

Carbonatación en puentes y edificaciones de Bogotá

Carbonation in bridges and buildings in Bogota

PEDRO NEL QUIROGA SAAVEDRA

Profesor del Centro de Estudios de Estructuras, Materiales y Construcción de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Recibido: 20/09/2009 Aceptado: 30/10/2009

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

Se presentan y analizan los resultados de dos proyectos de grado de la Especialización en Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería, en los que se recopiló la información sobre carbonatación en edificios y puentes de Bogotá, obtenida en estudios de patología realizados entre 1999 y 2004. Se encontró que en aproximadamente el 50% de los elementos estudiados, el frente de carbonatación ya ha alcanzado o está muy próximo a alcanzar el refuerzo y que un 40% ya ha empezado a sufrir corrosión. También se halló que el avance del frente de carbonatación y el desarrollo de corrosión en el acero de refuerzo son relativamente altos en estructuras jóvenes, en comparación con estructuras de mayor edad.

Palabras claves: carbonatación, porosidad, pasivación, corrosión, puzolanas, relación agua-cemento

Abstract

In this paper, results from several forensic investigations regarding carbonation made from 1999 to 2004 on Bogotá bridges and buildings, and compiled by two groups of graduate students at the Escuela Colombiana de Ingeniería are presented and analyzed. The carbonation front already reached or is close to reach the steel reinforcement in about 50% of the elements that were explored, and that active corrosion is occurring in about 40% of the elements. Finally, the degree of carbonation and corrosion of steel is relatively high in young structures when compared to old ones.

Keywords: carbonation, porosity, passivation, corrosion, pozzolans, water-cement relationship.

INTRODUCCIÓN

La carbonatación es una de las causas más importantes del deterioro de estructuras de concreto reforzado en lugares con altos niveles de CO_2 , como centros urbanos y parqueaderos de edificios. Dado el grado de contaminación del aire en Bogotá y sus altos contenidos de CO_2 , cabe esperar que muchas estructuras de concreto presenten grados avanzados de carbonatación. En estudios de patología de edificios y puentes en Bogotá se ha encontrado que algunos elementos presentan deterioro por corrosión del acero de refuerzo, atribuible a carbonatación, y que ésta ha avanzado en algunos elementos más de lo esperado (Rojas, 2008; Escobar, 2008).

El propósito de este artículo es presentar un compendio de los resultados de varios estudios hechos en edificios y puentes de Bogotá en años pasados, que permita tener una visión más global del fenómeno y que sirva de base para elaborar un inventario más completo y para plantear futuras investigaciones sobre el tema. Se hace inicialmente un resumen del proceso de carbonatación del concreto y de corrosión del acero de refuerzo, así como del efecto de diferentes variables en la velocidad de avance del fenómeno; finalmente, se presenta el resumen de los resultados de los estudios hechos en puentes y edificaciones, con comentarios y conclusiones.

CARBONATACIÓN DEL CONCRETO

En presencia de oxígeno, cuando la alcalinidad del concreto que rodea el acero de refuerzo es alta ($\text{pH} > 12,5$), se forma una capa de óxido (capa pasivadora) de unos pocos nanómetros de espesor alrededor del acero que lo protege contra la corrosión. Si la alcalinidad desciende debido a carbonatación o si hay presencia de cloruros, la capa pasivadora se vuelve inestable y deja de cumplir su función protectora, por lo que el acero de refuerzo queda vulnerable a la corrosión.

Como resultado de la corrosión el acero pierde sección, reduciéndose la capacidad estructural del elemento; además, se forman productos cuyo volumen es mayor que el acero original, lo cual produce fisuras y desprendimientos del concreto, dejando el acero aún más expuesto y aumentando la tasa de corrosión (ACI 201.2R-08).

La carbonatación consiste fundamentalmente en la reacción del dióxido de carbono, CO_2 , con el hidróxido

de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que se encuentran en la solución de poros del concreto y en sus componentes hidratados (Meeks, 2009). El resultado de la reacción es la formación de carbonato de calcio, CaCO_3 , la disminución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (principal responsable de la alta alcalinidad del concreto) y, como consecuencia, la disminución de la alcalinidad de la solución de poros. Al bajar el pH, la capa pasivadora es destruida y el acero pierde esta protección natural contra la corrosión. La tasa de corrosión del refuerzo, después de perderse la capa pasivadora, depende de varios factores, como la humedad relativa del concreto y del valor del pH. Adicionalmente, la carbonatación aumenta la contracción del concreto (contracción por carbonatación) que puede aumentar la fisuración y, por tanto, facilitar la entrada de agua y otros agentes agresivos, aumentando la corrosión del refuerzo (Gómez, 2006).

EFFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO Y DEL AMBIENTE EN LA TASA DE CARBONATACIÓN

La tasa de carbonatación depende en forma importante de la humedad relativa del concreto, siendo máxima para humedades relativas entre 50 y 75%. Para humedades relativas muy bajas, no hay agua suficiente en los poros para que se disuelvan cantidades significativas de CO_2 (Montani, 2000). Para humedades relativas muy altas, disminuye la velocidad de difusión del CO_2 .

La velocidad de carbonatación depende también de la concentración de CO_2 en la atmósfera, la cual puede variar entre 0,03% en zonas rurales y 0,3% en zonas urbanas, aunque puede haber concentraciones mayores en algunos sitios, como parqueaderos mal ventilados y túneles. En ensayos acelerados se ha encontrado que concentraciones de CO_2 de 4% producen en una semana la misma cantidad de carbonatación que concentraciones normales (0,03%) en un año (Moreno, 2004).

Debido a la mayor porosidad de pastas de cemento con una alta relación agua-cemento, la carbonatación aumenta al incrementarse la relación agua-cemento. También se ha encontrado que la carbonatación se incrementa al disminuir la cantidad de cemento (Balayssac, 1994, Gómez, 2006), por la consecuente reducción de la reserva alcalina. Igualmente, se ha encontrado que la tasa de carbonatación depende del tipo de cemento. Los cementos adicionados con materiales puzolánicos, como la mayoría de los cementos colombianos, produ-

cen pastas con menor cantidad de hidróxido de calcio y, por tanto, con menor reserva alcalina.

Los materiales puzolánicos, como la ceniza volante, el humo de sílice, el metacaolín y la escoria, reaccionan con el hidróxido de calcio, CH, produciendo silicato de calcio hidratado (S-C-H). El S-C-H tiene mayor resistencia mecánica y química que el CH y es menos poroso. Como resultado de la reacción puzolánica el concreto tiene mayor resistencia mecánica y menor permeabilidad, pero menor cantidad de hidróxido de calcio. Si bien la cantidad remanente de este hidróxido es suficiente para mantener las condiciones de alta alcalinidad dentro del concreto y el pH se mantiene prácticamente igual, se reduce la reserva de alcalinidad.

Aunque la menor permeabilidad del concreto con puzolanas puede disminuir la velocidad de ingreso del CO₂ en el interior de éste, la reducción en la cantidad de CH disponible para reaccionar con el CO₂ puede dar como resultado neto un aumento en la tasa de carbonatación. Investigaciones (Khunthongkeaw, 2006) muestran que, en efecto, para altos contenidos de ceniza volante hay aumentos significativos de la profundidad de carbonatación y también muestran que ésta depende del tipo de ceniza volante (mayor para ceniza volante con bajo contenido de calcio).

El tiempo y la calidad del curado afectan significativamente la profundidad de carbonatación para un tiempo dado, puesto que un buen curado contribuye a disminuir la porosidad y la conectividad de poros, particularmente cerca de la superficie del concreto. Estudios de Balayssac (1994) y Guirguis (Gómez, 2006) demuestran que la tasa de carbonatación disminuye

con el aumento en el tiempo de curado. Gowripalan et ál. (Meeks, 2009) encontraron que el curado inicial es crítico en la reducción de la permeabilidad del recubrimiento del concreto y, por ende, en la reducción en la tasa de carbonatación.

Se han propuesto varios modelos de predicción del avance del frente de carbonatación con el tiempo, como los de Tuutti (Da Silva, 1999), CEB (Lindvall, 1998) y Helene (Helene, 2009), en los cuales se consideran variables relacionadas con la calidad del concreto (relación a/c, tipo de cemento, coeficiente de difusión del CO₂, contenido de materiales cementantes suplementarios y curado) y la agresividad del ambiente (concentración de CO₂, humedad relativa). Sin embargo, en casos en los cuales no se tiene información suficiente para alimentar los modelos, se puede considerar que la profundidad del frente de carbonatación varía en forma aproximada con la raíz cuadrada del tiempo.

$$X = K\sqrt{t} \tag{1}$$

Donde

X = profundidad del frente de carbonatación en mm.

K = coeficiente que depende de la porosidad del con-

creto y de la agresividad del ambiente.

T = tiempo transcurrido en años.

En la tabla 1 (Gómez, 2006) se sugieren valores de K según la calidad del concreto, para grados de exposición comunes.

Si la ecuación 1 se reescribe, se tiene que

Tabla 1
Valores recomendados de K según la calidad del concreto (Gómez, 2006)

Calidad del concreto	K recomendado	Características
Buena	< 5	Relación a/c < 0,5, contenido de cemento ≥ 350 kg/m ³ , tiempo de curado ≥ 7 días, compactación con vibrador, control de calidad alto.
Regular	6-9	Relación a/c: 0,5 - 0,6, contenido de cemento: 350 - 250 kg/m ³ , tiempo de curado 3 - 7 días, compactación sin vibrador, control de calidad medio.
Mala	10-15	Relación a/c ≥ 0,6, contenido de cemento ≤ 250 kg/m ³ , tiempo de curado < 3 días, sin compactación, control de calidad bajo.
Pésima	> 15	Relación a/c ≥ 0,65, contenido de cemento ≤ 200 kg/m ³ , sin ningún tipo de curado, sin compactación, control de calidad inexistente.

$$t = \left[\frac{1}{K^2} \right] X^2 \quad (2)$$

Esto indica que el tiempo para que el frente de carbonatación alcance cierta profundidad es proporcional a dicha profundidad al cuadrado. En consecuencia, la vida útil de una estructura (tiempo para inicio de la corrosión) depende del recubrimiento del refuerzo al cuadrado, lo cual destaca la importancia de tener recubrimientos adecuados.

CARBONATACIÓN EN EDIFICACIONES Y PUENTES DE BOGOTÁ

Se recolectó y analizó la información disponible, obtenida en diversos estudios de patología en edificios y puentes ubicados en distintas zonas de Bogotá. Debido a que en la mayoría de los casos no se contaba con información suficiente sobre características del concreto y del ambiente que lo rodea, el análisis se hizo con base en la expresión 1. Se contó con la colaboración de empresas, laboratorios de ensayos e ingenieros que participaron en los mencionados estudios.

Carbonatación en puentes

Entre 1999 y 2000 se efectuaron estudios del estado de nueve puentes en Bogotá, cuyas edades en el momento del diagnóstico oscilaban entre 9 y 40 años. En cada puente se hicieron varias exploraciones en diferentes elementos. En cada una de ellas se obtuvo información relacionada con profundidad y recubrimiento del refuerzo, durabilidad residual por carbonatación y proyección de durabilidad. La resistencia a compresión se obtuvo a partir de núcleos y el avance del frente de carbonatación se evaluó aplicando fenofaleína en los puntos de interés a diferentes profundidades (figura 1). La evaluación del grado de corrosión se hizo en forma visual al llegar la exploración al nivel del refuerzo. Así mismo, se presenta un resumen del diagnóstico, promedios de profundidad del frente de carbonatación, del recubrimiento y de la constante K , así como el número de elementos evaluados y el número de elementos que presentan algún grado de corrosión para cada puente (tabla 2).

De estos resultados vale la pena destacar que siete de los nueve puentes presentan signos de corrosión en algunos o varios elementos. Uno de los puentes sin sig-

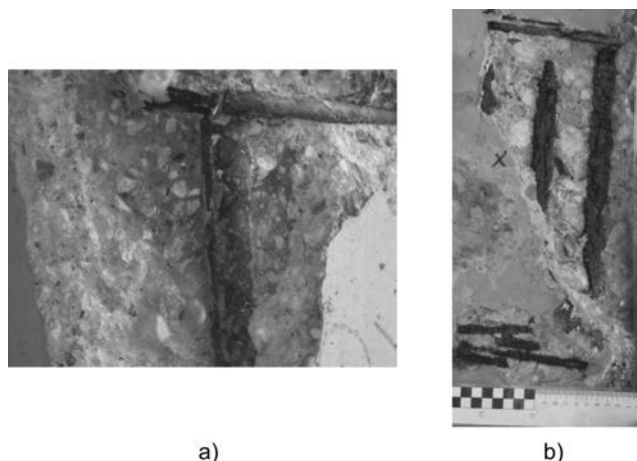


Figura 1. a) Elemento en el cual el frente de carbonatación está cerca del refuerzo. Refuerzo con inicios de corrosión. b) Elemento con grado avanzado de corrosión.

nos de corrosión es una estructura relativamente nueva, que tenía sólo nueve años cuando se hizo el diagnóstico, en la cual, sin embargo, el frente de carbonatación ha avanzado más de lo esperado para concreto de buena calidad. La otra estructura sin signos de corrosión tenía 22 años en el momento del diagnóstico y en ésta el frente ha avanzado lo esperado para concreto de buena calidad. En dos de los puentes se ha presentado un avance importante del frente de carbonatación en columnas. Cuatro de los nueve puentes obtuvieron en promedio un K mayor que 5, indicando concreto de regular calidad en lo que a avance del frente de carbonatación se refiere y cinco obtuvieron en promedio un K menor que 5, indicando concreto de buena calidad.

Se muestra también que se encontró algún grado de corrosión en más o menos el 40% de los elementos evaluados (tabla 2).

Se incluyen además todos los datos disponibles de profundidad de carbonatación contra resistencia a compresión para los nueve puentes (figura 2). A pesar de la gran dispersión de los datos, por corresponder a elementos de diferentes edades y diferentes grados de exposición, es claro que la profundidad del frente de carbonatación tiende a disminuir con el aumento de la resistencia del concreto, lo cual es de esperarse, pues los concretos de mayor resistencia son menos porosos.

En la figura 3 se grafican todos los resultados de profundidad de carbonatación contra edad $X = K \sqrt{t}$ ocho puentes, así como tres líneas del tipo

Tabla 2
Resumen del estado de los puentes

Puente	Edad (años)	K media (a)	Profundidad carbonatación (mm) (b)	Número de elementos evaluados	Número de elementos con corrosión C	Comentarios
1	30	3,1	17	12	8	Inicio de corrosión en algunos elementos (vigas o placas). En algunos sitios, profundidad carbonatación > recubrimiento. No se evaluaron columnas.
2	22	6,4	30	7	4	Inicio de corrosión en cuatro elementos (una viga, una placa, dos columnas). En algunos sitios, profundidad carbonatación > recubrimiento.
3	22	4,3	20	8	1	Inicio de corrosión en una viga. En general, profundidad carbonatación < recubrimiento.
4	40	4,9	31	6	4	Algunos elementos con corrosión (tres vigas, una placa). En algunos puntos, profundidad carbonatación > recubrimiento. Profundidad carbonatación alto en columna (50 mm), aunque menor que recubrimiento (150 mm).
5	9	6,9	21	10	2	Inicio de corrosión en dos columnas. Concreto poroso, avance rápido del frente de carbonatación.
6	20	4,5	20	6	2	Inicio de corrosión en dos placas. En general, profundidad carbonatación < recubrimiento.
7	20	3,8	17	8	1	Inicio de corrosión en una placa. En general, profundidad carbonatación < recubrimiento.
8	18	6,5	27	4	0	No corrosión, pero avance rápido del frente de carbonatación.
9	21	6,4	29	5	3	Inicio de corrosión en dos columnas y una placa. En algunos sitios, profundidad de carbonatación > recubrimiento.
10	ND	ND	ND	4	4	Una columna muy afectada. Corrosión en cuatro elementos (dos vigas, una placa, una columna). Frente de carbonatación de 100 mm en una columna. Resistencia de algunas columnas muy baja < 21 Mpa.

ND = No disponible.

Notas

(a) Valor calculado con la ecuación (1), tomando el promedio de profundidad de carbonatación de todos los puntos evaluados.

(b) Valor promedio de profundidad de carbonatación de todos los puntos evaluados.

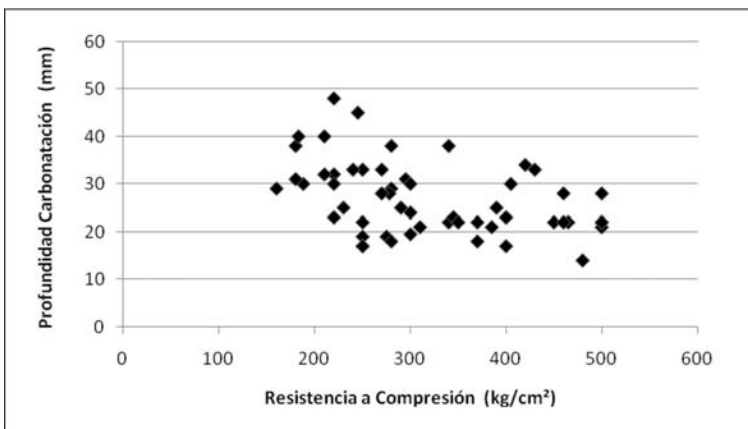


Figura 2. Profundidad del frente de carbonatación vs. resistencia a compresión de nueve puentes en Bogotá (todos los datos incluidos).

La línea continua es la media de los valores medidos de profundidad de carbonatación de los puentes, la cual corresponde a un valor de $K = 5$, aproximadamente. Las líneas punteadas son los límites superior e inferior que incluyen la mayoría de los datos, las cuales corresponden a valores de $K = 12$ y $K = 1,5$, respectivamente. Aunque en promedio la profundidad de carbonatación de los puentes evaluados está dentro de lo esperado para estructuras de concreto de buena calidad ($K = 5$), cinco de los ocho puentes tienen elementos en los cuales el avance del frente de carbonatación es mucho mayor que lo esperado, en algunos casos con valores de K de 12 o 13, correspondientes a concreto de muy baja calidad. Esto significa que la tasa de carbonatación en algunos puntos de los elementos es muy alta y que

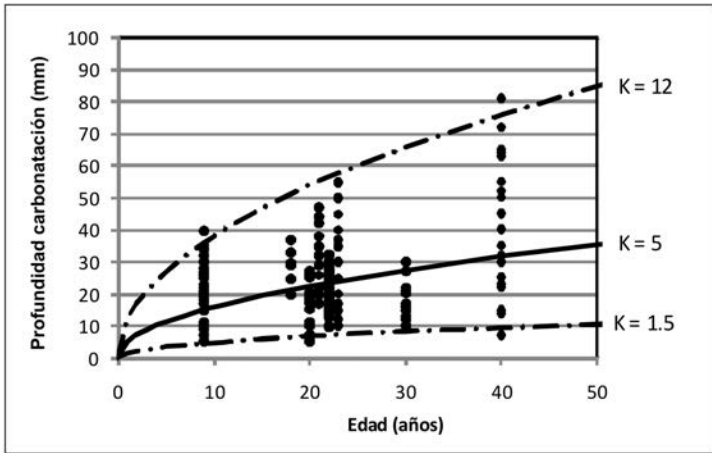


Figura 3. Profundidad del frente de carbonatación contra edad de ocho puentes en Bogotá (los resultados de cada puente son puntos sobre una línea vertical).

probablemente el frente de carbonatación alcanzará muy pronto el refuerzo, si aún no lo ha hecho.

A continuación se presenta la distancia del frente de carbonatación al refuerzo (figura 4). En alrededor del 50% de los casos el frente de carbonatación está a más de 10 mm del refuerzo. Esto es consistente con los resultados de la tabla 1, en la cual se muestra que más o menos el 40% de los puntos explorados presenta algún grado de corrosión. También se puede observar que el avance del frente de carbonatación en comparación

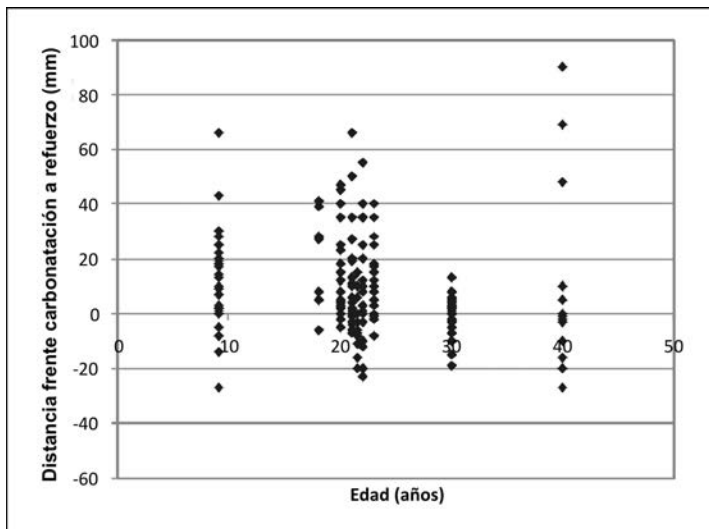


Figura 4. Distancia del frente de carbonatación al refuerzo contra edad de ocho puentes en Bogotá (los resultados de cada puente son los puntos sobre una línea vertical).

con el espesor del recubrimiento es alto incluso en los puentes jóvenes.

Así mismo, se muestra la vida útil remanente (tiempo esperado para que el frente de carbonatación llegue al refuerzo) de todos los puntos explorados (figura 5), se presenta la vida útil remanente promedio (figura 6) y se muestra el porcentaje de elementos cuya vida útil remanente es superior a diez años. En aproximadamente el 55% de los casos la vida útil remanente es mayor de diez años, resaltándose que no hay una correlación muy fuerte con la edad de los puentes. La vida útil remanente básicamente no disminuye con la edad, como sería de esperar, sino que es muy baja en la mayoría de los puentes de menos de 25 años de edad, lo cual indicaría que los puentes jóvenes no tienen la resistencia a carbonatación apropiada para las condiciones del ambiente de Bogotá.

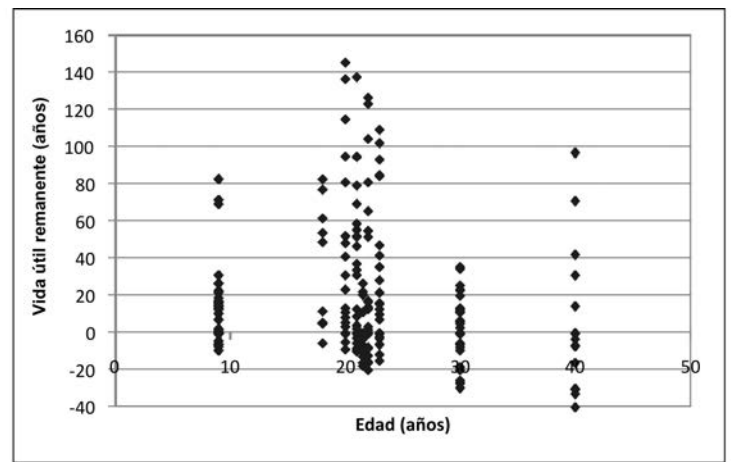


Figura 5. Vida útil remanente contra edad de ocho puentes en Bogotá.

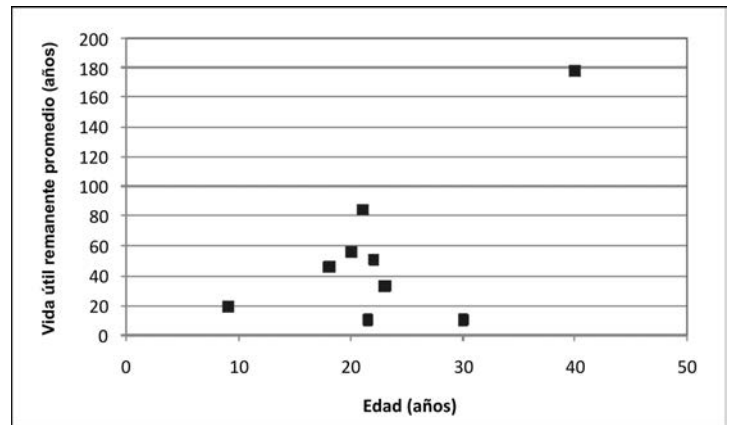


Figura 6. Vida útil remanente promedio contra edad de ocho puentes en Bogotá.

Carbonatación en edificios

Siguiendo una metodología similar a la usada para el análisis de los puentes, se estudió la información obtenida entre 1999 y 2004 de 22 edificios ubicados en diferentes zonas de Bogotá. Se obtuvieron datos de profundidad del frente de carbonatación, tamaño del recubrimiento y estado del refuerzo en diferentes puntos y elementos, y se analizaron con base en la ecuación 1.

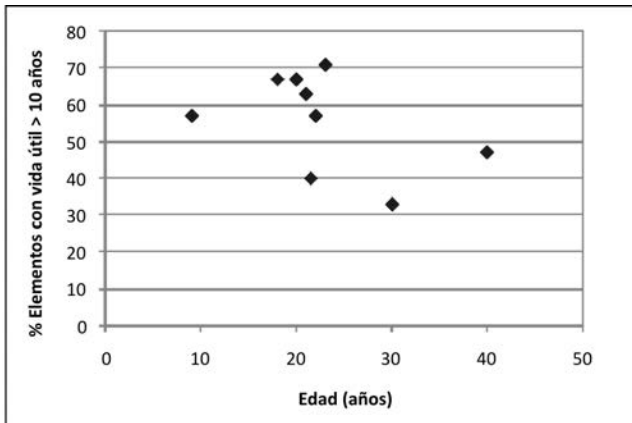


Figura 7. Porcentaje de elementos con más de diez años de vida útil contra edad de ocho puentes en Bogotá.

Posteriormente se muestran los resultados obtenidos de profundidad de carbonatación contra edad en años de los 22 edificios, así como tres líneas del tipo $X = K\sqrt{t}$ (figura 8). La línea continua con $K = 4,5$ es el promedio de los datos. Las líneas punteadas son los límites superior e inferior que incluyen la mayoría de los datos, las cuales corresponden a valores de $K = 8,0$ y $K = 2,5$, respectivamente. Se encontró que más o menos el 60% de los resultados corresponden a concreto de buena calidad ($K \leq 5$) y el 40% a concreto de calidad regular. También se puede apreciar la gran dispersión que hay incluso en elementos de una misma edificación, lo cual era de esperarse si se tiene en cuenta que la calidad del concreto y el grado de exposición a CO_2 pueden variar sensiblemente entre diferentes estructuras y entre diferentes puntos de una misma edificación. Igualmente se puede notar que las estructuras analizadas de menos de diez años de edad tenían profundidades de carbonatación significativamente mayores que las esperadas para concreto de buena calidad.

Además de la profundidad propiamente dicha del frente de carbonatación, se comparó ésta con el recu-

brimiento del refuerzo, que es lo que finalmente está relacionado con la vida útil remanente de la estructura. Más adelante se muestra la distancia entre el frente de carbonatación y el recubrimiento del refuerzo (mm) contra edad (años). Los valores positivos indican la distancia que le falta al frente de carbonatación para

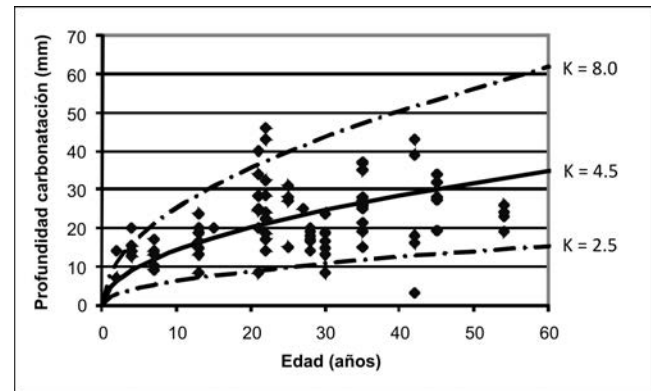


Figura 8. Profundidad del frente de carbonatación contra edad de 22 edificios en Bogotá (los datos de cada edificio son puntos sobre una línea vertical. Sin embargo, una línea de puntos puede incluir varios edificios de la misma edad).

llegar al refuerzo, mientras los negativos indican que el frente ha avanzado más allá del refuerzo y que éste está desprotegido contra corrosión. En el 42% de los casos la profundidad del frente de carbonatación es mayor que el recubrimiento del refuerzo. En el 45% de los casos (menos de la mitad) el frente de carbonatación está a más de 5 mm del refuerzo, lo que indica que en aproximadamente la mitad de los elementos evaluados el acero de refuerzo ha perdido la capa pasivadora (o está a punto de perderla) y, por tanto, la protección contra corrosión. El hecho de que en un porcentaje elevado de sondeos el frente de carbonatación está cerca del refuerzo, o que en algunos casos ya lo ha alcanzado, se puede atribuir a que los recubrimientos son menores que los estipulados por las normas de construcción (NSR o ACI 318). Según estas normas, los recubrimientos para refuerzo principal deben ser mayores de 40 mm en vigas y columnas y de 20 mm en viguetas y muros. El recubrimiento promedio de todos los datos es 27 mm. Por otra parte, está establecido que para edificaciones de 50 años de edad la profundidad del frente es en general menor que 40 mm. Esto significa

que si las vigas y columnas tuvieran el recubrimiento estipulado por las normas, el frente de carbonatación no debería haber llegado al refuerzo aún. Adicionalmente se observó, como era de esperarse, que los elementos (columnas, vigas, viguetas y muros) que presentaron mayor carbonatación fueron aquellos ubicados en sótanos o parqueaderos.

Se calculó y graficó la vida útil remanente (tiempo para que el frente de carbonatación llegue al refuerzo) de todos los puntos explorados (figura 10), así como la vida útil remanente promedio de cada edificio (figura 11). En seis edificios (27%) la vida útil remanente promedio es mayor que 30 años y en siete (32%) es cero.

Finalmente, sólo el 42% de los elementos en 12 de los 22 edificios (figura 12) tenían en el momento del estudio más de 10 años de vida útil remanente. Algunas edificaciones de menos de 20 años de edad también poseen un alto porcentaje de puntos con menos de 10

años de vida útil remanente; de hecho, prácticamente la mitad de las edificaciones en que no hay elementos con más de 10 años de vida útil remanente tienen menos de 20 años de edad.

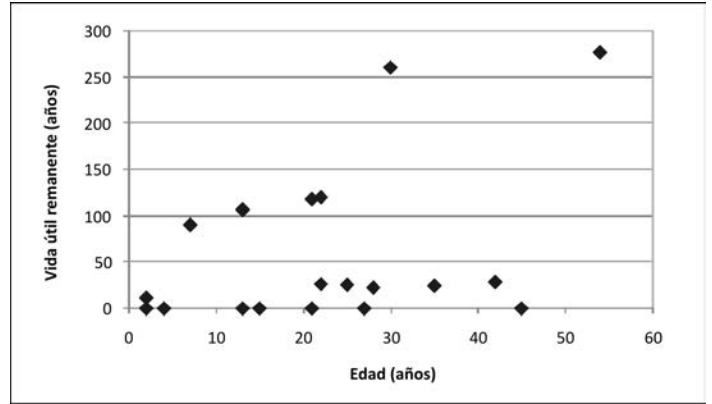


Figura 11. Vida útil remanente promedio contra edad de 22 edificios en Bogotá.

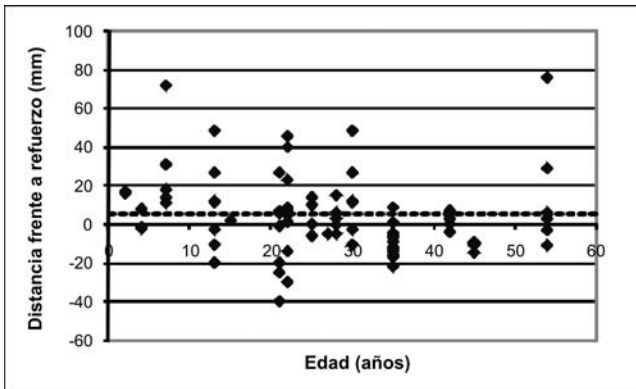


Figura 9. Distancia del frente de carbonatación al refuerzo de todos los puntos explorados contra edad de 22 edificios en Bogotá.

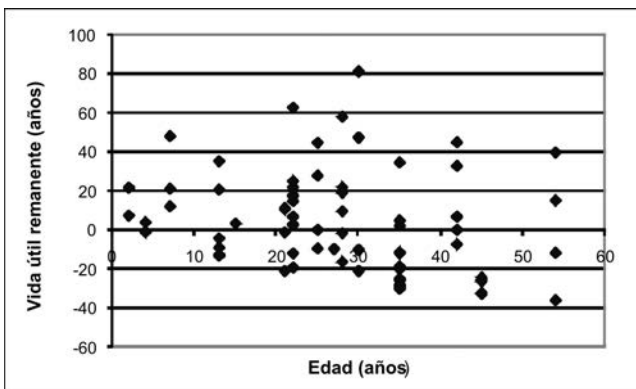


Figura 10. Vida útil remanente contra edad de todos los puntos explorados de 22 edificios en Bogotá (se muestran valores hasta cien años en las ordenadas).

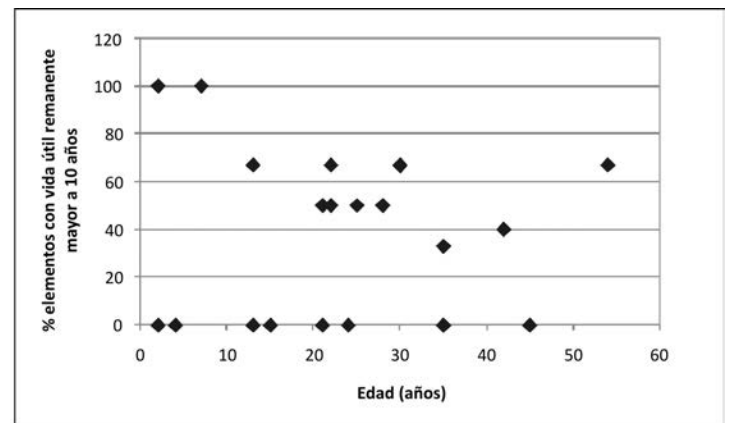


Figura 12. Porcentaje de elementos con vida útil remanente mayor que 10 años de 22 edificios en Bogotá.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados de exploraciones realizadas en 9 puentes y 22 edificios de Bogotá, se sacaron las siguientes conclusiones:

- Un porcentaje importante (casi el 50%) de elementos estructurales de edificios y puentes de diferentes edades han sido afectados significativamente por carbonatación, sea porque el frente de carbonatación

está muy cerca del refuerzo o porque ya hay procesos activos de corrosión.

- El grado de avance de la carbonatación y su variabilidad es mucho mayor en puentes que en edificios, lo cual es razonable si se considera que el grado de exposición tanto a CO₂ como a humedad es mayor en éstos. Sin embargo, como en general los recubrimientos en puentes son mayores, el porcentaje de elementos afectados por corrosión es mayor en edificios que en puentes.
- Los recubrimientos de edificios, menores que los estipulados por la NSR (o el ACI-318), han contribuido a que la vida útil de un porcentaje significativo de elementos estructurales de edificaciones, en particular de sótanos, sea relativamente baja.
- El grado de afectación por corrosión por carbonatación de estructuras jóvenes (10-20 años de edad) no difiere considerablemente del de estructuras mayores (30-40 años), lo cual en principio va contra lo esperado. Esto puede deberse al incremento acelerado del contenido de CO₂ en la atmósfera, recubrimientos insuficientes, curado inapropiado o insuficiente, bajo control de calidad en la construcción de algunas obras y al uso en años recientes de cementos adicionados.
- Para que las estructuras de concreto que se construyan en adelante en Bogotá tengan una resistencia adecuada contra carbonatación es necesario que el concreto sea de buena calidad, que sea adecuadamente compactado y curado y que se dejen al menos los recubrimientos exigidos por la NSR, particularmente en elementos expuestos a ambientes con alto contenido de CO₂, como los que rodean los puentes o los que se encuentran en parqueaderos con poca ventilación.

REFERENCIAS

- ACI Committee 201 (2001). *Guide To Durable Concrete*. Farmington Hill, Mich.: American Concrete Institute, pp. 4, 11, 17, 18.
- Balayssac, J.P., Détriché, Ch. H. & Grandet, J. (1994). Effect of Curing upon Carbonation of Concrete. Toulouse, Cedex, France: Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Insa-UPS Génie Civil, Complexe Scientifique de Ranguel, 31077.
- Begliardo, H. F. (1993). *Cemento con adiciones*, vol. XXI. Cimec, pp. 44-49.
- Da Silva, T.J. & Roca, P. (1999). Reliability Updating of Deteriorating Concrete Slabs. ACI Special Publication, SP-186: *High-Performance Concrete: Performance and Quality of Concrete Structures*.
- Escobar, M.T. (2008). Carbonatación del concreto. Proyecto de grado de especialización, Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Fullea, J. Proceso de degradación de las armaduras, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja CSIC. Internet: www.aahes.org.ar/documents/3-JoseFulleaGarcia-Procesosde-Degradacion.pdf.
- Garcés, P., Climent, M.A. & Zornoza, E. (2008). *Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado*, ed. ECU.
- Gómez, J.G. (1994). Durabilidad del concreto. Reunión del Concreto, Materiales y Patología. Asocreto, p. 94.
- Helene, P. & Castro-Borges, P. (2009). *A Novel Method to Predict Concrete Carbonation*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo.
- Heng, M. & Murata, K. (2004, July). Aging of Concrete Buildings and Determining the pH Value on the Surface of Concrete by Using a Handy Semi-Conductive pH Meter. *Analytical Sciences*, vol. 20. The Japan Society for Analytical Chemistry.
- Khunthongkeaw, J., Tangtermsirikul, S. & Leelawat, T. (2006, November). *Carbonation Depth Prediction for Fly Ash Concrete*. Construction and Building Materials.
- Lindvall, A. (1998). Duracrete-Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures. Budapest: 2nd International PhD Symposium in Civil Engineering.
- Meeks, K. & Carino, N. (1999). Curing of High-Performance Concrete: State of the Art Report. Gaithersburg, MD: Nistir 6295, NIST.
- Montani, R. (2000). La carbonatación, enemigo olvidado del concreto. *Revista Construcción y Tecnología*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, <http://www.imcyc.com/revista/2000/dic2000/carbonatacion.htm>.
- Moreno, E.I. et ál. (2004). Efecto de la relación agua-cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. *Ingeniería*, 8-2, pp. 117-130.
- Neal, R. E. (1999). Corrosion of metals in concrete. *Materials Journal*. Farmington Hills, Mich: American Concrete Institute, pp. 45-47.
- Rick, M. (2002). *La carbonatación*. Publicaciones Pubval, p. 33.
- Rojas, S. & Luna, H.A. (2008). El fenómeno de la carbonatación en edificaciones de la ciudad de Bogotá. Proyecto de grado de especialización, Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Salazar, A. (2005). Panorama del uso de las puzolanas en Colombia. *Revista Noticreto*. Bogotá: Asocreto, pp. 13, 20, 23, 28 - 31.
- Serrano, M. (2006). *Lesiones en plataformas de estructuras construidas en concreto reforzado*. Bogotá: Unal Ediciones, pp. 272-276.
- Villaescusa, E. & Potvin, Y. (2004, September). Ground Support in Mining and Underground Construction: Proceedings of the Fifth International Symposium on Ground Support. Perth, Australia.