de degradación es la corrosión de las armaduras por carbonatación resultan ser de 15 mm para la clase IIa (humedad ambiente alta) y de 20 mm para la clase IIb (humedad ambiente media). Los recubrimientos nominales, considerando un control de ejecución normal, deberían fijarse en 25 y 30 mm para las clases IIa y IIb, respectivamente.

De acuerdo a este tipo de análisis, para que las armaduras permanezcan libres de corrosión durante la vida útil de proyecto considerada, si la clase de exposición se corresponde con la IIb se deberían diseñar hormigones con resistencias superiores a 35 MPa si el contenido de aire es inferior al 4.5% y de 30 MPa para contenidos de aire mayores o iguales a 4.5%. Para la clase de exposición IIa las resistencias mínimas de diseño serían de 30 MPa y 20 MPa, según que el contenido de aire incorporado sea inferior o superior al 4.5%, respectivamente. Puede observarse como efecto combinado del microclima y contenido de aire condicionan las resistencias mínimas de diseño.

En las figuras 1 y 2 se representa el avance de la carbonatación para las resistencias de diseño analizadas, contenido de aire incorporado menor al 4.5%, ambiente protegido de la lluvia y expuesto a la lluvia, respectivamente. En cada gráfico se ha incluido el recubrimiento mínimo sugerido por la Instrucción, para visualizar en forma rápida la edad estimada en que se produce la despasivación de las armaduras.

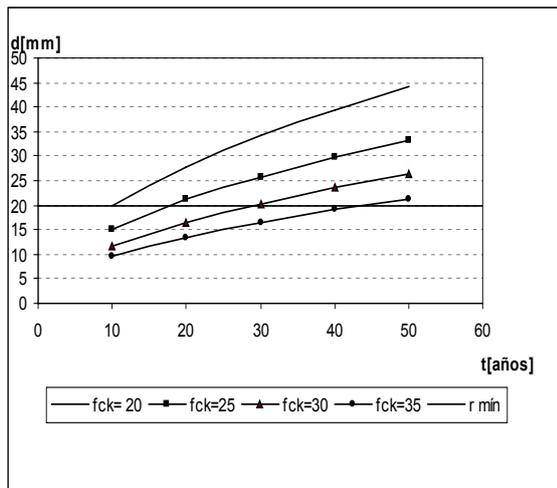


Figura 1

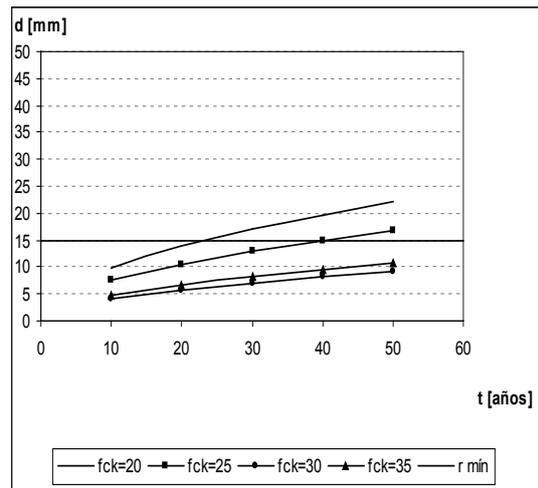


Figura 2

Avance de la carbonatación para las resistencias de diseño analizadas, contenido de aire incorporado menor al 4.5%, ambiente protegido de la lluvia. **Figura 1.:** Recubrimiento mínimo de 20 mm. **Figura 2:** Recubrimiento mínimo de 15 mm.

APLICACIÓN DEL MODELO A ESTRUCTURAS EN SERVICIO

En puentes existentes con más de treinta años en servicio se ha determinado, en pilas y estribos, la profundidad y constante de carbonatación, y se han comparado los resultados experimentales con los valores teóricos que resultan del modelo propuesto por la EHE-08.

La constante de carbonatación experimental (K_{ce}) surge de aplicar la ecuación 1, en la que se incorpora la edad de cada puente y la profundidad de carbonatación (d_e) determinada en micro testigos. El valor teórico de la constante de carbonatación (K_{ct}) se calcula a partir de la ecuación 2, considerando que el hormigón fue elaborado con cemento pòrtland normal, con un contenido de aire incorporado inferior al 4.5% y que las estructuras están en contacto con un ambiente que presenta un contenido medio de humedad (clase IIb). Además, para cada puente, fue necesario determinar la resistencia media a compresión (f_{cm}). Con el valor de K_{ct} y la edad de la estructura se infiere el avance de la carbonatación (dt). En la Tabla 2 se presentan los valores de la profundidad de carbonatación determinados en forma experimental, resistencia a compresión, diámetro de las armaduras (θ) y espesores de recubrimiento (r) de cada estructura.

Tabla 2

| Estructura | Edad [años] | f_{cm} [MPa] | d_e [mm] | θ [mm] | r [mm] |
|----------------------------|-------------|----------------|------------|---------------|----------|
| Puente sobre A° San Carlos | 33 | 41 | 16 | 20 | 30 |
| Puente sobre A° Del Gato | 33 | 30 | 22 | 20 | 33 |
| Puente sobre A° Martín | 69 | 33 | 20 | 20 | 27 |
| Puente sobre A° Carnaval | 69 | 46 | 11 | 20 | 16 |
| Puente sobre RP 29 | 26 | 29 | 18 | 20 | 32 |

El tiempo de inicio de la corrosión se ha determinado con los valores del espesor de recubrimiento medidos in situ y K_{ce} . El período de propagación surge de aplicar la ecuación 3, con los recubrimientos y diámetros de las armaduras determinados mediante la apertura de ventanas de inspección, y una velocidad de corrosión que se corresponde con un contenido medio de humedad.

En la Tabla 3 se informa, para cada estructura, los valores experimentales y teóricos de la constante y profundidad de carbonatación, los tiempos correspondientes al inicio (t_i) y propagación (t_p) de la corrosión y el valor estimado de la vida útil (t_L).

Tabla 3

| Estructura | Kce [mm/año ^{0.5}] | Kct [mm/año ^{0.5}] | de [mm] | dt [mm] | t_i [años] | t_p [años] | t_L [años] |
|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Puente sobre A° San Carlos | 2.78 | 2.12 | 16 | 12 | 116 | 60 | 176 |
| Puente sobre A° Del Gato | 3.83 | 3.61 | 22 | 21 | 74 | 66 | 140 |
| Puente sobre A° Martín | 2.41 | 3.00 | 20 | 25 | 126 | 54 | 180 |
| Puente sobre A° Carnaval | 1.32 | 1.74 | 11 | 14 | 147 | 32 | 179 |
| Puente sobre RP 29 | 3.53 | 3.82 | 18 | 19 | 82 | 64 | 146 |

Del análisis efectuado surge que los valores teóricos de la constante y profundidad de carbonatación se aproximan de forma aceptable a los determinados experimentalmente.

De acuerdo a la EHE-08, los puentes evaluados deberían diseñarse para una vida útil de proyecto (t_g) de 100 años, que da lugar a una vida útil de cálculo (t_d) de 110 años. En la Tabla 3 se observa como el valor estimado para la vida útil (t_L) resulta muy superior al de la vida útil de cálculo. El modelo propuesto por la Instrucción probablemente sobrestime los tiempos inferidos para la vida útil, en particular los que se corresponden con la despasivación de las armaduras.

En la figura 3 se observa el progreso de la carbonatación, en las pilas y estribos, de dos de los puentes evaluados, el emplazado sobre el A° Carnaval y sobre la RP 29, elegidos por los distintos niveles de resistencia que presentan y por las diferencias entre los recubrimientos y constantes de carbonatación.

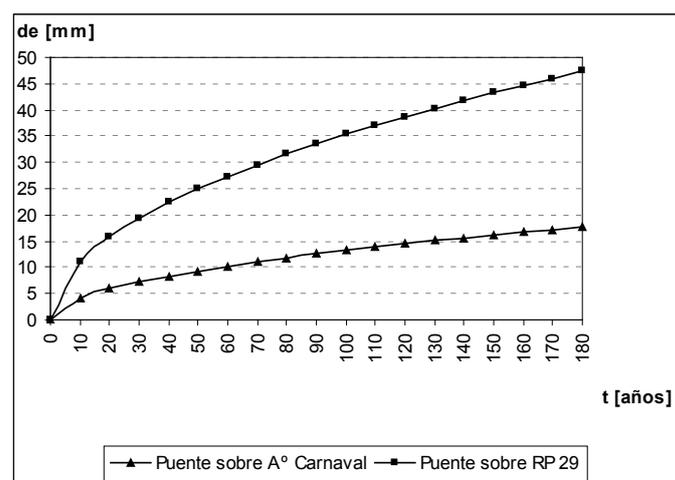


Figura 3: Progreso de la carbonatación en los puentes ubicados sobre A° Carnaval y RP 29.

Según se aprecia en la Figura 3, existe una notable diferencia en la resistencia a la carbonatación de los dos puentes. El ubicado sobre el A° Carnaval, con un recubrimiento de 16 mm y una relación recubrimiento/diámetro de la armadura inferior a la unidad alcanzaría,

de acuerdo al modelo, una vida útil de 179 años, permaneciendo las armaduras en estado pasivo durante 147 años. La prolongada vida en servicio estaría asociada a la calidad del hormigón, definida a través del nivel de resistencia (46 MPa), una adecuada compactación que se ha podido apreciar en los testigos y buena terminación superficial que se ha observado en los elementos estructurales analizados. La calidad del hormigón de recubrimiento ha quedado registrada en la constante de carbonatación, $1.32 \text{ mm/año}^{0.5}$, que presenta un valor significativamente bajo. El puente sobre RP 29, en contacto con un ambiente que se corresponde con el mismo tipo de exposición que el ubicado sobre el A° Carnaval, si bien verifica el estado límite de durabilidad, manifiesta una mayor velocidad de carbonatación, hecho que puede ser atribuido al menor nivel de resistencia y a una constante de carbonatación superior. De acuerdo a este tipo de análisis parece ser que la calidad del recubrimiento prevalece sobre el espesor.

CONCLUSIONES

Los principios del diseño por durabilidad han comenzado a incorporarse en los distintos Códigos y Reglamentos mediante requisitos prestacionales que vinculan el desempeño de la estructura con el medio de exposición y las características del hormigón de recubrimiento, en particular su calidad evaluada a través de la conectividad de la estructura porosa.

La incorporación del estado límite de durabilidad y los modelos para inferir la vida útil en servicio respecto de la corrosión de las armaduras, propuestos por la Instrucción EHE-08, representan un logro importante. No obstante, estos avances deben ser considerados con precaución. En el análisis realizado en el presente trabajo, referido a la corrosión por carbonatación, se ha comprobado la sensibilidad del modelo respecto de algunos de los parámetros involucrados, sobre los cuales existe poca información de los valores asignados.

Tanto los modelos de degradación como los requisitos prestacionales están sujetos a cambios y ajustes permanentes que derivan de la retroalimentación del desempeño de las estructuras en servicio.

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.