

Desempeño de las pinturas vinil-acríticas contra la carbonatación del concreto

Moreno, E. I.¹, Solís-Carcaño, R. G.² y Arias-Palma, C. A.³

Fecha de recepción: 17 de agosto de 2007 – Fecha de aceptación: 7 de abril de 2008

RESUMEN

La carbonatación del concreto y los cloruros son las causas principales de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Lejos de los ambientes marinos, la corrosión inducida por la carbonatación del concreto podría ser el principal mecanismo de corrosión en concreto reforzado. Después de que la carbonatación ocurre, es sabido que las barras de acero de refuerzo normal se corroen activamente. El objetivo de esta investigación fue estudiar el desempeño de los recubrimientos del concreto como una alternativa para evitar la carbonatación de los elementos de este material y, por lo tanto, la corrosión del refuerzo. Varios tipos de pinturas vinil-acrítica y uno de acrílica fueron aplicadas en probetas de concreto para monitorear el avance de la carbonatación. Las probetas de concreto fueron cilíndricas y se colaron usando tres relaciones agua/cemento. Después de pintados, los cilindros fueron carbonatados en una cámara de carbonatación acelerada al 4% de CO₂ y 60% de humedad relativa. Los resultados indicaron que las pinturas vinil-acríticas y la acrílica de buena calidad redujeron satisfactoriamente la velocidad de carbonatación de los especímenes de concreto; pinturas vinil-acríticas de baja y regular calidad no redujeron la velocidad de carbonatación.

Palabras Clave: Carbonatación, Concreto, Corrosión, Durabilidad, Edificios, Películas barrera.

Performance of vinyl-acrylic paints against carbonation-induced corrosion

ABSTRACT

Concrete carbonation and chloride ions are the main cause of corrosion in reinforced concrete structures. Away from marine environments, carbonation-induced corrosion would be the corrosion mechanism in reinforced concrete. After carbonation has occurred, plain reinforcing steel bars are known to corrode actively. The objective of this investigation was to study the performance of concrete coatings as an alternative to avoid carbonation of concrete elements, and therefore, corrosion of the reinforcement. Two different coatings (vinyl-acrylic and acrylic) were employed in concrete specimens to monitor the carbonation progress. Concrete specimens were cylindrical in shape, cast using three water/cement ratios. After painting them, the specimens were carbonated in an accelerated carbonation chamber at 4% CO₂ and 60% RH. The results indicated that the good-quality acrylic and vinyl-acrylic coatings successfully reduced the carbonation rate of the concrete specimens; regular- and low-quality vinyl-acrylic coatings did not reduced the carbonation rate.

Keywords: Buildings, Carbonation, Coatings, Concrete, Corrosion, Durability

¹ Profesor-Investigador del C. A. de Estructuras y Materiales, FIUADY. E-mail: emoreno@uady.mx

² Profesor-Investigador del C. A. de Ingeniería de la Construcción, FIUADY. E-mail: tulich@uady.mx

³ Estudiante del Programa de Maestría en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UADY

INTRODUCCIÓN

El concreto, como material pétreo que es, suele ser muy durable, sin embargo el concreto reforzado no lo es tanto, y suele deteriorarse como resultado de la interacción del medio ambiente con las barras de acero; de aquí que la corrosión del acero sea el principal factor en la reducción de la vida útil de servicio de las estructuras de concreto reforzado.

En ambientes diferentes al marino, la carbonatación del concreto podría ser la causa de la corrosión del refuerzo, bajo condiciones propicias de humedad y temperatura. Debido a la reacción química entre el dióxido de carbono y los compuestos hidratados del cemento, se reduce el pH de la solución del poro del concreto; una vez que el pH se encuentra por debajo de 9, el acero embebido pierde su estado pasivo y empieza su proceso de corrosión, que con el transcurrir del tiempo ocasionará deterioros del concreto.

Se ha reportado que en el medio urbano de Yucatán, México la corrosión inducida por la carbonatación está afectando a las construcciones de concreto; como ejemplo se puede citar la infraestructura universitaria estudiada por Moreno *et al.* (2006). Edificios con menos de 25 años de edad presentan signos inequívocos de deterioro por corrosión (Figura 1). Sin embargo, no todos los edificios mostraron el mismo desempeño bajo condiciones similares de temperatura y humedad, ya que las velocidades de carbonatación

reportadas estuvieron aproximadamente entre 4 mm/año^{1/2} y 11 mm/año^{1/2} para el mismo tipo de concreto. A pesar de las diferencias esperadas debido a la variabilidad en la calidad del concreto y las condiciones de microclima, existe otro factor que podría estar causando este irregular desempeño: la efectividad de la barrera que proporciona la pintura al concreto.

Tradicionalmente la pintura se ha aplicado a los elementos de concreto atendiendo únicamente a objetivos de carácter arquitectónico, y las propiedades deseables que se han buscado en ella son la resistencia a la abrasión y su durabilidad.

Por otro lado, el uso de elementos prefabricados de concreto ha tenido gran auge en los últimos años en la región. Especial mención merecen los paneles de concreto reforzado, los cuales son preferidos por diseñadores e inversionistas, ya que proporcionan un aspecto novedoso al edificio y a la vez permiten concluir la construcción con mayor rapidez. La mayoría de los elementos prefabricados de concreto suelen diseñarse para tener acabado aparente (sin pintura); el uso de concretos de buena calidad, característico de la prefabricación, hace suponer que las estructuras tendrán una buena durabilidad, sin embargo, la realidad es que pueden observarse agrietamientos y delaminaciones en el concreto, típicos de la corrosión, en importantes construcciones con poco más de 10 años de antigüedad (Figura 2).



Figura 1. Agrietamiento en viga de concreto reforzado en edificio universitario.

Entre las acciones contra la corrosión inducida por la carbonatación, las películas barrera o sistemas de protección superficial (pinturas y productos similares) parecen ser una buena alternativa (Rodríguez, 2005). El mecanismo básico de protección de estos sistemas

consiste en la formación de una película flexible y continua que actúa como una barrera física de baja permeabilidad contra gases como dióxido de carbono, vapor de agua y otros agentes agresivos (Trocónis *et al.*, 2003).



Figura 2. Agrietamiento y delaminaciones en paneles prefabricados en edificio privado.

Algunos buenos resultados se han obtenido cuando se han usado películas barrera en el concreto. Los mejores desempeños se han obtenido con pinturas acrílicas, epóxicas y de poliuretano (Andrade, 1989; Keer, 1992). Para ser efectivas, las películas deberían ser aplicadas a estructuras de concreto nuevas, o bien en estructuras reparadas sólo cuando todo el concreto carbonatado ha sido removido.

Debido a la gran variabilidad en las calidades y componentes de estos productos, los resultados mencionados anteriormente requieren de pruebas que validen su eficacia bajo las condiciones de servicio. Las pinturas epóxicas y de poliuretano, a pesar de su eficacia no suelen representar una opción viable debido a que son, aproximadamente, cuatro veces más costosas que las pinturas vinílicas. Por lo tanto, sería deseable tener información acerca del desempeño de pinturas más accesibles, desde el punto de vista económico, como las alquidálicas, las acrílicas y las vinílicas.

En una investigación previa realizada en el mismo ambiente, cuatro tipos de pintura fueron estudiados: alquidálicas, acrílicas, vinílicas y vinil-acrílicas. Probetas recubiertas con pintura alquidálica o acrílica presentaron menos del 20% de la profundidad de carbonatación encontrada en las probetas de control. En contraste, las probetas recubiertas con pintura vinílica o vinil-acrílica presentaron más del 80% de ese valor. Sin embargo, en este estudio no fueron consideradas las calidades de las diferentes pinturas (Serrano y Moreno, 2006).

Una vez que la pintura acrílica ya ha mostrado su eficacia contra la carbonatación del concreto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la calidad de la pintura vinil-acrílica como un medio para disminuir la velocidad de carbonatación en elementos de concreto fabricados con agregado calizo, bajo exposición acelerada.

METODOLOGÍA

Se estudiaron tres calidades de concreto comprendidas en el rango de resistencia a la compresión entre 15 y 25 MPa; para esto, se seleccionaron tres relaciones agua-cemento (a/c): 0.80, 0.70 y 0.62. El material cementante utilizado fue cemento Portland ordinario (CPC30), y los agregados fueron producto de la trituración de piedra caliza; la Tabla 1 presenta las principales propiedades de los agregados grueso y fino. Las mezclas fueron diseñadas acorde a las especificaciones del ACI, (ACI 211.1, 1997) y fueron coladas acorde con los estándares de la ASTM (ASTM C 192, 2004); la Tabla 2 presenta las cantidades de los materiales mezclados.

Tabla 1. Propiedades de los agregados pétreos.

Material	Propiedad	Valor
Agregado Grueso	Tamaño Máximo	19 mm
	Peso Específico	2.37
	Peso Unitario Suelto	1,118 kg/m ³
	Peso Unitario Compacto	1,277 kg/m ³
Agregado Fino	Absorción	6.9 % peso
	Peso Específico	2.34
	Módulo de Finura	2.97
	Absorción	5.6 % peso

Tabla 2. Diseño de mezclas.

Relación a/c	Agua (kg)	Cemento (kg)	Agregado Grueso (kg)	Agregado Fino (kg)
0.80	220	275	819	763
0.70	220	314	819	733
0.62	210	338	819	738

Cada calidad de concreto fue sujeta a 5 tratamientos superficiales, todos ellos producto de la aplicación de diferentes pinturas de látex emulsionado en agua. Se tuvieron, además, probetas de control (sin tratamiento superficial) para cada calidad de concreto, resultando de esta forma un total de 18 tipos de probetas diferentes las que fueron expuestas a la cámara de carbonatación acelerada. Adicionalmente, se tuvieron para cada calidad de concreto probetas de control externo que se mantuvieron siempre fuera de la cámara de carbonatación.

Para hacer las mediciones de la carbonatación se utilizaron 6 cilindros de concreto de 75 mm de diámetro x 75 mm de largo, para cada uno de los casos estudiados. Para pruebas de resistencia a la compresión se utilizaron 3 cilindros de 150 mm por 300 mm por cada a/c (ASTM C 39/C 39M, 2004); y

para pruebas de porosidad se utilizaron 2 cilindros de 100 mm por 200 mm por cada a/c (ASTM C 642, 2004).

El tratamiento de curado para las probetas de concreto fue de 28 días de inmersión en agua. Una vez transcurrido este período, las probetas fueron acondicionadas por 147 días al ambiente del laboratorio, previo al período de pruebas aceleradas. Posteriormente, las probetas fueron pintadas y, seguidamente, colocadas en la cámara de carbonatación acelerada, en un ambiente al 4% de CO₂ y 60% de humedad relativa.

Las características de las pinturas, de acuerdo a la información emitida por los fabricantes, son presentadas en la Tabla 3. El código de identificación usa las dos primeras letras mayúsculas para el tipo de pintura: AC para acrílica y VA para vinil-acrílica; la tercera letra (mayúscula) sirve para identificar la categoría de la pintura, de acuerdo a la terminología de la norma mexicana (NMX-C-423-ONNCCE, 2003), basándose en la información de la hoja técnica del producto; la última letra se refiere al fabricante.

Tabla 3. Características de las pinturas.

Código	Costo (dólares/galón)	Tipo de pintura	Sólidos en peso (%)	Lavabilidad (ciclos)	Durabilidad (años)
AC-Aa	34.00	acrílica	56 ± 2	>5,000	15
VA-Ab	28.05	vinil - acrílica	50 ± 1	>5,000	no definido
VA-Aa	30.15	vinil - acrílica	50 ± 3	> 5,000	10
VA-Ba	20.80	vinil - acrílica	50 ± 2	2,500	3 a 5
VA-Ca	11.60	vinil - acrílica	39 ± 2	no definido	1

La pintura fue aplicada con brocha en dos capas solamente en la superficie cilíndrica de las probetas, siguiendo las recomendaciones de los fabricantes; la pintura no fue reducida o diluida con agua. Para evitar la carbonatación en las bases de las probetas cilíndricas, los extremos fueron sellados con pintura epóxica, aplicada también en dos capas.

El avance de la carbonatación fue determinado utilizando una solución ácido-base (fenoltaleína al 1%), rociada directamente encima de la superficie de concreto siguiendo el criterio de la RILEM (1988). Para cada medición del avance, se extrajeron dos probetas de la cámara de carbonatación (por cada tratamiento de pintura y a/c.), las cuales fueron partidas usando martillo y cincel. Después de aplicar el indicador ácido-base, se hicieron ocho mediciones del avance de la carbonatación usando un vernier digital. Cada medición fue corregida y convertida, de mediciones radiales en un cilindro, en mediciones de

profundidad de carbonatación en un plano semi-infinito (Moreno, 1999). Una vez corregidas las medidas, se obtuvo el promedio de cada probeta, y el resultado fue a su vez promediado con el resultado de la otra probeta.

Previo a la colocación de las probetas en la cámara de carbonatación, una primera determinación de la profundidad de carbonatación fue realizada en las probetas de control externo. Esta medición fue hecha después de la terminación del periodo de acondicionamiento, con el fin de determinar el avance del frente de la carbonatación durante este periodo. Esta primera determinación fue utilizada para corregir el coeficiente de carbonatación durante el período de carbonatación acelerada.

RESULTADOS

En la Tabla 4 se presentan los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión, porosidad, y

revenimiento de los diferentes concretos. Los resultados de la resistencia a la compresión estuvieron por arriba de los valores nominales, particularmente para la mezcla de a/c de 0.70. Los valores de la porosidad fueron altos, aunque en el rango esperado

para el tipo de agregado de alta absorción utilizado (Solís y Moreno, 2006). El revenimiento estuvo en el rango esperado de $10 \text{ cm} \pm 2.5$; la mezcla de a/c de 0.70 tuvo el menor revenimiento, mientras que la mezcla de a/c de 0.62 tuvo el mayor.

Tabla 4. Propiedades del Concreto.

Relación a/c	Resistencia de diseño MPa	Resistencia a la compresión MPa	Porosidad %	Revenimiento cm
0.80	15	18.5	26.3	11
0.70	20	24.8	25.5	10
0.62	25	26.2	25.2	12

Las Tablas 5 a 7 presentan los resultados de la profundidad de carbonatación, a diferentes tiempos de exposición, después de la prueba acelerada. Para cada tipo de pintura, se da el promedio de la profundidad de la carbonatación (\bar{x}) así como la desviación estándar (σ). Al final del experimento, las probetas con la pintura vinil-acrílica de menor calidad (VA-Ca) tuvieron del 91 al 100% de la profundidad de carbonatación medida en las probetas de control interno (sin pintura, expuestas en la cámara). Las probetas con la pintura vinil-acrílica de calidad media

(VA-Ba) tuvieron del 50 al 81% de la profundidad de carbonatación medida en las probetas de control interno. Las probetas con la pintura vinil-acrílica de buena calidad de ambos proveedores (VA-Aa y VA-Ab) tuvieron de 2 a 24% y de 5 a 31%, respectivamente, de la profundidad de carbonatación medida en las probetas de control interno. Las probetas con pintura acrílica (AC-Aa) tuvieron del 12 al 41% de la carbonatación medida en las probetas de control interno.

Tabla 5. Profundidad de carbonatación (promedio y desviación estándar) de probetas con a/c de 0.80 (mm).

Tiempo	0 días		7 días		14 días		23 días	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
AC-Aa			3.5	3.4	7.2	5.0	8.2	3.2
VA-Ab			4.3	2.2	6.7	4.6	6.1	3.3
VA-Aa			6.1	3.6	4.9	3.2	4.0	4.0
VA-Ba			6.5	3.5	12.4	4.0	15.2	2.9
VA-Ca			11.4	2.5	14.2	2.3	19.4	1.9
Control	3.2		11.4	2.1	16.2	1.8	20.0	2.7

Tabla 6. Profundidad de carbonatación (promedio y desviación estándar) de probetas con a/c de 0.70 (mm).

Tiempo	0 días		14 días		35 días		56 días	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
AC-Aa			1.3	2.2	2.2	3.5	2.7	3.0
VA-Ab			1.0	1.8	0.5	1.0	1.1	2.2
VA-Aa			0.7	1.6	2.8	2.8	0.4	1.2
VA-Ba			5.1	4.0	11.2	3.3	10.9	3.7
VA-Ca			8.3	2.7	16.8	3.4	19.8	1.9
Control	1.3		12.1	2.5	18.4	3.4	21.8	2.5

Tabla 7. Profundidad de carbonatación (promedio y desviación estándar) de probetas con a/c de 0.62 (mm).

Tiempo	0 días		14 días		35 días		64 días	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
AC-Aa			2.1	2.5	7.8	5.2	2.9	3.1
VA-Ab			1.2	2.2	1.6	3.0	1.8	2.9
VA-Aa			3.5	3.8	3.9	3.5	4.8	3.0
VA-Ba			6.7	3.8	12.3	2.9	16.6	2.9
VA-Ca			10.3	3.4	17.0	3.1	20.3	2.3
Control	1.0		10.7	2.4	15.4	2.1	20.4	1.9

Las Figuras 2 y 3 ilustran como ejemplo los resultados de la prueba de profundidad de carbonatación para cada tipo de pintura, para los especímenes de la mezcla con a/c de 0.80 después de 23 días de exposición acelerada. En las probetas de control (Figura 2a), con pintura VA-Ca (Figura 2b), y con pintura VA-Ba (Figura 2c), la carbonatación

promedio de las dos probetas fue de 20.0 mm, 19.4 mm y 15.2 mm, respectivamente. Mientras que, en las probetas con pintura VA-Aa (Figura 3a), con pintura VA-Ab (Figura 3b), y con pintura AC-Aa (Figura 3c), la carbonatación promedio de las dos probetas fue de 4.0 mm, 6.1 mm y 8.2 mm, respectivamente (Tabla 5).



Figura 2. a) Probeta de control, b) con recubrimiento de vinil-acrílico calidad C (VA-Ca), y c) con recubrimiento de vinil-acrílico calidad B (VA-Ba), para a/c de 0.80 después de 23 días de exposición acelerada.



Figura 3. a) Probeta con recubrimiento de vinil-acrílico calidad A (VA-Aa), b) con recubrimiento de vinil-acrílico calidad A (VA-Ab), y c) con recubrimiento acrílico calidad A (AC-Aa), para a/c de 0.80 después de 23 días de exposición acelerada.

DISCUSIÓN

Con los datos en las Tablas 5 a 7 fueron estimados los coeficientes de carbonatación, al 4% de CO₂. Los datos son presentados en las Tablas 8 a 10. Normalmente, la carbonatación es modelada como:

$$x = k\sqrt{t} \quad (1)$$

donde t es el tiempo de exposición, x es la profundidad de carbonatación al tiempo t , y k es el coeficiente de carbonatación.

Sin embargo, cuando existe una carbonatación inicial previa a la carbonatación acelerada, entonces el coeficiente de carbonatación al 4% de CO₂ puede ser obtenido de (Moreno, 1999):

$$k_{4\%} = \sqrt{(x^2 - x_0^2)/t} \quad (2)$$

donde t es el tiempo de exposición, x es la profundidad de carbonatación al tiempo t , y x_0 es la profundidad de carbonatación inicial medida después del período de acondicionamiento.

El promedio del coeficiente de carbonatación puede ser obtenido de:

$$k_{avg} = \sum k_i \cdot (x_i - x_0) / (\sum x_i - i \cdot x_0) \quad (3)$$

El coeficiente de carbonatación ha sido modelado usando el coeficiente de difusión del CO₂ en concreto (D), la concentración de CO₂ en el ambiente utilizado

(c), y la concentración de los compuestos hidratados de calcio (M) (Moreno, 1999):

$$k = \sqrt{2 D c / M} \quad (4)$$

En el caso de experimentos con dos concentraciones de CO₂ (c₁, c₂) usando diferentes probetas de la misma mezcla de concreto, el tiempo para alcanzar una profundidad de carbonatación x_c en ambas probetas sería, para la concentración c₁:

$$t_1 = x_c^2 \cdot M / 2 D c_1 \quad (5)$$

y para c₂:

$$t_2 = x_c^2 \cdot M / 2 D c_2 \quad (6)$$

entonces, resolviendo para x_c²:

$$x_c^2 = \frac{t_1 2 D c_1}{M} = \frac{t_2 2 D c_2}{M} \quad (7)$$

resolviendo para t₁:

$$t_1 = t_2 \frac{c_2}{c_1} \quad (8)$$

de (4) y (7):

$$x_c^2 = t_1 k_1^2 = t_2 k_2^2 \quad (9)$$

substituyendo (8) en (9):

$$t_2 \frac{c_2}{c_1} k_1^2 = t_2 k_2^2 \quad (10)$$

resolviendo para k₁:

$$k_1 = k_2 \sqrt{c_1 / c_2} \quad (11)$$

y entonces, el promedio de los coeficientes de carbonatación obtenidos en (3) fueron convertidos a coeficientes de carbonatación atmosféricos (k_{atm}) usando (11):

$$k_{atm} = k_{avg} \sqrt{c_{atm} / c_{4\%}} \quad (12)$$

donde c_{atm} y c_{4%} son las concentraciones de CO₂ atmosféricas y en la cámara, respectivamente.

Tabla 8. Coeficientes de carbonatación al 4% CO₂, probetas de a/c de 0.80 (mm/año^{1/2}).

Tiempo	7 días	14 días	23 días
AC-Aa	10	33	30
VA-Ab	21	30	21
VA-Aa	38	19	10
VA-Ba	41	61	59
VA-Ca	79	71	76
Control	79	81	79

Tabla 9. Coeficientes de carbonatación al 4% CO₂, probetas de a/c de 0.70 (mm/año^{1/2}).

Tiempo	14 días	35 días	56 días
AC-Aa	0	6	6
VA-Ab	0	0	0
VA-Aa	0	8	0
VA-Ba	25	36	28
VA-Ca	42	54	51
Control	61	59	56

Tabla 10. Coeficientes de carbonatación al 4% CO₂, probetas de a/c de 0.62 (mm/año^{1/2}).

Tiempo	14 días	35 días	64 días
AC-Aa	9	25	7
VA-Ab	3	4	4
VA-Aa	17	12	11
VA-Ba	34	40	40
VA-Ca	52	55	48
Control	54	50	49

En promedio, al final del experimento y con respecto a las probetas de control, la pintura acrílica (AC-Aa) redujo el coeficiente de carbonatación en 79%, las pinturas vinil-acrílicas de buena calidad (VA-Aa y VA-Ab) redujeron, en ambos casos, el coeficiente de carbonatación en 88%. Las pinturas vinil-acrílicas de menor calidad (VA-Ba y VA-Ca) redujeron el coeficiente de carbonatación en sólo 31% y 5%, respectivamente.

Los coeficientes de carbonatación atmosférica (al 0.047% de CO₂) para cada a/c son presentados en la Tabla 11. De acuerdo al Manual de la red DURAR (Troconis et al., 2000), los coeficientes de carbonatación arriba de 6 mm/año^{1/2} son representativos de concreto de baja calidad, y los coeficientes de carbonatación debajo de 3 mm/año^{1/2} son representativos de concreto de buena calidad.

Para las a/c de 0.80 y 0.70, los coeficientes de carbonatación estuvieron arriba de 6 mm/año^{1/2} para las probetas de control, como se esperaba para este tipo de concretos. Sin embargo, el uso de pinturas vinil-acrílicas de buena calidad (VA-Aa y VA-Ab) redujeron los coeficientes de carbonatación a valores

≤ 3 mm/año^{1/2}, hecho que haría durable a los elementos de concreto reforzado, aun para altas relaciones a/c. Lo mismo sucedería cuando se usara pintura acrílica (AC-Aa) (excepto para a/c de 0.80).

Tabla 11. Coeficientes de carbonatación convertidos a 0.047% CO₂ (mm/año^{1/2}).

a/c	0.80	0.70	0.62
AC-Aa	3.3	0.7	2.1
VA-Ab	2.7	0.0	0.4
VA-Aa	3.0	0.0	1.4
VA-Ba	6.2	3.4	4.2
VA-Ca	8.1	5.5	5.6
Control	8.6	6.3	5.5

Se debe notar que los resultados obtenidos en las probetas de la mezcla de a/c de 0.70 fueron mejores que los de las probetas de la mezcla de a/c de 0.62, con la excepción de las probetas de control. Como el revenimiento de la mezcla de a/c de 0.70 fue 20% menor que la de la a/c de 0.62, la mezcla de a/c de 0.70 podría ser más densa que lo esperado. Esto fue confirmado por los resultados de la resistencia a la compresión que estuvieron muy cercanos para ambas mezclas. Resultados de otras investigaciones realizadas con el mismo tipo de agregado utilizado en este trabajo han mostrado que solamente existen diferencias significativas en la porosidad del concreto cuando las a/c entre dos mezclas difieren en más de 0.1 (Solís y Moreno, 2006). Por lo tanto, solo se esperarían diferencias significativas entre los resultados de las probetas de las mezclas de 0.80 y 0.62 en la Tabla 11.

Analizando los coeficientes de carbonatación atmosférica de las mezclas de 0.80 y 0.62, se puede observar que, para cada tipo de pintura, k_{am} disminuye conforme la a/c disminuye. Lo anterior indicaría que el desempeño de la pintura como barrera contra la carbonatación no dependería únicamente de la calidad de la pintura, sino también de la calidad del concreto utilizado. Este efecto fue observado del mismo modo en la investigación previa mencionada en la introducción (Serrano y Moreno, 2006).

De acuerdo con la norma Europea EN 1504-2 (2004), un sistema de protección superficial debería proveer una resistencia a la penetración de CO₂ en términos de un espesor de aire equivalente SD. Actualmente, se requiere un mínimo valor de SD de 50 m para calificar como recubrimiento anti-carbonatación. Este valor es equivalente a 5 veces la resistencia a la carbonatación de 25 mm de recubrimiento de un

concreto de calidad media. En otras palabras, para que un recubrimiento califique como anti-carbonatación, la profundidad de carbonatación debería ser 5 veces menor cuando se aplique un recubrimiento, respecto al concreto sin pintar. En este caso, solo los recubrimientos con calidad de 5 años de durabilidad (Tabla 3) alcanzaron esta condición, y solo cuando se usaron a/c menores a 0.80.

Esta información podría ser valiosa para controlar el inicio de la corrosión en elementos carbonatados de concreto cuando el recubrimiento de concreto es mayor que el espesor de la capa carbonatada; o bien, después de una rehabilitación del elemento, cuando no sea deseable aumentar el recubrimiento de concreto por razones estéticas, pero el uso de recubrimientos anti-carbonatación evitaría una carbonatación a futuro. Sin embargo, en el caso de presencia de capas carbonatadas, se requieren pruebas adicionales para confirmar que el uso del recubrimiento no acelerará la velocidad de corrosión en los lugares activos (por presencia de grietas) por confinamiento de la humedad presente en los poros del concreto.

CONCLUSIONES

- La pintura acrílica redujo satisfactoriamente la profundidad de carbonatación en 80% o más, comparado con las probetas de control para a/c < 0.80.
- Las pinturas vinil-acrílicas cuya calidad garantiza cinco años de durabilidad mínima (tipo A), redujeron satisfactoriamente la profundidad de carbonatación en 80% o más, comparado con las probetas de control siempre y cuando a/c < 0.80.
- El desempeño de los recubrimientos superficiales como barrera contra la carbonatación depende no solamente de la calidad de la pintura pero también de la calidad de la mezcla de concreto empleada.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó con apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (J34433-U), y de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY). La asesoría y las valiosas discusiones del Prof. Distinguido Dr. A. A. Sagüés de USF son gratamente apreciadas. Así mismo, los autores agradecen a A. Nadal, L. Castro y F. Duarte por ejecutar algunas de las pruebas reportadas. Las opiniones y comentarios expresados son de los autores y no necesariamente de las organizaciones participantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 211.1-91(1997). Standard practice for selecting proportions for normal heavyweight, and mass concrete, ACI International, Farmington Hills, MI.
- Andrade, C. (1989). "Manual-Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras." Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España.
- ASTM C 39/C 39M-03 (2004). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C 192-98 (2004). Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C 642-97 (2004). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- EN 1504-2 (2004). Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Surface protection systems for concrete.
- Keer, J. G. (1992). "Surface treatments," Durability of Concrete Structures-Investigation, repair, protection, Mays G., ed., E&F Spon, London, UK, pp. 143-157
- Moreno, E. I. (1999). "Carbonation of blended cement concretes," Disertación doctoral, University of South Florida.
- Moreno, E. I., Solís-Carcaño, R. G., López-Salazar, L. R. (2006). "Carbonation-induced corrosion in urban concrete structures," Materials Performance, Vol. 45, pp 56-60.
- NMX-C-423-ONNCCE, (2003). Industria de la construcción –Pinturas Latex– especificaciones y métodos de pruebas.
- Rodrigues, M. P. (2005). "Reinforced concrete corrosion: Prevention by surface protection systems," Memorias del 47° Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2005, Brasil, pp VII.187- VII.201.
- RILEM Recommendations CPC-18, (1988). "Measurement of hardened concrete carbonation depth," Materials and Structures, Vol. 21, pp. 453-455.
- Serrano Ixtepan, D., Moreno, E. I. (2006). "Películas barrera: Una opción contra la carbonatación del concreto reforzado", Ingeniería—Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 10, No. 2, pp 37-45.
- Solís Carcaño, R., Moreno, E. I. (2006). "Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo", Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, Vol. 21, No. 3, pp. 101-112.
- Trocónis-Rincón, O., Romero-Carruyo, A., Andrade, C., Helene, P., Díaz, I. (2000). "Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado" Red DURAR, CYTED, Maracaibo, Venezuela.
- Trocónis de Rincón, O., Helene, P., Vargas, A., Espinosa, A., Contreras, D., Prado, D., Hernández, I., Bravo, J., Sánchez, M., Fernández, R., Urdaneta, R., Delgado, S. (2003). "Materiales y sistemas de rehabilitación. Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón," P. Helene y F. Pereira, eds., Sao Paulo, Brasil, pp. 215-250.

Este documento se debe citar como:

Moreno, E. I., Solís-Carcaño, R. G. y Arias-Palma, C. A. (2008). **Desempeño de las pinturas vinil-acrílicas contra la carbonatación del concreto.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 12-1, pp. 31-39, ISSN: 1665-529X