

APLICACION DEL MODELO DURACRETE PARA INFERIR EL AVANCE DE LA CARBONATACION

Fabián Iloro*, Lilian Eperjesi**, Luis Traversa*

* Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT-CIC).
Calle 52 e/ 121 y 122, La Plata, (+54) (221) 483-1141/44, direccion@lemit.gov.ar

** Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería, UNLP.

Calle 1 y 47, La Plata, (+54) (221) 425-8911, int. 3425, eperjesi@ing.unlp.edu.ar

Palabras claves diseño por durabilidad, carbonatación, modelo DuraCrete.

RESUMEN

En este trabajo se evalúan puentes viales ubicados en la provincia de Buenos Aires. Para cada puente se ha determinado el avance de la carbonatación (diferenciando entre zonas protegidas y expuestas a la lluvia), los espesores de recubrimiento, la concentración de CO₂ en el medio y se ha inferido la dosificación de los hormigones. Teniendo en cuenta las variables que definen la calidad del hormigón y las características del medio de exposición, se ha aplicado el modelo DuraCrete para estimar el avance de la carbonatación, valor que se compara con el real determinado in situ. También se ha estimado el tiempo de inicio de la corrosión. Del análisis de los resultados surge que los valores inferidos por el modelo para la profundidad de carbonatación se ajustan con buena aproximación a los reales, cuando los elementos se encuentran protegidos de la lluvia y surgen diferencias para los que están en contacto con la lluvia. La misma tendencia prevalece para las estimaciones de los tiempos de inicio de la corrosión.

INTRODUCCION

El Proyecto DuraCrete, Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures (1), ha reunido y organizado los conceptos básicos del diseño por durabilidad. Introduce una metodología que incluye modelos matemáticos para la degradación de las estructuras en función del tiempo y del medio de exposición, considerando la naturaleza estocástica de las variables que definen la calidad del hormigón y las características del medio. También incorpora el concepto de estados límites que permiten diferenciar entre el comportamiento correcto y el adverso de la estructura y contribuyen a definir el tiempo de vida en servicio.

El logro más importante del Proyecto DuraCrete ha sido el de introducir en el diseño por durabilidad la teoría de la confiabilidad, con principios similares a los utilizados en el diseño estructural. La propuesta del análisis de confiabilidad es determinar la probabilidad de que ocurra un cierto evento que marca el fin de la vida en servicio de la estructura. El evento se describe a través de una función de estado límite $g(x,t)$ donde “x” representa las variables básicas y “t” el tiempo.

Fabián Iloro, Personal de Apoyo CICBA, Doctorando UNS.

Lilian Eperjesi, Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería, UNLP.

Luis Traversa, Investigador Emérito CICBA

La función de estado límite se transforma en una ecuación de diseño, tal como se indica en la ecuación 1, que resulta positiva sólo cuando la estructura cumple con los requisitos que se han fijado en el proyecto.

$$g(x,t) = R(t) - S(t) > 0 \quad \text{ecuación 1}$$

Donde $R(t)$ y $S(t)$ son funciones de las variables aleatorias incluidas en x , representan la variación en el tiempo de la resistencia y solicitación, respectivamente. La naturaleza estocástica de la resistencia y solicitaciones se considera mediante planteos semi probabilísticos o probabilísticos.

En el enfoque semi probabilístico, para la comprobación del estado límite se utiliza una ecuación de diseño expresada en función de valores característicos y de coeficientes parciales de seguridad, que reducen las resistencias y aumentan las solicitaciones. El término "semi probabilístico" surge debido a que las variables básicas no se describen con su distribución de probabilidad completa sino mediante un único parámetro que es su valor característico. Los factores de seguridad junto con los valores característicos son introducidos con el fin de asegurar un cierto nivel de confiabilidad en el diseño. En el enfoque probabilístico, cada una de las variables que forman parte de la ecuación de diseño se representan a través una función de densidad de probabilidad.

Los modelos propuestos por DuraCrete son los más difundidos a nivel internacional para evaluar el proceso de corrosión de las armaduras por acción de los cloruros y por carbonatación del recubrimiento. Para estructuras a construirse permiten inferir el tiempo de vida útil, diseñar espesores de recubrimiento o definir la calidad del hormigón. En estructuras existentes, los modelos son utilizados para planificar las estrategias adecuadas de reparación y mantenimiento.

En este trabajo se evalúan estructuras existentes que corresponden a puentes viales ubicados en la provincia de Buenos Aires y emplazados en ambiente rural. Para cada puente se ha determinado el avance de la carbonatación (diferenciando entre zonas protegidas y expuestas a la lluvia) (2), los espesores de recubrimiento, la concentración de CO_2 en el medio y se ha inferido la dosificación de los hormigones (3). Teniendo en cuenta las variables que definen la calidad del hormigón y las características del medio de exposición, se ha aplicado el modelo DuraCrete (basado en un enfoque semi probabilístico) para inferir el avance de la carbonatación, valor que se compara con el real determinado in situ. También se ha estimado, para cada estructura, el tiempo de inicio de la corrosión.

CARACTERISTICAS DE LAS ESTRUCTURAS Y DEL MEDIO

Las estructuras evaluadas corresponden a treinta puentes viales ubicados en la provincia de Buenos Aires, con edades próximas a los 50 años. La tipología estructural es similar en todos los puentes, presentan varios tramos y distintas luces entre apoyos, los tableros están constituidos por losas y vigas que apoyan sobre estribos y pilas, con anchos de calzada de 13 m.

En las inspecciones no se han observado signos generalizados de corrosión. En un solo caso se ha detectado un proceso de corrosión inicial en la armadura principal de una losa, pudiendo atribuirse a un espesor mínimo del hormigón de recubrimiento. En algunos de los puentes, en los sectores donde se ubican los desagües, el alto contenido de humedad ha favorecido el desarrollo de una corrosión incipiente con desprendimientos del recubrimiento.

El macro clima puede definirse como templado-húmedo, con temperaturas medias anuales comprendidas entre 13°C y 17°C, precipitaciones medias anuales de 1100 mm y una humedad relativa que varía entre el 68% y el 74%; según datos proporcionados por la estación meteorológica de Azul, la más próxima a la zona en la que se encuentran las estructuras. El meso clima corresponde a un ambiente rural, no existiendo en su proximidad industrias que contribuyan a la contaminación del medio con sustancias perjudiciales para el hormigón o las armaduras. La concentración de dióxido de carbono (CO₂) medida en las proximidades de cada estructura varía entre 339 ppmv (5.14x10⁻⁴ kg/m³) a 386 ppmv (5.86x10⁻⁴ kg/m³). Para tener en cuenta la influencia del micro clima se ha considerado, en cada puente, la ubicación de los elementos estructurales evaluados respecto del contacto con las precipitaciones, es decir, si se hallan protegidos o expuestos a la lluvia.

Teniendo en cuenta las características del clima, el hormigón está en contacto con un medio al que podría clasificarse como A2 (ambiente normal, corrosión por carbonatación) según el Reglamento CIRSOC 201-2005 (4).

EL MODELO DURACRETE PARA INFERIR LA CARBONATACION

Para estimar el avance de la carbonatación DuraCrete (5) propone un modelo que se basa en la primera ley de difusión de Fick a la que se le incorporan distintos coeficientes que consideran la influencia del tipo de cemento, el tiempo de curado y la acción del medio. Teniendo en cuenta el enfoque semi probabilístico (basado en coeficientes parciales de seguridad) y considerando como estado límite el asociado al inicio de la corrosión, que sucede cuando el frente carbonatado alcanza a las armaduras, la ecuación 2 representa la ecuación de diseño.

$$g = x^d - x_{c(t)}^d = x^d - ((2 \cdot C_{s,ca}^d \cdot t) / (R_{ca}^d))^{0.5} \quad \text{ecuación 2}$$

x^d : valor de diseño del espesor de recubrimiento, surge de considerar el valor medio o nominal definido en el proyecto (x^c) al que se le sustrae un término que representa el margen de seguridad (Δx), es decir: $x^d = x^c - \Delta x$.

$x_{c(t)}^d$: valor de diseño de los depósitos de carbonatación.

$C_{s,ca}^d$: valor de diseño de la concentración de CO₂ en la superficie del hormigón, por lo general suele considerarse como una variable determinística.

t : tiempo de contacto entre el hormigón y el CO₂.

R_{ca}^d : valor de diseño de la resistencia del hormigón a la carbonatación. Surge de considerar la influencia de variables vinculadas a la composición del hormigón (tipo de cemento), ejecución (tiempo de curado) y exposición (humedad relativa del medio). Por tal motivo se la define como se indica en la ecuación 3.

$$R_{ca}^d = R_{ca,0}^c / (k_{e,ca}^c \cdot k_{c,ca}^c \cdot (t_0 / t)^{2.nca} \cdot \gamma_{Rca}) \quad \text{ecuación 3}$$

$R_{ca,0}^c$: valor característico de la resistencia a la carbonatación determinada mediante ensayos acelerados de carbonatación (ACT).

$k_{e,ca}^c$: valor característico del factor ambiental, depende del material y medio de exposición.

$k_{c,ca}^c$: valor característico del factor de curado, considera el tiempo de curado.

t_0 : edad del hormigón cuando se realiza el ensayo ACT.

n_{ca} : valor característico del factor de edad, depende del material y medio de exposición.

γ_{Rca} : factor de seguridad para la resistencia a la carbonatación.

El margen de seguridad asociado al espesor de recubrimiento (Δx) y el factor de seguridad de la resistencia a la carbonatación (γ_{Rca}), se establecen para tres niveles de confiabilidad (alto, normal y bajo) que contemplan el costo de reparación respecto del costo de diseño y construcción; tienen en cuenta la incertidumbre en el proceso de modelación y se definen en función del destino de la estructura, implicancia económica, accesibilidad a mantenimientos futuros, etc.

APLICACION DEL MODELO A ESTRUCTURAS EXISTENTES

Teniendo en cuenta las variables que definen la calidad del hormigón y las características del medio de exposición, se ha aplicado el modelo basado en un enfoque semi probabilístico para inferir el avance de la carbonatación, valor que se compara con el real determinado in situ.

El avance en el tiempo del frente carbonatado ($x_{c(t)}$) se infiere a partir de la ecuación 4, que constituye el segundo término de la ecuación 2.

$$x_{c(t)} = ((2 \cdot C_{s,ca} \cdot t) / (R_{ca}))^{0.5} \quad \text{ecuación 4}$$

Donde $C_{s,ca}$ es la concentración del CO_2 atmosférico determinado en el lugar de emplazamiento de cada puente con un equipo de sonda infrarroja; t representa la edad de las estructuras, para todas se ha considerado 50 años y R_{ca} la resistencia del hormigón a la carbonatación que se la obtiene a partir de la ecuación 3.

El valor de R_{ca} depende de distintos parámetros ($R_{0,ca}$, $k_{c,ca}$, $k_{e,ca}$ y n_{ca}) propuestos por DuraCrete en función de la calidad del hormigón (tipo y contenido de cemento, razón agua/cemento), del tiempo de curado y las características del medio de exposición (expuesto o protegido de la lluvia y humedad relativa).

Cuando por falta de ensayos acelerados no se conoce en forma directa el valor de la $R_{0,ca}$, DuraCrete cuenta con un banco de datos para obtenerla en forma indirecta a partir de la calidad del hormigón, definida a través de las determinaciones del contenido de cemento y razón agua/cemento. En estas experiencias, de acuerdo a los valores inferidos para las dosificaciones, la $R_{0,ca}$ varía entre 35 kg.año/m⁵ y 250 kg.año/m⁵. Asumiendo un tiempo de curado de 3 días, el factor de curado $k_{c,ca}$ sugerido por DuraCrete es de 2.10. Suponiendo que se ha utilizado un cemento portland normal, el factor ambiental $k_{e,ca}$ para elementos exteriores protegidos de la lluvia es de 0.86 y para elementos expuestos a la lluvia de 0.48. El factor de edad n_{ca} toma los valores de 0.098 y 0.40 según se trate hormigón protegido o en contacto con la lluvia, respectivamente. Para un costo de reparación bajo respecto del costo de diseño y construcción, el factor de seguridad para la resistencia a la carbonatación γ_{Rca} propuesto por DuraCrete es de 1.30.

Para inferir el tiempo de inicio de la corrosión (t_i) se utiliza la ecuación 5, que surge de despejar el tiempo (t) en la ecuación 2 y reemplazar el avance de la carbonatación ($x_{c(t)}^d$) por el espesor de recubrimiento medido in situ (r), al que se le sustrae un término que representa el margen de seguridad (Δx) y toma el valor de 8 mm para un costo de reparación bajo respecto del costo de diseño y construcción.

$$t_i = [((r - \Delta x)^2 \cdot R_{0,ca}) / (2 \cdot C_{s,ca} \cdot k_{e,ca} \cdot k_{c,ca} \cdot (t_0 / t)^{2 \cdot n_{ca}} \cdot \gamma_{Rca})]^{1/(1-2n)} \quad \text{ecuación 5}$$

En la Tabla 1 se presentan los valores determinados in situ de la concentración de CO₂ en el medio (C_{s,ca}), los recubrimientos (r) y el avance del frente carbonatado real (x_{C_{Rp}} y x_{C_{Rnp}}). También se incorporan los valores que surgen del modelo, referidos a la resistencia a la carbonatación del hormigón R_{ca,0}, el frente carbonatado inferido (x_{C_{Mp}} y x_{C_{Mnp}}) y los tiempos de inicio de la corrosión (t_{ip}). Los subíndices “p” y “np” representan las condiciones protegido y expuesto a la lluvia, respectivamente.

Tabla 1: Determinaciones realizadas in situ y las que surgen por aplicación del modelo.

Puente	Determinaciones in situ				Aplicación del modelo			
	C _{s,ca} [ppmv]	r [mm]	x _{C_R} [mm]		R _{ca,0} [kg.año/m ⁵]	x _{C_M} [mm]		t _{ip} [años]
			x _{C_{Rp}}	x _{C_{Rnp}}		x _{C_{Mp}}	x _{C_{Mnp}}	
1	386	30	20	5	70	24	3	42
2	357	35	15	10	100	19	2	118
3	359	35	31	5	50	27	3	50
4	356	30	20	5	90	20	2	63
5	373	30	15	0	200	14	1	93
6	339	40	13	1	150	15	2	310
7	385	35	30	5	40	31	3	36
8	367	30	15	0	160	15	2	125
9	365	30	13	1	170	15	1	135
10	370	30	10	0	250	12	1	215
11	386	40	30	7	35	33	4	46
12	360	35	25	8	40	30	3	40
13	367	40	15	4	180	14	2	359
14	356	30	14	3	140	16	2	112
15	368	35	23	5	80	21	2	85
16	375	40	20	1	70	23	2	112
17	373	35	18	5	70	23	2	74
18	365	40	23	5	50	27	3	76
19	368	30	21	6	75	22	2	49
20	363	35	28	3	75	22	2	82
21	370	40	22	5	75	22	2	121
22	358	35	27	8	40	30	3	38
23	365	40	24	6	70	23	2	115
24	372	35	25	3	75	22	2	79
25	375	40	28	4	40	30	3	55
26	367	30	20	6	80	21	2	53
27	375	35	23	5	70	23	2	73
28	364	40	25	3	70	23	2	115
29	371	35	27	4	70	23	2	73
30	374	35	25	4	65	24	2	66

Análisis de los Resultados

A simple vista se observa, en la Tabla 1, las diferencias significativas que existen en el frente carbonatado real entre elementos protegidos (x_{C_{Rp}}) y en contacto con la lluvia (x_{C_{Rnp}}). La misma tendencia se verifica para los valores inferidos por el modelo DuraCrete según que el hormigón esté protegido (x_{C_{Mp}}) o en contacto con la lluvia (x_{C_{Mnp}}).

La exposición directa a las precipitaciones aumenta el contenido de humedad en el hormigón dificultando el ingreso de CO₂. Distintas experiencias sugieren que cuando el

contenido de humedad en el hormigón supera el 80%, la cinética de la carbonatación se aparta de la ley de la raíz cuadrada del tiempo ($t^{0.5}$), para contemplar esta situación el tiempo debería estar elevado a un exponente "n" (t^n) que disminuye por debajo de 0.5 a medida que aumenta el contenido de humedad en el hormigón (6).

En la Figura 1 se observa cómo se modifica la velocidad de carbonatación para diferentes condiciones de exposición: ambiente de laboratorio (curva A), exterior protegido (curva B) y exterior en contacto con la lluvia (curva C). Los valores representados corresponden al promedio de veintisiete hormigones de calidad similar y las diferencias en el frente carbonatado se deben, únicamente, a las características del medio de exposición. De acuerdo a estas experiencias (7), resulta evidente como el contenido de humedad en el hormigón controla el ingreso y difusión del CO_2 .

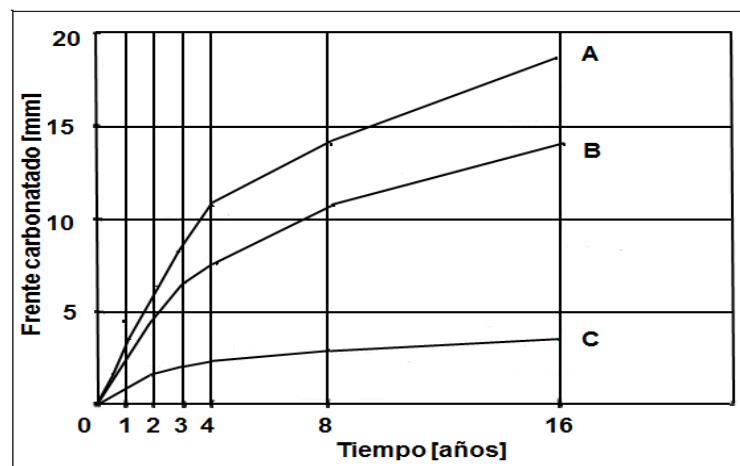


Figura 1: Velocidad de carbonatación para diferentes condiciones de exposición (7).

Para elementos protegidos de la lluvia, la carbonatación inferida por el modelo se aproxima de manera aceptable a la real. Si consideramos que la mayor parte de los valores correspondientes a x_{CRp} y x_{CMp} se hallan comprendidos entre los 20 mm y 30 mm, las diferencias entre el frente carbonatado real y el inferido por el modelo no superan los 4 mm en el 90% de las determinaciones. Este comportamiento se visualiza en la Figura 2 donde se representa, para ambiente protegido de la lluvia, el avance de la carbonatación real en función de la que surge de aplicar el modelo.

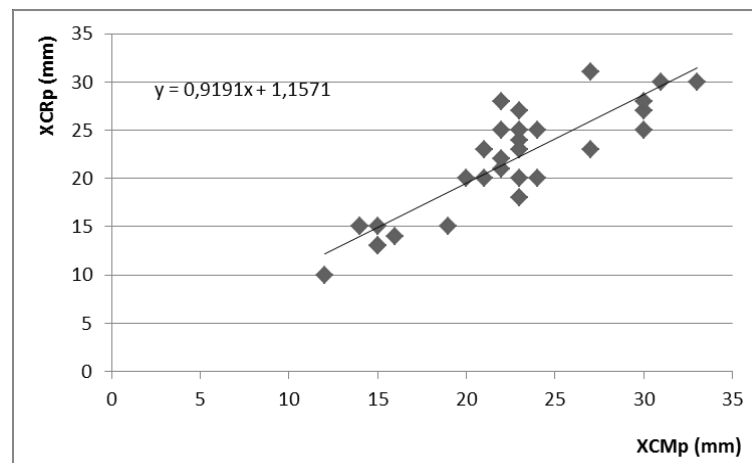


Figura 2: Carbonatación real en función de la inferida por el modelo.

Para elementos expuestos a la lluvia, la carbonatación real y la que surge de aplicar el modelo manifiestan diferencias importantes, la inferida por DuraCrete subestima los valores reales. A nuestro entender al factor ambiental ($k_{e,ca}$) y al factor de edad (n_{ca}), que permiten calcular la resistencia del hormigón a la carbonatación (R_{ca}) según la ecuación 3, se le asignan valores que no resultan representativos del micro clima generado por acción de las precipitaciones. Si bien la mayor humedad en el hormigón reduce el avance de la carbonatación, la reducción propuesta por el modelo resulta excesiva ya que conduce a valores elevados de la R_{ca} .

Respecto de los tiempos de inicio de la corrosión, existen también diferencias importantes según se considere al hormigón protegido o en contacto con la lluvia. En la Tabla 1 se presentan los tiempos de inicio de la corrosión para elementos protegidos de la lluvia (t_{ip}). Los valores resultan razonables, aunque debe considerarse el efecto importante que ejerce el espesor de recubrimiento en la ecuación 5. Para hormigones de calidad similar (igual $R_{ca,0}$), por ejemplo 70 kg.año/m⁵, considerando los recubrimientos de 30 mm (Puente 1), 35 mm (Puentes 17, 27, 29) y 40 mm (Puentes 16, 23, 28), se obtienen t_{ip} de 42 años, 73 años y 115 años, respectivamente.

Los tiempos de inicio de la corrosión para hormigones expuestos a la lluvia resultan tan excesivos que se hallan fuera de toda lógica. Para el hormigón del Puente 11, que presenta la menor resistencia a la carbonatación ($R_{ca,0}$ de 35 kg.año/m⁵), el t_{np} resulta ser de 2.0×10^{11} años y para el Puente 10, con la mayor resistencia a la carbonatación ($R_{ca,0}$ de 250 kg.año/m⁵), se obtiene un t_{np} de 1.1×10^{14} años. Estos resultados inadmisibles surgen de los valores propuestos por DuraCrete para los factores $k_{e,ca}$ y n_{ca} ya que son las únicas variables que cambian, según la ecuación 5, al pasar del ambiente protegido al expuesto a la lluvia.

Las distintas experiencias a nivel internacional proporcionan resultados del avance de la carbonatación y del tiempo de inicio de la corrosión para hormigones exteriores protegidos de la lluvia, donde los valores inferidos por el modelo resultan aceptables. Lo curioso y hasta sospechoso es que no hemos encontrado experiencias referidas a hormigones en contacto con la lluvia. Resulta extraño porque numerosas obras de infraestructura de gran envergadura han sido proyectadas y ejecutadas de acuerdo a los conceptos básicos del diseño por durabilidad y a los modelos propuestos por DuraCrete para vidas útiles que superan los 100 años.

Las primeras estructuras construidas de acuerdo a estos principios han sido las emplazadas en dos de los estrechos del oeste Báltico (Great Belt y Öresund), las obras realizadas comprenden túneles, islas artificiales y puentes, permitiendo la comunicación entre dos de las islas más grandes de Dinamarca y Suecia. También el túnel Western Scheldt en Holanda, bajo el estuario del Río Escalda, que comunica las localidades de Ellewoutsdijk y Terneuzen (8). En estas obras el principal factor de deterioro son los cloruros del ambiente marino, pero en los túneles se suma la acción del dióxido de carbono en altas concentraciones. El modelo DuraCrete considerado en los túneles es el que contempla el avance de la carbonatación en ambientes protegidos de la lluvia, razón por la cual no se han cuestionado los valores de los factores $k_{e,ca}$ y n_{ca} ni los resultados inferidos.

Recientemente Nhu Cuong Tran (9), en mediciones realizadas en cuatro torres de enfriamiento, ha manifestado importantes diferencias entre la carbonatación real y la inferida por el modelo DuraCrete, resaltando la necesidad de reconsiderar los valores del factor "n" propuestos por DuraCrete para estructuras en contacto con las precipitaciones.

CONCLUSIONES

El Proyecto DuraCrete ha reunido y organizado los conceptos básicos del diseño por durabilidad. El logro más importante ha sido el de introducir la teoría de la confiabilidad, que permite contemplar la naturaleza estocástica de las variables que definen la calidad del hormigón y las características del medio. Los modelos propuestos por DuraCrete son los más difundidos a nivel internacional para evaluar el proceso de corrosión de las armaduras por acción de los cloruros y por carbonatación del recubrimiento.

La aplicación del modelo DuraCrete para estimar el avance de la carbonatación manifiesta diferencias importantes según se trate de ambientes exteriores protegidos o en contacto con la lluvia. Para ambientes protegidos, los valores inferidos para el frente carbonatado se aproximan de manera aceptable a los valores reales y los tiempos estimados para el inicio de la corrosión resultan razonables. Para ambientes en contacto con la lluvia, el modelo subestima los valores del frente carbonatado real y los tiempos de inicio de la corrosión resultan tan excesivos que se hallan fuera de toda lógica. De acuerdo a nuestras experiencias, para hormigones en contacto con las precipitaciones deberían reverse y ajustarse los factores propuestos por DuraCrete vinculados al medio de exposición.

La utilización de modelos, con sus aciertos y desventajas, resulta incuestionable porque nos compromete con el seguimiento y evaluación del comportamiento de las estructuras en servicio y a reconsiderar, en forma permanente, las medidas que conducen a una mayor durabilidad.

REFERENCIAS

- (1) DuraCrete. "Final technical report. General guidelines for durability design and redesign". Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347. (2000).
- (2) DURAR. "Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado". CYTED. (1997).
- (3) Norma ASTM C 1084-97. "Standard test method for portland-cement content of hardened hydraulic cement concrete". (1997).
- (4) CIRSOC 201-2005. Reglamento argentino de estructuras de hormigón. Capítulo 2. Especificaciones por resistencia y durabilidad. (2005).
- (5) DuraCrete. "Modelling of degradation". Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347. (2000).
- (6) Edited by Page, C., Page, M. "Durability of concrete and cement composites". Ed. Woodhead Publishing Limited. ISBN 978-1-85573-940-6. (2007).
- (7) Lay, S., Schießl, P. "Service life models". LIFECON D 3.2. (2003).
- (8) Schießl, P. "New approach to service life design of concrete structure". Asian Journal of Civil Engineering. Building and Housing. Vol 6, N° 5, 393-407. (2005).
- (9) Cuong Tran, N., Hu, H., Genest, Y., Boule, A. and Vincendeau, M. "Methodology of taking local climate data into the concrete carbonation depth prediction. Proposition of a model predicting the temporal and spatial variation of the carbonation depth on cooling towers". Conference Papers. IGCMAT-2016. 1st International Conference on Grand Challenges in Construction Materials. March 17-18, (2016).