

Barras de acero galvanizado: Una opción contra la corrosión inducida por la carbonatación

Eric I. Moreno*, Daniel Serrano Ixtepan†, y Enrique Cob Sarabia‡
Recibido el 28 de abril de 2005-Aceptado el 27 de julio de 2005

RESUMEN

La carbonatación del concreto es la segunda causa de corrosión en estructuras de concreto reforzado, y en ambientes tropicales no marinos, puede ser el principal mecanismo. Una vez que el concreto está carbonatado, las barras de acero empiezan a corroerse activamente. El objetivo de esta investigación fue estudiar el desempeño del acero de refuerzo galvanizado como un material de refuerzo alternativo bajo los ambientes mencionados. Dos tipos de especímenes fueron usados, de concreto simple para medir la carbonatación, y de concreto reforzado para evaluar la corrosión. Tres relaciones agua – cemento y dos tipos de barras de acero, normales y galvanizadas, fueron empleados. Los especímenes fueron carbonatados en una cámara de carbonatación acelerada al 4% de CO₂ y 60% de humedad relativa. Después de la carbonatación, la humedad relativa fue incrementada por arriba del 90% con el fin de incrementar la corrosión. El desempeño de la corrosión fue evaluado usando la técnica de la polarización lineal. Los resultados de los potenciales y las densidades de corrientes de corrosión indican que el acero de refuerzo galvanizado está corroyéndose a bajas velocidades mientras que el acero de refuerzo normal está corroyéndose activamente.

Palabras claves: acero galvanizado, carbonatación, concreto, corrosión, durabilidad

Galvanized rebars: An option against carbonation-induced corrosion

ABSTRACT

Concrete carbonation is the second cause of corrosion in reinforced concrete structures, and in inland tropical environments, it would be the main corrosion mechanism. Once concrete is carbonated, plain rebars are known to corrode actively. The objective of this investigation was to study the performance of galvanized reinforcing steel as an alternative reinforcing material under those circumstances. Three different water/cement ratios were used, and two different rebars, plain as controls, and galvanized. The specimens were carbonated in an accelerated carbonation chamber at 4% CO₂ and 60% RH. After full carbonation, the RH was increased above 90% in order to increase corrosion. The corrosion behavior was monitored using a linear polarization resistance technique. The results indicate that the galvanized reinforcing steel is corroding at low rates. Galvanized steel may be a good alternative material under inland tropical environments.

Keywords: Carbonation, Concrete, Corrosion, Galvanized reinforcing steel, Linear polarization resistance.

*Profesor-Investigador del CA de Estructuras y Materiales, FIUADY, emoreno@uady.mx

†Estudiante de licenciatura de Ingeniería Civil, Instituto Tecnológico de Mérida

‡Estudiante de Maestría en Ingeniería-Construcción, FIUADY

INTRODUCCIÓN

La corrosión inducida por la carbonatación es la segunda causa de la corrosión en las estructuras de concreto reforzado. La carbonatación del concreto es debida a la reacción del dióxido de carbono atmosférico y los compuestos hidratados del cemento. El producto de esta reacción es, principalmente, carbonato de calcio que precipita dentro de los poros del concreto (Moreno 2000). Sin embargo, el pH de la solución del poro disminuye de valores superiores a 12.5 unidades a menos de 9 unidades después de la carbonatación (Moreno 2001). El acero está protegido en las estructuras de concreto de la agresividad del medio ambiente debido al entorno altamente alcalino que provee la solución del poro. Este ambiente forma una capa pasiva sobre la superficie del acero. La capa pasiva es destruida como resultado de la pérdida de alcalinidad en la solución del poro que rodea al acero, desarrollándose una corrosión uniforme. Esta corrosión uniforme acelera la formación de grietas en el concreto si existen condiciones adecuadas de humedad y temperatura. En ambientes tropicales las condiciones atmosféricas pueden aumentar la agresividad del dióxido de carbono (Castro *et al.* 1997, Véleva *et al.* 1998).

La profundidad de carbonatación (x) es medida usualmente empleando una solución indicadora de pH rociada en una superficie recién descubierta del concreto (Moreno 2000). La carbonatación sigue una dependencia con la raíz cuadrada del tiempo igual a $k \cdot t^{1/2}$, donde k es conocido como el coeficiente de carbonatación. Este coeficiente depende de varios factores como el tipo y la cantidad de cemento, la porosidad del concreto, las adiciones puzolánicas, etc. (Baker 1988). Investigaciones previas en edificios de concreto reforzado han mostrado una carbonatación significativa del concreto después de sólo 20 años de servicio (Castro *et al.* 1999, Moreno *et al.* 2002, Moreno *et al.* 2005). Estos edificios de concreto, con resistencias en el rango de 20 a 30 MPa, tenían coeficientes de carbonatación en el rango 5 a 8 mm/año^{1/2}. En otra investigación de campo en viviendas se encontró que los coeficientes de carbonatación eran más altos que aquellos encontrados en los edificios de concreto (Moreno *et al.* 2003). Una evaluación de mezclas de concreto, con valores de resistencia en el mismo rango que las de las estructuras de concreto, mostró densidades de corriente de corrosión por arriba de 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para la mayoría

de las barras de refuerzo. Las velocidades de corrosión estaban en el rango de 8 a 23 $\mu\text{m}/\text{año}$ (Moreno *et al.* 2004a).

Como algunos de los elementos de concreto usados en las casas, tales como losas armadas, mesetas de cocina, etc., tienen menos de 10 cm de espesor (incluso 5 cm), no existe la posibilidad de incrementar el recubrimiento de concreto sobre la barra, e incrementar las propiedades del concreto sería muy costoso. Por lo tanto, el uso de otro material de refuerzo sería una posible opción para controlar la corrosión inducida por la carbonatación. Una de estas posibilidades pudiera ser el uso de acero de refuerzo galvanizado. El recubrimiento galvanizado consiste en cuatro capas con diferentes concentraciones de zinc y hierro: eta (100% Zn), zeta (94% Zn), delta (90% Zn), y gama (75% Zn). El zinc y sus aleaciones son materiales anfóteros por naturaleza, corroyéndose activamente tanto en ambientes altamente alcalinos como en ambientes ligeramente ácidos. En el caso de la carbonatación del concreto, con un pH cercano a 8,5 (Moreno 2001), el recubrimiento de zinc debería proteger al acero. Por otra parte, previo a la carbonatación, el recubrimiento de zinc podría sufrir autocorrosión durante la hidratación del cemento, si el pH de la solución del poro es mayor de 13.3, hasta que se forme en la superficie una capa pasivante de hidróxizincato de calcio (Macías y Andrade 1983). Como el espesor típico de un recubrimiento de zinc es del orden de 100 μm , velocidades de corrosión promedio menores de 2 $\mu\text{m}/\text{año}$ serían necesarios para alcanzar una vida útil de 50 años mínimo (Moreno 1998). El objetivo de esta investigación fue determinar el desempeño de las barras galvanizadas embebidas en concreto como material alternativo bajo carbonatación y corrosión.

METODOLOGÍA

Especímenes y materiales

En todos los casos se usó cemento Portland como material cementante, sin adición mineral. Agregado calizo triturado, altamente poroso, fue utilizado como agregado fino y grueso. Tres relaciones agua-cemento (a/c) fueron empleadas (0.84, 0.74 y 0.65), de uso común en construcción de viviendas, ya que corresponden a resistencias mecánicas de 15, 20 y 25 MPa, aproximadamente. Los diseños de mezcla fueron preparados de acuerdo al ACI (1997), y los especímenes fueron

colados siguiendo los procedimientos de la ASTM (2002).

Dos tipos diferentes de especímenes de concreto fueron usados. Especímenes prismáticos instrumentados de 50 mm × 100 mm × 200 mm fueron usados para monitorizar el proceso de corrosión. Estos especímenes estaban reforzados con dos barras corrugadas de 9.5 mm de diámetro (del #3), una hecha de acero normal y la otra de acero galvanizado. Para el monitoreo de la corrosión (Figura 1), un electrodo de referencia interno, hecho de barras de titanio activado con recubrimiento de óxido de metales, fue colocado en la mitad del espécimen (Castro *et al.* 1996). Los especímenes fueron preparados por triplicado. Cilindros de concreto simple de 150 mm de alto por 75 mm de diámetro fueron usados para monitorear el avance del frente de carbonatación.

Los especímenes fueron dejados secar en el ambiente del laboratorio por 90 días (~60% de humedad relativa, HR), para ser expuestos posteriormente en una cámara al 4% de CO₂ por 64 días con el fin de acelerar la carbonatación

(Moreno *et al.* 2004b). Después del período de carbonatación, los especímenes fueron expuestos a un ambiente al 80% HR por 40 días antes de ser expuestos a más de 90% HR con el fin de aumentar la velocidad de corrosión.

Profundidad de carbonatación

La profundidad de la carbonatación durante el período de estabilización, previo al de carbonatación acelerada, fue determinado usando especímenes de control. Durante la carbonatación, dos especímenes de concreto simple por mezcla de diseño fueron removidos de la cámara a edades diferentes. Una rodaja de ~50 mm de espesor fue quebrada, de cada espécimen con cincel y martillo, y una solución de fenolftaleína al 1% fue rociada sobre la superficie recién expuesta del concreto. La profundidad de carbonatación fue medida en ocho lugares diferentes usando un vernier. Después de tomar las mediciones de carbonatación el remanente del espécimen fue puesto de nuevo en la cámara.

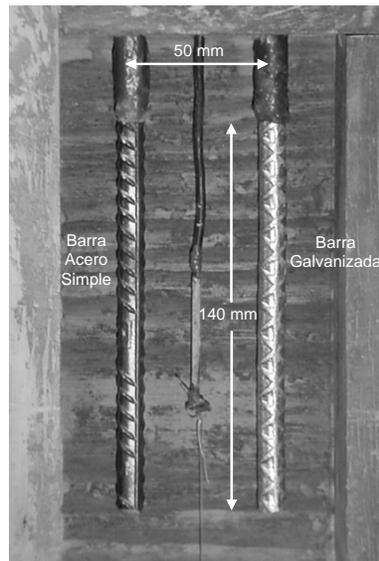


Figura 1. Disposición de los aceros en el molde previo al colado.

Mediciones de potencial

Mediciones de media celda fueron tomadas, para cada barra, contra el electrodo de referencia interno antes, durante y después del período de carbonatación. El electrodo de referencia interno fue calibrado contra un electrodo de referencia

externo cobre – sulfato de cobre, colocado en la superficie del concreto.

Resistencia eléctrica del concreto

La resistencia eléctrica del concreto fue monitoreada antes, durante y después de la

carbonatación usando un medidor de resistencia eléctrica. La resistencia eléctrica fue medida de una barra a la otra usando un arreglo de dos puntos.

Velocidades de corrosión

Pruebas de resistencia a la polarización lineal usando un potenciostato fueron realizadas durante los períodos de carbonatación acelerada y de humectación sin necesidad de remover los especímenes de las cámaras respectivas. Las pruebas fueron conducidas iniciando desde el valor a circuito abierto en dirección negativa, hasta alcanzar unos 10 mV, a una velocidad de barrido de 0.01 mV·s⁻¹ (Sagüés *et al.* 1995). La barra galvanizada (Barra X) fue usada siempre como electrodo de trabajo, mientras que la barra de acero simple (Barra Y) fue usada como electrodo auxiliar. Los valores de resistencia a la polarización fueron convertidos en velocidades de corrosión utilizando la ecuación de Stearn-Geary, v.c. = 52 mv · Rp.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 1 muestra los resultados de las mediciones de carbonatación. Los valores son el promedio de ocho mediciones, convertidos de mediciones en una superficie cilíndrica en mediciones en una superficie plana, debido al uso de especímenes cilíndricos (Moreno 1999). Los especímenes estarían completamente carbonatados cuando la profundidad de carbonatación alcanzara los 37.5 mm. Antes de colocar los especímenes en la cámara de carbonatación, la profundidad de carbonatación fue determinada durante el período de estabilización usando especímenes de control y los datos fueron reportados como los correspondientes al día 0 de exposición acelerada. Debido al hecho de que algunas mezclas eran mejor que otras, la última profundidad de la carbonatación fue determinada en fechas diferentes. La profundidad de carbonatación fue mayor conforme más alta fue la relación a/c.

Tabla 1. Promedio de profundidades de carbonatación (x) y desviaciones estándar (s), en mm.

Mezcla	Días de exposición al 4% CO ₂											
	0		1		4		7		9		16	
	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s	x	s
0.84	9.3	0.6	19.5	0.7	21.5	1.2	23.7	0.8				
0.74	7.9	0.6	16.8	1.0	18.0	1.9			21.0	1.1		
0.65	7.3	0.8	14.3	1.3	16.1	2.3					20.4	1.6

La figura 2 muestra los potenciales promedio de las barras galvanizadas en función del tiempo. Los potenciales de las mezclas de 0.84 y 0.74 mostraron una transición de más de 600 mV hacia valores más negativos después de iniciada la exposición acelerada. Los especímenes de la mezcla 0.65 tuvieron un cambio de potencial menos pronunciado después de la exposición al CO₂. Al final del período de carbonatación

acelerada, los potenciales de todos los especímenes estaban alrededor de -1000 mV. Los potenciales cambiaron hacia valores más positivos después de extraerlos de la cámara de carbonatación. Sin embargo, los potenciales se estabilizaron en el rango -1000 a -1100 mV en la cámara de humectación. Los últimos valores son indicadores de una activación de la capa eta (Yeomans 1994).

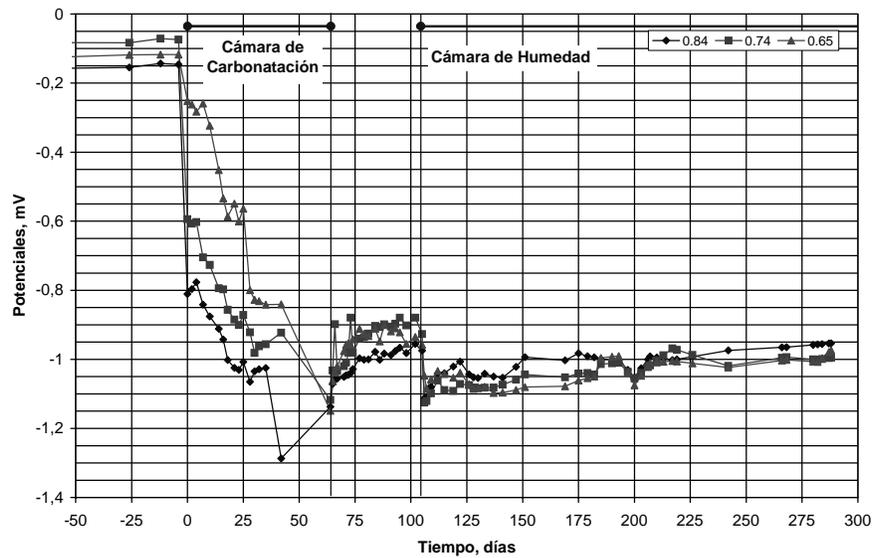


Figura 2. Potenciales promedio de las barras galvanizadas en función del tiempo.

La figura 3 muestra los potenciales promedio para las barras de acero simple en función del tiempo. Todos los potenciales mostraron una transición entre 200 y 300 mV hacia potenciales más negativos después de iniciada la exposición. Los valores se estabilizaron durante este período en -600 mV, aproximadamente. Después de colocar

los especímenes en la cámara de humectación, los potenciales disminuyeron 100 mV, aproximadamente, en la dirección menos positiva. Los potenciales tendieron a estabilizarse en el rango -600 a -700 mV, el cual es el rango esperado para el acero embebido en concreto en condiciones de corrosión activa.

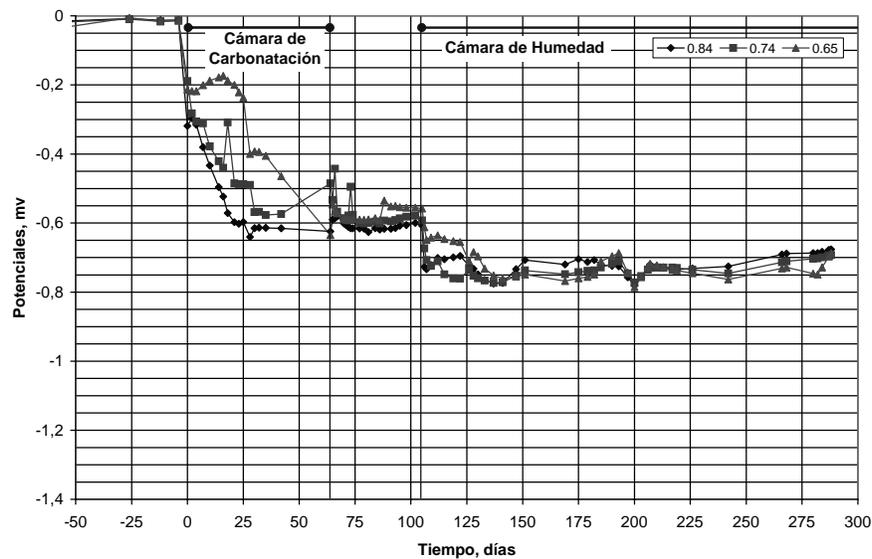


Figura 3. Potenciales promedio de las barras de acero simple en función del tiempo.

La figura 4 muestra la resistencia eléctrica promedio del concreto en función del tiempo. Conforme la carbonatación avanza, la resistencia eléctrica aumenta (~60% HR). Después de remover los especímenes de la cámara de carbonatación, la resistencia eléctrica disminuye debido al aumento de la humedad (~85% HR). Sin

embargo, una vez en la cámara de humectación (>90% HR), las resistencias disminuyen a valores muy bajos. Es observable que los valores finales están inversamente relacionados con la relación a/c, siendo la resistencia más baja la que corresponde a la mezcla con la relación a/c más alta.

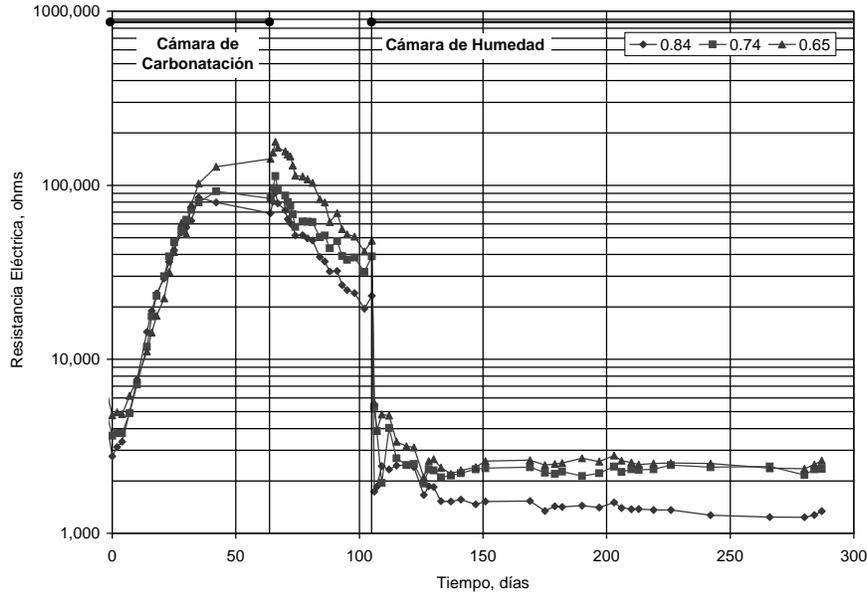


Figura 4. Resistencia eléctrica promedio del concreto en función del tiempo.

Las densidades de corrientes de corrosión promedio de las barras galvanizadas son presentadas en la figura 5. Como fue observado en investigaciones anteriores (Moreno y Sagüés 1998, Moreno 1999) las densidades de corrientes de corrosión durante el período de carbonatación acelerada son muy bajas. Es sólo después de que los especímenes son humectados que la corrosión se desarrolla y velocidades de corrosión activa son alcanzadas. Densidades de corrientes de corrosión

del orden de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ fueron alcanzadas pocos días después de colocar los especímenes en la cámara de humectación. Las densidades de corrientes de corrosión se estabilizaron en el rango 0.06 a $0.10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Estos valores corresponden a velocidades de corrosión en el rango de 1 a $1.5 \mu\text{m}/\text{año}$, y están en el mismo rango de aquellas observadas por otros investigadores (González y Andrade 1982).

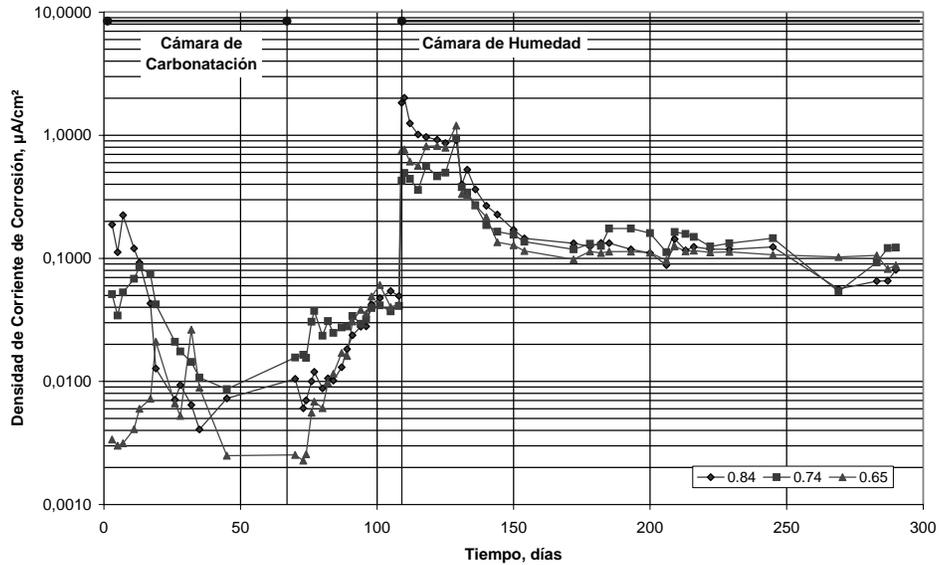


Figura 5. Densidades de corrientes de corrosión promedio en función del tiempo.

Las velocidades de corrosión de las barras de acero simple embebidas en concreto carbonatado bajo las mismas condiciones, reportadas previamente, alcanzaron un promedio de 11.7 $\mu\text{m}/\text{año}$ (Moreno *et al.* 2004a). Esos valores son un orden de magnitud mayor que aquellos observados en los especímenes galvanizados en esta investigación. Aunque el recubrimiento del galvanizado durará cerca de 70 años (estimación basada en los promedios de las densidades de corriente de corrosión medidas y asumiendo un espesor de recubrimiento de galvanizado de 100 μm) bajo las condiciones impuestas ($>90\%$ HR), el ambiente empleado es extremadamente agresivo. Por lo tanto, bajo condiciones reales ($\text{HR} < 90\%$), se espera que el recubrimiento del galvanizado dure más de 70 años (asumiendo un recubrimiento mínimo de 100 μm , sin defectos y sin contaminación por cloruros). Estos resultados apoyan el uso de acero de refuerzo galvanizado contra la corrosión inducida por la carbonatación, especialmente en el caso de elementos de concreto delgados y con poco recubrimiento.

CONCLUSIONES

- Las barras de acero galvanizado en concreto carbonatado se corroyeron a velocidades menores que las barras de acero simple.
- Las barras de acero galvanizado pueden ser un buen material alternativo contra la corrosión inducida por la carbonatación en ambientes tropicales no marinos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen al CONACyT (proyecto J34433-U) y a la Universidad Autónoma de Yucatán por el apoyo otorgado para el desarrollo de esta investigación. Las opiniones y las conclusiones son de los autores y no necesariamente de las instituciones participantes. Los autores agradecen a L. López Salazar, W. Castillo y F. Duarte Gómez por su participación en algunas de las pruebas realizadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACI 211.1-91 (1997). *Standard practice for selecting proportions for normal heavyweight, and mass concrete* ACI International, Farmington Hills, MI.
2. ASTM C 192-98 (2002) *Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory* ASTM International, West Conshohocken, PA.

3. Baker, R. F. M., (1988) "*Initiation period*," en *Corrosion of steel in concrete*, ed. P. Schiessl, Chapman and Hall, London, UK: p. 22.
4. Castro, P., Sagüés, A. A., Moreno, E. I., Maldonado, L., Genescá, J., (1996). *Corrosion*, 52, 8: p. 609.
5. Castro, P., Sanjuán, M., Genescá, J., (1997). "*Carbonatación natural del concreto expuesto en ambiente marino*", Memorias del XII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, México: p. 51.
6. Castro, P., Moreno, E. I., Genescá, J., (1999). "*Carbonation-induced corrosion of concrete coastal buildings in the north of Yucatan, Mexico*," Memorias del XIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, Mérida, México: p. 54.
7. González, J. A., Andrade, C., (1982). *Brit. Corros. J.*, 17, 1: p. 21.
8. Macías, A., Andrade, C., (1983). *Brit. Corros. J.*, 18, 2: p.82.
9. Moreno, E. I., (1998). "*Comportamiento de Barras Galvanizadas en el Período de Iniciación de la Corrosión en Concretos Puzolánicos*," Ingeniería—Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, 2, 2: pp. 9-20.
10. Moreno, E. I., (1999). "*Carbonation of blended cement concretes*," Disertación Doctoral, University of South Florida.
11. Moreno, E. I., (2000). "*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: pp. 43-48.
12. Moreno, E. I., (2001). "*Valores de pH de la Pasta de Cemento Puzolánico Carbonatado*", Ingeniería—Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, 5, 1: pp. 33-38.
13. Moreno, E. I., Sagüés, A. A., (1998). "*Carbonation-induced corrosion on blended-cement concrete mix designs for highway structures*," CORROSION/98, paper no. 636, NACE International, Houston, TX.
14. Moreno, E. I., Castro, P., Leal-Murguía, J., (2002). "*Carbonation-induced corrosion of urban concrete buildings in Yucatan, Mexico*," CORROSION/2002, paper no. 220, NACE International, Houston, TX,.
15. Moreno, E. I., Solís, R. G., Cob, E., (2003). "*Reinforcing steel corrosion in houses due to concrete carbonation in urban tropical environments*," CORROSION/2003, paper no. 280, NACE International, Houston, TX.
16. Moreno, E. I., Cob, E., Castro P. (2004a). "*Corrosion rates from carbonated concrete specimens*," CORROSION/2004, paper no. 439, NACE International, Houston, TX,.
17. Moreno, E. I., Domínguez, D., Cob, E., Duarte, F. (2004b). "*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: pp. 117-130.
18. Moreno, E. I., Solís, R. G., López, L. (2005). "*Carbonation-induced corrosion in urban concrete structures*," CORROSION/2005, paper no. 263, NACE International, Houston, TX.
19. Sagüés, A. A., Kranc, S. C., Moreno, E. I. (1995). *Corrosion Science*, 37, 7: p.1097.
20. Véleza, L., Castro, P., Hernández-Duque, G., Schorr, M. (1998). *Corrosion Reviews*, 16, 3:p. 235.
21. Yeomans, S. R. (1994). *Corrosion*, 50, 1: p. 72.