

Carbonatación de estructuras de hormigón ubicadas en ambiente urbano y rural

[Carbonation of concrete structures located in urban and rural environment]

C. Priano y L. Señas

Engineering Department,
Universidad Nacional del Sur,
Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

Copyright © 2013 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The objective of this investigation was to study the effect of carbonation on two reinforced concrete structures of 42 and 60 years old, located on two different environments: urban and rural. Samples of concrete were taken, the carbonation depth was measured and density, absorption and porosity tests were performed. The carbonation process can be modeled by the equation of the square root of time. From that model, the carbonation constant for each sample was calculated, the progress of the carbonation depth versus time was plotted and the correlation between porosity and depth of carbonation was analyzed. It was verified the existence of different microclimates surrounding structural elements. The moisture content of the surrounding surface of each structural element is the most important factor affecting the progress of carbonation.

KEYWORDS: Durability, concrete, carbonation, environment, microclimate.

1 INTRODUCCIÓN

El concepto de diseño por performance mediante requisitos que vinculan el desempeño de la estructura con el medio de exposición y las características del hormigón de recubrimiento, en especial, su calidad evaluada a través de la conectividad de su estructura porosa, está siendo incluido en varios códigos y reglamentaciones de diversos países. Los más avanzados en este sentido, son Australia, Nueva Zelanda, Canadá, Sudáfrica y la Unión Europea, siendo Australia el país que se destaca como líder en el uso de especificaciones prestacionales [1]. El planteo de diseño prestacional requiere establecer un modelo matemático de predicción de la vida en servicio, basado en conocimientos científicos, para cada uno de los procesos de degradación. Además, requiere la búsqueda y calibración de métodos de ensayo que permitan cuantificar las variables incluidas en dicho modelo de predicción. En base a esta necesidad, surge el concepto de “indicadores de durabilidad” [2] como aquellas propiedades medidas en el hormigón que puedan reflejar aspectos de la microestructura o del transporte de moléculas e iones en su interior.

El punto más cuestionado en el diseño por durabilidad, quizás por lo difícil que resulta implementarlo en la práctica, es el referido a definir la velocidad de ingreso del agresivo a través del hormigón mediante modelos sencillos y accesibles que permitan inferir, con cierta fiabilidad, la vida en servicio conforme al proceso de deterioro que prevalece [3]. No obstante existen avances al respecto. La Federación Internacional del Hormigón (fib) ha publicado en el Boletín 34 “Model Code for Service Life Design” [4], un enfoque probabilístico para el diseño por durabilidad según distintos procesos de deterioro, con la intención de incorporar el material contenido en dicho documento, en el Código Modelo de la fib (Model Code for Service Life Design). Otro avance es el introducido por la Instrucción del Hormigón Estructural [5] que regula el proyecto y ejecución de las estructuras de hormigón en España. La nueva Instrucción EHE presenta distintos aspectos relevantes vinculados a la durabilidad, en particular se incluyó un anexo en el que se establecen pautas para la comprobación del estado límite de durabilidad cuando la degradación se debe a la corrosión inducida por cloruros o carbonatación del recubrimiento.

Las barras de acero embebidas en el hormigón se encuentran protegidas de la corrosión por dos efectos: la elevada alcalinidad de la fase acuosa y el efecto barrera que proporciona el recubrimiento del propio hormigón aislándolas del medio exterior. Una de las causas fundamentales de la pérdida de esta capacidad protectora debido a la disminución de la alcalinidad del hormigón de recubrimiento, es la carbonatación, que genera un ataque en forma homogénea por toda la superficie de las barras de refuerzo y produce una corrosión generalizada semejante al que se da en la atmósfera, con la diferencia que en este caso, las armaduras quedan recubiertas por el hormigón que retiene agua en sus poros, prolongando los tiempos de humectación. El responsable de este proceso es el dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera que ingresa a la masa del hormigón a través de la red de poros interconectados con el exterior y en presencia de agua, transforma al hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) en carbonato de calcio (CaCO_3).

Para que se produzca la carbonatación, el contenido de humedad es fundamental. Si los poros están completamente secos, el CO_2 no podrá reaccionar, y si están completamente saturados, su penetración será muy lenta debido a la baja solubilidad del CO_2 en el agua. Sólo cuando los poros están parcialmente llenos de agua (entre 50% y 80%) se dan las condiciones óptimas para la carbonatación [6]. La velocidad de carbonatación puede ser lenta si la estructura se somete a mojados periódicos. Por ejemplo, en el caso de las paredes externas de un edificio, la velocidad de carbonatación será mucho mayor en el área protegida de la lluvia que en el área no protegida. La exposición de los edificios conduce a diferencias significativas: la superficie que está orientada de tal manera que quede abrigada de la lluvia y secada por el sol, se carbonata mucho más que las superficies horizontales protegidas del sol y sometidas al agua de lluvia [7]. La porosidad del hormigón es otro parámetro muy importante, ya que los poros capilares de menor tamaño están generalmente saturados de humedad y por tanto inaccesibles a la carbonatación.

La carbonatación es un proceso de difusión y por lo tanto su progreso en el interior del hormigón se atenúa con el tiempo. La velocidad de avance del frente carbonatado es de vital importancia para calcular el tiempo que tardará éste en llegar hasta la armadura y dar inicio a la despasivación en forma generalizada como consecuencia de la disminución del pH. La velocidad de avance es función fundamentalmente de: el contenido de humedad del hormigón, su porosidad (relación a/c) y su contenido en materia alcalina carbonatable. El modelizado de la carbonatación, a los fines prácticos, puede ser realizado mediante la simple ley de la raíz cuadrada del tiempo [8]:

$$x_c = k_c \cdot t^{1/2}$$

donde k_c representa una constante de carbonatación que depende de las características del hormigón y del medio ambiente, t es el tiempo de exposición y x_c es la profundidad del frente carbonatado que se puede detectar fácilmente mediante la pulverización de 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. Si se conoce la edad de una estructura y se mide la profundidad del frente carbonatado en diferentes elementos estructurales, se pueden calcular las constantes de carbonatación de cada muestra analizada en forma experimental, mediante la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo. A partir de dicha constante, se puede graficar el avance del proceso de carbonatación en función del tiempo para cada una de las muestras. Si además, se incluye el recubrimiento de las armaduras, se puede visualizar la edad estimada en que se produjo la despasivación de las armaduras o bien estimar el tiempo restante para que ello ocurra.

En el presente trabajo se analizaron dos obras de hormigón armado emplazadas en diferentes ambientes y se estudió el proceso de carbonatación desarrollado en diversos elementos estructurales. La concentración de CO_2 en el aire es uno de los parámetros que afecta directamente el proceso de carbonatación y es el que define el grado de agresividad del medio ambiente, el cual condiciona el comportamiento en servicio de la estructura.

La primera de las obras relevadas está emplazada en un ambiente urbano con un ligero aumento del contenido de dióxido de carbono, originado en la combustión del parque automotor. Es el ambiente que prevalece en áreas densamente pobladas, sin industrias significativas y con diferentes grados de contaminación que dependen del desarrollo de la ciudad y las medidas de control implementadas por el gobierno de la misma. Una situación particular se da en ambientes bajo techo o interiores que no están ventilados ya que pueden contener humos, los que en presencia de condensación o de humedad elevada, resultan altamente corrosivos.

La segunda de las estructuras analizadas está emplazada en un ambiente rural que no contiene contaminantes químicos agresivos al hormigón armado. Esta situación se puede considerar en aquellas zonas en las que, dentro de un radio de 5 km, no existan fábricas, industrias pesadas, grandes zonas urbanas y no estén próximas al litoral marítimo. Es de esperar que, en el corto plazo, sea la menos afectada por procesos corrosivos.

La obra emplazada en el ambiente urbano es una estructura de hormigón armado de la ciudad de Bahía Blanca (centro-este de la República Argentina), donde los valores de concentración de CO_2 son del orden de 413 ppm [9]. En el ambiente

rural se relevó un conjunto de siete puentes situados sobre la Ruta Provincial Nº 51, a unos 60 km al oeste de la ciudad de Bahía Blanca, emplazados sobre el río Sauce Grande y su valle de inundación. En mediciones realizadas en los puentes relevados se han detectado diferencias entre la concentración determinada sobre el tablero y debajo de él. El valor promedio correspondiente a la parte superior es de 346 ppm (promedio de 4 determinaciones y un desvío Standard de 6 ppm) y en la parte inferior es de 365 ppm (promedio de 4 determinaciones y un desvío Standard de 14 ppm). Debe recordarse que la concentración depende del parque automotor, de la densidad poblacional y de la existencia de un área industrial, siendo también significativa la influencia de los vientos la cual puede aumentar o disminuir la concentración de CO₂ [10].

El clima predominante en la región es semiárido templado, con una temperatura media anual de 15° C y con una precipitación media de 700 mm. La energía solar, que en el ambiente rural durante la mañana evapora el rocío y derrite el agua congelada, es absorbida en las ciudades en forma directa por los edificios. De allí que la humedad relativa dentro del área urbana, es siempre menor que la registrada en la periferia rural. Las islas de calor también producen células convectivas que pueden estar asociadas a patrones de difusión de contaminantes y a un incremento en las precipitaciones dentro de la ciudad [11]. Los vientos predominantes son del cuadrante norte y noroeste (sector continental) para las cuatro estaciones del año. La circulación atmosférica regional imprime a Bahía Blanca, pese a su localización costera, características continentales. Este hecho se manifiesta por la fuerte amplitud térmica anual y por el dominio de los vientos. Si bien la agresividad del ambiente varía con el esquema de vientos que modifican la presencia y contenidos de contaminantes, la diferencia de concentración entre los dos ambientes relevados coincide con datos publicados en otros trabajos [12]-[13], en los cuales las determinaciones en el ambiente urbano son aproximadamente un 15% superiores comparadas con aquellas correspondientes al área rural.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 ESTRUCTURA EMPLAZADA EN AMBIENTE URBANO

La estructura relevada en el ambiente urbano fue construida en 1968. Se diseñó con dos subsuelos, planta baja y nueve pisos, pero apenas terminado el esqueleto de hormigón, se canceló el proyecto y recién en el 2012 se concluyó la obra. En el año 2010 se realizó un relevamiento para constatar el estado de conservación de la estructura. Las vigas, losas y columnas internas del edificio se encontraban en buen estado de conservación, teniendo en cuenta el tiempo transcurrido desde su ejecución (Figura 1.a). Aquellas zonas que sufrieron la acción del escurrimiento del agua de lluvia, por ejemplo las vigas del hueco de la escalera, mostraban signos de un proceso de corrosión avanzado (Figura 1.b). Las losas en donde se acumulaba el agua, sufrieron un desprendimiento del hormigón de recubrimiento, dejando a la armadura de refuerzo expuesta (Figura 1.c). En algunos sectores se evidenció el intento de remediar parcialmente dicha situación mediante el colado de un mortero cementiceo (Figura 1.d). En el subsuelo se pudo constatar la acumulación de agua y residuos sobre las bases de las columnas (Figura 1.e).

Se calaron testigos en columnas y losas, de 10 cm de diámetro y altura variable entre 16 y 29 cm, según los diferentes elementos estructurales relevados. Al momento de la extracción de los testigos Nº 1 y Nº 2, se evidenció un zunchado de hormigón simple de aproximadamente 6 cm de espesor. En el caso particular del testigo Nº 1, dicha zona se desprendió al momento de calado, ya que estaba pobremente adherida a la sección original (Figura 1.f)

2.2 ESTRUCTURA EMPLAZADA EN AMBIENTE RURAL

Se estudió un sector de la ruta provincial Nº 51, en la zona denominada "Bajo San José" o "7 puentes". Los puentes fueron construidos a mediados de la década del '50 y están emplazados sobre el río Sauce Grande y su valle de inundación. A fines del 2006, se llevó a cabo un relevamiento visual y muestreo del hormigón de pilas, vigas, superficie de rodamiento y estribos de los siete puentes, inclusive uno antiguo de vigas metálicas, con estribos de hormigón, construido en la década del '30, que se encuentra desactivado a la vera del camino. Del relevamiento realizado se constataron las siguientes situaciones:

- Muros "de vuelta" totalmente separados de estribos sin poder contener al terraplén: las alas de los estribos estaban constituidas por tablestacas de hormigón unidas únicamente, en su parte superior, por una viga de vinculación o encadenado. En varios sectores se encontró la armadura de estos encadenados cortada, dejando al muro "de vuelta" totalmente separado del estribo (Figura 2.a).
- Corrosión de las armaduras de refuerzo en vigas, losas de tablero y pilas: en algunos sectores, se observó un estado de corrosión generalizado (Figura 2.b).
- En concordancia con los sectores humedecidos por agua de lluvia liberada por los drenajes ubicados en vigas exteriores, se observó una corrosión generalizada de las armaduras y el consecuente desprendimiento del hormigón de

recubrimiento. Las vigas interiores, que no sufrieron procesos de mojado y secado, se encontraron en buenas condiciones (Figura 2.c).

- Espesores de recubrimiento mínimos: en algunas zonas donde el hormigón de recubrimiento se había desprendido totalmente, se pudieron medir los espesores, los cuales resultaron muy variables. El máximo espesor medido fue de 30 mm y el mínimo de 10 mm. Esta situación genera una condición riesgosa para las armaduras de refuerzo, ya que es el recubrimiento del hormigón el que le provee una barrera física contra la penetración de agentes agresivos desde el exterior.
- Diseño inadecuado de los drenajes: éstos no facilitaban la rápida evacuación del agua de lluvia, y permitieron que circule por la superficie del hormigón (Figura 2.d).
- Postes de hormigón de las barandas vehiculares y peatonales: las armaduras presentan un estado avanzado de corrosión, el que se puede apreciar en la figura 2.e.

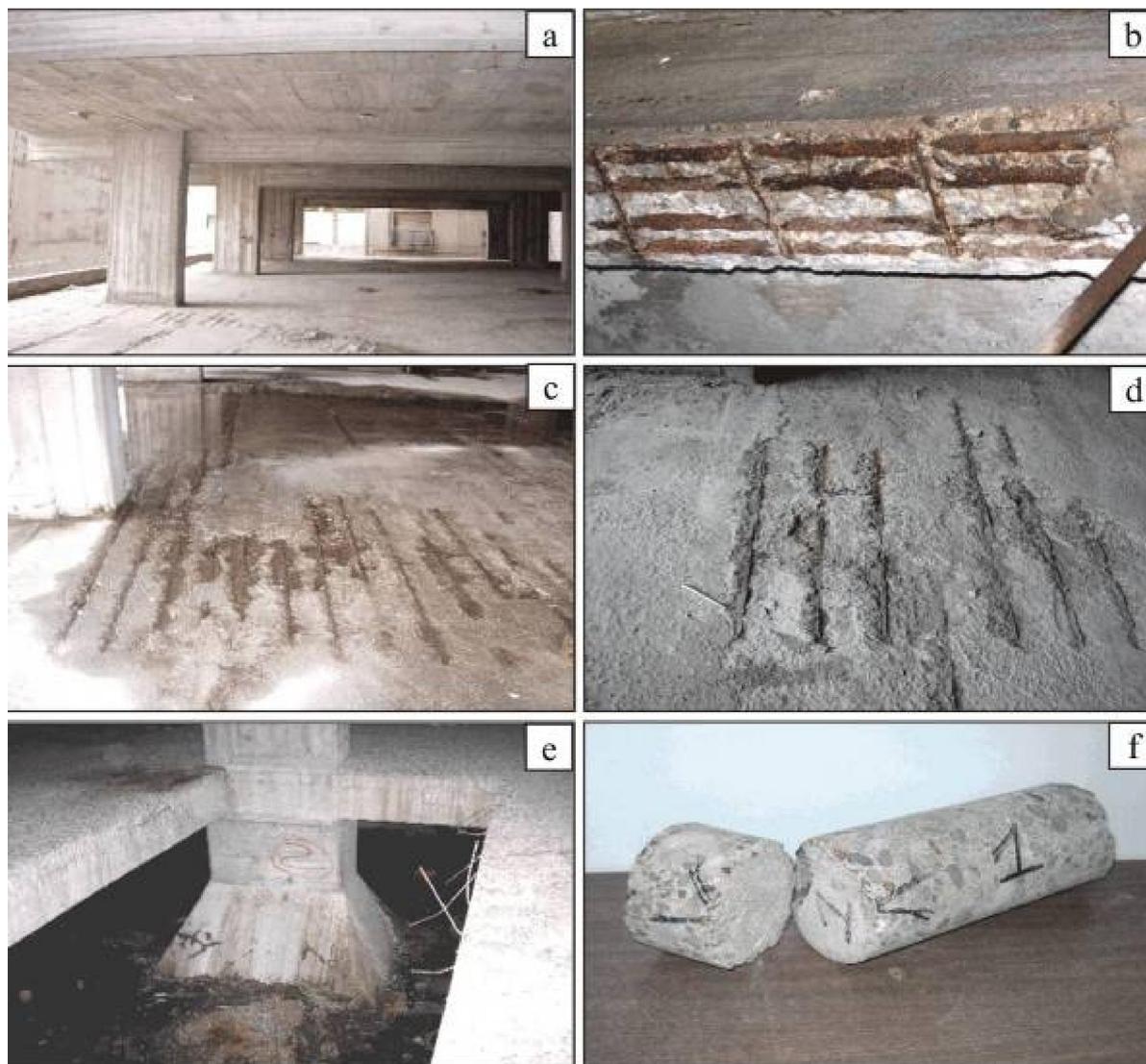


Fig. 1. Relevamiento de la estructura emplazada en ambiente urbano

a: vigas, losas y columnas internas, en buen estado de conservación.

b: avanzado proceso de corrosión en las armaduras de las vigas del hueco de escalera.

c: armadura de refuerzo expuesta en las losas donde se acumula agua de lluvia.

d: evidencias de reparaciones parciales mediante colado de mortero cementiceo.

e: acumulación de agua y residuos en contacto con las bases de columnas.

f: desprendimiento del zunchado de hormigón simple al momento de calar el testigo N°1.



Fig. 2. Relevamiento de los puentes de la ruta Provincial Nº 51

a: muro de vuelta separado del estribo.

b: corrosión generalizada con pérdida de sección en armaduras de refuerzo.

c: corrosión generalizada de las armaduras en concordancia con los drenajes ubicados en vigas exteriores. Vigas interiores en perfecto estado de conservación.

d: diseño inadecuado de drenajes que no evacuan eficazmente el agua de lluvia.

e: corrosión de las armaduras en los postes de hormigón de las barandas vehiculares y peatonales.

f: puente antiguo fuera de servicio (con más de 70 años de edad).

Con el hormigón de cada una de las muestras de ambas obras, se realizaron ensayos de densidad, absorción y porosidad, según lo establecido en la norma ASTM C642-97 [14] y se midió la profundidad del frente carbonatado mediante pulverización con fenolftaleína en solución alcohólica al 1%, sobre la superficie del hormigón recientemente expuesta. Mediante la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo se calculó la constante de carbonatación (k_c) teniendo en cuenta la edad de cada una de las estructuras en años (t) y la profundidad de carbonatación en milímetros (x_c) medida sobre la superficie del

hormigón. Una vez obtenida la constante k_c , se graficó el avance del proceso de carbonatación en función del tiempo para cada una de las muestras.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La ubicación de los elementos estructurales muestreados en las dos obras relevadas, con las respectivas denominaciones, se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Ubicación y denominación

Ambiente	Muestra	Ubicación
Urbano	C1	columna zunchada subsuelo
	C2	columna zunchada subsuelo
	C3	columna interna
	C4	columna interna
	C5	columna interna
	C6	columna externa
	L7	losa con acumulación de agua
	L8	losa central
	L9	losa cercana perímetro externo
	L10	losa cercana hueco escalera
Rural	P1	Pila Puente 4
	P2	Estribo Puente 2
	P3	Tablero Puente 3
	P4	Viga Puente 4
	PV	Estribo Puente viejo

Los valores de densidad, absorción y porosidad, la profundidad de carbonatación medida en cada muestra (x_c) y la correspondiente constante de carbonatación (k_c) calculada mediante la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo, en función de la edad de cada una de las respectivas estructuras, se detallan en la Tabla 2.

Más de la mitad de las determinaciones de porosidad y absorción resultaron significativamente elevadas (mayor a 15% y 5%, respectivamente), lo que indica que estas muestras de hormigón tienen alta probabilidad de desarrollar patologías debido a la facilidad que presentan para el ingreso de sustancias agresivas desde el medio exterior.

La compacidad del hormigón es el factor más importante que gobierna la capacidad de resistir la penetración del agua que transporta un agente agresivo. El criterio de evaluación establece que si el porcentaje de porosidad es menor al 10%, la calidad del hormigón es alta; entre 10% y 15%, es buena y finalmente si es mayor a 15%, la calidad es baja [6]. Los elevados valores de porosidad presentados por los hormigones estudiados, facilitan el ingreso de humedad y oxígeno hasta las barras de acero, favoreciendo el proceso de carbonatación que acelera la despasivación de la película protectora de las armaduras.

El menor valor de porosidad y absorción de las muestras tomadas en el ambiente rural, corresponde al hormigón del puente antiguo, que posee más de 70 años de edad, el cual se encuentra fuera de servicio (Figura 2.f). Los mayores valores de porosidad (superiores a 20%) corresponden a las muestras tomadas en los demás puentes.

Los valores de profundidad de carbonatación, para los elementos estructurales estudiados arrojaron diferencias significativas. Los hormigones de las columnas del subsuelo (testigos C1 y C2), resguardadas del agua de lluvia, presentaron los valores más elevados de profundidad de carbonatación, aunque la armadura no presentó signos de corrosión dado el recubrimiento que tienen dichas columnas luego de la reparación mediante el zunchado y la mínima disposición de humedad. En comparación con los hormigones de losas (en algunas con acumulación de agua de lluvia), las columnas interiores presentaron valores de penetración mayores. Sin embargo el proceso de corrosión más avanzado se dio en las losas debido al escaso recubrimiento de sus armaduras y a la presencia de humedad constante.

Tabla 2. Densidad, absorción, porosidad, profundidad y constante de carbonatación

Ambiente	Muestra	Densidad (g/cm ³)	Absorción (%)	Porosidad (%)	x _c (mm)	k _c (mm/año ^{0,5})
Urbano	C1	2,39	7,1	18,5	45	6,94
	C2	2,38	7,4	19,3	40	6,17
	C3	2,35	6,8	18,1	31	4,63
	C4	2,37	6,5	16,9	38	5,86
	C5	2,44	5,3	13,5	30	4,63
	C6	2,45	6,1	15,2	28	4,32
	L7	2,43	3,7	11,3	15	2,31
	L8	2,37	5,7	13,8	22	3,39
	L9	2,43	4,1	11,8	20	3,09
	L10	2,39	4,6	12,5	19	2,93
Rural	P1	2,32	13,1	27,0	31	4,00
	P2	2,23	10,7	21,8	10	1,29
	P3	2,24	9,6	20,1	11	1,42
	P4	2,30	11,7	23,9	22	2,84
	PV	2,42	7,8	17,4	5	0,56

En la Figura 3 se observa el progreso del frente carbonatado de las columnas y losas estudiadas de la estructura emplazada en ambiente urbano, calculado a partir de los respectivos coeficientes de carbonatación. Se incluyó en la gráfica, los diferentes espesores de recubrimiento (columnas de subsuelo: 60 mm, columnas: 36 mm y losas: 10 mm), para poner de manifiesto la edad estimada en que se produjo o producirá la despasivación de las correspondientes armaduras.

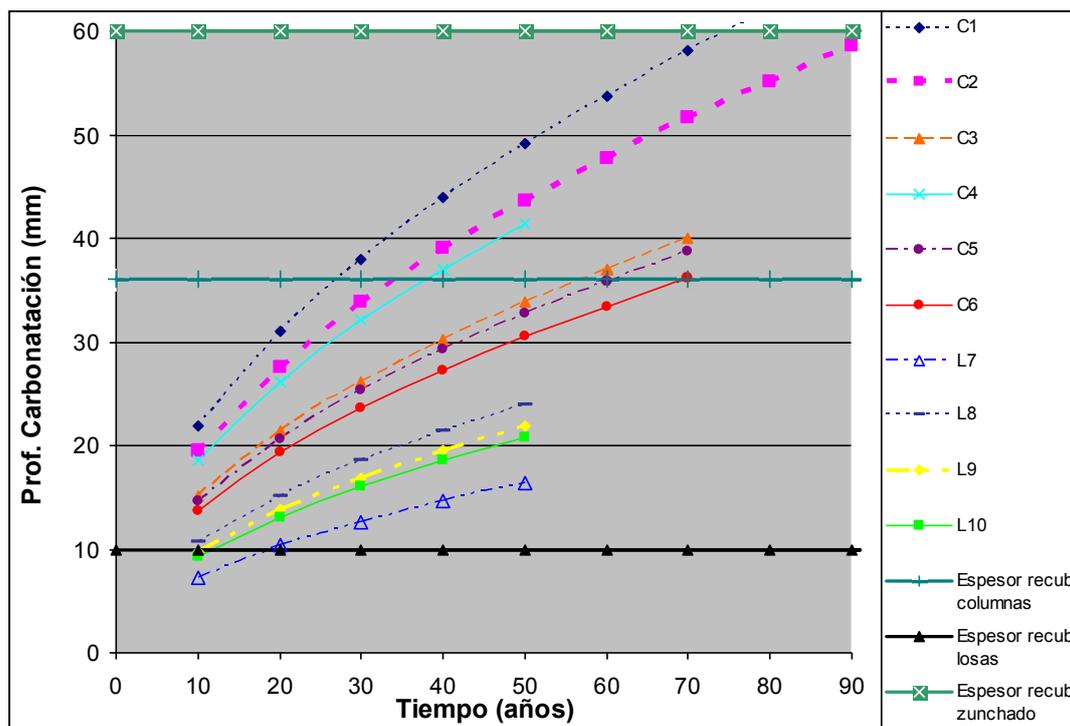


Fig. 3. Progreso de la carbonatación en la estructura emplazada en ambiente urbano

En la mayoría de los testigos extraídos de losas se puede apreciar el lento progreso de la carbonatación (constantes de carbonatación en el orden de $3 \text{ mm/año}^{0.5}$) pero a la vez, el escaso recubrimiento generó un prematuro inicio en la despasivación de las armaduras a partir de los 12 años de edad. Por otro lado, en la mayoría de las columnas interiores con constantes de carbonatación superiores, el considerable recubrimiento impide que el frente carbonatado llegue a las armaduras luego de 44 años de vida en servicio. De acuerdo al modelo, las armaduras de C3 y C5 permanecerían en estado pasivo durante más de 60 años. Algo similar sucede con las columnas del subsuelo, que aún manifestando los mayores valores de velocidad de carbonatación, tardarían más de 70 y 90 años, respectivamente, en perder su pasividad debido al proceso de carbonatación.

En la Figura 4 se observa el avance del frente carbonatado de los elementos estructurales estudiados de los puentes emplazados en el ambiente rural, con sus respectivos espesores de recubrimiento. El puente más antiguo es el que presenta la menor velocidad de carbonatación. La prolongada vida en servicio se puede asociar a la calidad del hormigón, en especial el de recubrimiento, el cual presentó un valor significativamente bajo de la constante de carbonatación.

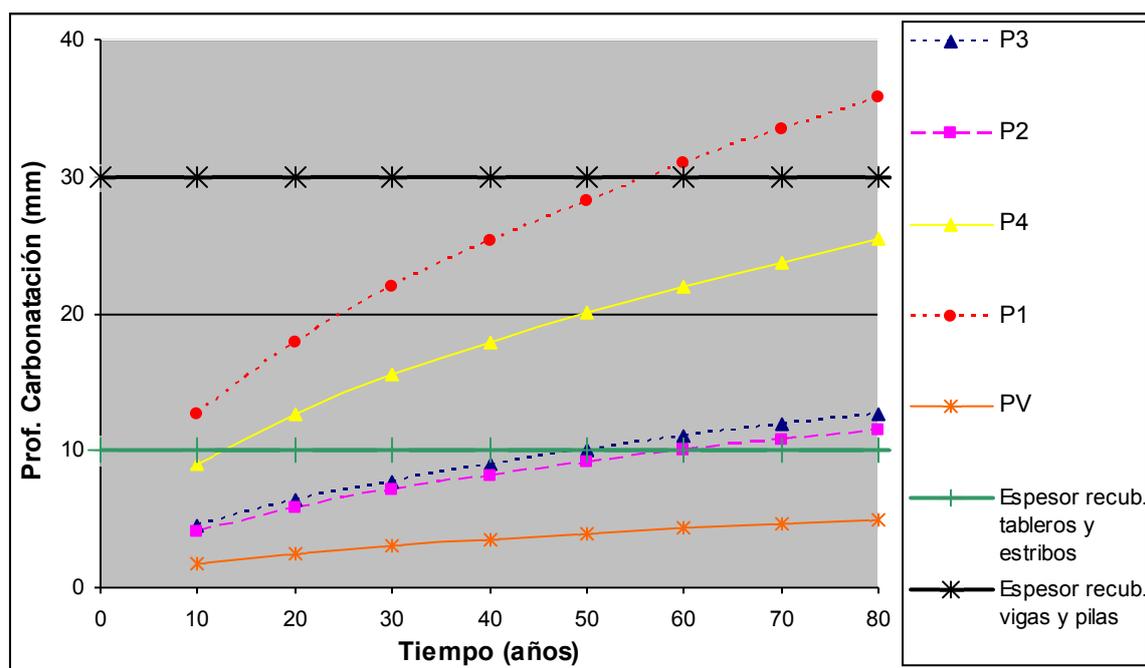


Fig. 4. Progreso de la carbonatación en los puentes emplazados en ambiente rural

En el caso del tablero del puente 3 (P3) y el estribo del puente 2 (P2), con escasos espesores de recubrimiento (10 mm), el frente carbonatado tardó más de 50 años en llegar debido a la baja velocidad de penetración del agresivo (constantes de carbonatación menores que $1,5 \text{ mm/año}^{0.5}$). A diferencia de la pila del puente 4 (P1) que presentó la constante de carbonatación más elevada ($4 \text{ mm/año}^{0.5}$) pero debido al considerable espesor de recubrimiento, el frente carbonatado también tardó más de 50 años en llegar a la armadura. Para el hormigón de la viga del puente 4 (P4), el frente de carbonatación aún no ha llegado a la armadura y según el modelo predictivo, esta situación se daría dentro de 50 años más de vida en servicio.

En todos los puentes analizados, el valor de porosidad que presentaron las muestras resultó elevado (más de 20%, excepto el puente viejo). A igualdad de hormigón, el factor distintivo sería el microclima que rodea cada uno de estos elementos estructurales.

En el tablero del puente 3 (P3) y el estribo del puente 2 (P2), en contacto directo con el agua de lluvia y expuestos a la radiación solar, se obtuvieron menores profundidades de carbonatación en el hormigón que en la pila y la viga del puente 4 (P1 y P4). En este último caso, el hormigón de la pila se encuentra resguardado de las lluvias y expuesto solamente a la humedad ambiente, de tal manera que los tiempos en los cuales éste permanece seco, son más prolongados, permitiendo una mayor penetración del dióxido de carbono. Aunque el frente carbonatado haya llegado a las armaduras, no hay signos visibles de corrosión debido a la falta de humedad suficiente para que este proceso se desarrolle. En el caso del hormigón de la viga del puente 4, que corresponde a una zona humedecida por agua de lluvia liberada por un drenaje mal diseñado, la

situación es diferente, ya que se observan signos de un proceso de corrosión avanzado. Esto se debe a la lixiviación de los productos cálcicos del hormigón superficial por donde escurre el agua del drenaje.

En la Figura 5 se grafica la correlación entre la profundidad de carbonatación, medida en los diferentes elementos estructurales y la correspondiente porosidad del hormigón para las obras emplazadas en ambiente urbano y rural.

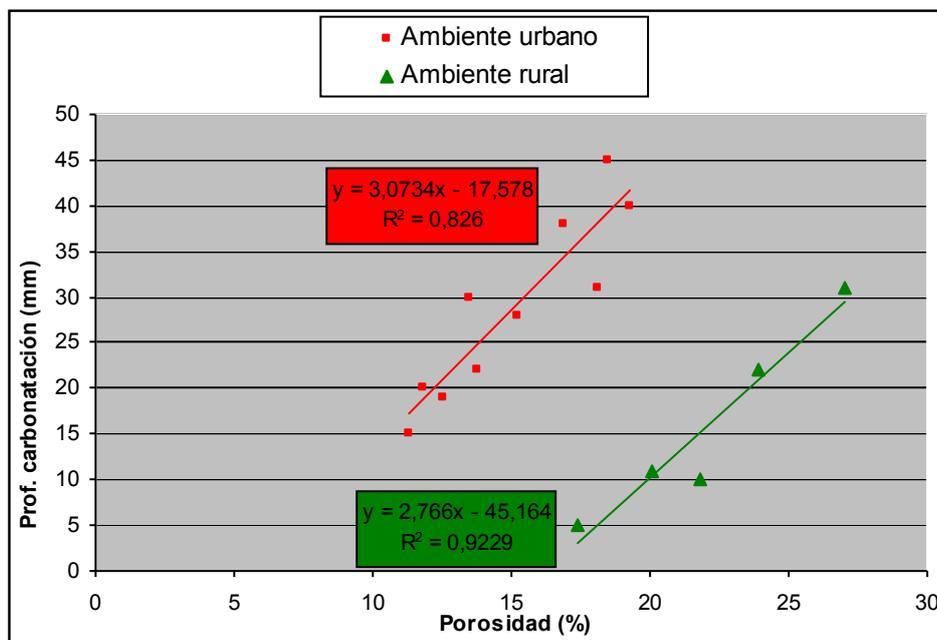


Fig. 5. Correlación entre profundidad de carbonatación y porosidad

En forma conjunta no se observa una tendencia en la relación entre ambos parámetros, pero si se analizan los valores de cada estructura independientemente, se puede apreciar una tendencia lineal en dicha relación e inclusive se observa una similitud en las pendientes de las rectas. En todos los casos, el hormigón de mayor porosidad presentó una mayor profundidad de carbonatación. La porosidad del hormigón es un parámetro adecuado para la evaluación de la tasa de degradación por carbonatación que los mismos sufren en distintos ambientes de exposición.

Las diferencias para cada estructura analizada están relacionadas a los factores que gobiernan el proceso de carbonatación además de la porosidad del hormigón, como por ejemplo las condiciones microclimáticas que rodean al hormigón, humedad relativa, concentración de CO_2 en el ambiente, tiempo de exposición y tipo de cemento empleado.

El hormigón correspondiente a la estructura del ambiente urbano es el que mayores valores de penetración del frente carbonatado presentó. Este hecho puede asociarse a la mayor concentración de CO_2 en cercanías de la estructura dado que está emplazada en el centro de la ciudad de Bahía Blanca. A diferencia del hormigón de los Puentes de la Ruta Nº 51, que sufrió un avance de carbonatación de menor orden pero con valores de porosidad muy elevados e inclusive en un período de tiempo de exposición al CO_2 mucho mayor.

4 CONCLUSIÓN

Se observaron procesos de corrosión de armaduras por carbonatación y lixiviación en estructuras emplazadas en ambientes de moderada agresividad, como lo son el urbano y el rural. Esta situación, que afecta directamente la durabilidad de la estructura, se debe al insuficiente espesor de recubrimiento, mala compactación y diseños inadecuados o falta de mantenimiento, que impidieron el correcto escurrimiento del agua.

Se comprobó que el deterioro depende del microclima de exposición, ya que éste varía para diferentes zonas de un mismo elemento estructural. Esta diferencia de microclimas en un mismo ambiente de exposición se ha visto reflejada en los distintos valores de profundidad de carbonatación. Por ejemplo, el hormigón que se encuentra resguardado de lluvias y expuesto solamente a la humedad ambiente, presentó mayor penetración de dióxido de carbono que aquel hormigón en contacto directo con el agua de lluvia y expuestos a la radiación solar. En ambos casos el avance en el proceso de corrosión

por carbonatación, es función de la humedad disponible en cercanías de la superficie del hormigón, que puede ser favorecido por un mal diseño de drenajes.

Los resultados indican claramente que hormigones con muy alta porosidad (mayor del 20%) permiten el desarrollo de procesos corrosivos en ambientes no agresivos. A pesar de las diferencias de concentraciones de CO₂ en los dos ambientes relevados, se registró una relación lineal entre porosidad y profundidad de carbonatación en las dos estructuras analizadas. El ensayo de porosidad podría ser un indicador del desempeño futuro del hormigón cuando está expuesto a ambientes en los que puede producirse corrosión por carbonatación. Este ensayo, conjuntamente con el de capilaridad, permitiría calificar la prestación del hormigón frente a distintos mecanismos de ingreso de sustancias a la masa.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen los datos suministrados por personal del LEMIT-CIC en referencia a las determinaciones de dióxido de carbono en el ambiente rural.

REFERENCIAS

- [1] J. Bickley, R. Hooton and K. Hover, "Performance specifications for durable concrete", *Concrete International*, vol. 9, pp. 51-57, 2006.
- [2] V. Baroghel-Bouny, "Which toolkit for durability evaluation as regards chloride ingress into concrete? Part II: Development of a performance approach based on durability indicators and monitoring parameters". *Proceedings of 3rd International Workshop "Testing and modelling chloride ingress into concrete"*. Madrid, Spain, pp. 137-163, 2002.
- [3] L. Eperjesi, E. Ferreira Hirschi and A. Vicente, "Avances en la normalización de la resistencia a la carbonatación de estructuras de hormigón armado". *I Congreso Hormigón Premezclado de las Américas 2010, XII Congreso Iberoamericano del Hormigón Premezclado, IV Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón y 18° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón*. Mar del Plata, Argentina, 8 pág., 2010.
- [4] fib Bulletin 34, "Model code for service life design". *Internacional Federation for Structural Concrete (fib)*, Switzerland, 110 pág., 2006.
- [5] EHE-08, "Instrucción del hormigón estructural". Suplemento del Boletín Oficial del Estado Nº 203, España, 304 pág. , 2008.
- [6] CYTED, "Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado". *Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo*, 208 pág., 1998.
- [7] P. Garcés Terradillos, M. Climent Llorca and E. Zornoza Gómez, "Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado". Editorial Club Universitario, España, 126 pág., 2008.
- [8] L. Traversa, "Corrosión de armaduras en atmósferas rurales, urbanas, marinas e industriales". *Durabilidad del hormigón estructural*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, pp. 217-257, 2001.
- [9] L. Traversa, A. Di Maio and J. Sota, "Metodología de evaluación de patologías en estructuras de hormigón armado". *Revista Hormigón*, H49, pp. 29-39, 2011.
- [10] L. Traversa, "Corrosión de armaduras en el hormigón armado: una problemática del patrimonio moderno". *2do. Congreso Iberoamericano y X Jornada "Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio"*. La Plata, Argentina, 12 pág., 2011.
- [11] A. Capelli, M. Piccolo and A. Campo, "Clima urbano de Bahía Blanca". Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, 200 pág., 2005.
- [12] K. George, L. Ziska, J. Bunce and B. Quebedeaux, "Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature across an urban-rural transect". *Atmospheric Environment*, vol. 41, pp. 7654-7665, 2007.
- [13] S. Talukdar, N. Banthia, J. Grace and S. Cohen, "Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change: Part 2 – Canadian urban simulations". *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, pp. 931-935, 2012.
- [14] ASTM C642, "Standard test method for density, absorption and voids in hardened concrete". American Society for Testing and Materials, 3 pág., 1997.