



12-14 de Noviembre del 2012
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa

ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO REFORZADO EXPUESTO A CARBONATACIÓN

H.J. Cárdenas-Varela¹, A.L. López León¹, S.T. De La Cruz Chaidez¹, O. Dena Ornelas¹, A. Esparza Rodríguez.

¹ Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. Del Charro 450 Norte, Colonia Partido Romero, C.P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua.

RESUMEN

El proceso de carbonatación en estructuras de concreto reforzado, amplifica las probabilidades de que agentes agresivos externos lleguen al acero de refuerzo causando así su deterioro y por ende el elemento perderá su capacidad portante de diseño. En el presente trabajo se evaluó la respuesta que ofrecen el concreto, con una relación agua/cemento aproximada a 0.63 con adición de carbonato de magnesio, al someterlos a un proceso de carbonatación acelerado. Se elaboraron vigas de concreto reforzado, cilindros de concreto y cubos con varillas corrugadas para revisar la pérdida de adherencia entre el acero y el concreto. La investigación concluye con la determinación de la eficiencia del carbonato de magnesio para inhibir ó disminuir el frente de carbonatación y la modificación de las propiedades mecánicas que éste produce en los elementos de concreto.

Palabras clave: Carbonatación, Carbonato de magnesio, concreto reforzado, inhibición.

ABSTRACT

A Carbonation process in reinforced concrete structures amplifies the chances for outsiders to reach the reinforcing steel and corrode and can thus lose structure bearing capacity offered initially in the design. This study evaluated the response offered by concrete with a water / cement ratio of about 0.63 and adding a percentage of magnesium carbonate, to undergo a process of accelerated carbonation. To this were made of reinforced concrete beams, concrete cylinders and cubes with corrugated rods to check the loss of adherence between the steel and concrete. The paper concludes with the determination of the efficiency of the magnesium carbonate to inhibit or decrease the carbonation front and the modification of the mechanical properties which it produced in the concrete elements.

Keywords: Carbonation, Magnesium Carbonate, Mechanical, Reinforced Concrete, Inhibition.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas que caracterizan una estructura de concreto reforzado (EC), están directamente ligadas a la durabilidad ó vida útil de ésta, ya que, si en dado momento la EC deja de ofrecer sus cualidades estructurales, su serviciabilidad tendrá que ser prescindida por cuestiones de seguridad, sin importar que tan lejos este de su vida útil proyectada. Para lograr estimar la vida útil de una estructura los puntos clave son: el diseño, la construcción, el envejecimiento y mantenimiento durante su vida útil¹.

La relación que existe entre la porosidad y la durabilidad se refleja en prácticamente todos los reglamentos y códigos en el ámbito internacional². En México, en la norma NMX-C-403-ONNCCE -1999 se estipulan requerimientos de durabilidad de concreto hidráulico estructural. Es necesario recalcar que aunque la durabilidad del concreto es más alta si su resistencia a la compresión es mayor, esta no se debe tomar como medida confiable de la durabilidad³.

Patologías que se producen en el proceso constructivo, pueden debilitar el mecanismo de transferencia de tensiones entre las armaduras y el concreto y disminuir la capacidad portante junto con las condiciones de seguridad⁴. Dentro de la vida útil de una EC uno de los principales factores involucrados en la reducción de la durabilidad en ambientes no marinos, es el dióxido de carbono CO₂, principal componente de la carbonatación⁵.

Para elaboración de un concreto, las normas aplicables a menudo se basan en especificaciones prescriptivas, suponiendo que se traducirá en una durabilidad adecuada. En cambio también existen normas como la Europea, EN 206-1, donde se definen cuatro clases de exposición frente a la carbonatación, esto para definir su rendimiento, producción y conformidad. Para cada tipo de exposición, la cantidad del aglutinante mínimo y la relación agua aglutinante máxima se especifican⁶.

Los principales factores que intervienen en el proceso de carbonatación son: tipo y contenido de cemento, relación agua/cemento (a/c), grado de hidratación, concentración de dióxido de carbono CO₂, humedad relativa y temperatura. Relaciones de a/c altas, por ejemplo 0.65 favorece a la carbonatación, una humedad relativa entre 50 % y 80 %, temperatura de 23 ° C y un grado hidratación bajo también lo hacen⁷.

En la elaboración de concreto, la reacción química del cemento y el agua hace que parte de ésta se evapore. Al salir el vapor se genera una red capilar y microporos al interior del concreto, que aunado a la permeabilidad del material pétreo y las fisuras generadas por el fraguado y aumento de temperatura, se obtiene un material poroso y permeable⁸.

Un proceso de carbonatación reduce el pH del concreto a unidades por debajo de 10, lo cual en un concreto reforzado se maximizan las posibilidades para que se presente una oxidación reducción en el acero de refuerzo y a la vez grietas o fisuras en la EC, originando con esto estructuras inseguras⁹.

Extensas investigaciones se han realizado a diferentes tipos de concreto con la finalidad de medir su comportamiento frente a la carbonatación, estos trabajos varían desde la implementación de diferentes relaciones a/c, tipos de cemento, permeabilidad de los materiales, condiciones de

curado, adiciones de aditivos como humo de sílice, escoria de alto horno, ceniza volante entre otros. De lo cual estas acciones responden solo como una función temporal para ayudar en el control de la profundidad de carbonatación. Otros procedimientos un tanto efectivos son la implementación de recubrimientos con mayor espesor, también recubrimientos o soluciones disueltas en el mismo concreto como:

- Recubrimientos superficiales de morteros con acrílico incorporado³.
- Recubrimiento a base de pinturas acrílicas, para obras nuevas y remodelaciones, en ambientes tropicales no marinos¹⁰.
- Silicatos líquidos y silicofluoruro pueden proporcionar una superficie de protección contra agentes agresivos, dado que estas sustancias al reaccionan dentro del poro con el hidróxido de calcio forman obstrucciones dentro del mismo. Otras sustancias que funcionan como escudos protectores son los siliconas, silanos y siloxanos que forman una capa hidrofóbica¹¹.

En un proceso de carbonatación el dióxido de carbono CO_2 al reaccionar con hidróxido de calcio Ca(OH)_2 dentro de la matriz del concreto, forma carbonato de calcio CaCO_3 ó también llamada calcita. El fenómeno del crecimiento y formación de la calcita ya tiene tiempo que se estudia, dentro de los trabajos realizados se han preocupado por inhibir o detener el crecimiento de ésta. Algunos de los estudios relacionados con la formación de calcita tienen lugar experimentaciones con adiciones de magnesio, entre los cuales sea determinado que:

- El ion de magnesio Mg^{+2} es un inhibidor conocido de la calcita y un modificador de la morfología en su superficie. En estado saturado o insaturado el ion de magnesio puede inhibir la disolución de la calcita¹².
- El crecimiento de la calcita se da en proceso de monocapas. Al formarse una monocapa ya con la incorporación de magnesio Mg, la monocapa siguiente ejercerá un cierto control sobre el desarrollo de la monocapa subsecuente¹³.
- A medida que aumenta la concentración de magnesio Mg la tasa de crecimiento de la calcita disminuye¹⁴.

Partiendo con este principio donde el Magnesio puede colaborar a controlar un proceso de carbonatación, se dio a la tarea de revisar el desempeño de concretos con adición de carbonato de magnesio que ofrecen durante un proceso de carbonatación acelerado y las propiedades mecánicas que se alcanzan.

METODOLOGÍA

Resistencia a compresión

Para la revisión de la resistencia a esfuerzos de compresión se elaboraron 18 cilindros (figura 1), tomando como base el método ASTM C31/C31M, de 0.15 m de diámetro y 0.30 m de altura, para los cuales se empleo la misma relación agua-cemento (0.63) equivalente a un $f'c$ aproximado de 300 kg/cm^2 . Del total de los cilindros, seis se consideraron para comparación (cilindros blanco), seis cilindros con 2.5 % carbonato de magnesio MgCO_3 y los últimos seis con un porcentaje igual a la unidad de MgCO_3 , los porcentajes se realizaron en función del peso del cemento.



Figura 1. Lotes de cilindros blanco y con contenido de carbonato de magnesio $MgCO_3$

Del lote de seis cilindros, para cada caso, cuatro fueron sometidos a un proceso de carbonatación acelerado, donde posteriormente se revisó la resistencia a la compresión y la profundidad de carbonatación. A los restantes se les estimó su resistencia a compresión en un estado normal.

Con lo anterior se pretendió obtener parámetros para comparar en que medida modifica el aditivo $MgCO_3$, la resistencia a la compresión y la eficiencia de éste para controlar un proceso de carbonatación. Las propiedades de los materiales con las que se elaboraron los concretos, se especifican a continuación, el cemento para este caso fue portland tipo I. Los concretos fueron curados inmersos en agua por 28 días.

Tabla 1. Propiedades de los materiales pétreos

Agregado Grueso			Agregado fino		
Tamaño máximo	19	mm	Peso específico de la arena	2640	kg/m^3
Peso específico grava	2680	kg/m^3	Absorción	0.7	%
Contenido de humedad	2	%	Contenido de humedad	6	%
Absorción	0.5	%	Módulo de finura	2.6	
Peso volumétrico	1455	kg/m^3	Peso volumétrico	1602	kg/m^3

La resistencia a la compresión de los cilindros fue evaluada mediante una máquina universal (figura2), las bases de los cilindros se cubrieron con moldes de neopreno para una buena distribución de la carga.



Figura 2. Revisión de la resistencia a compresión de los cilindros de concreto

Estudios experimentales de adherencia

El fenómeno que hace posible el combinar el gran despeño que tiene un concreto con respecto a esfuerzos de compresión y el acero a resistir esfuerzos de tensión propiamente, es la adherencia entre ellos. De tal forma que se elaboraron cubos de concreto con dimensiones de 0.12 m × 0.18 m × 0.15 m, los cuales fueron colados con una varilla corrugada No. 3 al centro, y así estimar la fuerza necesaria para desprender la varilla del cubo de concreto. Se elaboraron 18 cubos de concreto (figura 3), de los cuales seis cubos son para comparación (cubos blanco), seis cubos contienen 2.5 % de MgCO₃ y los seis restantes contiene 1 % de MgCO₃.



Figura 3. Cubos para revisión de adherencia

De los lotes de seis cubos, dos cubos fueron ensayados después de un proceso de curado por inmersión que duró 28 días. Los cubos restantes fueron ensayados para determinar la fuerza de adherencia después de ser igualmente curados y pasar por un proceso de carbonatación acelerado, de estos cuatro cubos se ensayaron dos cubos para un primer frente de carbonatación posteriormente se ensayaron los restantes para un proceso de carbonatación más avanzado.

La estimación de la fuerza de adherencia fue calculada en función de la longitud de desarrollo de la varilla y la fuerza necesaria para extraerla tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$u = \frac{T}{\sum o \cdot L_{des}} \quad (1)$$

donde U es la fuerza de adherencia, $\sum o$ es el perímetro de la varilla y L_{des} es la longitud de la varilla embebida en el cubo de concreto.

La aplicación de la fuerza de extracción fue mediante una máquina universal. Similar a lo efectuado en una prueba de resistencia a la fluencia de las varillas donde con mordazas se sujeta la barra y posteriormente se tensa, la sujeción se realizó como se muestra en la figura 4. Empleando una placa metálica con un orificio al centro, entre la base de la máquina y el cubo, se aseguró que la tensión aplicada se concentrara solo para extraer la varilla.



Figura 4. Extracción de una varilla embebida en un cubo de concreto

Resistencia a la flexión de vigas de concreto simplemente reforzadas

Empleando la misma metodología aplicada en los cilindros y cubos de concreto en cuanto a cantidad de muestras elaboradas y tipo de comparaciones que se pretenden realizar relacionadas a la modificación de las propiedades mecánicas y efectividad del MgCO_3 para controlar el proceso de carbonatación, se realizaron vigas de concreto con dimensiones de $0.12 \text{ m} \times 0.15 \text{ m} \times 0.60 \text{ m}$, las cuales fueron simplemente reforzadas con dos varillas corrugadas de No. 2 y un $F_y = 6000 \text{ kg/cm}^2$ (figura 5).

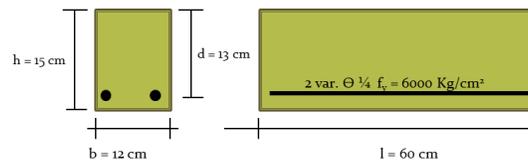


Figura 5. Dimensionamiento de vigas de concreto simplemente reforzadas

A diferencia de los otros concretos realizados, las vigas fueron elaboradas con un cemento portland tipo II. Los especímenes fueron ensayados empleando la metodología utilizada para revisar determinar el módulo de ruptura de una viga de concreto, norma NMX-C-191-ONNCCE-2004 (figura 6), de igual forma antes y después de un proceso de carbonatación.



Figura 6. Determinación de la resistencia a flexión de una viga de concreto simplemente reforzada

Cámara de carbonatación acelerada (CCA)

El objetivo en este apartado fue obtener concretos con distintos frentes de carbonatación en un periodo relativamente corto, para lo cual se adaptaron un par de cámaras aisladas en las cuales se recrearon las condiciones necesarias para que este fenómeno se presentara, (figura 7), es decir, se controló la temperatura y se alimentó de humedad, así como de volumen de CO_2 equivalente a 200 veces la concentración en un ambiente natural.

La profundidad de carbonatación obtenida en los especímenes se estimó empleando una solución de fenolftaleína y el valor de pH se determinó con phmetro comercial.



Figura 7. Cámaras aisladas para una carbonatación acelerada, Vol. izq. 1.5 m³, Vol. der. 0.2 m³

RESULTADOS

En la tablas siguientes se muestran los resultados de las pruebas efectuadas.

Tabla 2. Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión de cilindros en su estado natural

Cilindro	Diámetro cm	Long. cm	Área cm ²	% MgCO ₃	Fuerza T	Resistencia kg/cm ²	Frente de Carbonatación
CB-4	15.1	30.4	179.1	0	61.086	341.11	-
CB-5	15.1	30.4	179.1	0	59.571	332.65	-
CM1-3	15.2	30.5	181.4	1	57.198	315.21	-
CM1-4	15.1	30.5	179.0	1	53.763	300.22	-
CM2-1	15.2	30.5	183.8	2.5	40.017	217.65	-
CM2-5	15.1	30.5	179.1	2.5	40.443	225.81	-

Tabla 3. Resultados de resistencia a la compresión de cilindros con 20 días expuestos a una CCA

Cilindro	Diámetro cm	Long. cm	Área cm ²	% MgCO ₃	Fuerza T	Resistencia kg/cm ²	Frente de Carbonatación
CB-1	15.2	30.4	181.4	0	59.584	328.36	1.15 cm
CB-2	15.2	30.4	181.4	0	61.789	340.51	1.15 cm
CM2-1	15.2	30.6	181.4	2.8	41.601	229.33	1 cm
CM2-6	15.1	30.6	179.0	2.8	40.223	224.61	0.9 cm
CM1-1	15	30.4	176.71	1	55.200	312.37	1.2
CM1-2	15.2	30.3	181.4	1	54.800	302.99	1.1

Tabla 4. Resultados de las pruebas de adherencia en cubos de concreto en su estado natural

Cubo	Diámetro Varilla in	Perímetro cm	Long. Desarrollo cm	Tensión kg	<i>U</i> Estimada kg	Carbonatación cm
A-2	3/8	2.99	14.28	4943	115.67	0
A-6	3/8	2.99	12.54	4620	123.21	0
AM1-1	3/8	2.99	12.06	2616	72.51	0
AM1-2	3/8	2.99	10.63	2093	65.81	0
AM2-1	3/8	2.99	13.49	2856	70.78	0
AM2-2	3/8	2.99	14.92	2885	64.65	0

Tabla 5. Resultados de las pruebas de adherencia en cubos de concreto después de 20 días en CCA

Cubo	Diámetro Varilla in	Área cm ²	Long. Desarrollo cm	Tensión kg	<i>U</i> Estimada kg	Carbonatación cm
A-3	3/8	0.71	11.5	3993	116.03	0.7
A-4	3/8	0.71	12.7	3200	84.20	1.1
AM2-5	3/8	0.71	13.97	4539	78.57	0.5
AM2-3	3/8	0.71	14.28	2600	60.84	0.7
AM1-4	3/8	0.71	11.75	2200	62.57	0.9
AM1-6	3/8	0.71	11.43	2199	64.29	0.6

Tabla 6. Resultados de las pruebas de resistencia a la flexión de vigas simplemente armadas

Viga	Long.	Acero	Fuerza	Frente de	pH
------	-------	-------	--------	-----------	----

	cm	cm ²	T	Carbonatación cm	
VCB-5	60	0.633	3.566	0	11.36
VCB-4	60	0.633	3.275	0	11.27
VM2-4	60	0.633	3.549	0	11.23
VM2-1	60	0.633	3.750	0	11.18
VM1-10	60	0.633	3.540	0	11.22
VM1-9	60	0.633	3.360	0	11.29

Tabla 7. Resistencia a la flexión de vigas simplemente armadas con 20 días en CCA

Viga	Long. cm	Acero cm ²	Fuerza T	Frente de Carbonatación cm	pH Exterior	pH Interior
VCB-3	60	0.633	3.200	0.73	9.33	11.22
VCB-1	60	0.633	3.200	0.76	9.06	11.14
VM2-8	60	0.633	2.700	0.61	9.72	11.16
VM2-9	60	0.633	3.200	0.76	9.22	11.16
VM1-3	60	0.633	3.600	0.69	9.20	11.26
VM1-1	60	0.633	3.200	0.60	9.06	11.22

CONCLUSIONES

Los resultados reflejan que la adición de carbonato de magnesio $MgCO_3$, en las dosificaciones donde se empleó concreto portland tipo I afecta considerablemente en las propiedades mecánicas del elemento. Al añadir un 2.5% de $MgCO_3$ a la dosificación, la resistencia a compresión disminuyó aproximadamente un 30%, mientras que para dosificación con 1 % de $MgCO_3$ la resistencia a la compresión disminuyó 8 %. La adherencia también se redujo, ya que se pierde más del 40 % para los dos casos de dosificación.

Los resultados anteriores se pueden atribuir a que el aditamento hacer una reacción brusca con el agua y el cemento de dosificación modificando la consistencia del concreto fresco en más de un 40%.

En cuanto a la efectividad del $MgCO_3$ para colaborar a controlar el proceso de carbonatación los resultados muestran que en el mejor de los casos, este obtuvo cerca de un milímetro en promedio menos profundidad de carbonatación, por lo que se considera que la aportación del carbonato de magnesio en la inhibición de la carbonatación es prácticamente nula.

Los concreto elaborados con un cemento portland tipo II y adiciones de carbonato de magnesio, presentaron una resistencia a la compresión promedio en los tres lotes, sin embargo la obtención de el frente de carbonatación fue similar en los que tenían adiciones de carbonato y los que carecían del mismo.

AGRADECIMIENTOS

Fue posible llevarse a cabo este proyecto gracias al apoyo que brindó el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

REFERENCIAS

1. Těpy Brěetislav, Marke'ta Chroma, Pavel Rovnanı'k. "Durability assessment of concrete structures: reinforcement depassivation due to carbonation". Structure and Infrastructure Engineering Vol. 6, No. 3, June 2010, 317–327. ISSN 1573-2479 print/ISSN 1744-8980 online 2010 Taylor & Francis.
2. Oshiro A., Baronetto C., Beltramone C. 2008. "Comportamiento de hormigones expuestos a condiciones naturales de alta agresividad". Exacta Sao Paulo, v.6, n. 1, p. 93-108, jan./jun.2008.
3. Carvajal A., Silva C., Valiente J., Venegas A., "Efectos de la carbonataci3n acelerada en distintos tipos de cementos y hormigones", Revista de la Construcci3n volumen 6 # 1 - 2007, pp. 88-97.
4. Molina M., Guti3rrez J.P.,
García M.D., "Estrategias para evaluar estructuras de hormig3n armado con patologías por falta de adherencia", Segunda edici3n congreso Fundaci3n Escuela de la Edificaci3n (2006), pp. 40-49.
5. Moreno I. Erick, Serrano
Daniel, Cob Enrique, "Barras de acero galvanizado: Una opci3n contra la corrosi3n inducida por la carbonataci3n", Ingeniería 9-2 (2005), pp.17-24.
6. Rozi3re Emmanuel, Ahmed
Loukili, Francois Cussigh. "A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation". Construction and Building Materials 23 (2009) pp. 190–199.
7. Linhua Jianga, Baoyu Linb,
Yuebo Caib. "A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete". Cement and Concrete Research 30 (2000), pp. 699-702.
8. Barrera V Hugo, P3rez
Horacio, Sandoval Rom3n, "La carbonataci3n en edificios de Santiago" Publicado por admin en XIV Jornadas 2003 - Valdivia - U Austral el septiembre 25, 2008.
9. Huang N.M, Chang J.J.,
Liang M.T., "Effect of plastering on the carbonation of a 35-year-old reinforced concrete building", Construction and Building Materials 29 (2012), pp.206–214.
10. Serrano I., Moreno I. 2006. "Películas barrera: Una opci3n contra la carbonataci3n del concreto reforzado", Ingeniería 10-2, 37-45.
11. Shaker M. Raja M., Research Scholar; Prof. Ramesh R Reddy. "Re-alkalization of Carbonated Reinforced Cement Concrete Members". Revista NBMCW February 2009 NBM Media Construction information.
12. Lin Yi-Pin, Singer Philip, "Effect of Mg⁺² on the kinetics of calcite crystal growth", Journal of Crystal Growth 312 (2009), pp. 136–140.
13. Astilleros J.M, Fern3ndez DÍaz, "The role of magnesium in the growth of calcite: An AFM study", Chemical Geology 271(2009) pp. 52–58.
14. Deleuze Marc, Brantley Susan. "Inhibition of calcite crystal growth by Mg²⁺ at 100°C and 100 bars: Influence of growth regime". Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 61, No. 7, pp. 1475-1485. 1997. PII S0016-7037(97) 00024-0.