

CORRELACIÓN ENTRE CARBONATACIÓN NATURAL Y ACELERADA DEL HORMIGÓN CON DISTINTOS CEMENTOS

Iloro F. H.¹, Traversa L. P¹, Ortega N. F.²

¹Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica y Comisión de Investigaciones Científicas, La Plata, Argentina. direccion@lemit.gov.ar

²Universidad Nacional del Sur-Dto. Ingeniería. nfortega@criba.edu.ar,

RESUMEN

En el diseño por durabilidad del hormigón armado, la afectación por carbonatación es uno de los factores importantes a considerar. La carbonatación natural es una reacción química originada cuando el CO₂ presente en la atmósfera entra en contacto con el hormigón a través de su red de poros interconectados con el exterior y reacciona con los productos hidratados alcalinos del cemento. La cinética del proceso depende de las características del medio de emplazamiento (concentración de CO₂, HR, etc.) y de la red porosa del hormigón (razón agua/material cementíceo, contenido y tipo de cemento, curado, etc.).

Para evaluar el comportamiento del hormigón y sus materiales componentes se emplean, en algunos casos, ensayos normalizados rápidos o acelerados, en los cuales a veces las condiciones de exposición de las muestras bajo evaluación son extremas, a fin obtener resultados en cortos periodos de tiempo. El Reglamento CIRSOC 201-2005, prescribe por ejemplo para calificar la durabilidad del hormigón, el ensayo de succión capilar, estableciendo una velocidad límite de diseño o sobre los agregados para determinar la reacción álcali-sílice (RAS) prescribiendo una expansión máxima límite a 16 días de ensayo. Este valor ha sido obtenido comparando los resultados obtenidos en ensayos acelerados con comportamiento reales.

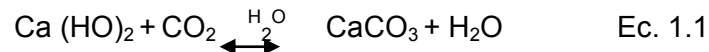
El método acelerado de carbonatación consiste en incrementar la concentración de CO₂ a valores superlativos respecto a la concentración atmosférica a fin de acelerar el proceso de carbonatación, existiendo distintas correlaciones entre la carbonatación acelerada con la natural, indicándose que 7 días en cámara acelerada con 4 % de CO₂, 23°C y 60 % HR corresponde a 360 días de exposición natural.

En este Trabajo se presentan correlaciones obtenidas entre profundidades de carbonatación naturales y aceleradas determinadas en hormigones elaborados con distintos tipos de cemento (CPN, CPC, CPF, CPP) y razones agua material cementante de 0.50. Las muestras se expusieron en distintos ambientes naturales. Con los resultados obtenidos se trata de calificar potencialmente una velocidad de carbonatación en el ensayo acelerado que permita calificar al hormigón en los distintos ambientes evaluados. Este límite podrá ser empleado al igual que en otros métodos acelerados para calificar al hormigón, en el último caso para aceptar o rechazar una determinada dosificación o modificar el espesor de recubrimiento para alcanzar la vida útil de diseño.

Palabras clave: Hormigón, durabilidad, carbonatación, método acelerado

INTRODUCCION

El proceso de carbonatación es la reacción del CO₂ atmosférico con los productos hidratados del hormigón principalmente con el hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) y con el silicato de calcio hidratado (S-C-H). El Ca(OH)₂ se forma durante la hidratación del cemento Portland y está disuelto en el agua de poros del hormigón, conjuntamente con los álcalis del cemento (Sodio y Potasio) y, en menor significancia, de los agregados. El dióxido de carbono (CO₂) gaseoso presente en el aire, ingresa a la masa del hormigón a través de los poros interconectados con el exterior Fig. 1, transformando al Ca (HO)₂ en carbonato de calcio (CaCO₃) según la Ec. 1.1



El CIRSOC 201 [1] clasifica a los ambientes o atmósferas en los cuales puede estar emplazada una estructura de acuerdo con el tipo de exposición que puede producir degradación por corrosión de las armaduras o por otras causas distintas a la corrosión. Teniendo en cuenta esta clasificación para los ambientes exteriores de emplazamiento puede plantearse entonces que la mayoría de las atmósferas de Argentina corresponden a la clase A2 (Corrosión por carbonatación), a excepción de aquellas que se ubican en la zona de la costa atlántica que corresponden a Ambiente M1, M2 y M3 (corrosión por cloruros en ambiente marino) o CL (corrosión por cloruros en ambiente distinto al marino).

Para el diseño por durabilidad el CIRSOC 201 prescribe el ensayo de succión capilar prescribiendo una velocidad límite de 4 g/m²seg^{0.5}. Este ensayo surgió como necesidad para caracterizar al hormigón respecto a su comportamiento durable, ya que hasta antes de incluirse en los reglamentos al hormigón el concepto de durabilidad se lo caracterizaba generalmente por su nivel resistente.

Es sabido que cuando existen agregados con minerales potencialmente reactivos con los álcalis del cemento puede generarse reacciones químicas deletéreas, por ello se han creado ensayos acelerados normalizados como el ensayo de barras de morteros que limita una expansión máxima a la edad de 16 días 0.1 % o para el prisma de hormigón a las 13 semanas de 0,08% y 0,04 % en función de la mineralogía del agregado [2].

El comportamiento de estructuras sometidas a condiciones reales de agresividad ha demostrado que no se relaciona linealmente con los resultados obtenidos en los ensayos acelerados, por lo tanto los métodos acelerados pueden ser válidos para la aceptación del material pero no para su rechazo [3].

Carbonatación natural: La velocidad del proceso de carbonatación depende de varios factores directamente relacionados con las características agresivas del medio en contacto con la estructura (concentración de CO₂, humedad relativa, precipitaciones) y con el espesor y calidad del hormigón de recubrimiento definida por el tipo y contenido de cemento, razón a/mc, y el tamaño y volumen de los poros capilares y de los macroporos (poros de compactación y/o aire ocluido) interconectados con el exterior, que son los que cobran importancia en todos los procesos de durabilidad.

El proceso de carbonatación tiene su origen en la difusión de CO₂ en la estructura porosa del hormigón, según la ley de Fick donde la penetración es proporcional al gradiente de concentraciones entre dos medios. Es conocido que cuanto mayor es la concentración en un medio y menor la cantidad de sustancias reactivas en el otro, mayor será el transporte. En la Figura 1 se esquematiza el proceso de difusión del CO₂ en la estructura del hormigón y los productos que se forman en el proceso.

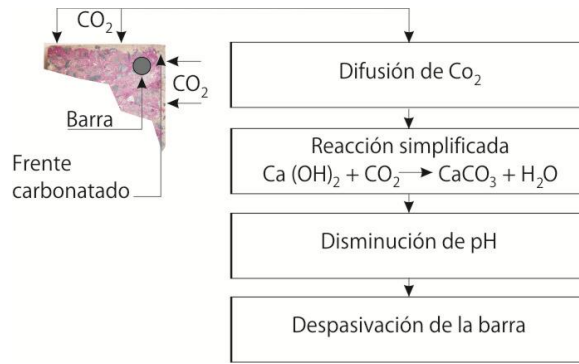


Figura 1: Esquema del proceso de carbonatación (Adaptado Traversa, 2001 [4])

Método acelerado de carbonatación: La carbonatación natural es un proceso demasiado lento para calificar al hormigón en cortos periodos de tiempo, por ello desde hace años se están implementado métodos de carbonatación acelerada. Se proponen diferentes procedimientos para el método acelerado existiendo poco consenso en cuanto a la concentración de CO₂ y los parámetros higrotérmicos (HR, T) empleados como así también al tipo de curado, el estacionamiento y condicionamiento previo de las muestras antes de carbonatarlas y a las dimensiones y formas de las mismas.

Las cámaras de carbonatación poseen diseños diferenciados en cuanto al tipo del material empleado para los gabinetes (vidrio, metal, acrílico, nylon, etc.). La concentración de CO₂ se logra inyectando CO₂ en estado gaseoso o solido (hielo seco) mientras que la HR se obtiene mediante aire húmedo, vapor de agua o con distintas soluciones salinas saturadas. También, se pueden acoplar a las cámaras sondas para el control de la temperatura, HR y concentración de CO₂. Existen, en la actualidad, cámaras de carbonatación normalizadas como lo especificado en de la norma UNE EN 83993-1:2009 [5]. Las variables que pueden influir sobre los resultados cuando se aplica el método acelerado de carbonatación son:

- **Estacionamiento y acondicionamiento de las muestras:** El estacionamiento y acondicionamiento de las probetas para el ensayo son determinantes de los resultados que se obtienen en los métodos acelerados. En una primera etapa debe contemplarse el tipo y tiempo de curado, que definen la densificación de la estructura porosa. Las condiciones del estacionamiento luego del curado, también, pueden afectar la estructura porosa y/o causar en ambientes severos (altas temperaturas ó baja humedad) microfisuraciones por donde puede ingresar el CO₂.

- **Estado de saturación del hormigón:** Las muestras deben alcanzar un equilibrio higrométrico respecto a las condiciones de climáticas de la cámara previo a la inyección del CO₂, ya que el estado de saturación de la muestra respecto a las condiciones de ensayo puede originar una distorsión en los resultados y no reflejar el comportamiento en un ambiente natural. RILEM [6] considera un estado de referencia cuando las muestras alcanzan el equilibrio a una HR $75 \pm 2\%$ y $20 \pm 1^\circ \text{C}$ con una distribución uniforme del agua evaporable en las muestras de ensayo mientras que la norma EN 13295:2004 [7] recomienda mantener las muestras en atmósfera con HR 60 % durante un período mínimo de 14 días, finalizando cuando la variación de masa entre dos lecturas es inferior a 0,2 % en 24 hs.

- **Concentración de CO₂:** En los ensayos de carbonatación acelerada existen criterios diferenciados en cuanto a la concentración a emplear ya que varían del 1 al

100%, en general, se acepta que a concentraciones alrededor del 4% de CO₂ el proceso es similar al que ocurre al carbonatarse en ambientes naturales. Estas divergencias surge en cuanto a las similitudes de la microestructura generada por carbonatación natural y acelerada. En el trabajo de microscopia realizado por Al-Kadhimi et al. [8] se afirma que la microestructura de una pasta de cemento que ha sufrido carbonatación natural y la de una que se ha carbonatado en atmósfera saturada de CO₂ no difieren. Castellote et al. [9], más centrado en la reacción de las fases, confirma que bajas concentraciones de CO₂, inferiores al 4%, no modifican de forma drástica la microestructura que se obtiene con respecto a la de la carbonatación natural.

Según Verbeck [10], concentraciones elevadas de CO₂ pueden aumentar la humedad interna del hormigón debido a la mayor velocidad de reacción y evolución del agua; a bajas concentraciones de CO₂ la humedad interna no aumenta por encima de la humedad exterior.

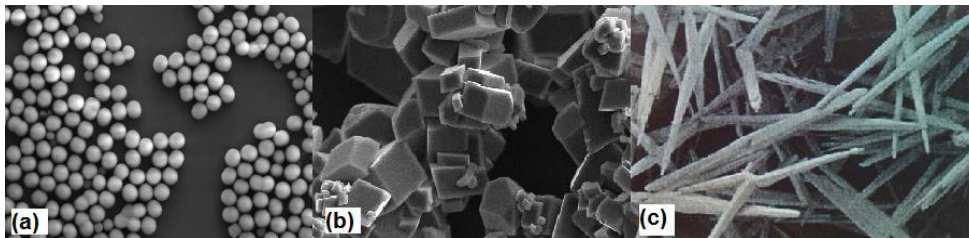


Figure 2: Polimorfos de Carbonatos de Calcio: (a) Vaterita, (b) Calcita, (c) Aragonita [11]

CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Materiales y mezclas: Para el análisis de la correlación de los resultados obtenidos con la carbonatación natural y acelerada se confeccionaron hormigones con distintos cementos, CUC 332 Kg/m³, la razón a/mc 0,50 según CIRSOC para ambientes clase A1, agregado grueso granítico y arena oriental y argentina como agregado fino. El curado fue de 28 días en cámara húmeda.

Los cementos empleados en la dosificación corresponden a cementos comerciales existentes en el mercado; en la Tabla 1 se presenta la composición química de los mismos y el contenido de material carbonatable (CMC) obtenido a partir de Iloro et al [12] que confiere la reserva alcalina o resistencia a la carbonatación.

Tabla 1: Composición química de los cementos

| Componentes (%) | Cemento | | | |
|--------------------------------|---------|-------|-------|-------|
| | CPN40 | CPC40 | CPP | CPF |
| Na ₂ O | 0.19 | 0.21 | 0.33 | 0.23 |
| MgO | 1.75 | 1.54 | 3.09 | 1.01 |
| Al ₂ O ₃ | 4.56 | 4.56 | 4.73 | 3.84 |
| SiO ₂ | 19.1 | 19.03 | 20.94 | 19.55 |
| P ₂ O ₅ | 0.11 | 0.09 | 0.26 | 0.12 |
| SO ₃ | 3.76 | 3.32 | 3.3 | 2.88 |
| Cl | -- | -- | 0.02 | -- |
| K ₂ O | 1.01 | 1.03 | 1.02 | 0.98 |
| CaO | 64.89 | 57.4 | 54.6 | 58.5 |
| TiO ₂ | 0.27 | 0.28 | 0.43 | 0.23 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |

| | | | | |
|--------------------------------|------|------|------|------|
| Mn ₂ O ₃ | 0.18 | 0.19 | 0.20 | 0.12 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.95 | 3.99 | 3.16 | 3.53 |
| ZnO | 0.07 | 0.05 | 0.00 | 0.01 |
| SrO | 0.07 | 0.07 | 0.12 | 0.06 |
| CMC (kg/m³) | 50.9 | 44.7 | 42.6 | 45.3 |

Metodología de ensayos

Carbonatación Natural: Para analizar el factor de influencia del medio ambiente de emplazamiento en cuanto al estado higroscópico del hormigón y las variaciones de concentraciones de CO₂, se programaron pruebas con distintas condiciones de exposición. El régimen de precipitaciones varía el estado de saturación superficial del hormigón modificando también por capilaridad una zona interna, por lo tanto en los elementos no protegidos de la lluvia los poros poseerán un estado saturado en los primeros mm. En el caso del ambiente interior la humedad y la temperatura serán constantes. Las concentraciones de CO₂ fueron monitoreadas con un equipo de sonda infrarroja. Las precipitaciones promedio en el periodo 2011- 2015 fueron de 830 mm/año. En la Tabla 2 se informan los promedios de las condiciones ambientales de los ambientes de exposición temperatura (T), humedad relativa (HR), concentración de CO₂.

Tabla 2: Condiciones de los ambientes de exposición

| Clase de Exposición | Parámetros | | |
|--|------------|--------|------------------------|
| | HR (%) | T (°C) | CO ₂ (ppmv) |
| (A) exterior no protegido del agua de lluvia | 72 | 17,5 | 400 |
| (B) exterior protegido del agua de lluvia | | | |
| (C) interior laboratorio con temperatura y humedad controladas | 50 | 21,0 | 580 |



Ambiente A



Ambiente B



Ambiente C

Figura 2: Ambientes de exposición para carbonatación natural

Carbonatación acelerada: Las muestras fueron preconditionadas para el equilibrio higrométrico a peso constante (diferencia de 0,01 g entre pesadas a 24 hs). Las condiciones de ensayo del método acelerado fueron de HR a 60 % ± 5 %, T 22 °C ± 2 °C y la concentración de CO₂ de 4 % en volumen (40.000 ppmv)

Profundidad de carbonatación: La profundidad de carbonatación se midió siguiendo las indicaciones de RILEM [13]. Con las probetas cilíndricas de 10 cm x 20 cm expuestas en ambiente natural exterior e interior se aserraron discos de 2,5 cm de espesor, mientras que para los ensayos de carbonatación acelerada se emplearon especímenes de 2,5 cm de altura y 10 cm diámetro, en todos los casos se fracturaron horizontalmente a la mitad mediante carga diametral. La profundidad se determinó con el rociado de disolución de fenolftaleína al 1 % en alcohol etílico, la tonalidad rosa fucsia indica hormigón no

carbonatado $pH > 9,5$; la incolora indica hormigón carbonatado $pH < 9,5$; con un calibre Vernier se tomaron las lecturas en ambas mitades de 3 especímenes por hormigón.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Carbonatación natural: La carbonatación natural del hormigón en los tres ambientes de exposición durante 4 (cuatro) años confirma el efecto de las condiciones de exposición; en el ambiente exterior las profundidades son mayores en los hormigones del ambiente A respecto al ambiente B, era de esperar este comportamiento debido a que el agua de lluvia modifica sensiblemente el estado higrométrico del hormigón en los primeros mm desacelerando el ingreso del CO_2 . Por su parte las profundidades en los hormigones del ambiente exterior protegido son menores que las profundidades en ambiente interior, diferencia atribuida a una mayor concentración de CO_2 en el ambiente interno.

En cuanto el efecto por el tipo de cemento empleado, el CPN posee una mayor resistencia a la carbonatación en los tres ambientes de exposición, superior al 40 % promedio en el ambiente A, un 18 % en el ambiente B y un 15% en el ambiente interior respecto a las otras series, siendo el HF50 el de menor resistencia a la carbonatación. Esto se atribuye a la mayor reserva alcalina o cantidad de material carbonatable aportada por el CPN [12]. En la Tabla 3 se informan las profundidades promedio medidas durante los periodos de tiempo (1, 2, 3 y 4 años) en los distintos ambientes de exposición y la constante de carbonatación (Kn).

Tabla 3: Profundidades de carbonatación (X_{cr}) en los distintos ambientes

| Tiempo (año) | HN50 | | | HC50 | | | HF50 | | | HP50 | | | Kn (mm.año ^{0.5}) | |
|-----------------|-------------------------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|--------------------------------|-----|
| | Condición de exposición | | | | | | | | | | | | | |
| | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C | | |
| | X _{cr} (mm) | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1,2 | 2,7 | 2,9 | 1,7 | 3,0 | 3,2 | 2,1 | 3,5 | 3,8 | 1,8 | 3,1 | 3,5 | HN50 | 2,1 |
| 2 | 1,8 | 3,8 | 4,1 | 2,4 | 4,2 | 4,4 | 2,7 | 4,9 | 5,2 | 2,4 | 4,5 | 4,9 | HC50 | 3,0 |
| 3 | 2,6 | 4,7 | 4,9 | 2,7 | 5,2 | 5,5 | 3,6 | 6,1 | 6,7 | 3,0 | 5,5 | 5,8 | HF50 | 3,5 |
| 4 | 3,1 | 5,4 | 5,7 | 3,2 | 6,0 | 6,5 | 4,0 | 7,0 | 7,6 | 3,5 | 6,4 | 6,9 | HP50 | 3,1 |

Carbonatación Acelerada: Las experiencias indican que la serie HN50 posee menor profundidad de carbonatación que las otras series de hormigones, similar comportamiento que en los ambientes naturales. Con el tiempo de exposición, 10 y 14 días, aumenta la profundidad siguiendo la misma tendencia que a los 7 días, el hormigón HN50 presenta las menores profundidades de carbonatación, Tabla 4.

Tabla 4: Profundidad de carbonatación (X_{ca}) método acelerado

| Tiempo (días) | HN50 | HC50 | HF50 | HP50 |
|------------------|----------------------|------|------|------|
| | X _{ca} (mm) | | | |
| 7 | 2,1 | 2,7 | 3,3 | 2,8 |
| 10 | 3,3 | 3,9 | 4,5 | 4,0 |
| 14 | 4,1 | 5,1 | 6,1 | 5,3 |

Correlación carbonatación natural y acelerada: Para correlacionar las profundidades de carbonatación en ambiente natural y acelerada, se empleó el modelo simple de la \sqrt{t} calculando para las profundidades del método acelerado el tiempo real t_{ar} , considerando que cada serie de hormigón presenta constante de carbonatación al año de exposición en

el ambiente B, Tabla 3, se observa que para la exposición de 7 días en el método acelerado del HN50 presenta una buena correlación con 1 año en exposición natural del ambiente B desviándose un 15 % del tiempo real Figura 3, la desviación puede ser atribuida a la diferencia entre la variación de la HR natural promedio de 70 % versus la HR constante de 60 % del método acelerado. Si se extrapolan los resultados obtenidos con 10 y 14 días corresponden a 2,4 y 3,2 años aproximadamente de exposición natural del ambiente B. El resto de la series presentan similar correlación Fig. 3 y 4.

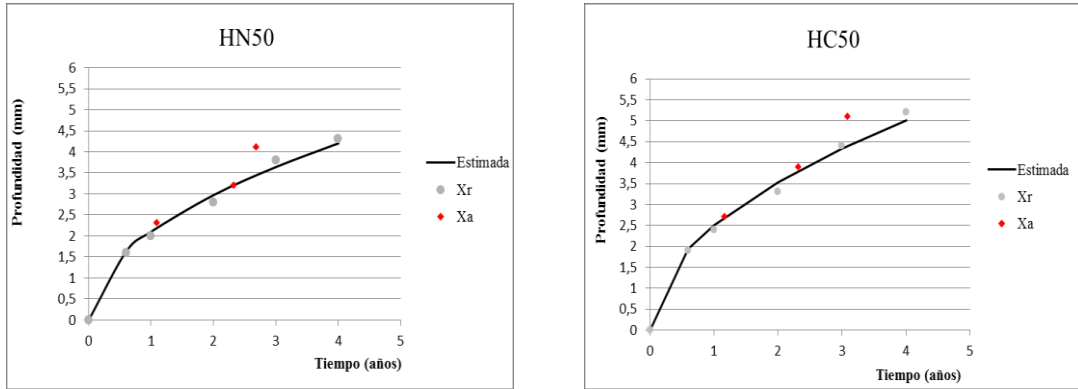


Figura 2: Profundidad de carbonatación natural y acelerada HN50 y HC50

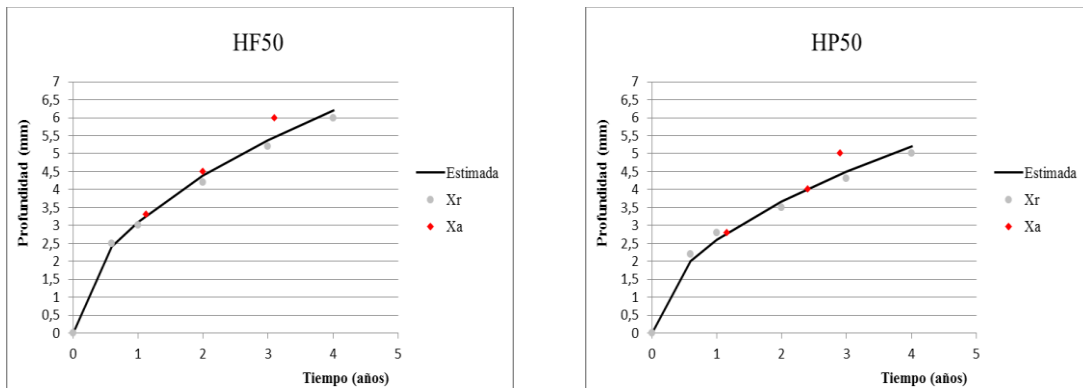


Figura 3: Profundidad de carbonatación natural y acelerada HF50 y HP50

CONCLUSIONES

Con los materiales empleados, constante el contenido de cemento, la razón de a/cm 0,50 y las experiencias realizadas surgen las siguientes conclusiones:

- La carbonatación natural varía de acuerdo al tipo del cemento empleado, mejor comportamiento presenta CPN en los tres ambientes de exposición respecto al CPC, CPF y CPP a pesar de los efectos originados por las adiciones sobre la porosidad, la cantidad de componentes alcalinos gobernada por el OCa es la que otorga mayor resistencia a la carbonatación.
- En cuanto al método acelerado, si bien sería necesario profundizar aún más los estudios, puede plantearse que con las condiciones de acondicionamiento pre ensayo y las de ensayo HR $60 \pm 5 \%$, T $22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ y una concentración de CO_2 promedio del $4 \pm 0.2 \%$ en volumen, la carbonatación obtenida a 7 días presenta una buena correlación con la de un ambiente natural exterior protegido de la lluvia con las condiciones climáticas de HR 70% y una T media anual de $17 \text{ }^\circ\text{C}$. Por su parte en los elementos en contacto con la lluvia, la profundidad de carbonatación se reducen por

debajo del 50%, por consiguiente deberán emplearse factores de corrección que tengan en cuenta el efecto de atenuación, por ejemplo el Reglamento Español EHE-2008 prescribe un factor de 0,5 para estos casos.

- El método acelerado de carbonatación, podría adoptarse como ensayo prestacional para obtener potencialmente velocidades de carbonatación que permitan calificar al hormigón en los distintos ambientes de exposición. Este límite podrá ser empleado al igual que en otros métodos acelerados para calificar al hormigón, en el último caso para su aceptación, para redefinir una determinada dosificación o modificar el espesor de recubrimiento a fin de alcanzar la vida útil de diseño.

REFERENCIAS

- [1] CIRSOC 201-2005 Reglamento Argentino para la Construcción.
- [2] Falcone, D., Milanesi C. "Evaluación de la reacción álcali-agregado: Posibilidades y limitaciones de los métodos de ensayos disponibles". VI Congreso Internacional y XX Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Ing. S. C. Fava. Concordia. Entre Ríos. 2014
- [3] Giovambattista, A., Traversa, L. y Di Maio, A. "Análisis sobre los métodos acelerados empleados para la evaluación del hormigón y sus materiales constituyentes". Ciencia y Tecnología del Hormigón, LEMIT, N° 4, 1997.
- [4] Traversa, L.P. "Corrosión de Armaduras en Atmósferas Rurales, Urbanas, Marinas e Industriales". DURABILIDAD DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL. Capítulo 5. E.d. Irassar F.F., p.p. 217-257. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2001.
- [5] UNE 83993-1:2009, "Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido".
- [6] RILEM Concrete permanent Committee CPC 18 (1984). Measurement of hardened Concrete Carbonation Depth. *Materiaux et Construction* Vol. 17 N° 102, p.p. 435-440.
- [7] EN 13295:2004, "Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods: Determination of resistance to carbonation." European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium. 2004
- [8] Al-Kadhimi, T.K.H., et al., An accelerated carbonation procedure for studies on concrete. *Advances in Cement Research*, 1996. 8 (30): p.p. 47-59.
- [9] Castellote, M., et al., Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations. *Materials and Structures*, 2009. 42 (4):p.p. 515-525
- [10] Verbeck, G.J., Carbonation of hydrated Portland cement. ASTM Special Technical Publication, 1958. 205: p.p. 17-36.
- [11] Cizer, O., Van Balen, K., Elsen, J., Van Gemert, D., "Crystal Morphology of Precipitated Calcite Crystals from Accelerated Carbonation of Lime Binders". Proceedings of the 2nd International Conference on Accelerated Carbonation for Environmental and Materials Engineering, Oct 1-3, 2008, Rome, Italy.
- [12] Iloro F. H., Sota J., Ortega N., "Influencia del tipo de cemento en el proceso de carbonatación acelerada de morteros". VIII CINPAR Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras junio de 2012 - La Plata, Argentina.
- [13] RILEM TC 56-MHM; CPC 18. Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Materials and structures*, Vol 21, N° 126, enero 1988, p.p. 453-455.