

## ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA EFECTIVA A LA CARBONATACION

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

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

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

\*\*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](mailto:direccion@lemit.gov.ar)

**Palabras claves** diseño por durabilidad, modelos de vida en servicio, carbonatación.

### RESUMEN

En los modelos más avanzados que permiten inferir el avance de la carbonatación ha comenzado a utilizarse un parámetro denominado resistencia efectiva a la carbonatación ( $R_{ca}$ ) que tiene en cuenta el coeficiente de difusión del dióxido de carbono en el hormigón y la capacidad del cemento de fijar el dióxido de carbono. La  $R_{ca}$  puede obtenerse a partir de ensayos acelerados de carbonatación o en condiciones naturales de exposición. En este trabajo se presentan valores sugeridos a nivel internacional para la  $R_{ca}$ , su incorporación en modelos y los cambios producidos en inferir el avance de la carbonatación para distintos valores de  $R_{ca}$  que se corresponden con hormigones de diferente calidad. Además, se determina la  $R_{ca}$  del hormigón que forma parte de estructuras existentes. Los estudios y análisis realizados conducen a que la  $R_{ca}$  proporciona información que resulta útil para clasificar la calidad del hormigón frente al ingreso y captación de  $CO_2$ . No obstante, por tratarse de un parámetro recientemente incorporado, se lo debe interpretar con criterio y conocimiento de las variables a las que resulta sensible.

### INTRODUCCION

Numerosos modelos empíricos y teóricos, con distintos niveles de complejidad, han sido propuestos para inferir el avance de la carbonatación. Los modelos empíricos se basan en relaciones entre los depósitos de carbonatación y parámetros asociados a la composición del hormigón, a propiedades de transporte y al medio de exposición; resultan simples y sencillos, pero su aplicación es limitada. Los modelos teóricos se sustentan en leyes físico-químicas que involucran procesos de difusión y reacción, resultan más complejos, no obstante permiten una aplicación más generalizada.

Entre los modelos más utilizados para inferir el avance de la carbonatación figuran el DuraCrete (1) y el propuesto por el fib - Boletín 34 (2), luego adoptado por el Código Modelo 2010 (3). Estos modelos presentan expresiones similares que se basan en la primera ley de difusión de Fick e incorporan un parámetro denominado *resistencia efectiva a la carbonatación* ( $R_{ca}$ ) que tiene en cuenta la calidad del hormigón frente al ingreso y captación del  $CO_2$ .

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

Fabián Iloro. Personal de Apoyo CICBA, Doctorando UNS.

Luis Traversa. Investigador Emérito CICBA.

La velocidad de ingreso del factor agresivo a través del hormigón se evalúa mediante el coeficiente de difusión, tal como sucede con la difusión de cloruros. En el proceso de carbonatación, resulta complicado utilizar el coeficiente de difusión del CO<sub>2</sub> (D<sub>ca</sub>) porque no existe consenso respecto de una metodología para determinarlo. Por lo general se lo obtiene en forma indirecta, mediante expresiones empíricas en función de la humedad relativa del medio, de la absorción de agua y composición del hormigón; informando valores que varían entre 1.3x10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>/s y 0.87x10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>/s para humedades relativas del 70% y 75%, respectivamente (4). También existen expresiones para obtenerlo a partir de la resistencia característica del hormigón (4), proporcionando valores que varían entre 3.16x10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>/s y 1.0x10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>/s para resistencias características comprendidas entre 20 y 40 MPa, respectivamente.

Ante la dificultad de obtener valores para el D<sub>ca</sub> mediante ensayos relativamente sencillos, que garanticen cierta reproducibilidad de los resultados, se ha propuesto la utilización de la R<sub>ca</sub>, definida como el cociente entre la capacidad de combinación del CO<sub>2</sub> en el hormigón no carbonatado y el coeficiente de difusión del CO<sub>2</sub> en el hormigón, tal como se indica en la ecuación 1.

$$R_{ca} = a / D_{ca} \quad \text{ecuación 1}$$

R<sub>ca</sub>: resistencia efectiva a la carbonatación [kg.s /m<sup>5</sup>].

a: capacidad de combinación del CO<sub>2</sub> en el hormigón no carbonatado [kg/m<sup>3</sup>].

D<sub>ca</sub>: coeficiente de difusión del CO<sub>2</sub> en el hormigón [m<sup>2</sup>/s].

La R<sub>ca</sub> incluye en un único parámetro el factor de retardo (a) y el coeficiente de difusión (D<sub>ca</sub>). Depende de la razón agua/cemento, cantidad y tipo de cemento, por lo tanto constituye una variable que permite definir la calidad del hormigón respecto de las propiedades de transporte. La R<sub>ca</sub> puede obtenerse a partir de ensayos acelerados de carbonatación (que se realizan bajo condiciones controladas de temperatura, humedad y concentración de dióxido de carbono) o en condiciones naturales de exposición en ambiente de laboratorio. También se la puede obtener mediante mediciones realizadas en estructuras existentes que incluyen la determinación del frente carbonatado, la concentración de dióxido de carbono en el medio de exposición y la edad de la estructura.

En este trabajo se presentan valores sugeridos a nivel internacional para la R<sub>ca</sub>, su incorporación en modelos y los cambios producidos en inferir el avance de la carbonatación para distintos valores de R<sub>ca</sub> que se corresponden con hormigones de diferente calidad. Además, se determina la R<sub>ca</sub> del hormigón que forma parte de estructuras existentes aplicando el modelo propuesto por DuraCrete.

## **DETERMINACION DE LA RESISTENCIA EFECTIVA A LA CARBONATACION**

La R<sub>ca</sub> se la obtiene mediante ensayos de carbonatación natural (NAC) o acelerada (ACC) realizados en condiciones específicas y controladas de temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub> que favorecen la carbonatación. Luego de un tiempo definido de exposición, se fractura la muestra y se le aplica una solución indicadora de fenoltaleína que, por cambio en la coloración de la superficie del hormigón, permite medir el frente carbonatado.

La metodología del ensayo ACC propuesto por DuraCrete (5), para morteros y hormigones, consiste en un acondicionamiento de las muestras durante 7 días de curado

húmedo más 21 días en ambiente de laboratorio (a 20°C de temperatura y 65% de humedad relativa); seguido de 28 días en la cámara de carbonatación en contacto con una concentración de CO<sub>2</sub> del 2%, una temperatura de 20°C y humedad relativa del 65%. Finalizado el período de ensayo de 56 días, se determina el avance de la carbonatación. Los ensayos NAC se realizan en laboratorio a 20°C, 65% HR y concentración del CO<sub>2</sub> de 0.03%, la duración del ensayo es de 1 año.

La resistencia a la carbonatación obtenida a partir de los ensayos ACC y NAC se informa como el recíproco de la  $R_{ca}$  ( $1/R_{ca}$ ) y se la denominada *inversa de la resistencia efectiva a la carbonatación del hormigón* ( $R_{ca}^{-1}$ ). La nomenclatura utilizada para expresar los resultados bajo condiciones establecidas de temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub> se acompañan con el subíndice cero; para ensayos acelerados se indica  $R_{ACC,0}^{-1}$  y para condiciones naturales de carbonatación en laboratorio como  $R_{NAC,0}^{-1}$ .

Los ensayos de carbonatación propuestos por DuraCrete (5) se realizan sobre morteros y hormigones de acuerdo a las siguientes consideraciones:

**Nivel 1:** contempla ensayos sobre morteros normalizados con la finalidad de evaluar la  $R_{ca}$  del cemento a partir de ensayos AAC. Este valor debería ser informado por el productor de cemento, proporcionado una clasificación similar a la utilizada para la resistencia a compresión.

**Nivel 2:** se refiere a ensayos sobre hormigones moldeados en probetas normalizadas, bajo condiciones definidas de ejecución y curado en laboratorio. La finalidad es la de evaluar mediante ensayos ACC la composición que resulte ser la más adecuada. Se debería contar con distintos niveles de  $R_{ca}$ , tal como sucede con la resistencia a compresión del hormigón, proporcionados por el proveedor del hormigón.

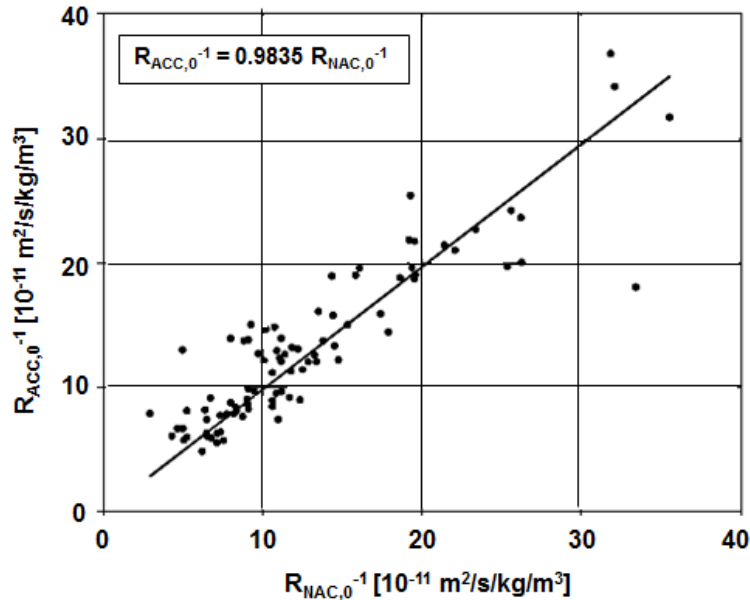
**Nivel 3:** comprende la evaluación de hormigones mediante ensayos NAC de acuerdo a tres modalidades:

3.1.- Hormigones preparados en laboratorio con la composición a utilizar en obra, sometidos a curado normalizado durante 7 días y luego estacionados durante 1 año en ambiente de laboratorio (20°C, 65% HR). Estos ensayos permiten vincular los ACC y los NAC en laboratorio.

3.2.- Hormigones preparados en laboratorio con la composición a utilizar en obra, curado normalizado durante 7 días y luego estacionados durante un año en obra, sometidos al mismo ambiente que la estructura. Este tipo de ensayos permite comparar los  $NAC_{laboratorio}$  con los  $NAC_{estructura}$  para evaluar la influencia del tipo de exposición (permiten determinar los factores ambientales utilizados en los modelos).

3.3.- Hormigones que forman parte de testigos extraídos de las estructuras a la edad de 1 año, permiten evaluar las distintas tareas vinculadas con la ejecución y la acción del ambiente (resultan de utilidad para definir los factores de curado y ambientales propuestos por los modelos). Además, este tipo de evaluaciones pueden ser utilizadas como control de calidad.

Las experiencias de los ensayos propuestos por el Nivel 2 y Nivel 3 modalidad 3.1, manifiestan que existe una buena vinculación entre los ACC y los NAC realizados en laboratorio (6), tal como se observa en la Figura 1.



**Figura 1:** Relación entre los resultados de ensayos de carbonatación acelerada y bajo condiciones naturales (6).

El modelo propuesto por el fib - Boletín 34 (2) también plantea una relación entre los ensayos ACC y los NAC realizados en laboratorio, según se indica en la ecuación 2. De acuerdo a dicha relación, la  $R_{NAC,0}^{-1}$  resulta mayor que la  $R_{ACC,0}^{-1}$  en un factor de 1.25 y según DuraCrete la  $R_{NAC,0}^{-1}$  supera en 1.02 a la  $R_{ACC,0}^{-1}$ . Estas diferencias podrían explicarse considerando que para las mismas condiciones de temperatura y humedad (20°C y 65% HR), en los ensayos acelerados el frente de secado penetra menos en el hormigón que bajo condiciones naturales, hecho que retardaría el proceso de carbonatación en los ACC. Para hormigones con muy bajo contenido de humedad la  $R_{ACC,0}^{-1}$  podría ser nula, pero el hormigón no tiene una resistencia infinita a la carbonatación, por eso se incorpora en la ecuación 2 el término  $\epsilon_t$  como ordenada al origen.

$$R_{NAC,0}^{-1} = k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \epsilon_t \quad \text{ecuación 2}$$

Donde  $k_t$  resulta ser igual a 1.25 y  $\epsilon_t$  toma el valor de  $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}/\text{kg}/\text{m}^3$ .

El fib - Boletín 34 propone la misma metodología que DuraCrete para los AAC. Una vez realizado el ensayo y medido el frente de carbonatación, la  $R_{ACC,0}^{-1}$  se determina según la ecuación 3.

$$R_{ACC,0}^{-1} = (x_c / \zeta)^2 \quad \text{ecuación 3}$$

$R_{ACC,0}^{-1}$ : inversa de la resistencia a la carbonatación determinada mediante el ensayo acelerado  $[(\text{m}^2/\text{s})/(\text{kg}/\text{m}^3)]$ .

$x_c$ : depósito de carbonatación medido en el ensayo [m].

$\zeta$ : constante que tiene en cuenta la concentración de  $\text{CO}_2$  utilizada en el ensayo y el tiempo de duración, para las condiciones de ensayo propuestas en la metodología toma el valor de  $420 (\text{s}/\text{kg}/\text{m}^3)^{0.5}$ .

Las distintas experiencias coinciden en manifestar que los ensayos ACC son los únicos que proporcionan una medida directa de la resistencia a la carbonatación, demandan poco tiempo, la metodología es sencilla y resultan lo suficientemente sensibles para evaluar la resistencia a la carbonatación de diferentes cementos y hormigones. La

dispersión evaluada a través del coeficiente de variación (CV) se mantiene dentro de niveles aceptables. De acuerdo con experiencias realizadas por el grupo Task 3 de DuraCrete (6), el CV se encuentra entre 2.5% y 20.1% (determinado para un cuantil del 90%), los mayores CV están asociados a valores bajos de la  $R_{ACC,0}^{-1}$ , sucede que cuanto menor es el avance del frente carbonatado, mayor es la dispersión en los valores.

### Clasificación de los Hormigones de acuerdo con la Resistencia a la Carbonatación

DuraCrete ha propuesto una clasificación de los hormigones de acuerdo a la resistencia efectiva a la carbonatación obtenida a partir del ensayo acelerado, definida como se indica en la ecuación 4 (1). En la Tabla 1 se presenta la clasificación CAR y su vinculación con la  $R_{ACC,0}$  (expresada en distintas unidades) y la  $R_{ACC,0}^{-1}$ . De acuerdo a esta clasificación a mayor CAR mayor es la resistencia del hormigón a la carbonatación.

$$CAR = 1 / R_{ACC,0}^{-1} = (\zeta / x_c)^2 \quad \text{ecuación 4}$$

CAR: resistencia a la carbonatación [ $\text{kg/m}^3/\text{m}^2/\text{s}$ ].

$R_{ACC,0}^{-1}$ : inversa de la resistencia a la carbonatación [ $\text{m}^2/\text{s}/\text{kg}/\text{m}^3$ ] determinada en el ensayo acelerado.

$\zeta$ : constante que para las condiciones de ensayo propuestas en la metodología toma el valor de  $420 (\text{s}/\text{kg}/\text{m}^3)^{0.5}$ .

$x_c$ : depósito de carbonatación medido en el ensayo [m].

Tabla 1: Clasificación de la resistencia a la carbonatación propuesta por DuraCrete.

Clasificación	$R_{ACC,0}$		$R_{ACC,0}^{-1}$
	[ $10^{10} \text{ kg/m}^3/\text{m}^2/\text{s}$ ]	[ $\text{kg.año}/\text{m}^5$ ]	[ $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}/\text{kg}/\text{m}^3$ ]
CAR - 0.1 Baja resistencia	CAR = 0.1	31.7	100
CAR - 0.5 Buena resistencia	CAR = 0.5	159	20
CAR - 1 Buena resistencia	CAR = 1.0	317	10
CAR - 5 Muy buena resistencia	CAR = 5.0	1585	2
CAR - 10 Excelente resistencia	CAR = 10.0	3170	1

Para interpretar la clasificación CAR conviene tener presente el modelo propuesto por DuraCrete para inferir el avance de la carbonatación, basado en un enfoque semi probabilístico (utilizando coeficientes de seguridad), presentado en la ecuación 5.

$$x_{c(t)} = ((2 \cdot C_{s,ca} \cdot t) / (R_{ca}))^{0.5} \quad \text{ecuación 5}$$

Donde  $x_{c(t)}$  representa el valor de los depósitos de carbonatación;  $C_{s,ca}$  es la concentración de  $\text{CO}_2$  en la superficie del hormigón;  $t$  corresponde al tiempo que el hormigón ha estado en contacto con el  $\text{CO}_2$  y  $R_{ca}$  es resistencia efectiva a la carbonatación definida según la ecuación 6.

$$R_{ca} = R_{ACC,0} / (k_{e,ca} \cdot k_{c,ca} \cdot (t_0 / t)^{2.nca} \cdot \gamma_{Rca}) \quad \text{ecuación 6}$$

$R_{ACC,0}$ : resistencia a la carbonatación determinada mediante ensayos acelerados.

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

$k_{c,ca}$ : factor de curado, considera el tiempo de curado.

$t_0$ : edad del hormigón cuando se realiza el ensayo acelerado (28 días).

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

$\gamma_{Rca}$ : factor de seguridad para la resistencia a la carbonatación.

Tal como se ha presentado el modelo, los valores correspondientes a los ensayos acelerados, es decir los  $R_{ACC,0}$  de la ecuación 6, son los considerados en la clasificación CAR. A modo de ejemplo, se infiere el avance de la carbonatación a la edad de 50 años de hormigones con diferentes CAR, curados durante 3 días ( $k_{c,ca} = 2.10$ ), en ambiente exterior protegidos de la lluvia ( $k_{e,ca} = 0.86$  y  $n_{ca} = 0.098$ ) y para un costo de reparación bajo respecto del costo de diseño y construcción ( $\gamma_{Rca} = 1.30$ ). Los resultados conducen a valores del frente de carbonatación de: 34mm (CAR - 0.1), 15mm (CAR - 0.5), 11mm (CAR - 1), 5mm (CAR - 5) y 3mm (CAR - 10).

## DETERMINACION DE LA RESISTENCIA EFECTIVA A LA CARBONATACION EN ESTRUCTURAS EXISTENTES

Para estructuras existentes con edades que superan los 10 años, es posible determinar la  $R_{ca}$  a partir de la ecuación 5, considerando que los parámetros  $k_{e,ca}$ ,  $k_{c,ca}$  y  $n$  están implícitos en la  $R_{ca}$ . Esta metodología no requiere de ensayos acelerados, se corresponde con la composición del hormigón, las tareas de colocación y curado a las que ha estado sometido y con el meso y micro clima de exposición. Según se observa en la ecuación 7, sólo se requiere determinar la profundidad del frente carbonatado ( $x_c$ ), la concentración de  $CO_2$  del medio ( $C_{s,ca}$ ) y la edad ( $t$ ) de la estructura.

$$R_{ca} = (2 \cdot C_{s,ca} \cdot t) / (x_c)^2 \quad \text{ecuación 7}$$

La resistencia a la carbonatación de estructuras existentes obtenida a partir de la determinación de la  $R_{ca}$  o  $R_{ca}^{-1}$  es la real, podría asemejarse a la resistencia a compresión del hormigón in situ obtenida en testigos extraídos de las estructuras.

La ecuación 7 permite inferir el valor de la  $R_{ca}$  para elementos de hormigón interiores o exteriores protegidos de las precipitaciones, porque para estos micro climas se asume que el avance de la carbonatación se ajusta a la ley de la raíz cuadrada del tiempo, según se ha indicado en la ecuación 5.

Para elementos en contacto con las precipitaciones, el mayor contenido de humedad en el hormigón dificulta el ingreso del  $CO_2$ , se reduce significativamente la carbonatación y su avance se aparta de la ley de la raíz cuadrada del tiempo. Este comportamiento no ha sido correctamente interpretado por el modelo DuraCrete. Para contemplar el micro clima asociado a la exposición directa con la lluvia, el modelo propuesto por el *fib* - Boletín 34 (2), adoptado luego por el Código Modelo 2010 (3), incorpora un término denominado función ambiental ( $W$ ) que tiene en cuenta la orientación y geometría de los elementos estructurales, el promedio anual de días con una cantidad mínima de precipitación de 2.5 mm por día y la dirección del viento cuando se producen las precipitaciones.

### Determinación de la $R_{ca}$ en puentes en servicio

La ecuación 7 ha sido utilizada para inferir la  $R_{ca}$  de 30 puentes viales ubicados en la provincia de Buenos Aires, con edades próximas a los 50 años. Estas experiencias forman parte de un trabajo más amplio realizado con la finalidad de evaluar los puentes en servicio y obtener información respecto de parámetros vinculados a la durabilidad.

Algunos de los datos relevados han sido utilizados para caracterizar el comportamiento de los hormigones respecto de la carbonatación.

Las estructuras se encuentran emplazadas en un macro clima que puede definirse como templado-húmedo, con temperatura media anual comprendida entre 13°C y 17°C, precipitaciones medias anuales de 1100 mm y una humedad relativa que varía entre el 68% y el 74%. El meso clima corresponde a un ambiente rural, la concentración de CO<sub>2</sub> medida en las proximidades de cada estructura varía entre 339 ppmv (5.14x10<sup>-4</sup> kg/m<sup>3</sup>) a 386 ppmv (5.86x10<sup>-4</sup> kg/m<sup>3</sup>). En la Tabla 2 se informa, para cada puente, el avance de la carbonatación (x<sub>c</sub>) en elementos protegidos del contacto directo con las precipitaciones, la concentración de CO<sub>2</sub> en el medio (C<sub>s,ca</sub>), la R<sub>ca</sub> expresada en dos tipos de unidades y la R<sub>ca</sub><sup>-1</sup>.

Tabla 2: Valores de la R<sub>ac</sub> y la R<sub>ac</sub><sup>-1</sup> de los puentes evaluados.

Puentes	x <sub>c</sub> [mm]	C <sub>s,ca</sub> [ppmv]	R <sub>ca</sub>		R <sub>ca</sub> <sup>-1</sup> [10 <sup>-11</sup> m <sup>2</sup> /s/kg/m <sup>3</sup> ]
			[10 <sup>10</sup> kg/m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s]	[kg.año/m <sup>5</sup> ]	
1	20	386	0.46	146	21.7
2	15	357	0.76	241	13.2
3	31	359	0.18	57	55.6
4	20	356	0.43	135	23.5
5	15	373	0.79	249	12.7
6	13	339	0.96	304	10.4
7	30	385	0.20	65	48.8
8	15	367	0.78	248	12.8
9	13	365	1.03	328	9.7
10	10	370	1.75	561	5.7
11	30	386	0.20	65	48.8
12	25	360	0.27	87	36.4
13	15	367	0.78	248	12.8
14	14	356	0.87	275	11.5
15	23	368	0.33	105	30.2
16	20	375	0.45	142	22.3
17	18	373	0.55	175	18.2
18	23	365	0.33	105	30.2
19	21	368	0.40	126	25.2
20	28	363	0.22	70	45.3
21	22	370	0.39	125	25.4
22	27	358	0.23	74	42.8
23	24	365	0.30	96	33.0
24	25	372	0.28	90	35.2
25	28	375	0.23	73	43.4
26	20	367	0.44	139	22.8
27	23	375	0.34	108	29.4
28	25	364	0.28	88	36.0
29	27	371	0.24	77	41.2
30	25	374	0.29	91	34.8

Los valores de la R<sub>ca</sub> inferidos se encuentran comprendidos entre 0.18x10<sup>10</sup> kg/m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/s y 1.75x10<sup>10</sup> kg/m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/s. La clasificación CAR propuesta por DuraCrete se aplica a ensayos acelerados y no contempla los valores de R<sub>ca</sub> obtenidos a partir de estructuras existentes. En base a estas experiencias y considerando la resistencia a la carbonatación de los hormigones, podríamos establecer la siguiente clasificación CAR para estructuras existentes:

CAR >  $1.75 \times 10^{10} \text{ kg/m}^3/\text{m}^2/\text{s}$ : excelente resistencia.

CAR comprendida entre  $0.76 \times 10^{10} \text{ kg/m}^3/\text{m}^2/\text{s}$  y  $1.75 \times 10^{10} \text{ kg/m}^3/\text{m}^2/\text{s}$ : buena resistencia.

CAR <  $0.76 \times 10^{10} \text{ kg/m}^3/\text{m}^2/\text{s}$ : baja resistencia.

De acuerdo a la clasificación CAR que hemos propuesto, el 73% de los puentes poseen una resistencia baja respecto de la carbonatación por presentar valores inferiores a  $0.76 \times 10^{10} \text{ kg/m}^3/\text{m}^2/\text{s}$ . En estas estructuras, para una edad de 50 años, el avance del frente carbonatado se encuentra entre 20mm y 30mm, valores que están próximos al espesor de recubrimiento de 35mm especificado por las distintas normas europeas (7) para la clase de exposición XC3 (moderada humedad, elementos exteriores protegidos de la lluvia). Conviene tener presente que los puentes cumplen una función de importancia socio-económica para el país y deberían alcanzar una vida en servicio próxima a los 100 años.

En los últimos años se han publicado numerosos trabajos referidos a valores de la  $R_{ca}$  obtenida a partir de ensayos acelerados pero existe poca información respecto de la  $R_{ca}$  determinada en estructuras existentes. La clasificación CAR que hemos propuesto está sujeta a futuros ajustes, a realizar a medida que avancen las experiencias vinculadas a la determinación de la  $R_{ca}$  en estructuras existentes.

## CONCLUSIONES

Este trabajo persigue la finalidad de difundir en nuestro país la utilización de la resistencia efectiva a la carbonatación ( $R_{ca}$ ) como parámetro durable. El empleo de modelos ha dejado de lado la clasificación de la resistencia a la carbonatación de los hormigones en base a la constante de carbonatación  $k_c$  ( $k_c = x_c(t)^{0.5}$ ) y la ha sustituido por la  $R_{ca}$ , variable que se utiliza como parámetro de entrada en los modelos propuestos por DuraCrete, fib - Boletín 34 y Código Modelo 2010.

La determinación de la  $R_{ca}$  en estructuras existentes, con edades superiores a 10 años, constituye el método más directo y sencillo para conocer el valor real de la resistencia a la carbonatación del hormigón porque se corresponde con su composición, con las tareas de colocación y curado a las que ha estado sometido y con el meso y micro clima de exposición. La clasificación CAR propuesta está sujeta a futuros ajustes, a realizar a medida que avancen las experiencias vinculadas a la determinación de la  $R_{ca}$  en estructuras existentes.

## REFERENCIAS

- (1) DuraCrete. "Final technical report. General guidelines for durability design and redesign". Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347. (2000).
- (2) International Federation for Structural Concrete fib. "Model code for service life design, bulletin 34". ISBN 2-88394-074-6. (2006).
- (3) fib Bulletin 65. "Model Code 2010, Final draft-Vol. 2". ISBN 978-2-88394-105-2. (2012).
- (4) V. Saetta, R. Vitaliani. "Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures Part II. Practical applications". Cement and Concrete Research 35, 958–967. (2005).
- (5) DuraCrete. "Compliance testing for probabilistic design purposes". Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347. (2000).
- (6) DuraCrete. "Statistical quantification of the variables in the limit state functions". Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347. (2000).
- (7) EN 1992-1-1:2004/AC:2010. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. (2010).