



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



**REHABILITACIÓN DE ELEMENTOS DE CONCRETO REFORZADO BAJO
CORROSIÓN INDUCIDA POR LA CARBONATACIÓN**

E. I. Moreno, R. G. Solís-Carcaño, M. Torres-López

Universidad Autónoma de Yucatán
Facultad de Ingeniería
Av. Industrias No Contaminantes s/n por Anillo Periférico Norte
Mérida, Yucatán, México

RESUMEN

La carbonatación del concreto ocurre en todos los ámbitos del país, afectando la vida útil de las estructuras de concreto reforzado. Aunque existen procedimientos de reparación definidos, no son conocidos ampliamente, aplicándose por lo general el procedimiento tradicional.

Esta investigación evaluó tres procedimientos de reparación de elementos de concreto reforzado dañados por la corrosión inducida por la carbonatación. El procedimiento A consistió en eliminar el concreto contaminado rebasando la barra de acero. Los procedimientos B y C consistieron en eliminar el concreto al nivel de la barra de acero (técnica tradicional), adicionando una solución de NaOH al procedimiento B.

Los resultados indican que el procedimiento A brinda mayor protección, pasivando la barra de acero y restaurando el pH del concreto en menor tiempo. Por otro lado, una vez iniciado el proceso de carbonatación, después de la reparación, la despasivación de la barra de acero tarda más tiempo con el procedimiento B.

Palabras clave: agregado calizo, carbonatación, concreto, corrosión, reparación.

ABSTRACT

Concrete carbonation occurs in all the corners around the country, affecting the structure's service life. Even though there are well defined repair procedures, they are not widely known, thus employing a custom procedure.

This investigation studied three repair procedures for reinforced concrete elements damaged by carbonation-induced corrosion. Procedure A consisted in removing contaminated concrete beyond the rebar level. Procedures B and C consisted in removing concrete at the rebar level (custom procedure), adding a NaOH solution to procedure B.

Results show that procedure A provides better protection, passivating the rebar and restoring the concrete pH in less time. Also, once carbonation process is initiated after repair, rebar depassivation takes longer for procedure B.

Keywords: carbonation, concrete, corrosion, limestone aggregate, repair.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008 Chihuahua; Chih. México Del 12 al 14 de Noviembre



INTRODUCCIÓN

El concreto confiere una buena protección al acero de refuerzo tanto química como físicamente. Proporciona un ambiente alcalino que rodea al acero de refuerzo propiciando la formación de una capa de óxido, llamada pasivante, que lo protege contra la corrosión. El recubrimiento de concreto también protege la barra del exterior y de los agentes iniciadores de la corrosión. El grado de protección que el concreto le pueda dar a la barra depende principalmente de la calidad de éste, espesor de recubrimiento y de seguir buenas prácticas constructivas.¹

Una de las causas de que el concreto no proporcione la protección adecuada al acero contra la corrosión es debido a la carbonatación. La carbonatación del concreto es la segunda causa de corrosión en estructuras de concreto reforzado. La corrosión por la carbonatación tiende a desarrollarse más tarde, el proceso es más lento que la corrosión por cloruros, y conduce a una corrosión uniforme del acero que acelera la formación de grietas y reduce la vida útil de servicio de la estructura.²

La carbonatación es la reacción de los productos hidratados del cemento con el dióxido de carbono (CO₂) existente en la atmósfera. Debido a esta reacción, el pH de la solución del poro del concreto disminuye de >12.5 unidades a un valor entre 8 y 9 unidades. Ya que el pH del concreto ha disminuido, la barra de refuerzo pierde sus propiedades pasivas, dando paso al proceso de corrosión del acero de refuerzo.

Una vez que la corrosión afecta a una estructura de concreto reforzado, se deben emprender acciones para repararla y alargar su vida útil. Existen en la práctica diversos procedimientos de reparación y protección para las estructuras de concreto reforzado, tales como recubrimientos galvanizados y epóxicos sobre el acero de refuerzo, técnicas electroquímicas de reparación (re alcalinización, remoción de cloruros y protección catódica), inhibidores de corrosión, morteros de reparación, revestimientos, etc.³

Al llevar a cabo estos procedimientos, se ha observado que muchas veces la intervención no es la más acertada, los materiales o los procedimientos adoptados para la reparación no siempre confieren a la estructura las características de durabilidad, compatibles con la importancia de la obra y con los elevados costos de reparación y reconstrucción de las mismas. También ha sido frecuente un resultado negativo, o sea, una vida útil corta después de esa reparación, la mayoría de las veces mucho más corta que el período transcurrido entre el término de la obra y la necesidad de intervención.

En la práctica, estas intervenciones varían mucho de acuerdo a lo que dicen los procedimientos y técnicas desarrolladas, ya que se lleva a cabo un mal diseño durante la preparación del sustrato a intervenir. Tradicionalmente, al reparar una estructura de concreto reforzado carbonatado, sólo se elimina el concreto contaminado hasta alcanzar la barra de acero; sin embargo, los procedimientos propuestos por investigaciones realizadas, establecen que se debe eliminar todo el concreto carbonatado, incluso aunque se tenga que sobrepasar el confinamiento brindado por el acero.⁴

La presente investigación pretende evaluar tres diferentes procedimientos de reparación, en la rehabilitación de elementos de concreto reforzado dañados por la corrosión inducida por la carbonatación, empleando probetas de concreto reforzado expuestas a ambientes acelerados de carbonatación y corrosión.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se fabricaron 9 probetas prismáticas de 15 x 15 x 27.5 cm de concreto reforzadas con 3 varillas de acero corrugado de $\frac{3}{8}$ " de diámetro para las pruebas de carbonatación, corrosión (potencial de corrosión, velocidad de corrosión y resistencia eléctrica del concreto) y aplicación de los procedimientos de reparación (Figura 1). Así mismo, se fabricaron 3 probetas cilíndricas de 15x30 cm de concreto simple para las pruebas de resistencia a la compresión y 2 probetas cilíndricas de 10x20 cm de concreto simple para las pruebas de densidad, absorción y volumen de vacíos.

Se utilizó una relación agua / cemento de 0.70 para facilitar el proceso de carbonatación. La mezcla fue diseñada acorde al ACI, utilizando 307 kg de cemento por metro cúbico; el agregado pétreo fue piedra caliza de alta absorción.

Los especímenes fueron curados 28 días en un ambiente de alta humedad, y posteriormente fueron acondicionados al ambiente de laboratorio por 53 días antes de iniciar el proceso de carbonatación acelerada. Previo al proceso de carbonatación, se procedió a recubrir el fondo, así como la mitad de la altura de las paredes laterales de los especímenes de concreto reforzado con una pintura anticarbonatación con el fin de evitar la corrosión de la barra Z.

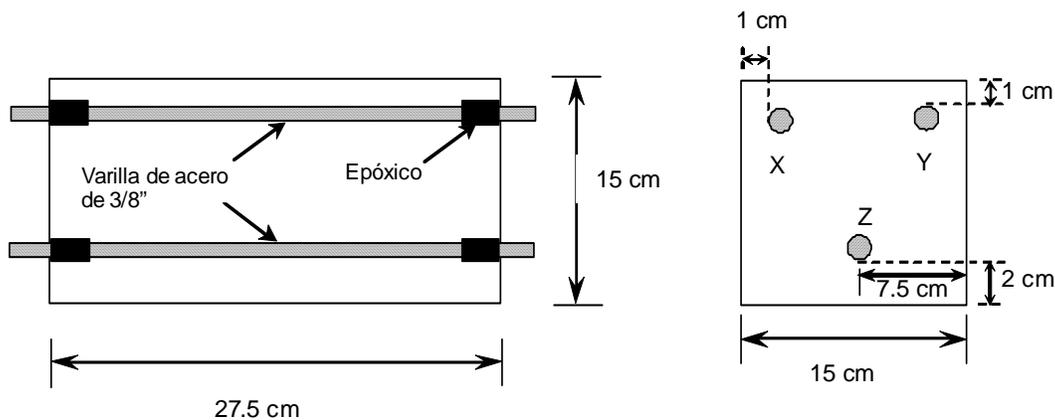


Figura 1. Detalle de los especímenes de concreto reforzado.

Los especímenes fueron carbonatados en una cámara de aceleración utilizando 8% de CO_2 y 60% de humedad relativa. Una vez que la profundidad de carbonatación había rebasado la profundidad de la barra se suspendió el proceso de carbonatación, retirándose los especímenes de la cámara.

Las probetas fueron forradas con papel húmedo y colocadas en bolsas de polietileno para mantener la humedad alrededor del 95% y acelerar el proceso de corrosión. Durante esta etapa se realizaron mediciones periódicas de potencial de corrosión, velocidad de corrosión y resistencia eléctrica del concreto.

Tomando como criterio para el proceso de reparación que las probetas de acero alcanzaran una densidad de corriente de corrosión de $> 1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y un potencial de $< -650 \text{ mV}$. Los procedimientos de reparación consistieron en: A. Reparación con el sistema técnico recomendado en los manuales de reparación;⁴ B. Reparación tradicional empleando una solución alcalina de NaOH con una concentración de 5 g/100 ml añadida al agua de la mezcla de concreto; C. Reparación con el sistema tradicional.

En la Figura 2 se pueden observar los sistemas empleados en la reparación. Una vez reparadas, las probetas fueron curadas por 7 días y colocadas nuevamente en la cámara de carbonatación por 37 días. Posteriormente se retiraron nuevamente las probetas, utilizando el mismo procedimiento descrito para acelerar el proceso de corrosión.

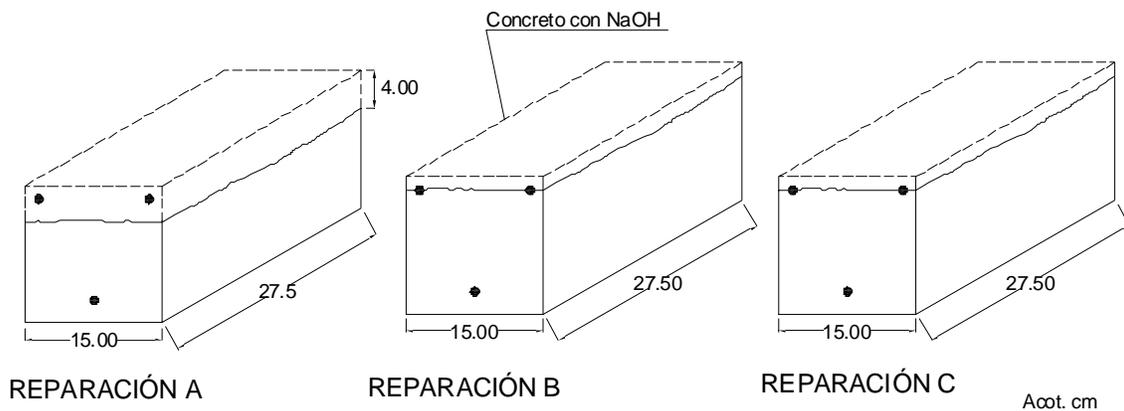


Figura 2. Esquema de los sistemas de reparación empleados.

RESULTADOS

Las figuras 3, 4 y 5 presentan los resultados de las pruebas de medición de potenciales, densidades de corriente de corrosión y resistencia eléctrica del concreto, respectivamente. En el caso de los potenciales y las densidades de corriente, cada punto es un promedio de seis barras de acero; mientras que en el caso de la resistencia eléctrica, cada punto es un promedio de tres especímenes. El día cero corresponde al inicio del período acelerado de carbonatación. Es de notar que, hasta antes de la reparación (día 60), todas las probetas son iguales.

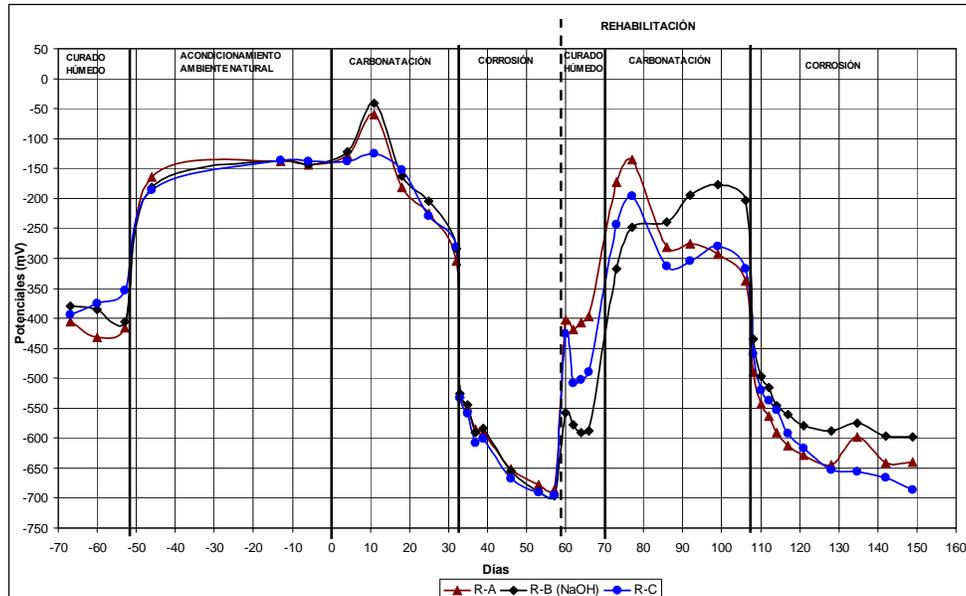


Figura 3. Promedio de potenciales, medidos con electrodo de cobre/sulfato de cobre.

El efecto del avance de la carbonatación puede observarse por el cambio de pendiente alrededor del día 11, tanto en la figura 3 (más negativa en el caso de los potenciales) como en la figura 4 (más positiva en el caso de las densidades de corriente). Por otra parte, como ya se ha reportado en la literatura, bajo un ambiente del 60% de humedad relativa se puede acelerar la carbonatación,² sin embargo la velocidad de corrosión no aumentará significativamente hasta que la humedad se incremente a valores cercanos al 90% de humedad relativa, como se observa en el período entre los días 32 y 58. El efecto de los procedimientos de reparación es más apreciable en el desarrollo de los potenciales que en el de las densidades de corrosión. Una vez reparada la probeta, sólo el procedimiento A permite una pasivación en el mismo rango de potenciales del curado inicial, como se aprecia en la figura 3 para el período entre los días 58 y 70.

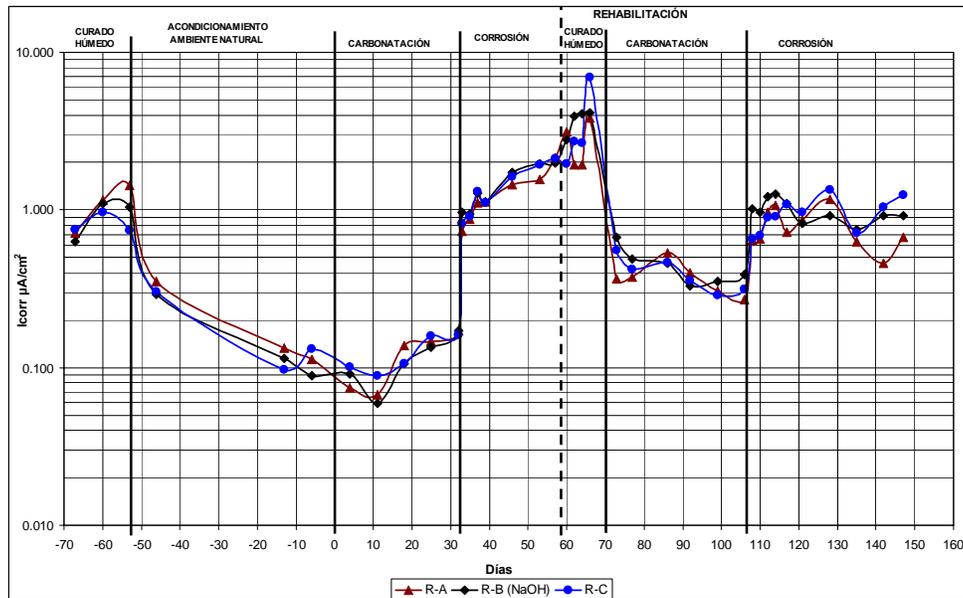


Figura 4. Promedio de densidades de corriente de corrosión.

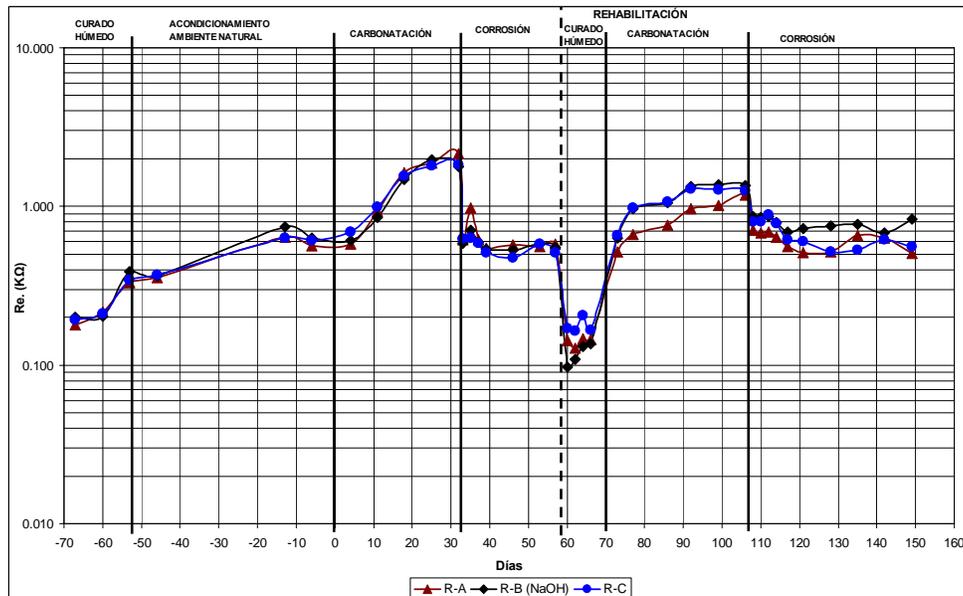


Figura 5. Promedio de la resistencia eléctrica del concreto.

Por su parte, el procedimiento B presenta los potenciales más negativos durante el período de reparación y curado húmedo (Figura 3), 200 mV más negativos que los potenciales mostrados durante el curado húmedo inicial. Posteriormente, el potencial medido tiene un cambio de pendiente menos pronunciado que en el caso de los procedimientos A y C, presentando también el potencial más positivo durante el período de corrosión posterior a la reparación.

El procedimiento C, por su parte, presenta un comportamiento intermedio durante el curado húmedo posterior a la reparación, con respecto a los potenciales de media celda, 100 mV



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



más negativos que los potenciales observados durante el curado húmedo inicial. Una vez carbonatado nuevamente, el procedimiento C presenta los potenciales más negativos tanto al final del período de carbonatación como en el período de corrosión, así como las densidades de corriente de corrosión más altas.

En la Figura 5 se observa que las resistencias promedio de las probetas aumentan en las dos etapas de carbonatación, lo que implica una disminución del riesgo de corrosión. Sin embargo, en la segunda etapa de carbonatación las probetas muestran una resistencia promedio menor a la presentada en la primera etapa, siendo las probetas del procedimiento A las que presentan valores más bajos. Durante las dos etapas de corrosión, las resistencias se mantuvieron similares; sin embargo, las probetas del procedimiento B tuvieron resistencias ligeramente más altas.

DISCUSIÓN

Después de efectuar la rehabilitación, el procedimiento A logró brindar mayor protección al acero, ya que los potenciales promedio medidos durante el curado húmedo son similares a los valores medidos al inicio del experimento (día -67). Por su parte, los procedimientos B y C no lograron darle la protección a la barra de acero durante esta etapa, al mostrar valores más negativos que los iniciales (día -67).

Por otro lado, durante la segunda etapa de carbonatación, las barras de los procedimientos A y C se despasivaron antes que las barras del procedimiento B. Esto puede observarse por el cambio de pendiente que presenta cada curva en esta etapa, lo cual significa que el procedimiento de reparación B logró oponerse al cambio de pH en la solución de poro del concreto por más tiempo que en los procedimientos A y C. Este resultado implica que el procedimiento B podría mantener la capa pasiva que protege al acero de refuerzo por un período mayor, en comparación con los procedimientos A y C. En un estudio reciente sobre realcalinización de concreto carbonatado usando soluciones alcalinas por absorción y difusión,⁵ se emplearon tres soluciones: Na_2CO_3 , KOH y una combinación de $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{KOH} + \text{NaOH}$. Los resultados obtenidos muestran que la realcalinización a través del contacto directo de las soluciones alcalinas sobre la superficie del concreto es efectiva en reestablecer el pH del concreto, abriendo la posibilidad de utilizar la solución de NaOH con el procedimiento A para mantener por más tiempo la pasividad de la barra.

Durante la segunda etapa de corrosión los tres procedimientos muestran valores que indican una alta probabilidad de corrosión. Sin embargo, estos valores reflejan potenciales menos negativos que en la etapa de corrosión antes de las reparaciones.

La Figura 6 muestra la correlación existente entre el comportamiento de los potenciales de corrosión y las densidades de corriente de corrosión. Es notorio como se obtienen valores asociados con corrosión activa durante el período de curado (días -70 a -50), mientras se forma la capa pasiva en la superficie del acero. Otro aspecto importante es el cambio de potencial (más positivo) asociado con el cambio de pH debido a la carbonatación del concreto alrededor de la barra (día 4), así como el cambio de pendiente posterior asociado con la activación de la superficie de la barra (día 11). Finalmente se obtienen potenciales muy negativos que se

correlacionan bien con los valores de la densidad de corriente de corrosión después de la carbonatación (del día 3 al día 58).

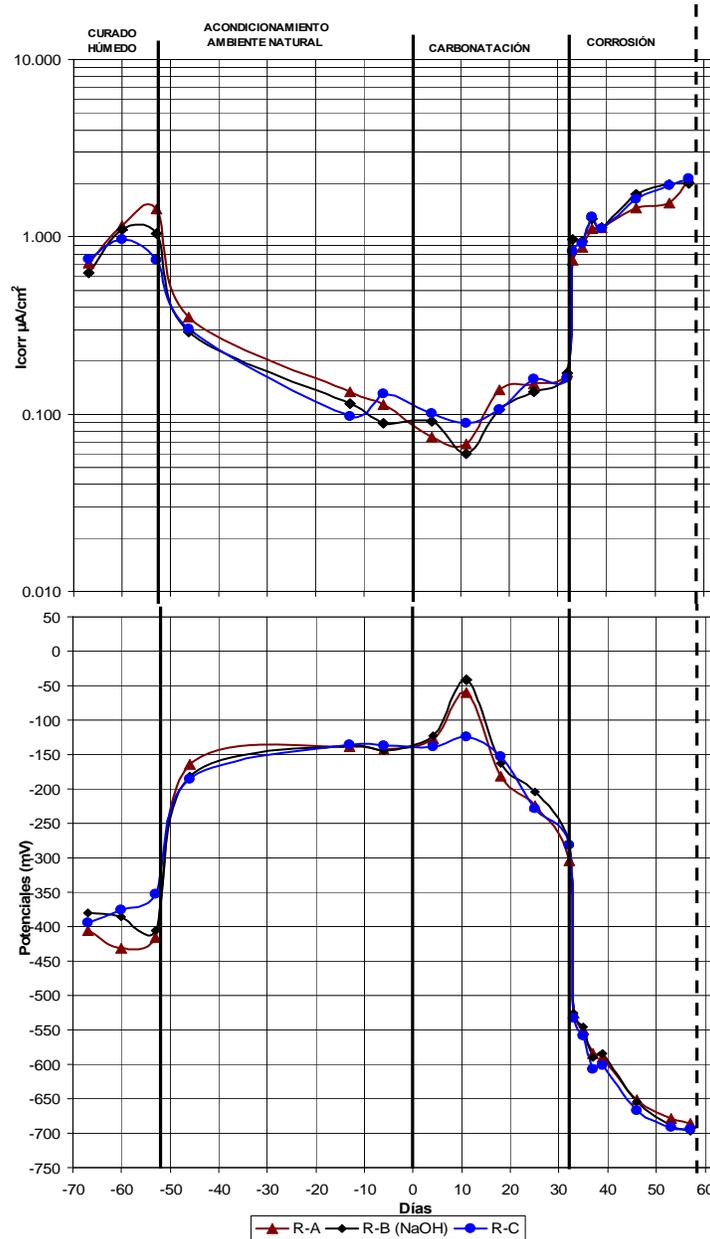


Figura 6. Correlación entre los valores de densidad de corriente de corrosión y sus respectivos valores de potencial de media celda



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



CONCLUSIONES

- El sistema de reparación A (procedimiento establecido en los manuales), basado en el comportamiento respecto a los potenciales de corrosión durante el curado húmedo posterior a la rehabilitación, logró restablecer las condiciones originales en la superficie de las barras, ya que los potenciales medidos en esta etapa fueron similares a los medidos al inicio del experimento.
- Los sistemas de reparación C y B (procedimiento tradicional y adición de NaOH, respectivamente), no lograron restablecer las condiciones originales en la superficie de las barras durante el curado húmedo posterior a la rehabilitación, ya que los potenciales de corrosión medidos en esta etapa fueron más negativos que los medidos inicialmente.
- Los potenciales de corrosión observados durante el proceso de carbonatación posterior a la rehabilitación indican que el sistema de reparación B (NaOH) logró despasivarse en un tiempo mayor que los sistemas A y C. Estructuras reparadas con este sistema podrían tener una vida útil más prolongada, siempre y cuando el elemento de concreto reforzado no esté expuesto a condiciones de humedad relativa alta (> 90 %).

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó con el apoyo parcial del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), y de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY). Los autores agradecen a A. Nadal, L. Castro y F. Duarte la ejecución de algunas de las pruebas reportadas. Las opiniones y comentarios expresados son de los autores y no necesariamente de las organizaciones participantes.

REFERENCIAS

1. E.I. Moreno, “La corrosión del acero de refuerzo inducida por la carbonatación del concreto”, Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán **4**, 2 (2000): pp. 43-48.
2. E.I. Moreno, G. G. Domínguez, E. Cob, F. Duarte, “Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración”, Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán **8**, 2 (2004): pp.117-130.
3. O. Troconis, A. Romero, C. Andrade, P. Helene, I. Díaz, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Red temática XV.B, Durabilidad de la armadura. (Maracaibo, Venezuela: CYTED, 1997): pp. 47-54.
4. H. Muñoz, P. Helene, F. Pereira, L. Hashook. “Procedimientos de preparación y limpieza del sustrato”. En Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón. Reparación, Refuerzo y Protección. Helene P., Pereira F. (editores), Programa Iberoamericano de Ciencia y



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



Tecnología para el Desarrollo, Red temática XV.F. Rehabilitar. (Sao Paulo, Brasil: CYTED, 2003): pp. 253-286.

5. F. Araújo, E. Pazini-Figueiredo, “Realkalization of the carbonated concrete using alkaline solutions”. En Quality of concrete structures and recent advances in concrete materials and testing. Helene P., Pazini E., Holland T., Bittencourt R. (editors). (Farmington Hills, Michigan: ACI, 2005): pp. 19-31.