A SEGURANÇA DAS OBRAS NO BRASIL DISCUTIDA SOB DIFERENTES PONTOS DE VISTA. TRAGA O SEU.
1º CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES
21 a 23 de maio de 2014 - Foz do Iguaçu - PR

CARBONATACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS CON ARENAS TRITURADAS

CABRERA, O.A.[1], ORTEGA, N.F.[2], TRAVERSA, L.P.[3], DONZA, H.A.[4]

[1] Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires – Argentina, Profesor Titular, Doctor, e-mail: ocabrera@fio.unicen.edu.ar
[2] Universidad Nacional del Sur – Argentina, Profesor Titular, Doctor, e-mail: nfortega@criba.edu.ar,
[3] Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (CIC-LEMIT) – Argentina, Director, Ingeniero, e-mail: direccion@lemit.gov.ar
[4] Universidad N. del Centro de la Pcia. de Bs. As – Argentina, Docente, Ingeniero, e-mail: hdonza@fio.unicen.edu.ar

RESUMEN

Es imprescindible el desarrollo y la calibración de métodos de ensayo que permitan cuantificar las variables que se incluyen en los modelos de predicción de la vida útil de las estructuras de hormigón en servicio. En este trabajo se analizan los efectos del tipo de agregado fino sobre el fenómeno de carbonatación del hormigón con el objetivo de incrementar el uso de las arenas trituradas en hormigones. El programa experimental comprendió la realización de dos series de hormigones con relaciones de *a/c* de 0.45 y 0.50, y el empleo de cinco tipos de arenas: tres trituradas (granítica, dolomítica, y calcárea) y dos naturales como referencia. A la segunda serie de hormigones se le efectuó un curado similar al de obra a fin de evaluar el impacto que tienen las prácticas empleadas en obras con escaso control de calidad sobre la carbonatación. Los resultados experimentales se comparan con los obtenidos con los modelos de vida útil estimada de la Instrucción Española EHE-2008 y de Edna Possan. Como conclusiones se pueden mencionar que de acuerdo al coeficiente de carbonatación, los hormigones con relación *a/c* = 0.45 se encuentran en categoría de hormigones de *alta calidad*, en cambio, los de relación *a/c* = 0.50 presentaron una *calidad regular*. Además, el modelo de la EHE-2008 dio como resultado valores de vida útil relativamente elevados, y el modelo de E. Possan presenta una predicción satisfactoria.

Palabras claves: Arenas trituradas; carbonatación; corrosión; vida útil en servicio.

ABSTRACT

It is essential to the development and calibration of test methods to quantify the variables included in the models predicting service life of concrete structures. In this paper the effects of type of fine aggregate on concrete carbonation phenomenon are analyzed with the aim to increase the use of crushed sand in concrete. The experimental program included the completion of two series of concrete with relations *w/c* of 0.45 and 0.50, and the use of five types of sand, three crushed (granite, dolomite, and limestone) and a two natural as a reference. A second series of concrete was performed a similar field to assess the impact of the practices employed in fields with little quality control over carbonation. The experimental results are compared with those obtained with models estimated service life of the spanish code EHE-2008 and Edna Possan. In conclusion may be mentioned that according to the coefficient of carbonation, concrete with *w/c* = 0.45 are in search of *high-quality concrete*, however, the concrete with *w/c* ratio = 0.50 showed a *fair quality*. Moreover, the model of EHE-2008 resulted in relatively high values of the shelf life, and E. Possan model present a satisfactory prediction.

Keywords: Crushed sand, carbonation, corrosion, service life.

1. INTRODUCCION

Durante los 30 años pasados, han ocurrido cambios significativos en el campo de durabilidad del hormigón. En este período, hubo un crecimiento enorme en la comprensión de los mecanismos y los procesos de deterioro, los desarrollos para proteger al hormigón contra el deterioro temprano y la utilización eficaz de los materiales, que han hecho que el hormigón incremente su durabilidad. También, ha sido importante el grado de convencimiento de la durabilidad, como una propiedad fundamental del hormigón. Esto ha causado un cambio conceptual de los profesionales implicados en el diseño y en la construcción de estructuras de hormigón armado (Ballim, 2009). Actualmente, el planteo de diseño por durabilidad requiere establecer modelos matemáticos de predicción de la vida en servicio, basados en conocimientos científicos sobre los materiales y los procesos de degradación de las estructuras expuestas en diferentes ambientes. Siendo imprescindible el desarrollo y la calibración de métodos de ensayo que permitan cuantificar las variables que se incluyen en estos modelos de predicción. En Argentina, la corrosión del acero de refuerzo originada por el proceso de carbonatación comprende aproximadamente al 90 % de los casos, debido en gran medida a que la mayoría de las grandes ciudades no están construidas sobre la costa marítima. También, las corrientes de aire soplan desde el continente hacia el mar, reduciendo la incidencia de la brisa marina en las estructuras ubicadas en la costa patagónica (Traversa, 2006).

Las características morfológicas de las partículas del agregado fino pueden incidir sobre los mecanismos de transporte, afectando indirectamente la calidad de la pasta al modificar la relación *agua/material cementíceo* (*a/mc*) para mantener una determinada consistencia, y/o directamente, por los cambios que le imprime a la conformación de las interfaces *"pasta-agregado fino"*, su tortuosidad y el incremento del *efecto puente* que se produce entre partículas, cuando las mismas se tocan o si las interfaces se solapan. El agregado fino ocupa un volumen importante en el hormigón, siendo la superficie específica de la arena entre 25 y 40 veces la del agregado grueso. En general, los modelos del hormigón que lo consideran como un material compuesto ignoran la interfaz *"pasta-agregado fino"* ya que solo consideran tres fases, el agregado grueso, el mortero y la interfaz entre estos dos (Goble, 1999). Además, el volumen de interfaces *"pasta- agregado fino"* afecta entre un tercio y la mitad del volumen total de la pasta endurecida (Neville, 1997). Cabe acotar que se debe tener en cuenta que la influencia del tipo de agregado fino (los aspectos geológicos y morfológicos de las partículas), sobre los procesos de corrosión de las armaduras tanto debidos a la carbonatación como al ataque por cloruros, no ha sido abordada en la bibliografía internacional. El objetivo de este trabajo es la evaluación del efecto del tipo de agregado fino sobre el fenómeno de carbonatación del hormigón. Los estudios se basan en el

comportamiento de dos series de hormigones con diferentes relaciones *agua/cemento* (*a/c*) y con distintos curados, empleando cinco clases diferentes de agregados finos.

2. MATERIALES, DOSIFICACIONES Y METODOLOGIA

2.1 Materiales

Como aglomerante se empleó un cemento portland con filler calcáreo (CPF-30, Norma IRAM 50000) con una pérdida por calcinación de 10.3 %, que denota un contenido de filler relativamente elevado. El agregado grueso usado fue una piedra partida granítica con un tamaño máximo nominal de 19 mm. Los agregados finos en estudio son tres arenas trituradas *"0-6 mm"* de distintas mineralogías (calcárea, dolomítica y granítica, con módulos de finura, *MF*, y contenidos de polvo similares), y dos arenas naturales, una con módulo de finura similar a las anteriores, y otra, con un módulo menor, 2.39. Las características de los agregados finos se detallan en la Tabla 1, incluyendo las características físicas de las partículas de arenas empleando el criterio de la norma BS 812 (Norma BS 812). El aditivo superplastificante empleado tenía como materia activa polímeros acrílicos.

Tabla 1: Módulo de finura, densidad y características físicas de los agregados finos.

Tipo de arena	***Calcárea (C)***	***Dolomítica (D)***	***Granítica (G)***	***Silícea (AN)***	***Silícea fina (S)***
Módulo de finura	3.48	3.38	3.15	3.33	2.39
Polvo (<75µm)	10.6	13.3	10.7	0	0
Densidad relativa	2.68	2.77	2.69	2.64	2.63
Forma partículas (*)	Angular	Elongada	Angular	Redondeada	
Textura superficial (*)	Rugosa	Rugosa	Cristalina	Pulida	

(*) de acuerdo con la norma BS 812

2.2 Dosificaciones

Se elaboraron dos series de hormigones, en la Serie 1 con relación *a/c* = 0.45, se incorporo el aditivo superfluidificante en las mezclas con arenas trituradas para obtener una consistencia del orden de 6 cm. Las mezclas de esta serie que contienen arenas naturales resultaron plásticas sin necesidad de incorporar aditivos, con un mayor asentamiento. Los hormigones de la Serie 2, con relación *a/c* = 0.50, no contienen aditivos dado que se obtuvo una consistencia similar a la Serie 1 adicionando un mayor contenido de agua, práctica que se realiza en obras con poco control de calidad. En cada serie el volumen de pasta se mantuvo constante y la variable fue el tipo de arena empleada. La relación *a/c* de la Serie 1 se eligió teniendo en

cuenta los valores límites para la mayoría de las clases de exposición que establece el Reglamento CIRSOC 201-05 (CIRSOC 201-05), excepto para los más agresivos (marino sumergido, congelación y deshielo con sales anticongelantes y agresividad química muy fuerte). Las proporciones de las mezclas se indican en Tabla 2. La mezcla *HAN-2* presentó una fluidez demasiado elevada por lo cual no se elaboraron probetas. Los hormigones de la Serie 1 fueron curados sumergidos en agua a 22±2 °C durante 28 días (curado normal), en cambio, los correspondientes a la Serie 2, solo fueron curados durante 3 días y los restantes 25 días se mantuvieron en ambiente de laboratorio (curado deficitario).

Tabla 2: Dosificaciones empleadas, en kg/m^3.

	Serie 1 (a/c=0.45)					Serie 2 (a/c=0.50)			
Mezcla	***HC-1***	***HD-1***	***HG-1***	***HAN-1***	***HS-1***	***HC-2***	***HD-2***	***HG-2***	***HS-2***
Cemento	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Agua	180	180	180	180	180	200	200	200	200
Arena	798	825	801	786	786	745	770	747	733
Agregado grueso	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Aditivo, %	0.50	0.60	0.50	---	---	---	---	---	---
Asentamiento, cm	6	6	6	14	12	6	8	6	16

2.3 Ensayo de la degradación del hormigón

El espesor de la profundidad de carbonatación, se obtuvo de probetas de hormigón, cilíndricas de 10 cm de diámetro y 5 de alto, y prismáticas de 15 x 15 x 45 cm , expuestas a la atmósfera de la ciudad de Olavarría, provincia de Buenos Aires, Argentina (*A-2*, clase de exposición: ambiente normal según el Reglamento CIRSOC 201-05), donde la temperatura y la humedad relativa, medias anuales, son de 14.6 °C y de 72 %, respectivamente (CRA, 2013). Los tiempos de exposición estuvieron comprendidos entre 34 y 75 meses.

La determinación del espesor carbonatado se obtuvo pulverizando con una solución de fenoftaleína, la cual hace virar la superficie tratada a un color rosa-púrpura cuando el hormigón no está carbonatado, mientras que las zonas carbonatadas, con *pH* del orden de 9/10, permanecen incoloras.

3. DISCUSION DE RESULTADOS

3.1. Resistencia y velocidad de succión capilar de los hormigones

Resistencia a compresión: De la Tabla 3 se puede establecer que la resistencia a compresión de los hormigones con arena trituradas, a los 28 días, fueron de 39 ± 1 MPa y 31 ± 1.5 MPa, para las Series 1 y 2, respectivamente. Las mezclas con arena natural presentaron un valor de

resistencia más bajo respecto a los valores medios correspondientes a los que contenían arenas trituradas, del 84 y 87 %, para las Series 1 y 2, respectivamente. En ambos casos, la forma redondeada y la textura superficial pulida fueron responsables, en parte, de este comportamiento al disminuir la adherencia, aunque también, la presencia del polvo de la arena pudo modificar las características de los productos de hidratación del cemento, en los hormigones con arenas trituradas. Además, los efectos del incremento de la relación *a/c* y del curado deficiente, para los hormigones con arenas trituradas, fue una disminución en promedio del 21 % de la resistencia a compresión.

Succión capilar (Norma IRAM 1871): Los valores de la velocidad de succión capilar de los hormigones con arenas trituradas, a los 28 días, fueron de 3.92 ± 0.40 $g/m^2.s^{0.50}$ y 15 ± 1.74 $g/m^2.s^{0.50}$, para las Series 1 y 2, respectivamente. Las mezclas con arena natural presentaron valores de velocidad de succión capilar mayores respecto a los valores medios de los que contenían arenas trituradas, del 29 y 68 %, para las Series 1 y 2, respectivamente, ante la menor tortuosidad de las interfaces por la lisura de las partículas de arena. Respecto a la capacidad de succión capilar el tipo de arena no influye significativamente, cuando el módulo de finura es similar.

Tabla 3: Propiedades de los hormigones en estado endurecido.

	Serie 1 (*a/c*=0.45) – curado normal					**Serie 2 (*a/c*=0.50) - curado deficitario**			
Mezcla	***HC-1***	***HD-1***	***HG-1***	***HAN-1***	***HS-1***	***HC-2***	***HD-2***	***HG-2***	***HS-2***
Resistencia, (MPa)	40.4	38.8	38.2	31.9	33.7	31.0	32.4	29.7	27.0
Velocidad de succión, ($g/m^2.s^{0.50}$)	4.32	3.75	3.56	5.05	6.74	16.74	13.57	14.67	26.00
Capacidad de succión, (g/cm^2)	0.387	0.381	0.346	0.374	0.429	0.571	0.553	0.489	0.580

3.2. Determinación del coeficiente de carbonatación

Si bien, existen varios modelos sobre el proceso de carbonatación (DuraCrete, 1998), basados en modificaciones a la primera Ley de Fick, en general se considera que la velocidad de carbonatación disminuye con el tiempo. Una fórmula sencilla ha sido adoptada por la Norma EN 206 (EN 206, 1997) para determinar la profundidad de carbonatación (d) en función del tiempo (t), Ecuación (1). Por otra parte, en el Anejo 9 de la Instrucción española EHE-2008, los espesores de recubrimiento dependen de la resistencia del hormigón, de la clase de exposición, del tipo cemento utilizado y de la vida útil prevista en el proyecto (EHE, 2008). La Ecuación (2) para calcular el coeficiente de carbonatación, K_c, se basa en el modelo de H*ä*kkinen (DuraCrete, 1998).

$$d = K_c\, t^{0.50} \qquad (1)$$

donde: K_c es el coeficiente de carbonatación (mm/año$^{0.50}$) que engloba las variables del hormigón (resistencia mecánica, tipo de cemento, tiempo de curado) y del ambiente (concentración de CO_2, temperatura, humedad relativa).

$$K_c = C_{env}\, C_{air}\, a\, (f_{cm})^b \qquad (2)$$

donde: f_{cm} , resistencia media del hormigón a compresión, en N/mm^2; C_{env} , coeficiente de ambiente; C_{air}, coeficiente de aireantes, contempla el contenido de aire intencionalmente incorporado al hormigón; y a, b, parámetros función del tipo de conglomerante.

En la Tabla 4 se indican los valores del coeficiente de carbonatación obtenidos con la Ecuaciones (1) y (2), la primera de ellas se basa en los valores experimentales medidos del espesor carbonatado sobre las probetas de hormigón, y la otra, se plantea de un modo teórico utilizando las resistencias a compresión de los hormigones obtenidas.

Tabla 4: Espesores de carbonatación y coeficiente de carbonatación.

Hormigón	Espesor carbonatado (mm)	Meses de exposición	Coeficiente de carbonatación, mm/año$^{0.5}$		Relación *a/c* y Tipo de curado
			Kc (*)	***Kc*** (#)	
HC-1	4	46-75	2.04	2.51	***Serie 1:*** - Relación *a/c* = 0.45 - Curado normal durante 28 días.
HD-1	5		2.55	2.69	
HG-1	4		2.04	2.76	
HAN-1	5		2.55	3.75	
HS-1	7		2.80	3.41	
HC-2	7	34	4.16	4.51	***Serie 2:*** - Relación *a/c* = 0.50 - Curado normal durante 3 días, luego en laboratorio.
HD-2	9		5.35	4.16	
HG-2	8.2		4.87	4.82	
HS-2	8		4.75	4.41	

(*) valor experimental, Ecuación (1); (#) valor teórico, EHE-2008, Ecuación (2)

Se ha sugerido que en un hormigón de alta resistencia a la carbonatación, el coeficiente de carbonatación posee un valor entre 2 y 3 mm/año$^{0.5}$, mientras que en un hormigón de baja resistencia a la carbonatación, el valor de K_c supera los 6 mm/año$^{0.5}$ (DURAR, 2000). De acuerdo a esta clasificación por el K_c, los hormigones con relación *a/c* = 0.45 (Serie 1), se encuentran en la categoría de hormigones de *alta calidad*; en cambio, los restantes, con relación *a/c* = 0.50 (Serie 2) y curado deficitario, la calidad es *regular* (DURAR, 2000; Andrade, 1993). Los resultados obtenidos, respecto a la influencia de la relación *a/c* sobre la

carbonatación, muestran una tendencia similar a la encontrada por otros autores (Moreno, 2004; Carvajal, 2007).

Los valores obtenidos de los coeficientes de carbonatación, aplicando las consideraciones del Anejo 9 de la Instrucción EHE-2008, Ecuación (2), presentan diferencias con los valores experimentales de similar magnitud que los obtenidos por Eperjesi et al (Eperjesi, 2010). El promedio del coeficiente de carbonatación obtenido para los hormigones de la Serie 1 con arenas gruesas (*MF* = 3.33 ± 0.18), trituradas y natural es de 2.30 mm/año$^{0.50}$. En cambio, para igual dosificación del hormigón, pero utilizando una arena natural más fina (*MF* = 2.39), el valor de este coeficiente se incrementa un 21 % (2.80 mm/año$^{0.50}$). Además, si se comparan los promedios de los coeficientes de carbonatación experimentales, de los hormigones con arenas gruesas y con mayor relación *a/c*, el incremento del coeficiente de carbonatación es un 108 % mayor, respecto a los hormigones de la Serie 1. Este comportamiento, de la influencia del tipo y finura de la arenas, puede asociarse a los cambios que se introducen en las interfaces "*pasta-agregado fino*" (cantidad, tortuosidad y solapamiento).

Por otra parte, la vinculación entre el coeficiente de carbonatación y la velocidad de succión capilar muestran una tendencia relativamente clara, donde se observa que el incremento de la velocidad de succión capilar se corresponde con un incremento de la carbonatación, esto resulta coherente en cuanto que la velocidad de succión capilar se relaciona con la estructura de poros del hormigón (Figura 1). Cuando ésta permite el ingreso más rápido del agua, es lógico que también se incremente el ingreso de CO_2 hacia el interior del material.

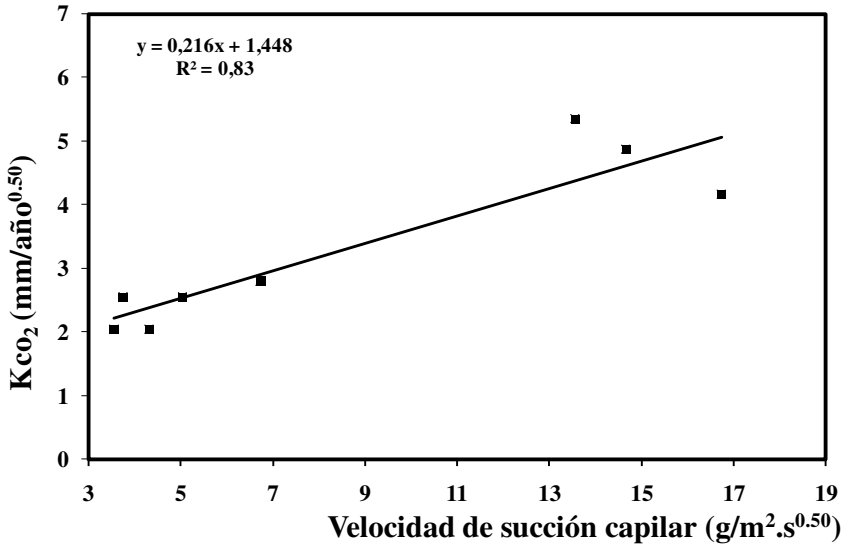

Figura 1: Relación entre el coeficiente de carbonatación y la velocidad de succión capilar.

En la Figura 2 se vincula el coeficiente de carbonatación de los diferentes hormigones, con sus respectivos valores de resistencia a compresión. Se observa que el incremento del coeficiente de carbonatación se corresponde con la disminución de la resistencia del hormigón, debido que ambos parámetros dependen de la estructura de poros del material.

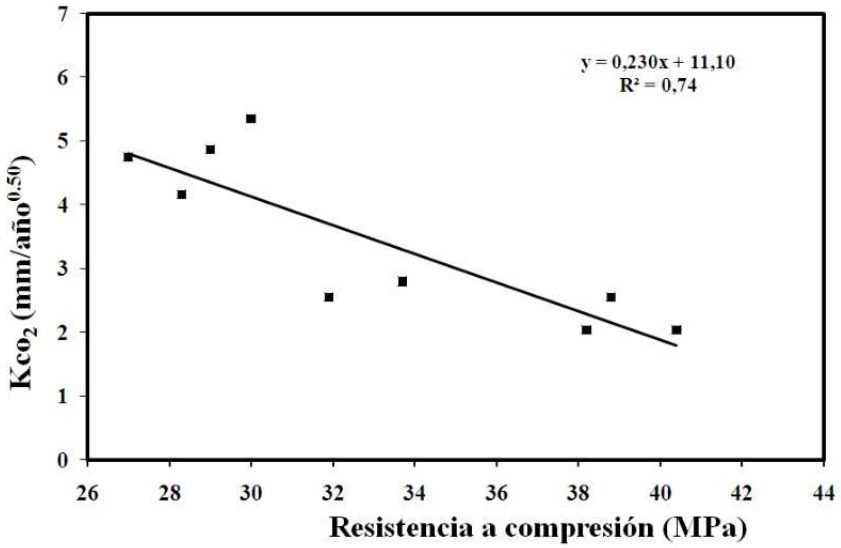

Figura 2: Relación entre el coeficiente de carbonatación y la resistencia del hormigón.

3.3. Cálculo de la vida útil de acuerdo con la Instrucción española EHE 2008

La Instrucción española EHE-2008, Anejo 9, establece un modelo de predicción de la vida útil *(t_L)*, basado en el modelo de Tutti, para el caso de la corrosión de las barras de refuerzo, provocada por el proceso de carbonatación. En el cálculo del período de iniciación se aplica la ley de la raíz cuadrada del tiempo, y la ecuación correspondiente es la Ecuación (3).

$$t_i = (d/K_c)^2 \qquad (3)$$

donde: t_i es el tiempo para que la carbonatación penetre una profundidad d (mm) y K_c es el coeficiente de carbonatación en mm/año$^{0.50}$.

Como período de propagación, se considera hasta el momento en que se produce una pérdida de sección de la armadura inadmisible o cuando aparecen fisuras en el recubrimiento. Para el cálculo del tiempo de propagación (t_p, en años), la Instrucción española EHE-2008 propone, la Ecuación (4).

$$t_p = (80\ C)/(Ø/\ V_{corr}) \qquad (4)$$

donde: C es el espesor del recubrimiento en mm, $Ø$ es el diámetro de la barra en mm, y V_{corr}, la velocidad de corrosión, en µm/año. En ausencia de datos experimentales, la velocidad de corrosión se toma como 2 o 3 µm/año, para ambientes con humedad media o elevada, respectivamente.

El valor de la vida útil estimada *(t_L),* resulta de la suma de los dos períodos, de iniciación y propagación. El modelo de la instrucción, plantea que el tiempo de iniciación, y por ello, de la vida útil estimada, depende fuertemente de la resistencia característica del hormigón. En cambio, para en el tiempo de propagación, la relación "*C/Ø*" es la variable que influye significativamente. En este modelo de vida de servicio, y en algunos otros, se incluye el tiempo de propagación porque puede ser suficientemente largo, y tener efectos sobre las cuestiones económicas (Bioubakhsh, 2011).

Tabla 5: Cálculo de la vida útil de una estructura de hormigón armado de acuerdo con el modelo del EHE-2008.

Hormigón	**Coeficiente de carbonatación, mm/año$^{0.5}$**	**Recubri-miento (mm) (*)**	**Diámetro de la barra (mm)**	**t_i (años)**	**t_p (años)**	**$t_{Lexp.}$ (años)** (**)	**$t_{Lteó.}$ (años)** (#)	**Relación *a/c* y tipo de curado**
HC-1	2.04	30	16	216	75	291	218	***Serie 1:*** - Relación *a/c* = 0.45 - Curado normal durante 28 días.
HD-1	2.55			138		213	199	
HG-1	2.04			216		291	193	
HAN-1	2.55			138		213	139	
HS-1	2.80			115		190	152	
HC-2	4.16	30	16	52	75	127	152	***Serie 2:*** - Relación *a/c* = 0.50 - Curado normal durante 3 días
HD-2	5.35			31		106	165	
HG-2	4.87			38		113	142	
HS-2	4.75			40		115	111	

(*) Tabla 7.7.1, CIRSOC 201-05; (**) en base a valores experimentales, Ecuación (1) con 30 mm de recubrimiento, y 16 mm de diámetro de la barra; (#) tiempo calculado con la coeficiente de carbonatación teórica, Ecuación (2).

A modo de comparación entre las especificaciones del Reglamento CIRSOC 201-05 y el cálculo de la vida útil estimada por la Instrucción EHE-2008, y teniendo en cuenta los valores experimentales del coeficiente de carbonatación, se puede efectuar el siguiente análisis. En este ejemplo, se considera una estructura de hormigón armado ubicada en un ambiente *A-2*, y de acuerdo con los recubrimientos establecidos por el Reglamento CIRSOC 201-05, para un hormigón expuesto al aire, con armaduras de diámetro ≤ 16 mm, se recomienda un recubrimiento mínimo de 30 mm. Se tomó para el cálculo una V_{corr} de 2 µm/año (humedad media). En la Tabla 5 se indican los valores de los tiempos de iniciación y de propagación, y

de la vida útil estimada, para una estructura realizada con diferentes arenas trituradas y naturales, y para dos relaciones *a/c*. Se debe destacar que para los hormigones de la Serie 1, los valores de t_i son muy elevados respecto a la vida útil establecida por el Reglamento CIRSOC 201-05 (50 años), en cambio en el caso de los hormigones con mayor relación *a/c* y con un curado deficitario (Serie 2), 3 de 4 hormigones, no alcanzan a cumplir este valor mínimo (ver columna quinta, Tabla 5).

Con el fin de evaluar la sensibilidad del modelo, se efectuó otro cálculo de la vida útil estimada, donde se considera el coeficiente de carbonatación calculado, de acuerdo la Instrucción EHE-2008, Ecuación (2). En este caso interviene la resistencia del hormigón, y el tiempo de iniciación se reduce, en algunos casos en forma significativa, pero en promedio, la reducción es de un 14 %. El tiempo de propagación es el mismo ya que este no depende de la resistencia del hormigón, y los valores de la vida útil estimada por la Instrucción EHE-2008 resultan, en la mayoría de los casos, menores a los obtenidos con valores de *Kc* experimentales (ver columna octava, Tabla 5). Posteriormente, siguiendo el análisis, en el cálculo anterior también se consideró la resistencia mínima indicada en el Reglamento CIRSOC 201-05, para el ambiente *A-2* (*H-25*), utilizando una barra de 16 mm de diámetro, obteniéndose un valor de vida estimada de 147 años (t_i = 72 años y t_p = 75 años).

Por otra parte, en un análisis similar efectuado por otro autor, se encontró que la aplicación del modelo de la Instrucción EHE-2008 dio como resultado valores de la vida útil relativamente elevados, concluyendo que este modelo sobreestima los tiempos inferidos para la vida útil, en particular, los que corresponden con la despasivación de las armaduras. Si bien considera que el modelo de la Instrucción española EHE-2008 es un logro, estos avances deben ser considerados con precaución, y se comprobó la sensibilidad de algunos parámetros involucrados, sobre los que no existe mucha información de los valores asignados (Eperjesi, 2010).

Finalmente, aplicando el modelo de la Instrucción EHE-2008, con los coeficientes de carbonatación experimentales, se obtuvieron las Figura 3 y 4. En la Figura 3 se vincula el espesor de recubrimiento con el tiempo de iniciación, para hormigones con relaciones *a/c* de 0.45 y 0.50. Algunos autores, establecen como vida útil de proyecto al tiempo de iniciación, cuando las condiciones de despasivación llegan a la barra y comienza el proceso de corrosivo (Helene, 1997). Las especificaciones del Reglamento CIRSOC 201-05 (ambiente *A-2*, *C* = 30 mm, relación *a/c* máxima de 0.50 y 50 años de vida útil), para una barra de acero con *Ø* = 16 mm, se cumplen para todos los hormigones de la Serie 1 (relación *a/c* = 0.45), y solo para el hormigón *HC* de la Serie 2 (relación *a/c* = 0.50).

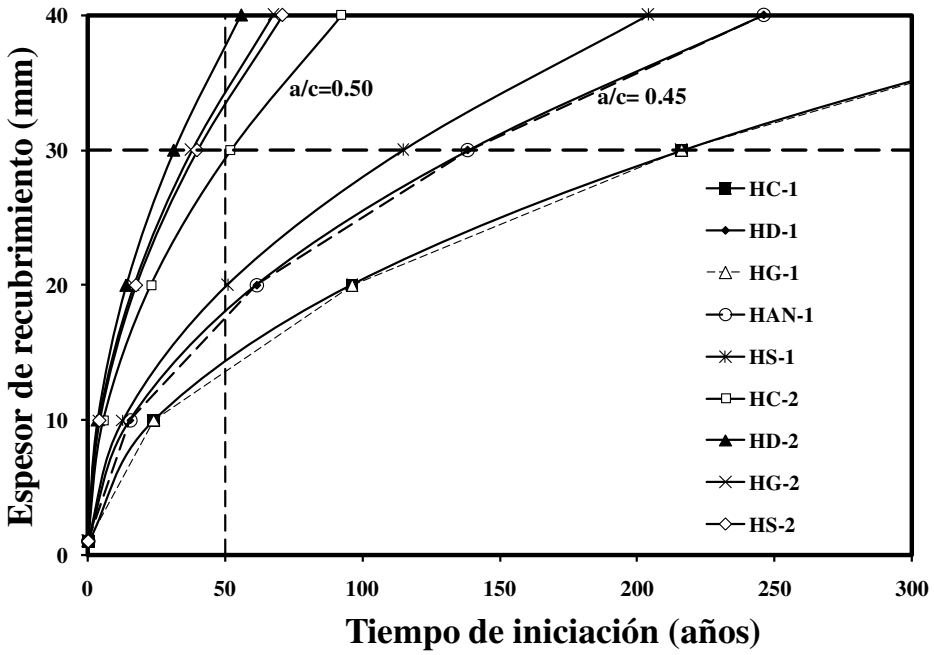

Figura 3: Tiempo de iniciación para diferentes hormigones empleando el modelo de la Instrucción EHE-2008.

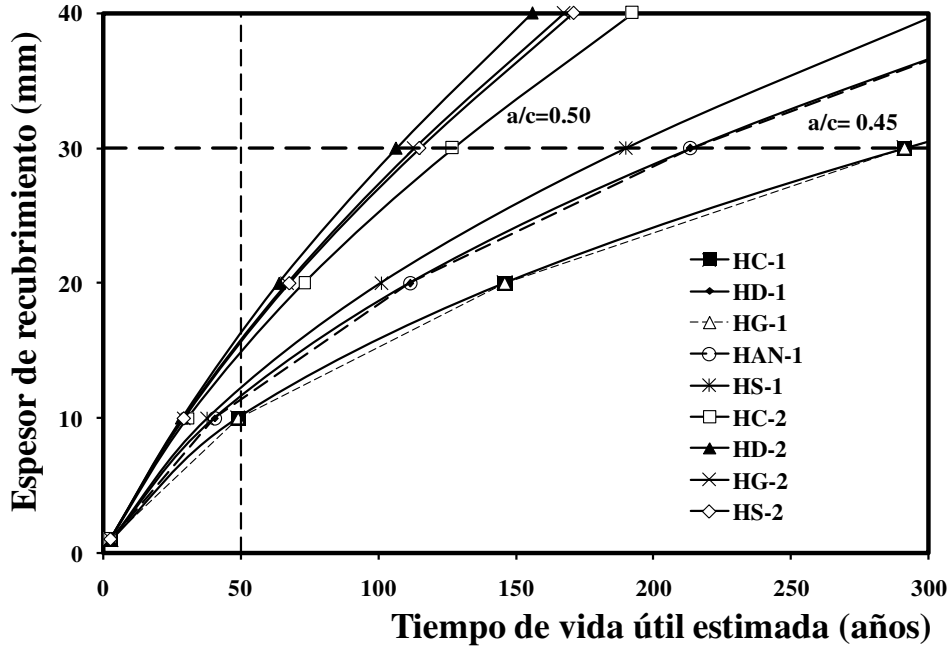

Figura 4: Tiempo de vida útil estimada para diferentes hormigones según el modelo de la Instrucción EHE-2008.

En la Figura 4, para las mismas condiciones indicadas para la Figura 3, se relaciona la vida útil estimada con el espesor de recubrimiento. Para las dos series de hormigones, se cumplen

las especificaciones de durabilidad indicadas en el Reglamento CIRSOC 201-05. En dicha figura, se ve claramente la influencia del tipo de arena, para las dos series de hormigones, sobre la vida útil de una estructura de hormigón armado. Para la serie de hormigones con una relación *a/c* = 0.50 y curado deficitario, el rango de la vida útil estimada varía entre 106 y 127 años. En cambio, para los hormigones con una relación *a/c* = 0.45 y curado normal, el rango varía entre 190 y 291 años. Los hormigones con arena natural muestran un comportamiento intermedio entre los valores que se obtuvieron para los hormigones con arenas trituradas.

3.4. Determinación del espesor de hormigón carbonatado

El Modelo propuesto por la Dra. Edna Possan para calcular la profundidad de carbonatación teniendo en cuenta: la resistencia del hormigón, el contenido de adiciones minerales activas, el tiempo, la concentración de CO_2 en el ambiente, la humedad relativa ambiente y la exposición a la lluvia (Possan, 2010) se indica en la Ecuación (5). Este modelo no tiene en cuenta el tipo de curado del hormigón, considera los cementos normalizados en Brasil, y ha sido validado sobre resultados experimentales de varios autores, con una eficiencia del 77 %.

$$y = k_c\left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} .\exp\left[\left(\frac{k_{ad}.ad^{\frac{3}{7}}}{40+f_c}\right)+\left(\frac{k_{co_2}.CO_2^{\frac{1}{2}}}{60+f_c}\right)-\left(\frac{k_{UR}.(UR-0{,}58)^2}{100+f_c}\right)\right].k_{ce} \quad (5)$$

donde:
y = profundidad de carbonatación media del hormigón, en mm.
k_c = factor variable que depende del tipo de cemento empleado.
f_c = resistencia característica a compresión del hormigón, en MPa.
k_{fc} = factor variable relacionado con la resistencia a compresión, en función del tipo de cemento utilizado.
t = edad del hormigón, en años.
ad = contenido de adición de puzolana en el hormigón, en % en relación a la masa de cemento.
k_{ad} = factor variable relacionado con el tipo de la adición puzolánica (humos de sílice, metacaolín y ceniza de cáscara de arroz), en función del tipo de cemento.
CO_2 = concentración de CO_2 en la atmósfera, en %.
k_{co2} = factor variable referido a la concentración de CO_2 del ambiente, en función del tipo de cemento.
UR = humedad relativa media, en % * 100.
k_{UR} = factor variable relacionado con la humedad relativa, en función del tipo de cemento utilizado.
k_{ce} = factor variable relacionado con la exposición a la lluvia, en función de las condiciones de exposición de la estructura.

Se calculo con la Ecuación (5) la profundidad de carbonatación con los coeficientes para el cemento fillerizado CP II F (Norma NBR 11578) para las dos series de hormigones, y se pudo observar que en este caso el modelo no dio resultados próximos a los determinados

experimentalmente (0.77 y 0.52 de los valores experimentales para las Series 1 y 2, respectivamente). Las diferencias entre valores se asocian a que éste cemento puede incluir entre 6 y 10 % de filler, y en cambio, el cemento argentino empleado en éste trabajo tenía un contenido de filler del orden del 20 % (CPF-30, IRAM 50000).

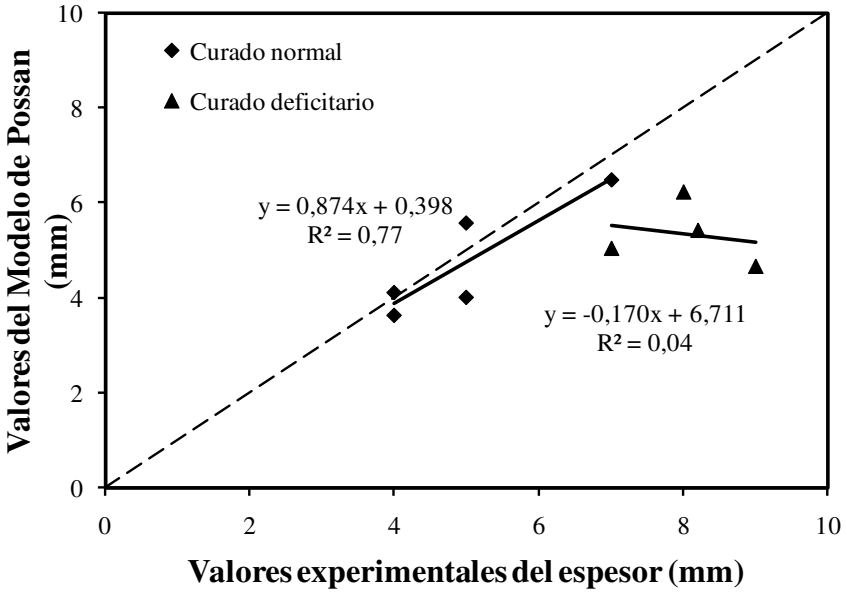

Figura 5: Relación entre los espesores carbonatados experimentales y los obtenidos con el Modelo de E. Possan.

Posteriormente, para lograr un mejor ajuste se emplearon las constantes del Modelo de Possan para un cemento CP I, y considerando que para acercarlo en su composición al CPF-30 el CP I se diluye un 20 % con filler, entonces, la relación *a/c efectiva* resulta ser de "*1/0.80*" de la empleada. Como la velocidad de carbonatación depende fundamentalmente de la relación *a/c* (dado que la red de poros constituye el camino de avance del CO_2 proveniente del exterior) (Page, 1992), por ello, las constantes k_c, k_{co2}, k_{UR}, y k_{ce}, fueron afectadas por el coeficiente "*1/0.80*", debido a que este valor modifica la relación "*agua/materiales cementíceos*" y la convierte en la relación *a/c efectiva* (efecto de dilución). Los valores obtenidos con estas consideraciones resultan óptimos en el caso de la Serie 1, pero no para los de la Serie 2 ya que el Modelo no tiene en cuenta al curado deficitario que tuvieron estos hormigones (Figura 5).

3.4.1. Propuesta de modificación al Modelo de E. Possan para tener en cuenta el curado

Para considerar el efecto del curado sobre la carbonatación, se propone una modificación al Modelo de la Dra. Edna Possan, Ecuación (6), basada en la velocidad de succión capilar. Este

parámetro es significativamente sensible a las variaciones del curado del hormigón (Cabrera, 2013). Para ello se afecta a la ecuación (5) de un exponencial que tiene en cuenta la velocidad de succión capilar del hormigón con un curado normal respecto al hormigón con un curado deficitario y una constante de ajuste (k_{sc}).

$$y_m = y \,.\, exp[k_{sc} \,.\, (VSC_{cn}/VSC_{cd})] \qquad (6)$$

donde:

y_m = profundidad de carbonatación media del hormigón teniendo en cuenta el tipo de curado, en mm.
y = profundidad de carbonatación media del hormigón con curado normal, en mm, Ecuación (5).
k_{sc} = factor variable que depende del tipo de curado, se propone para el curado normal un valor de 0, y para 3 días de curado normal un valor de 1.60.
VSC_{cn} = velocidad de succión capilar de hormigón con curado normal, en $g/m^2.s^{0.50}$.
VSC_{cd} = velocidad de succión capilar de hormigón con curado deficitario, en $g/m^2.s^{0.50}$.

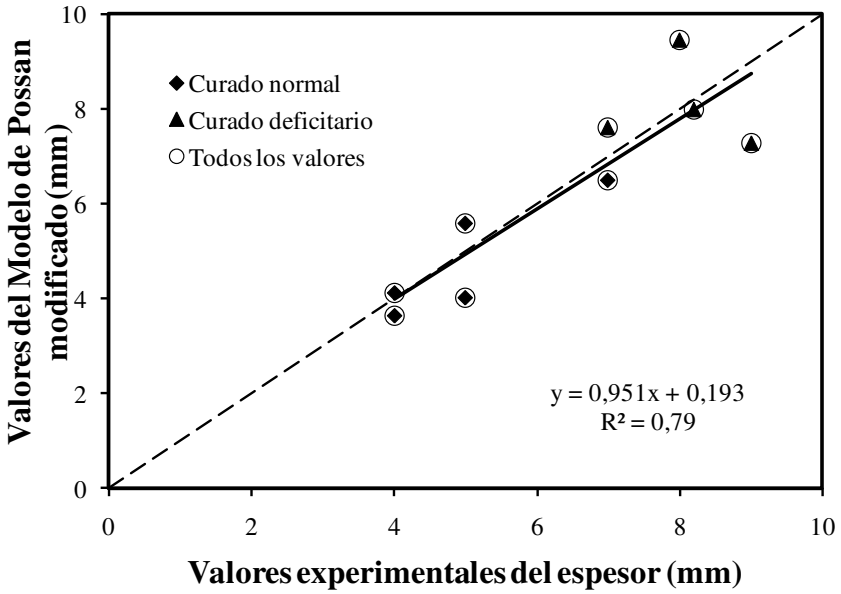

Figura 6: Relación entre los espesores carbonatados experimentales y los obtenidos con el Modelo modificado de Edna Possan para considerar el tipo de curado del hormigón.

En la Figura 6, se observa que con la modificación propuesta existe una adecuada correlación entre los valores experimentales con diferentes tipos de curados y los obtenidos con la Ecuación (6). Si bien la propuesta de modificación al Modelo de la Dra. Edna Possan se basó en un número limitado de valores, se debe seguir trabajando en el tema para verificar la factibilidad de la propuesta realizada, incrementando la cantidad de ensayos y tipos de curado.

4. CONCLUSIONES

Las experiencias y estudios realizados con hormigones elaborados con distintos tipos de agregados finos (naturales y triturados), y con curados y relaciones *a/c* diferentes, donde se mantuvo constante el volumen de pasta, permiten llegar a las siguientes consideraciones:

- De acuerdo con la clasificación del Manual DURAR, en base al coeficiente de carbonatación, los hormigones con relación *a/c* = 0.45, se encuentran en la categoría de hormigones de *alta calidad*, en cambio, los restantes, con relación *a/c* = 0.50 y curado deficitario, su calidad es *regular*. Para ambas series, los resultados obtenidos no muestran una significativa diferencia entre los hormigones fabricados con diferentes arenas trituradas, respecto a los elaborados con arenas naturales. Este comportamiento puede asociarse a que la tortuosidad de las interfases, a nivel agregado fino, no interfieren en la difusión del CO_2, ya que el volumen de pasta de cemento fue constante. En cambio, en promedio, el incremento del coeficiente de carbonatación, al variar la relación *a/c* (de 0.45 a 0.50) y el tipo de curado fue de un 108 %.
- Aplicando el modelo de carbonatación establecido en la Instrucción Española EHE-2008, dio como resultado valores de la vida útil relativamente elevados, concluyéndose que este modelo sobreestima los tiempos inferidos para la vida útil. Se debe tener en cuenta que los modelos de vida útil están sujetos a cambios y ajustes permanentes, que permiten retroalimentar el diseño y el desempeño de las estructuras de hormigón armado.
- Se propone una modificación al Modelo de la Dra. Edna Possan, para tener en cuenta el tipo de curado, basado en la velocidad de succión capilar, que para los valores analizados se obtuvo una adecuada aproximación con los valores experimentales.

5. REFERENCIAS

BALLIM, Y., et al, **Reflections on future needs in concrete durability research and development**, Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – Alexander et al (Eds.), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46850-3, pp.73-80, 2009.

BIOUBAKHSH, S., **The penetration of chloride in concrete subject to wetting and drying: measurement and modelling**, Doctoral thesis, U. College London, 355 p., 2011.

BS 812, Part 1: **Methods for sampling and testing of mineral aggregates, sands and filler: sampling, shape, size and classification**, British Standards Institution, London, 1975.

CABRERA, O., **Caracterización de la durabilidad de hormigones con arenas de trituración**, Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, 2013.

CARVAJAL, A.M.; SILVA, C.; VALIENTE, J. & VENEGAS, A., **Efectos de la carbonatación acelerada en distintos tipos de cemento y hormigones**, Revista de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Vol. 6, Nº 1, pp. 88-97, 2007.

CRA, Centro Regional Agrometeorológico, Fac. de Agronomía, UNCPBA, Argentina, 2014.

DURACRETE, **Probabilistic performance based durability design of concrete structures. Modelling of degradation**, The European Union – Brite EuRam III, Document BE95-1347/R4-5, 1998.

DURAR, **Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armad**o, Ed. CYTED, España, 2000.

EHE, **Instrucciones de hormigón estructural**, Ministerio de Fomento, España, 2008.

HELENE, P., **Vida útil de las estructuras de concreto**, IV Congreso de Iberoamericano de Patología de las Construcciones – CONPAT-97, Porto Alegre, Brasil, tomo 1, pp 1-30,1997.

EPERJESI, L., **Avances en la normalización de la resistencia a la carbonatación de estructuras de hormigón armado**, IV Congreso Internacional y 18ª Reunión Técnica de la AATH, ISBN 978-987-21660-4-5, pp. 299-306, Mar del Plata, Argentina, 2010.

GOBLE, C. & COHEN, M., **Influence of aggregate surface area on mechanical properties of mortar**, ACI Materials Journal, Vol. 96, Nº 6, 1999.

MORENO, E. et al, **Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración**, Ingeniería 8-2, pp. 117-130, 2004.

NEVILLE, A.M., **Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete**, ACI Materials Journal, Vol. 94, Nº 1, pp. 71-74, 1997.

NORMA EN 206, **Concrete - Performance, production and conformity**, European Committee for Standardization, 1997.

NORMA IRAM 1871, **Hormigón. Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido**, Argentina, 2004.

NORMA IRAM 50000, **Cemento. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción,** Argentina, 2004.

NORMA NBR 11578, **Cimento Portland composto**, ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 1991.

PAGE, C.L., **Nature and properties of concrete in relation to reinforcement corrosion**, in Corrosion of Steel in Concrete, Aachen, 17–19 February 1992.

POSSAN, E., **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**, Tese doctoral, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Brasil, 2010.

REGLAMENTO CIRSOC 201- 2005, **Reglamento argentino de estructuras de hormigón**, Ed, INTI, Buenos Aires, Argentina, 2005.

TRAVERSA, L.P., **Evaluación y diagnóstico de puentes de hormigón armado ubicados en ambientes rurales y marinos**, Proc. 16ª Reunión Técnica AATH, ISBN 987-21660-2-1, pp. 283-290, 2006.