

CAMBIOS MICROESTRUCTURALES RELACIONADOS CON LA CARBONATACION EN CONCRETO DE LARGA DURABILIDAD

CARBONATION-RELATED MICROSTRUCTURAL CHANGES IN LONG-TERM DURABILITY CONCRETE

Por /By Cláudio A. Rigo da Silva, Rubens J. Pedrosa Reis, Fernando Soares Lameiras, Wander Luiz Vasconcelos

Resumen

Este trabajo analiza los efectos de la carbonatación sobre la microestructura del concreto de cemento portland para aplicaciones de durabilidad de largo plazo. Un concreto Clase C 40 (resistencia a la compresión característica entre 40Mpa y 44Mpa en el día 28 de acuerdo a la norma brasileña NBR 8953) fue elegido para el estudio experimental de los efectos de la carbonatación, a cuyo objeto se moldearon muestras experimentales para un ensayo acelerado bajo una atmósfera de CO₂ al 100% después de la caracterización física y mecánica. Se observa que la carbonatación provocó una reducción de 5% a 12% de la porosidad abierta del concreto accesible al agua. Los valores de resistencia a la flexión obtenidos después de las pruebas de carbonatación revelaron una disminución de 12% a 25% en relación a los valores obtenidos antes de las pruebas en el día 28 y 91, respectivamente.

Palabras clave: *concreto, carbonatación, microestructura, durabilidad de largo plazo*

Abstract

This paper discusses the effects of carbonation on the microstructure of portland cement concrete for long-term durability applications. A class C40 concrete (characteristic compression strength between 40 MPa and 44 MPa on the 28th day, according to Brazilian standard NBR 8953) was chosen for the experimental study of the carbonation effects, from which test samples were molded for accelerated test under a 100%-CO₂ atmosphere after physical and mechanical characterization. It was observed that carbonation provoked a reduction of 5% to 12% of the concrete open porosity accessible to water. Flexural strength values obtained after the carbonation tests revealed a decrease of 12% and 25% in relation to the values obtained before tests on the 28th and 91st days, respectively.

Keywords: *concrete, carbonation, microstructure, long-term durability*



1. INTRODUCCION

La creciente preocupación por la durabilidad de la estructura de hormigón armado se justifica de muchas maneras: el concreto, en comparación a otros materiales de construcción, es barato y relativamente fácil de obtener en cualquier parte del mundo; el deterioro de la estructuras de concreto causa grandes pérdidas a la economía mundial; los mecanismos de deterioro del concreto armado se pueden entender y prevenir mejor; este es un campo de estudio importante que empezó a ser explorado mejor hace cosa de 20 años, permitiendo la producción de buen concreto con propiedades físicas específicas, mediante el uso racional del cemento y la adición de minerales, muchas veces provenientes de desechos industriales. Por otro lado, la preocupación por el desarrollo mundial sustentable ha llevado a estudios y a decisiones económicas y ecológicas orientadas a optimizar el uso de los recursos naturales en la manufactura de los diversos tipos de cemento, ya que el consumo mundial del cemento ha aumentado en forma incesante (Mehta, 1999).

Durante los últimos años, se ha observado en muchas partes del mundo que una de las causas principales del deterioro de las estructuras de hormigón armado es la corrosión del refuerzo (Swamy, 1999; da Silva y Roco, 1999). La durabilidad de las estructuras de hormigón armado depende básicamente de las propiedades microestructurales del concreto, ya que la integridad de las barras de acero es una función directa de la capacidad del concreto para servir como una barrera a los agentes agresivos. Esta es la razón por la que uno se topa con casos verdaderamente discordantes, uno al lado del otro: un Panteón Romano que ha durado más de 2000 años, construido con concreto simple de una resistencia extremadamente baja (alrededor de 10 MPa) y las estructuras modernas de concreto con una resistencia dos veces mayor y que se encuentran en un estado crítico de deterioro y que tienen poco más de diez años. La presencia del refuerzo sin suficiente protección es responsable de esta discrepancia. La carbonatación del concreto se relaciona directamente con la corrosión del refuerzo: crea un desequilibrio químico y hace bajar el pH del concreto, lo que facilita la depasivación del refuerzo y también potencia las reacciones adversas de cloruro y sulfuro.

La acción del CO₂ progresa desde afuera hacia el interior bajo la forma de un frente carbonatado, si bien hay autores que señalan que la penetración del dióxido de carbono no necesariamente produce un frente bien definido y que se pueden producir avances puntuales (Parrott, 1994). Sea cual fuere el caso, es necesario reducir este avance al máximo para obtener estructura de hormigón armado durable. Por lo tanto, para que la capa de concreto sobre el refuerzo (recubrimiento) constituya una protección efectiva es necesario que presente otras características además del grosor apropiado: adecuada densidad en la microestructura, baja porosidad y conectividad entre los poros, la que lleva a una baja permeabilidad (Rigo da Silva et al., 1999). Dichas características se pueden obtener de un concreto que presenta un reducido calor de hidratación, razón de agua a cemento baja, baja exudación y retracción plástica (Swamy, 1999).

La mayoría de las reacciones químicas entre los elementos agresivos y los componentes del concreto se producen en el agua contenida en los poros. De consiguiente, para lograr una aproximación adecuada a la durabilidad de las estructuras de hormigón armado, es importante conocer la estructura porosa del material, el grado de saturación de estos poros, esto es la fracción volumétrica de los poros del material que contienen fases gaseosas y acuosas, y la evolución de la concentración de los constituyentes del cemento que pueden ser atacados con el paso del tiempo (Papadakis et al., 1991a; Mehta y Monteiro, 1994).

En el caso de la carbonatación, el aire contiene CO₂, el que reacciona con los compuestos hidratados del cemento en la presencia de humedad. La reacción carbonatada en sí misma no es peligrosa para el cemento, excepto por el aumento en la retracción que se puede producir bajo ciertas condiciones. La preocupación acerca de carbonatación aumenta cuando se consideran estructuras de hormigón armado, porque una disminución en el pH del agua en los poros del concreto desde 12.6-13.5 a valores que están alrededor de 9, provoca la depasivación de los refuerzos, exponiéndolos a la corrosión (Neville, 1998; Rafai et al., 1991; Kazmierczak y Lindenmayer, 1996; Papadakis et al., 1991b; Kobayashi et al., 1994; Deloy, 1997).

2. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACION

Este trabajo presenta los resultados de un estudio que pretende clarificar los efectos de la reacción a la carbonatación sobre la microestructura del cemento. La estrategia experimental utilizada para la caracterización microestructural del concreto clase C40, antes y después de las pruebas de carbonatación aceleradas, consiste en que el comportamiento del material fue evaluado por medio de las propiedades mecánicas de tracción, medida mediante pruebas de flexión y separación, y compresión axial. Los parámetros micro-estructurales considerados fueron la porosidad, medida por medio de dos diferentes métodos; profundidad de carbonatación, determinada por la variación del pH material (fenolftaleína); y la identificación de carbonatos por medio de microscopía electrónica de barrido. La correlación entre la microestructura y las propiedades permitió la evaluación de la acción del CO₂ en el concreto.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

El concreto seleccionado, clase C40, estaba hecho con cemento CPII E 32 (compuesto de cemento adicionado con 25% escoria y 10% piedra caliza), arena lavada, agregado gnésico grueso con un máximo de 25 mm diámetro, y una mezcla aceleradora reductora de agua. Las Tablas 1 y 2 muestran la característica principal de los agregados y la dosificación

usada. Veintiocho muestras cilíndricas (ϕ 15×30 cm.) y catorce muestras prismáticas (15×15×75 cm.) fueron moldeadas de acuerdo a la norma brasileña NBR 5738. La Tabla 3 muestra los resultados de las pruebas mecánicas de resistencia a la compresión, tensión y flexión hasta la edad de 91 días.

Tabla 1. Características de los principales agregados

Características	Agregado Fino	Agregado Grueso
Diámetro Máximo (mm)	2,4	25
Módulo de Finura	2,62	7,02
Contenido de Materiales de Recubrimiento en Polvo (%)	0,35	0,13
Peso Unitario Seco (kg/m ³)	1419	1409
Peso Unitario Húmedo (kg/m ³)	1135	-
Peso Específico Real (kg/m ³)	2604	2682
Contenido de Terrones de Arcilla (%)	0,021	-

Tabla 2. Proporciones de mezcla típicas para resistencia del concreto grupo C 40.

Materiales	Proporciones de Mezcla
Cemento (kg/m ³)	430
Agregados Finos (kg/m ³)	605
Agregados Gruesos (kg/m ³)	1104
Superplastificador REAX 3000 A (kg/m ³)	2,2
Agua (l/m ³)	178,94
Razón A/C	0,42
Contenido de Aire (%)	4,1
Prueba de Fluidez (mm)	85

Tabla 3. Propiedades Mecánicas de Concreto C 40

Edad (días)	Resistencia a la Tracción Tensión (MPa)	Resistencia a la Flexión (MPa)	Resistencia a la Compresión (MPa)
3	2,2	4,7	29,5
7	2,8	5,0	33,8
28	3,9	5,9	41,8
91	4,7	6,9	46,6

Se preparó una cámara especial para las pruebas de carbonatación, lo que permitió someter a las muestras experimentales a una atmósfera controlada con humedad y temperatura coincidiendo con aquellos del laboratorio (alrededor de 60% y 20°, respectivamente). Una composición de CO₂ al 100% fue elegida para la atmósfera de la cámara en concordancia con un experimento informado en la literatura (Helene, 1999; Guimarães et al., 1999).

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la primera etapa, dos muestras prismáticas experimentales – P40CC y P40DC – fueron sometidas a CO₂ atmosférico durante 28 días. Después de las pruebas, se midió la resistencia a la flexión y la profundidad de la carbonatación mediante fenolftaleína en la sección de ruptura. Estos datos se presentan en la Tabla 4.



Tabla 4. Resistencia a la flexión y profundidad de la carbonatación.

Muestra	Resistencia a la Flexión (MPa)	Profundidad de la Carbonatación (mm)
P40CC	5,2	Profundidad: 0 Caras Laterales: 1 – 3 Superficie: 8 – 10
P40DC	5,1	Profundidad: 0 Caras Laterales: 2 Superficie: 2 – 3

La porosidad abierta de las muestras de concreto se midió de acuerdo a los procedimientos RILEM (1980) para obtener la porosidad accesible al agua. Ocho muestras cúbicas (dos de cada muestra experimental) con aproximadamente 10 cm. de esquina se tomaron de cuatro muestras experimentales cilíndricas (ϕ 15×30 cm.) — C40EC, C40FC, C40GC y C40HC. La ventaja de este procedimiento radica en obtener una muestra de concreto que no se carbonató en la práctica. Estas muestras, inicialmente, se protegieron del aire con una película de plástico, y más tarde se mantuvieron en el horno a 65° C por un período igual o superior a tres semanas hasta que la masa permaneció constante. Esta masa se denominó *masa seca*. Después de alcanzar esta condición, la muestra fue sometida al vacío durante 24 horas, y más tarde se mantuvo sumergida en agua durante otras 24 horas para obtener mediciones de masa hidrostática y saturada. Se calcularon los siguientes parámetros, que se presentan en la Tabla 5, sobre la base de estos valores (Rigo da Silva et al., 2000):

- Porosidad (P): razón entre el volumen de poros accesibles al agua y el volumen aparente de la muestra;
- Masa volumétrica real (Dr): la *masa volumétrica* del material impermeable, vale decir, la razón entre la muestra de masa seca y el volumen de material impermeable;
- Masa aparente real (Da): razón entre la *muestra de masa seca* y su volumen aparente.

De las ocho muestras mencionadas arriba, seis fueron sometidos a una atmósfera de CO₂ al 100% durante 25 días. Las dos muestras restantes – C40EC2 y C40FC1 – se mantuvieron en aire para control. Después del período acelerado de prueba de carbonatación, el procedimiento RILEM se repitió para obtener la porosidad accesible al agua para las ocho muestras. Los resultados se muestran también en la Tabla 5.

Tabla 5. Porosidad Accesible al agua, antes y después de la prueba de carbonatación.

Muestra	Antes de la Prueba de Carbonatación			Después de la Prueba de Carbonatación		
	P (%)	Dr (kg/m ³)	Da (kg/m ³)	P (%)	Dr (kg/m ³)	Da (kg/m ³)
C40EC1	9,0	2781,1	2531,3	7,9	2603,4	2398,5
C40EC2	8,6	2790,4	2551,4	8,1	2576,2	2368,5
C40FC1	8,8	2572,7	2345,9	9,7	2586,9	2336,5
C40FC2	8,6	2819,7	2577,9	7,9	2607,3	2400,3
C40GC1	7,5	2564,4	2373,1	7,3	2601,9	2412,1
C40GC2	8,4	2778,3	2543,5	7,8	2598,9	2396,0
C40HC1	8,4	2790,0	2554,8	7,8	2610,1	2407,2
C40HC2	9,4	2829,8	2564,9	7,6	2606,0	2407,1

De las muestras carbonatadas, se tomó argamasa con porciones de agregado grueso para la porosimetría de mercurio utilizando un AutoPore III 9420 (Micromeritics) capaz de alcanzar presiones del orden de los 414 MPa. Las porciones de argamasa se tomaron cerca de la superficie de la muestra, agregándose al nombre de la muestra el índice A, y de la región central de la muestra, agregándose un índice B. La Figura 1 muestra las curvas de intrusión del mercurio para las dos muestras carbonatadas (C40EC1 y C40GC2) y de la muestra de control (C40EC2). Los parámetros obtenidos mediante porosimetría de mercurio se presentan en la Tabla 6.



Tabla 6. Parámetros obtenidos con porosimetría de intrusión de mercurio.

Muestra	Porosidad Abierta (%)	Area Superficial Porosa (m ² /g)	Factor de Retención (%)	Diámetro Umbral (μm)	dV/dD al Final de la Intrusión (m ² /g)	D _m (μm)
C40EC1A	13.0	11.6	77.5	0.0144	0.9081	0.1238
C40EC1B	11.8	7.6	75.2	0.0144	1.579	0.2745
C40EC2A	13.4	4.8	54.8	0.1443	0.776	0.2123
C40EC2B	12.5	4.2	56.5	0.1441	0.9793	0.2695
C40GC2A	8.9	4.5	71.9	0.0144	0.000	0.1322
C40GC2B	9.2	4.1	71.2	0.027	1.357	0.2767

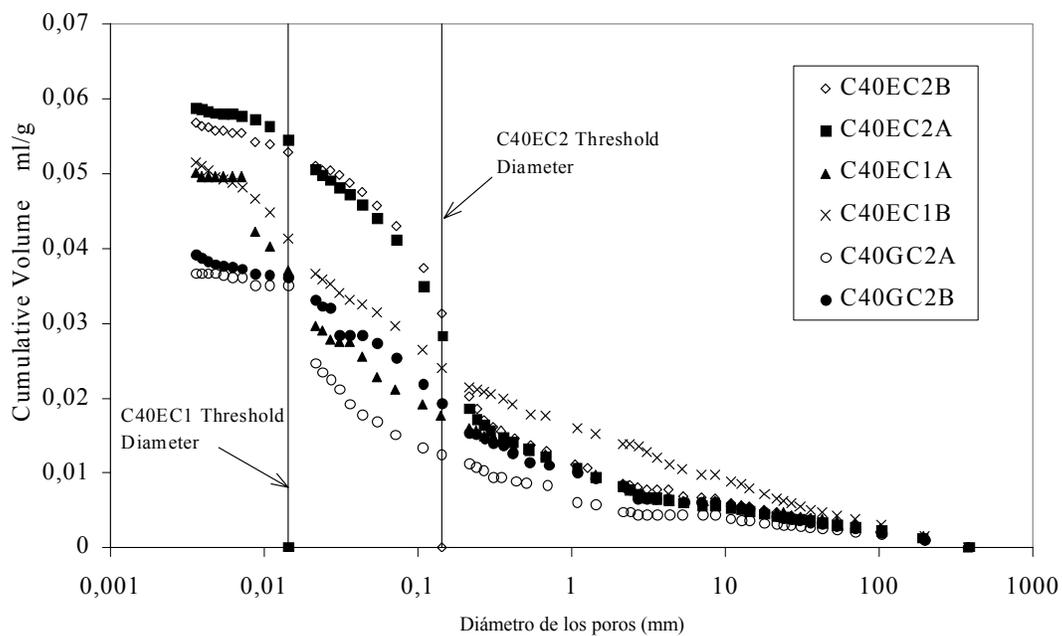


Figura 1. Curvas de intrusión del mercurio en muestras carbonatadas y de control

5. ANALISIS

El concreto carbonatado parece presentar una menor resistencia a la flexión. Esto se puede observar en la Figura 2 y también en la comparación de las Tablas 3 y 4. Los valores de la resistencia a la flexión disminuyeron en 12% y 25% en relación a los valores en los 28 y 91 previos, respectivamente. Al menos uno de las muestras experimentales prismáticas (P40CC) tenía mayores valores de profundidad de la carbonatación en la superficie, lo que significa que dicha cara no estaba protegida por el molde metálico utilizado para moldear la muestra experimental. Parece razonable que la cara no protegida de la muestra experimental sería más porosa que las de las restantes caras.

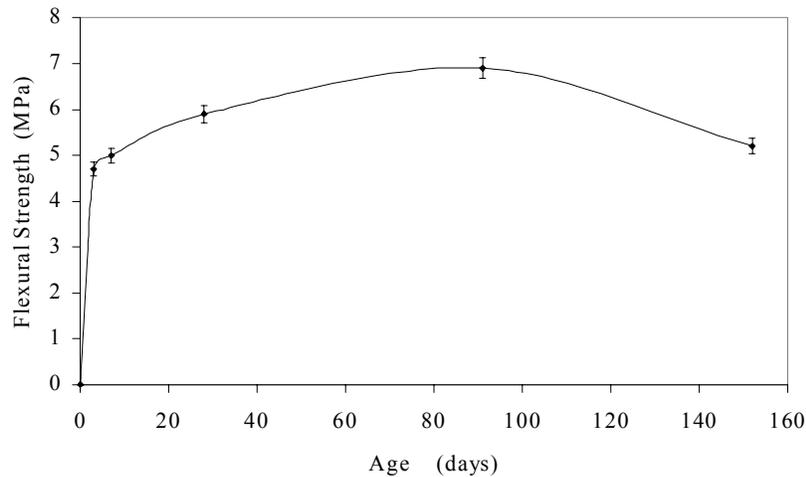


Figura 2. Resistencia a la flexión de concreto C40

Las muestras cúbicas carbonatadas soportaron cargas significativamente mayores (22% a 78% más altas) que la muestra de control soportó hasta la ruptura, como se muestra en la Tabla 7. Estos resultados son una confirmación que, si se considera sólo a los concretos simples, la carbonatación puede ser beneficiosa, mejorando algunas de las propiedades del concreto. Las mediciones de la porosidad accesible al agua (Tabla 5) muestra que la carbonatación hace que el concreto sea más compacto, pues 5% a 12% de la porosidad abierta se cerró. Esta puede ser una de las razones que explica el aumento en la resistencia mecánica.

Tabla 7. Propiedades mecánicas del concreto después de la prueba de carbonatación

Muestra	Profundidad de la Carbonatación (mm)	Carga al momento de la Ruptura en Prueba de Compresión Axial (ton)
C40EC1	8 – 15	57
C40EC2	1	32
C40FC1	1	35
C40FC2	8 – 15	52,5
C40GC1	8 – 15	54,5
C40GC2	8 – 15	49,2
C40HC1	8 – 15	49
C40HC2	8 – 15	43

Las curvas de intrusión del mercurio de las muestras carbonatadas se desarrollaron de una forma irregular y presentaron un volumen de intrusión total inferior a aquellos de las muestras de control, indicando que las estructuras de los poros estaban realmente cerradas. Los parámetros utilizados en este análisis (Tabla 6) se describieron en un trabajo previo (Rigo da Silva y Vasconcelos, 1998). La porosidad abierta de todos son comparables, y los resultados de C40GC2A y C40GC2B, levemente inferiores a aquellos de los demás, están en concordancia con la tendencia ya observada en las mediciones de la porosidad accesible al agua.

El área superficial porosa, el diámetro umbral, los valores de la distribución del diámetro promedio y derivado al final de la intrusión destacan las diferencias significativas entre la región carbonatada (superficie) y la región no carbonatada de las muestras. El área de la superficie de los poros siempre es mayor en la superficie que en el interior de

la muestra, aún en el caso de la muestra de control, que se puede deber al hecho de que las regiones superficiales están sujetas continuamente a interacciones con los elementos atmosféricos, incluyendo la carbonatación natural de las muestras de control (que se originan del contacto con el aire). El diámetro umbral, punto de inflexión de la curva de intrusión (que corresponde al máximo en la curva dV/dD) de las muestras carbonatadas es menor que aquella de la muestra de control. Algunos autores (Katz y Thompson, 1986; Halamickova et al., 1995) sugieren que el diámetro umbral corresponde al menor diámetro de los poros, entre los poros de mayor tamaño, lo que daría lugar a una trayectoria de percolación hacia el interior de la muestra. Por consiguiente, el marcado aumento en el diámetro umbral es un indicador del cierre de los poros como resultado de la carbonatación. El diámetro promedio de los poros (D_m) de las regiones al interior de las muestras fue prácticamente el mismo, pero las diferencias surgen en los promedios calculados para las regiones de la superficie, para las cuales D_m es significativamente menor para las muestras carbonatadas (alrededor de 60% menor) como una consecuencia del cierre de la microestructura.

Las muestras carbonatadas presentan una estructura porosa más torcida que aquellas de la muestra de referencia. Esta conclusión, que ya parecía estar indicada por la curva de intrusión irregular, se confirma por el valor significativamente más alto del factor de retención, que se define como la razón entre el volumen de mercurio retenido después del primer ciclo de intrusión-extrusión y el volumen total de mercurio introducido (Rigo da Silva y Vasconcelos, 1998). La pendiente de la tangente en relación a la curva de intrusión próxima al punto de máxima presión (dV/dV al final de la intrusión) indica la existencia de poros finos en la micro-estructura a la que el mercurio no pudo ingresar y que debe ser identificada y descrita mediante otras técnicas tales como la absorción de nitrógeno, no utilizada en este trabajo. A modo de conclusión, cuánto más pequeña esta pendiente, tanto menor la fracción de poros finos existente. En los valores presentados se puede apreciar que las mediciones de esta tangente obtenida en las regiones más superficiales siempre fueron menores a aquellas al interior de la muestra, incluyendo la muestra de referencia (C40EC2), lo que indicaría un posible efecto de la carbonatación natural. Sin embargo, una disminución en el dV/dD al final de la intrusión entre la superficie y el interior es mucho más marcada para las muestras carbonatadas, llegando incluso a la tangente cero para la muestra C40GC2, lo que evidencia que la carbonatación promovió el cierre de los poros finos en gran medida.

Un último aspecto que debe ser considerado en el análisis de los resultados de porosimetría es la morfología que presentan las curvas de intrusión. La Figura 1 revela que las dos curvas relacionadas con la muestra de control (C40EC2) prácticamente se traslapan, indicando que la distribución del tamaño de los poros coincide para la superficie y el interior de la muestra. Ahora bien, las muestras carbonatadas presentan un comportamiento mucho más diverso. A lo largo de prácticamente toda la distribución de las dos muestras analizadas, la región superficial, que de consiguiente experimentó carbonatación, tenía un valor de intrusión del mercurio inferior a aquél de la región interior. De esta forma, la carbonatación parece promover el cierre de la estructura porosa a lo largo de toda la distribución de los tamaños presentados por la estructura.

Las Figuras 3 y 4 muestran aspectos de las microestructuras del concreto analizado. Los productos de la hidratación se formaban naturalmente y la microestructura era compacta y con escasos vacíos (Figura 3). Algunas muestras carbonatadas se identificaron como partículas livianas y con una superficie lisa (Figura 4). La microestructura observada por SEM en las muestras de concreto se puede clasificar en compactas, presentando pocos poros y escasas fisuras. En general, la microestructura era uniforme. En la Figura 3, se pueden observar algunos productos de la hidratación, tales como los aglomerados de etringita (Figura 3a) y partículas de C-S-H mezcladas con portlandita (Figura 3b). Asimismo, se identificaron carbonatos en algunos micrografías, las que se muestran en la Figura 4.



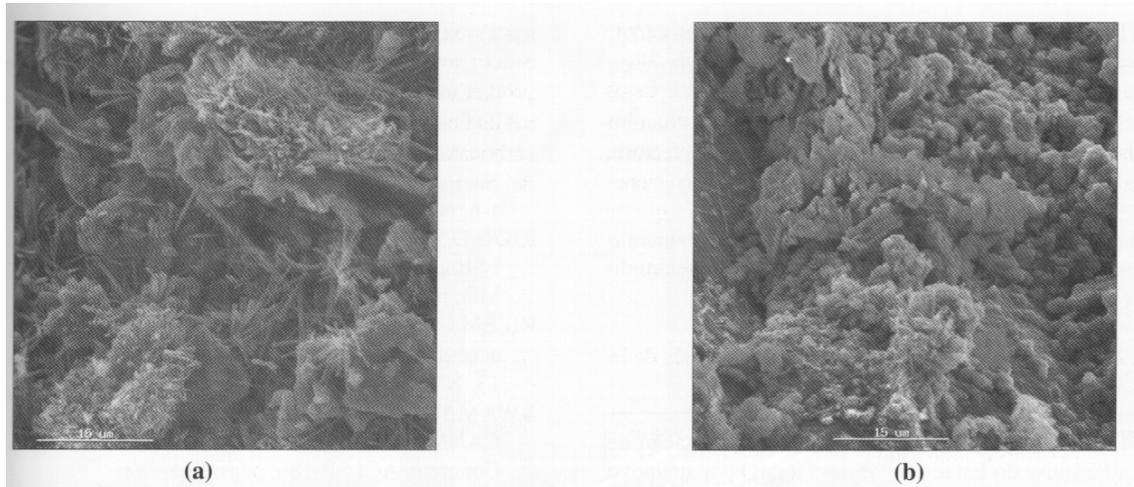


Figura 3. Microfotografía del concreto: (a) región de formación de etringita; (b) portlandita y silicatos de calcio

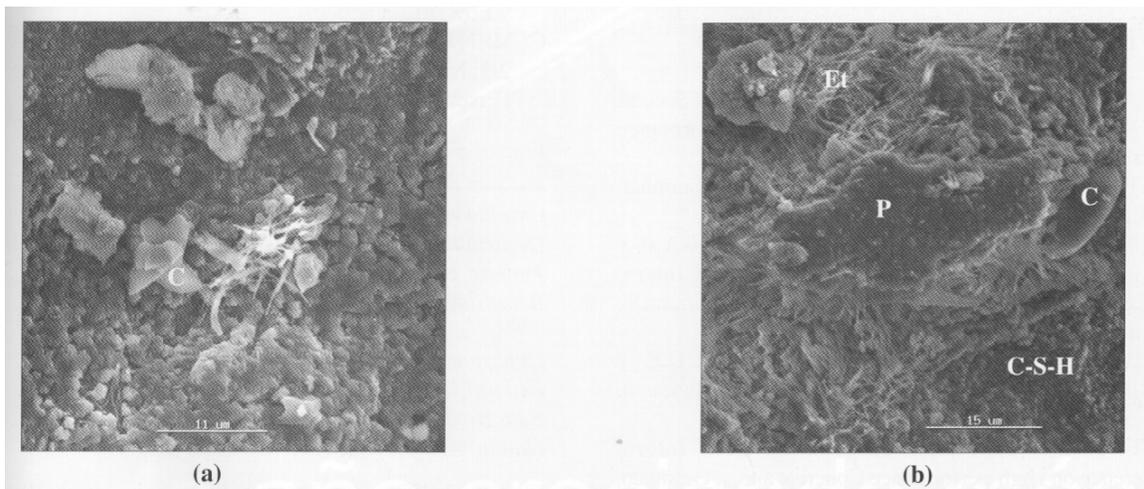


Figura 4. Microfotografía del concreto: (a) presencia de carbonatos (C); (b) algunos elementos de la microestructura: carbonatos (C), portlandita (P), silicatos de calcio (C-S-H) y etringita (Et)

6. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este trabajo se resumen a continuación:

1. Los valores de la resistencia a la flexión obtenidos después de la prueba de carbonatación muestran una disminución de 12% y 25% en relación a los valores previamente obtenidos a los 28 y 91 días, respectivamente. El concreto carbonatado parece presentar una disminución en su resistencia a la flexión.
2. En las muestras carbonatadas sometidas a la prueba de compresión, se alcanzó la ruptura con cargas significativamente más altas (22 a 78%) que aquellas con las muestras de control.
3. La carbonatación provocó una reducción de 5% a 12% de la porosidad abierta del concreto.
4. El análisis de los resultados de la porosimetría de mercurio mostraron claramente el cierre de la estructura porosa del material como resultado del efecto de la carbonatación:
 - a) La superficie porosa es siempre mayor en la superficie que al interior de la muestra, incluso para las muestras de control;
 - b) El diámetro umbral de las muestras carbonatadas es de un orden inferior a aquella de la muestra de control;
 - c) El diámetro promedio de la distribución de los poros (D_m) de las regiones superficiales es significativamente menor en las muestras carbonatadas (alrededor de un 60% menor);



- d) El valor significativamente más alto del factor de retención R de las muestras carbonatadas parece indicar a una estructura porosa más torcida que aquella en la muestra de referencia, lo que ya parecía indicado por la curva de intrusión irregular;
 - e) La medición de la pendiente (dV/DD) al final de la curva de intrusión en las regiones más superficiales era siempre menor a aquellas al interior de la muestra, incluyendo aquellas de la muestra de referencia (C40EC2), lo que estaría indicando un posible efecto natural de carbonatación. Sin embargo, la disminución en el valor de dV/DD al final de la intrusión entre la superficie y el interior es mucho más marcada para las muestras carbonatadas, llegando incluso a la tangente cero (zero tangent) para la muestra C40GC2, demostrando que la carbonatación promovía el cierre de una buena parte de estos poros más finos.
 - f) La carbonatación parece promover el cierre de la estructura porosa en todas las distribuciones por tamaño presentada por esta estructura.
1. La microestructura observado en las muestras de concreto C40 se pueden clasificar como compactas, presentando pocos poros y fisuras.

7. RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a FAPEMIG (Fundacao de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais) por su apoyo financiero.

8. REFERENCIAS

- DASILVA, T.J. Y ROCA, P. (1999), *En: Proceedings of Second CANMET/ACI Intern. Conference on High-performance Concrete*, ACI SP-186, págs. 525-533.
- DELOY, F.X. (1997), *En: Proceedings of International Seminar*, Brasilia, DF, págs. 1-11.
- GUIMARÃES, A.T.C., DIAS, C.R.R., RECENA, F.A.P., y HELENE, P.R.L. (1999), *En: Proceedings of II Intern. Conference on High-performance Concrete and...*, Gramado, RS, págs. 1-18.
- HALAMICKOVA, P. ET AL., (1995), *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 4, págs. 790-802.
- Helene, P.R.L. (1999), *En: Proceedings of II Intern. Conference on High-performance Concrete and...*, Gramado, RS, págs. 1-30.
- KATZ, A.J., y THOMPSON, A.H. (1986), *Physical Review B*, v. 34, Nº 11, págs. 8179-8181.
- KAZMIERCZAK, C.S., y LINDENMEYER, Z. (1996), *En: Proceedings of Intern. Congress on High-performance and...*, Florianópolis, SC, págs. 402-413.
- KOBAYASHI, K., SUZUKI, K., y UNO, Y. (1994), *Cement and Concrete Research*, v. 24, Nº 1, págs. 55-61.
- MEHTA, P.K. (1999), *En: Proceedings of II Intern. Conference on High-performance Concrete and...*, Gramado, RS, págs. 1-14.
- MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. (1994), *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*, Editora Pini, São Paulo.
- NEVILLE, A.M. (1998), *Propriedades do Concreto*, Editora Pini, São Paulo.
- PAPADAKIS, V.G., VAYENAS, C.G., y FARDIS, M.N. (1991), *ACI Materials Journal*, v. 88, Nº 2, págs. 186-196.
- PAPADAKIS, V.G., VAYENAS, C.G., y FARDIS, M.N. (1991), *ACI Materials Journal*, v. 88, Nº 4, págs. 363-373.
- PARROTT, L.J. (1994), *Magazine of Concrete Research*, v. 46, Nº 166, págs.23-28.
- RAFAI, N. ET AL. (1991), *Cement and Concrete Research*, v. 21, Nº 2/3, págs. 368-377.
- RIGO DA SILVA, C.A., LEMOS, F.L., VASCONCELOS, W.L., y LAMEIRAS, F.S. (1999), *En: 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, Florianópolis, SC.
- RIGO DA SILVA, C.A., REIS, R.J.P., VASCONCELOS, W.L., y LAMEIRAS, F.S. (2000), *En: Anais do V Encontro Nacional de Aplicações Nucleares*, Rio de Janeiro, RJ, págs. 1-6.
- RIGO DA SILVA, C.A., VASCONCELOS, W.L. (1998), *In: I Simpósio Brasileiro de Estruturologia*, Belo Horizonte, MG, págs. 1-10.
- RILEM COMMISSION 25 PEM (1980), Test Nº I.1 – Porosity accessible to water, *Matériaux et Construction*, RILEM, v. 13, Nº 75, págs. 177-179.
- SWAMY, R.N. (1999), *En: Proceedings of Second CANMET/ACI Intern. Conference on High-performance Concrete*, ACI SP-186, págs. 765-788.



CEMENT AND CONCRETE RESEARCH (1995), v. 25, n. 4: Pavla Halamickova, Rachel J. Detwiler, Dale P. Bentz y Edward J. Garboczi.

CEMENT AND CONCRETE RESEARCH (1991). v. 21, n. 2/3: Nourredine Rafai. Rene Letolle, Philippe Blanc, Alain Person y Philippe Gegout.

Cláudio A. Rigo da Silva

*Departamento de Ingeniería de Materiales y Construcción Civil
Federal University of Minas Gerais Rua
Belo Horizonte, MG, Brasil*

*Department of Materials Engineering and Civil Construction
Federal University of Minas Gerais Rua
Belo Horizonte, MG, Brazil*

claudio@denc.ufmg.br

Rubens J. Pedrosa Reis

*Departamento de Ingeniería Civil, FUMEC
Belo Horizonte, MG, Brasil*

*Department of Civil Engineering, FUMEC
Belo Horizonte, MG, Brazil*

Fernando Soares Lameiras

*Centro de Desarrollo de Tecnología Nuclear (CNET/CDTN)
Brasil*

*Nuclear Technology Development Center (CNET/CDTN)
Brazil*

Wander Luiz Vasconcelos

*Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales
Federal University of Minas Gerais
Belo Horizonte, MG, Brasil*

*Department of Metallurgical and Materials Engineering
Federal University of Minas Gerais
Belo Horizonte, MG, Brazil*

