



Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

Relación entre la velocidad de corrosión de la armadura y el ancho de fisuras en vigas de concreto armado expuestas a ambientes que simulan el medio marino

Y. Hernández¹, O. de Rincón¹, A. Torres², S. Delgado¹, J. Rodríguez³, O. Morón¹

¹Centro de Estudios de Corrosión, Universidad del Zulia. Venezuela.

²Instituto Mexicano del Transporte. México

³Dpto. Ingeniería Civil, Universidad de Granada. España

Información del artículo

DOI:

http://dx.doi.org/10.21041/ra_v6i3.152

Artículo recibido el 30 de Abril de 2016, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 17 de Julio de 2016. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2017 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2017.

© 2016 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 3, Septiembre – Diciembre 2016, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.521997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org.

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de septiembre de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

Esta investigación presenta una relación empírica entre la velocidad de corrosión de la armadura y la velocidad de ensanchamiento de fisuras por corrosión del recubrimiento de concreto en vigas, con o sin aplicación de carga. Se evaluaron vigas de concreto armado, expuestas a un proceso de corrosión natural mediante el rociado con solución salina al 3,5 %p/p de NaCl, para acelerar el proceso corrosivo de la armadura, mediante ensayos electroquímicos. El ancho de fisuras se evaluó mensualmente para estimar la relación existente entre éste y la pérdida de sección de la armadura. Los resultados demuestran que existe una relación directa entre la propagación del ancho de fisuras y la velocidad de corrosión, observando fisuras de mayor ancho en vigas cargadas.

Palabras clave: corrosión; concreto armado; vigas cargadas; ancho de fisuras.

ABSTRACT

This investigation presents an empirical correlation between the rebar corrosion rate and the corrosion-induced crack width propagation rate produced on beam's concrete cover, with or without load application to these beams. Reinforced concrete beams were evaluated, exposed to a natural corrosion process by spraying with 3.5 %w/w NaCl solution, to accelerate the rebar corrosion process, was performed with electrochemical tests. The beams corrosion-cracking evaluation was performed once every month, to determine the relation between crack width and the rebar corrosion loss. The results showed a direct relation between crack width propagation and rebar corrosion rate, showing wider cracks in the loaded beams.

Key words: corrosion; reinforced concrete; loaded beams; crack widths.

RESUMO

Esta pesquisa apresenta uma relação empírica entre a taxa de corrosão da armadura e a abertura de fissuras por efeito da corrosão da armadura em vigas de concreto, com ou sem aplicação de carga. Foram avaliadas vigas de concreto armado, expostas a um processo de corrosão natural por pulverização com solução salina a concentração de 3,5% de NaCl, para acelerar o processo de corrosão da armadura, mediante ensaios eletroquímicos. A abertura das fissuras foi avaliada mensalmente para estimar a relação entre ela e a perda de seção da armadura. Os resultados mostram que existe uma relação direta entre a propagação da abertura da fissura e a taxa de corrosão, observando a ocorrência de fissuras de maior abertura nas vigas sob carga.

Palavras-chave: corrosão; vigas de concreto armado sob carga; abertura de fissuras.

Autor de contacto: Yolanda Hernández (yolandahernandez@fing.luz.edu.ve)

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión de estructuras de concreto armado en ambientes marinos, es un problema grave, no solo por los gastos de reparación que puede ocasionar, sino que en algunas situaciones se ve afectada la seguridad de las personas. Para el caso de vigas de concreto armado, en general, el problema se puede agudizar ya que, al estar sometidas a esfuerzos de tracción, es prácticamente imposible evitar la microfisuración de las mismas, lo cual representa un camino por donde el agresivo empezará a penetrar. En una viga bien diseñada las fisuras de flexión son finas, casi invisibles y garantizan muy poca o ninguna corrosión del refuerzo. A medida que se incrementan gradualmente las cargas por encima de las cargas de fisuramiento, tanto la cantidad como el ancho de las fisuras aumentan y se pueden encontrar un ancho común de fisuras de aproximadamente 0,25 mm. Si las cargas se incrementan, el ancho de fisuras aumenta, aunque la cantidad se mantiene más o menos estable (ACI 224, 1992).

En el modelo propuesto por Tuutti (Tuutti, 1992) para determinar la durabilidad de la armadura, se define a T_1 como al tiempo de inicio de la corrosión que comprende desde la construcción de la estructura y el inicio de la corrosión, y a T_2 como al período de propagación comprendido entre el inicio de la corrosión y la manifestación de daños externos, llegando a un grado de deterioro inaceptable desde el punto de vista de la seguridad, funcionalidad y/o estética de la estructura. Además de las etapas T_1 y T_2 del modelo de Tuutti, se ha definido la etapa de vida residual, que es la que se inicia en el momento de la aparición visible de algún síntoma de degradación, como por ejemplo fisuras de ancho $> 0,1$ mm, delaminaciones de la cobertura de concreto, pérdida visible de la sección del acero, etc. y finaliza con su colapso. Esta etapa muestra la tendencia progresiva de degradación de capacidad portante de una estructura que se está corroyendo y que corresponde a lo que sería su vida residual (Troconis de Rincón y col., 1997). Por lo tanto, la vida residual se podría considerar como el tiempo en que debe repararse la estructura antes de que pueda colapsar.

Durante una inspección visual la etapa donde aparecen fisuras anchas, manchas de óxido en la superficie y desprendimiento es la más sencilla de detectar (vida residual). En cambio, para evaluar si la estructura se encuentra en las etapas T_1 o T_2 (vida útil) es necesario realizar un diagnóstico más complejo y costoso que una simple inspección visual. Para esto se debe, además de la inspección visual, realizar monitoreo de potencial para determinar activación del acero, estimación de la velocidad de corrosión, extracción de testigos de concreto para determinar la concentración de cloruros en la profundidad de la armadura, etc. Una evaluación del daño de la estructura se podría predecir conociendo la velocidad de corrosión y pérdidas de la sección del acero al momento de realizarse dicha evaluación.

La medida de la intensidad de corrosión, indica la cantidad de metal que se transforma en óxido por unidad de superficie de la armadura y tiempo. La cantidad generada de óxidos puede estar directamente relacionada con la fisuración del recubrimiento del concreto y la pérdida de adherencia, mientras que la reducción en la sección transversal del acero afecta a la capacidad portante de la estructura. Por lo tanto, la velocidad de corrosión puede ser un indicador del descenso de la capacidad portante de la estructura. La reducción de la capacidad portante del elemento de concreto armado afectado por corrosión de las armaduras, se debe fundamentalmente a cuatro efectos que son directamente producidos por la corrosión: reducción de la sección de armadura, reducción de la ductilidad de las barras, reducción de la adherencia y pérdida de sección efectiva del concreto debido a la fisuración y a fisuras del recubrimiento (Torres y Martínez, 2001).

En estudios anteriores (Andrade y col., 1993; Cabrera, 1996; Rodríguez y col., 1996; Rodríguez y col., 1997; Tachibana y col., 1990; Torres y Sagües, 2000; Torres, 1999; Torres, Castro, Sagües, 1999; Torres y col., 2007) se han evaluado probetas por medio de evaluación electroquímica y mapeo de fisuras, para determinar el valor de CC_{CORR} (Capacidad de Carga remanente por corrosión) de elementos estructurales con corrosión generalizada en función de daños fáciles de obtener como por ejemplo el ancho promedio de la fisura por corrosión presente en la superficie de concreto.

Basado en la información experimental de estos estudios (Torres y Martínez, 2003; Torres y col., 2007), es en la etapa de vida residual en donde la estructura comienza a disminuir considerablemente su capacidad de carga (resistencia) remanente, CC_{COR}. En este estudio se observó que, a mayor pérdida de radio, mayor es el ancho de fisuras. Por lo tanto, en este trabajo se determinarán correlaciones que permitan evaluar como afecta la corrosión del acero de refuerzo el inicio y propagación de fisuras en el concreto armado, tanto en ancho como en longitud, para poder predecir la durabilidad de las estructuras y así actuar previniendo su deterioro, causante de los altos costos de reparación, y la eventual falla de la misma, en vigas de concreto armado sometidas o no a carga.

2. PROCEDIMIENTO

Se fabricaron 24 vigas (16 con 1 % de Cl⁻/cemento y 8 sin Cl⁻), de dimensiones 120 x 10 x 15 cm, con una barra de acero de 0,952 cm de diámetro y un recubrimiento de concreto de 2,5 cm. Se determinó su sorción capilar y porosidad efectiva por medio de la Norma Sueca de Fagerlund (Fagerlund, 1986), utilizando probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 5 cm de altura, las cuales fueron secadas a 50°C hasta peso constante y luego colocadas sobre una esponja húmeda para determinar la cantidad de agua absorbida por los poros capilares del concreto, causantes del daño de la armadura.

Las 24 vigas de concreto fueron rociadas en un área central de 25 cm, con solución salina de NaCl al 3,5 %p/p dos veces por semana, para acelerar el proceso de activación de las barras por difusión de iones cloruro desde el exterior.

De los dos grupos de vigas (con y sin cloruros) se seleccionó la mitad de ellas para ser sometidas a carga constante por flexión por un período de un año, con el fin de evaluar el efecto combinado de flexión y cortante en la velocidad de corrosión y durabilidad de las vigas en general; ya que éstas simulan cargas normales en vigas reales. A lo largo de este trabajo a esta carga que se aplicó a las vigas luego de 900 días de evaluación se le llamará precarga.

2.1 Evaluación de las vigas de concreto

Las vigas se evaluaron electroquímicamente por medio del potencial de corrosión de la armadura utilizando un electrodo de Cu/CuSO₄ saturado (ASTM C876, 2009), dos veces por semana, en tres puntos diferentes a lo largo de la barra de acero. También se determinó la velocidad de corrosión utilizando el método de polarización lineal, a través del equipo GECORR6, en tres puntos sobre la barra de acero (zona central y extremas de las barras).

A 12 de las vigas fabricadas se le aplicó carga a flexión constante (500 kg), con la finalidad de simular cómo influye el esfuerzo de flexión en la corrosión de la armadura en una estructura de concreto. El sistema consistió en aplicar la carga utilizando un método de tres puntos (central y ambos extremos de las vigas), como se muestra en la Figura 1, haciendo 6 sistemas de precarga con dos vigas cada uno. Una vez al mes, se realizó la inspección visual y el levantamiento de fisuras de las 24 vigas (sometidas o no a flexión), con el fin de monitorear las fisuras aparecidas después de la aplicación de la carga, al igual que su longitud y ancho.

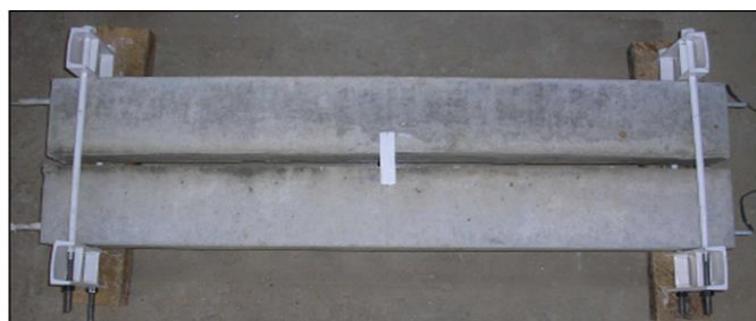


Figura 1. Sistema de carga aplicado a las vigas de concreto

2.2. Análisis para la determinación de correlaciones

Utilizando los resultados de velocidad de corrosión medidos se calculó la pérdida de sección de la barra de refuerzo, utilizando la Ley de Faraday:

$$\Delta W_F = \frac{55,85 \int I.dt}{n.F} \quad (1)$$

Donde:

ΔW_F = Pérdida de masa (g)

n = Valencia del hierro (Fe^{+2})

F = Constante de Faraday = 96.500 coul/mol

Peso atómico Fe = 55,85 g/mol

$\int I.dt$ = $\int icorr (A)dt$ = Área bajo la curva icorr vs. tiempo

Este valor de pérdida de masa se utilizó para estimar la pérdida de radio promedio por corrosión (x_{PROM}) (Geocisa, 2000). Estos valores de x_{PROM} se correlacionaron con los anchos de fisuras del concreto a lo largo del tiempo.

$$x_{PROM} = \frac{\Delta W_F \cdot 1000}{\rho \cdot \pi \cdot \phi \cdot L} \quad (2)$$

Donde:

ρ = Densidad del Fe (7,86 g/cm³)

ϕ = Diámetro de la barra de refuerzo (0,95 cm)

L = Longitud de la barra de refuerzo (100 cm)

3. RESULTADOS

El diseño de mezcla se realizó según el método ACI 211.1 (ACI 211.1, 1993), con relación agua/cemento (a/c) de 0,60. Las vigas se fabricaron usando un concreto con moderado desempeño en ambientes marinos, con sorción capilar de $1,50 \times 10^{-4}$ m/s^{0,5} y porosidad efectiva entre 8,3-8,8%. La resistencia a la compresión promedio, a los 28 días de curado, fue de 330 kg/cm².

3.1. Evaluación electroquímica

En la Figura 2 se observa la evaluación electroquímica de las vigas por medio de potenciales de corrosión, durante 3 años (1100 días aproximadamente); permitiendo de esta forma que las barras llegaran a un estado de activación (< -200 mV vs. Cu/CuSO₄). Se observa que aparentemente la precarga aplicada, no afecta significativamente los valores de potencial en el tiempo de evaluación, debido a que la barra ya se encontraba activa cuando se aplicó la carga.

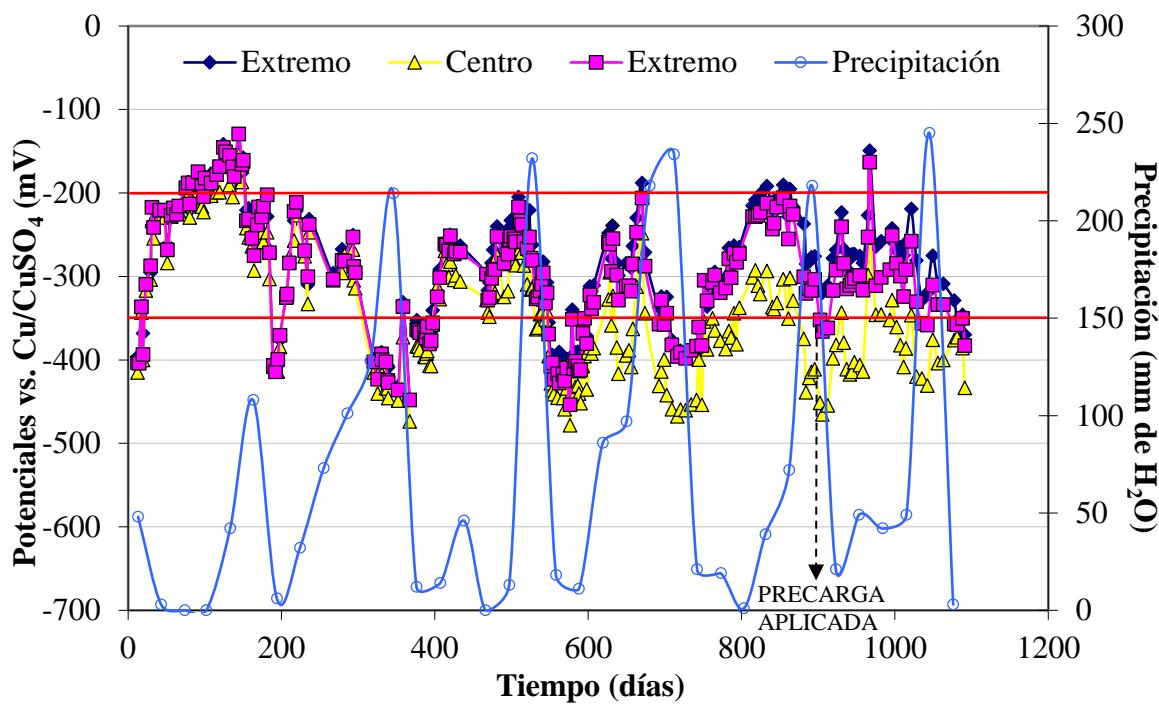


Figura 2. Variación del potencial durante el tiempo de evaluación de las vigas contaminadas con cloruro y precargadas.

También se observa que los potenciales en la zona central son más negativos, debido al rociado con solución de NaCl y no a la precarga aplicada. Adicionalmente, se manifiesta el efecto de la lluvia en la actividad de la barra, lo cual es lógico ya que se disminuye la resistividad del concreto. En la Figura 3 se observa que en las vigas sin contaminación inicial de cloruros, los valores de potencial vs. electrodo de Cu/CuSO₄ mostraron que no hay efecto significativo por la precarga aplicada al igual que se observó en las vigas contaminadas.

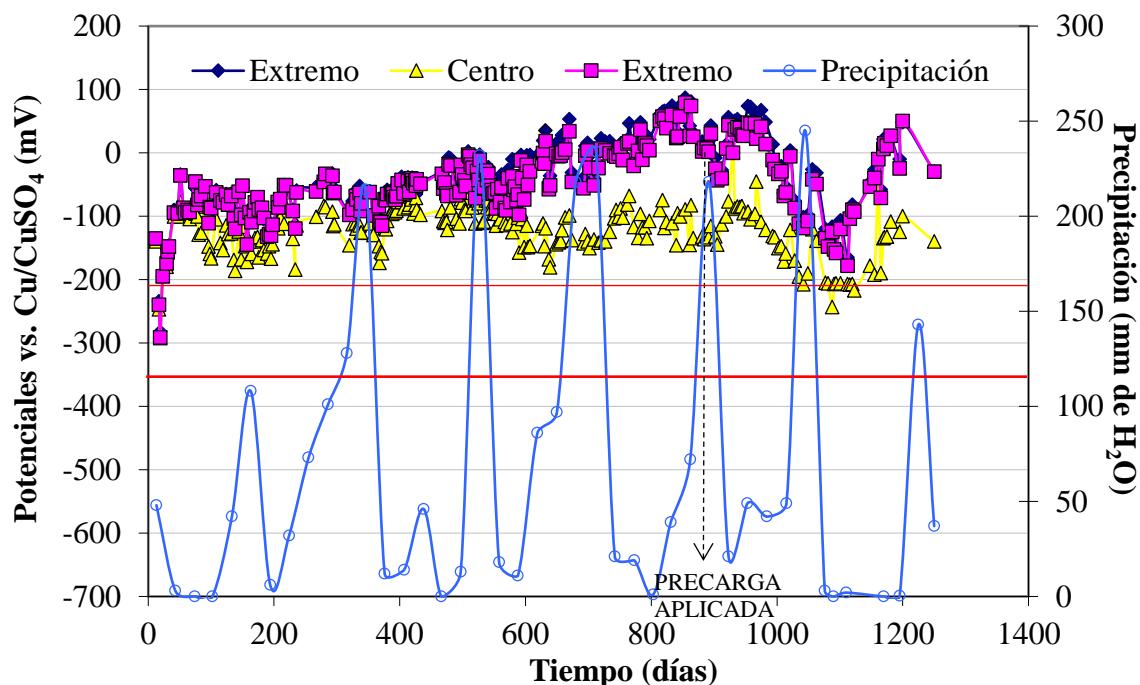


Figura 3. Variación del potencial durante el tiempo de evaluación de las vigas sin contaminación con cloruro y precargadas

En la Figura 4 se observa la velocidad de corrosión de las barras, mostrando, al igual que las medidas de potencial (Figura 2), que la precarga aplicada no afecta significativamente los valores de velocidad de corrosión. Solo se observa que en la zona central ésta es más alta, por el rociado con solución de NaCl antes y después de la precarga. La variación en los valores de velocidad de corrosión se debe al efecto de la lluvia, ya que disminuye la resistividad del concreto.

Las vigas precargadas, sin contaminación inicial de cloruros y rociadas en su zona central con NaCl (Figura 5), mostraron que aun cuando inicialmente todos los puntos evaluados mostraron una cierta actividad, luego se alcanzó la pasividad de la armadura y no es sino hasta, aparentemente, la aplicación de la carga que se nota la actividad del acero, lo cual concuerda con los resultados de medición de potenciales. Por otra parte, al evaluar el comportamiento de las vigas sin precarga, se nota el mismo efecto; de tal manera que no es la precarga la causante de la actividad de las barras sino el efecto de los iones cloruros, unido a las altas precipitaciones ocurridas en ese tiempo. Esto último se manifiesta posteriormente ya que al llegar a la época de sequía se nota nuevamente un decrecimiento de la velocidad de corrosión, pero con valores muy cercanos al que indica actividad de la armadura ($0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), particularmente en la zona central que era la que se regaba periódicamente con iones cloruro.

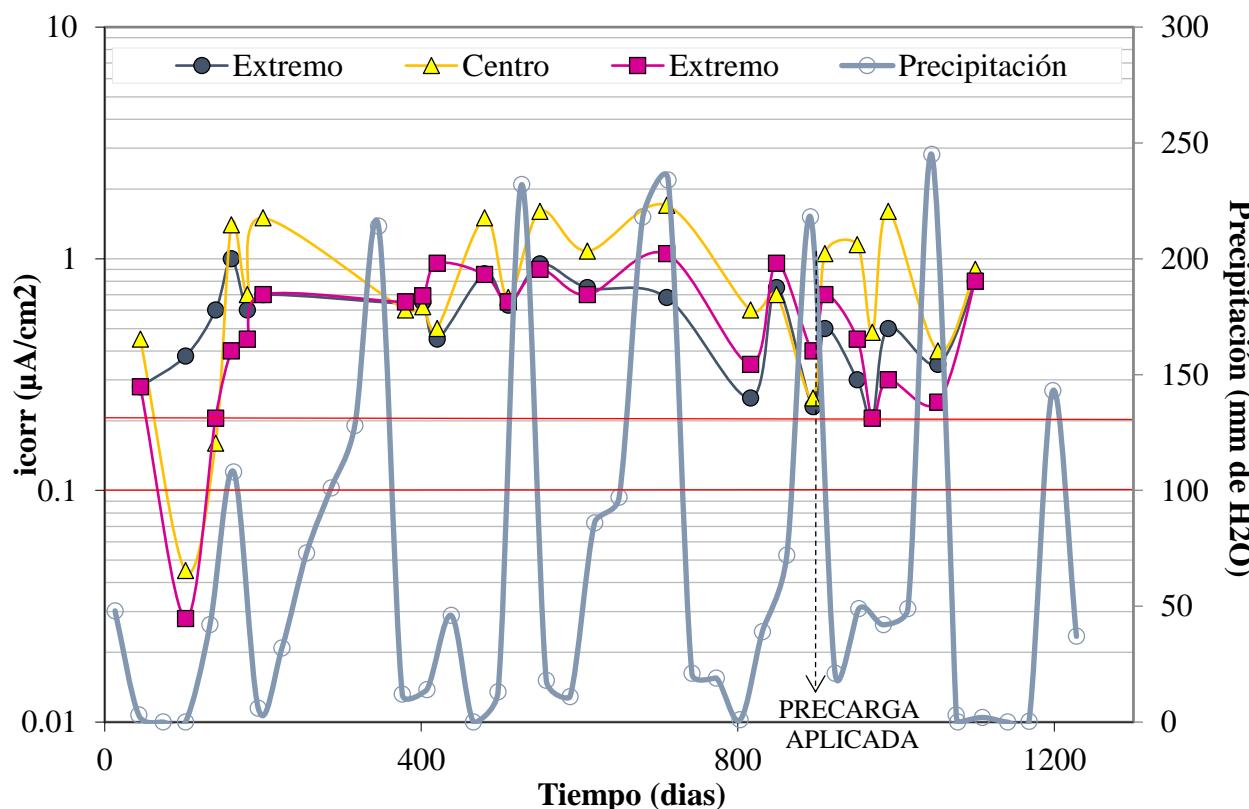


Figura 4. Variación de la velocidad de corrosión durante el tiempo de evaluación de las vigas contaminadas con cloruro y precargadas.

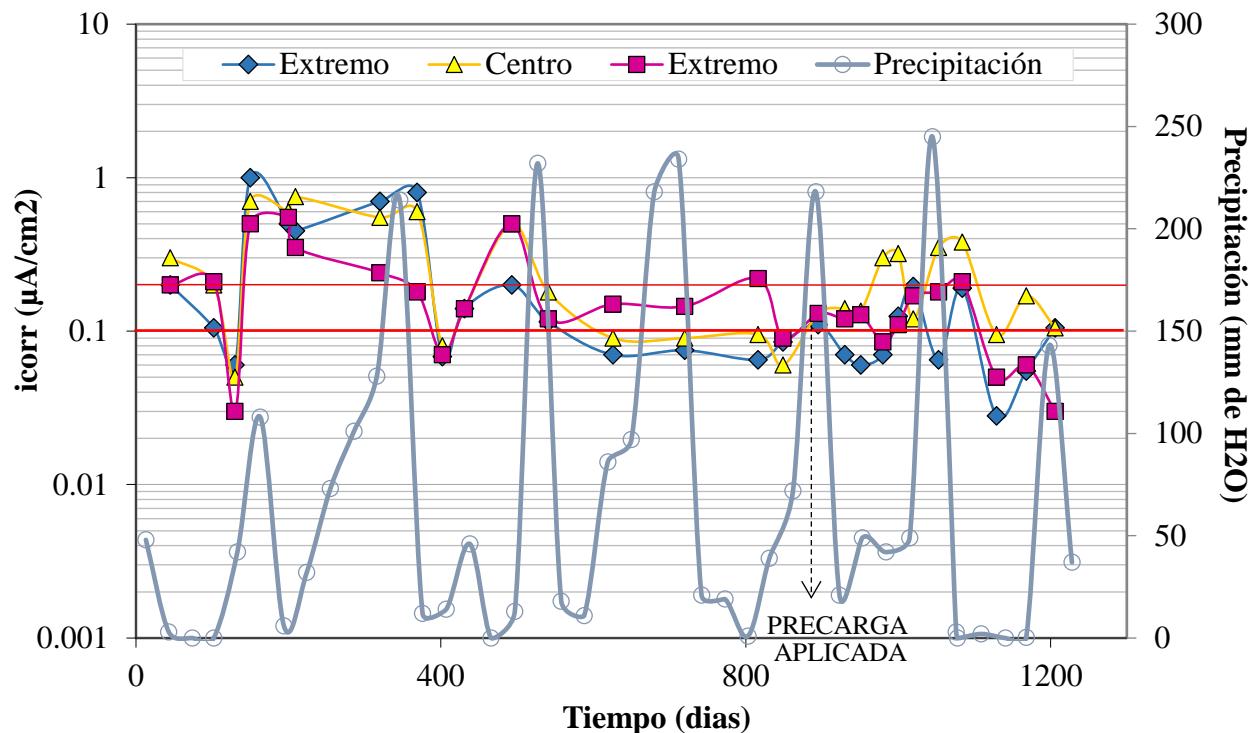


Figura 5. Variación de la velocidad de corrosión durante el tiempo de evaluación de las vigas sin contaminación con cloruro y precargadas

3.2 Inspección visual y levantamiento de fisuras

Cuando las vigas presentaron fisuras por corrosión, se realizó mensualmente la inspección visual y el levantamiento de fisuras. Después de esta evaluación las vigas se ensayaron mecánicamente hasta la ruptura final.

3.2.1. Sistemas de vigas sin contaminación inicial de cloruros

En las vigas sin precarga aplicada (Figura 6a), rociadas periódicamente sólo 25 cm de la zona central, no se observaron fisuras ni paralelas ni perpendiculares a la barra, aun cuando la velocidad de corrosión ya indicaba actividad de la misma ($> 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$); no siendo suficiente para agrietar el concreto. En el caso de las vigas precargadas (Figura 6b) sólo presentaban fisuras perpendiculares producto de la aplicación de la carga, con anchos menores a 0,15 mm, lo cual como ya se demostró al medir los parámetros electroquímicos, no han potenciado la corrosión de la armadura durante el tiempo de exposición evaluado.



Figura 6. Vigas sin contaminación inicial de cloruros, rociadas 25 cm en la zona central (a) sin precarga aplicada (b) con precarga aplicada

3.2.2. Sistemas de vigas con contaminación inicial de cloruros

En las vigas sin aplicación de precarga (Figura 7a), se observó, que en la zona donde estaban siendo regadas, se presentaron fisuras paralelas a la barra de acero, con espesores máximos de 0,40 mm. En las vigas con aplicación de precarga (Figura 7b), las fisuras por corrosión alcanzaron anchos de 0,8 mm. Esto indica que el efecto por corrosión de la barra debido a la contaminación inicial de cloruros ha facilitado la apertura de estas fisuras.

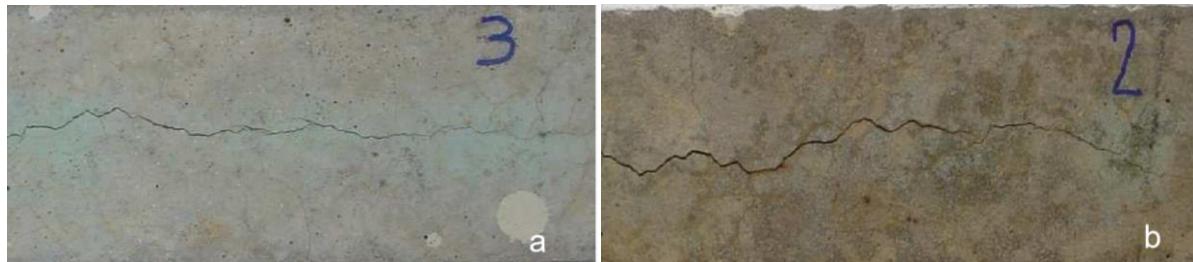


Figura 7. Vigas con contaminación inicial de cloruros, rociadas 25 cm en la zona central
(a) sin precarga aplicada (b) con precarga aplicada

3.3. Correlaciones ancho de fisuras vs. pérdida por corrosión

En la Figura 8 se detallan las características promedio de cada condición estudiada. Se observa que en la zona central de las vigas cargadas y sin cargar, la velocidad de corrosión promedio no presenta diferencia significativa ($1,080 - 0,989 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectivamente). Se observa el mismo comportamiento en la velocidad de corrosión de los extremos de las mismas vigas ($0,584 - 0,519 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectivamente) (Figuras 4 y 5). Al comparar los valores de velocidad de corrosión de la zona central y los extremos, si se observa diferencia significativa, producto del rociado con solución salina.

Condición	Velocidad de corrosión promedio ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Pendiente (mm/años)
Centro cargada	1,080	0,752
Centro sin cargar	0,989	0,619
Extremo cargado	0,584	0,267
Extremo sin cargar	0,519	0,225

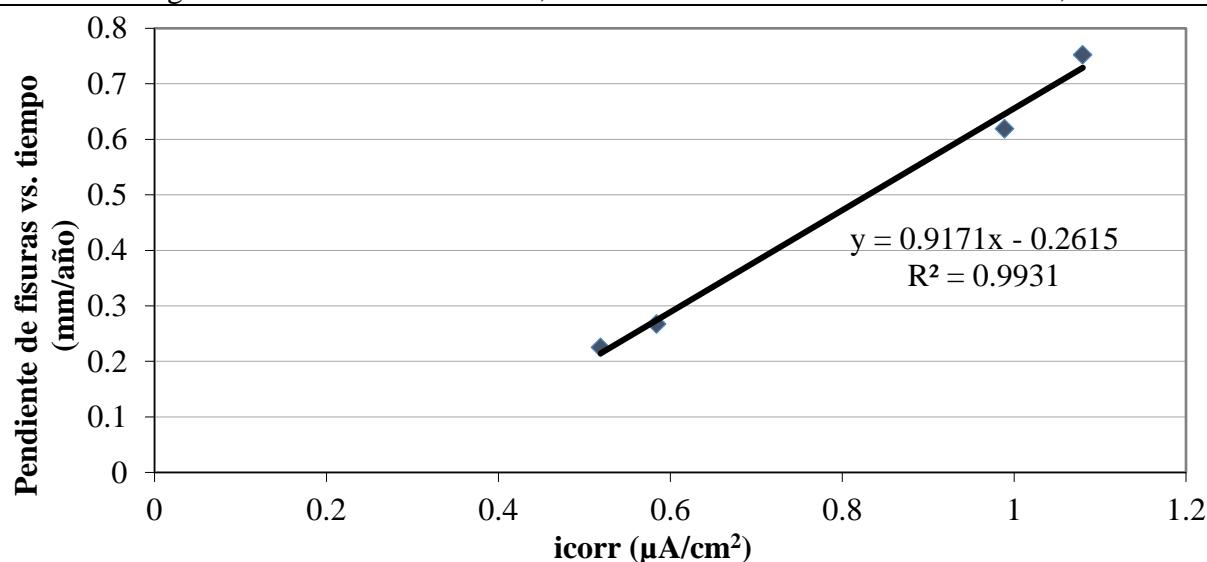


Figura 8. Pendiente promedio de anchos de fisuras en el tiempo vs. velocidad de corrosión del refuerzo (Hernández, 2009)

De la Figura 8 se puede observar que existe una correlación entre la pendiente de ancho de fisuración en el tiempo y la velocidad de corrosión del acero de refuerzo. Este fenómeno ya había sido estudiado por Alonso (Alonso y col., 1998) en el que utilizó un método acelerado de corrosión mediante corriente anódica impresa (10 y $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) a la barra de refuerzo dentro de concreto contaminado por cloruros. Como resultado obtuvo que a menor intensidad de aplicación de corriente (menor velocidad de corrosión) las fisuras se propagaban más rápido. A diferencia de lo obtenido por Alonso (Alonso y col., 1998) este trabajo demuestra que en corrosión natural y para valores de i_{corr} menores a $1,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, el ancho de fisuras en el tiempo es directamente proporcional a la velocidad de corrosión.

En la Figura 9 se observa la relación entre anchos de fisuras promedio y penetración de la corrosión en el refuerzo de las vigas de concreto sometidas o no a carga (corrosión natural (CEC) (Centro de Estudios de Corrosión), al igual que los datos de corrosión acelerada de otros autores para su comparación (Andrade y col., 1993; Cabrera, 1996; Rodríguez y col., 1996; Rodríguez y col., 1997; Tachibana y col., 1990; Torres y Sagües, 2000; Torres, 1999; Torres, Castro, Sagües, 1999; Torres y col., 2007). Se observa en los datos CEC cargados y sin cargar, que, para obtener un determinado ancho de fisura, se necesita menor pérdida de material por corrosión cuando las vigas están cargadas, que para obtener ese mismo ancho de fisuras en vigas sin carga aplicada (las tendencias de vigas con carga están desfasadas más a la izquierda que las tendencias de las vigas sin carga). Los resultados demuestran que existe una relación directa entre el ancho de fisuras y la velocidad de corrosión de la barra, encontrándose fisuras de mayor ancho en las cargadas.

En la Figura 9 se puede observar una diferencia en las líneas de tendencia de la relación empírica entre la pérdida por corrosión del refuerzo y ancho de fisuras en las vigas de concreto estudiadas, siendo la pendiente de los datos acelerados menos pronunciada que los datos de corrosión natural de otros autores.

En el caso de corrosión acelerada, la aparición de una fisura se produce con menos pérdida de material ya que los productos de corrosión al aparecer se acumulan rápidamente en las proximidades de la armadura generando altas tensiones de tracción que producen la fisuración. Adicionalmente, esta corriente anódica pudiese generar acidez en la interface acero/concreto, dependiendo del potencial, lo cual indudablemente disminuiría la adherencia entre la barra y el concreto permitiendo más fácilmente la aparición de las fisuras. En cambio, en las condiciones estudiadas en este trabajo, la corrosión es considerablemente más lenta permitiendo migración de los productos generados, necesitándose entonces mayor cantidad de productos de corrosión para que se inicie la fisura.

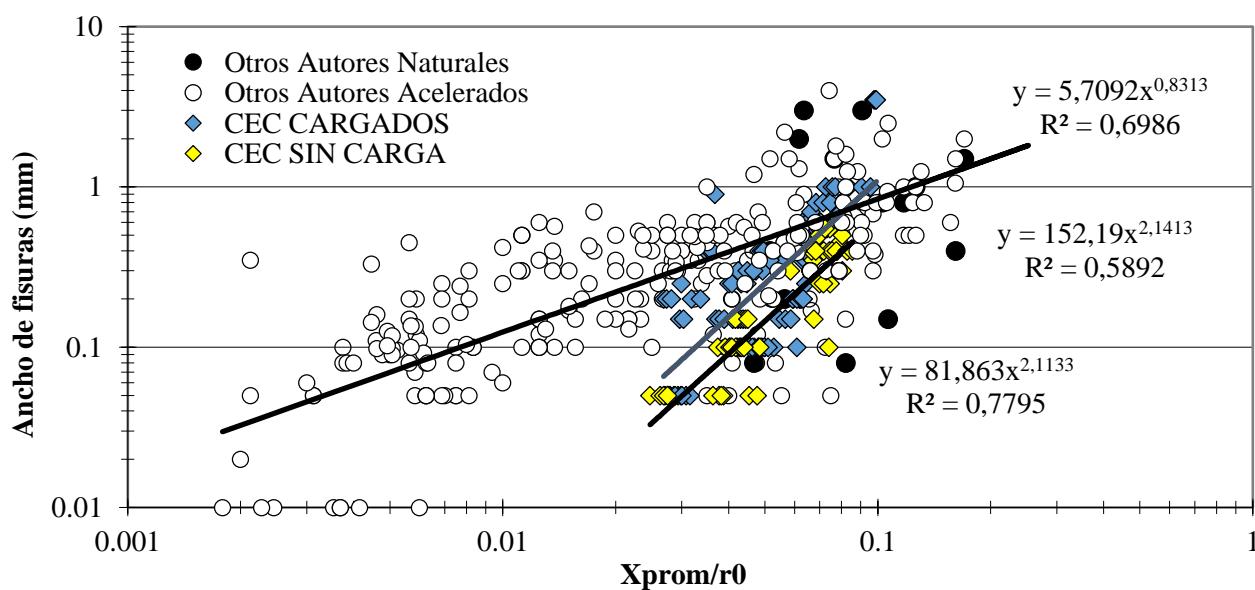


Figura 9. Comparación de ancho de fisuras en la viga de concreto vs. pérdida por corrosión del refuerzo de las vigas estudiadas (X_{prom}/r_0). Datos del CEC y de otros autores

Esto indica que los procesos de corrosión acelerada para simular degradación en estructuras reales no siempre dan resultados comparables con los de corrosión natural.

Al analizar la concentración de iones cloruros a nivel de la armadura (Figura 10), se determinó que las vigas fisuradas tienen más concentración de cloruros en el concreto cercano a la barra porque la solución de NaCl rociada en las vigas puede penetrar más fácilmente por las fisuras alcanzando el refuerzo, incrementando las concentraciones hasta valores superiores del valor límite de riesgo (4000 ppm Cl⁻), con respecto a las vigas no fisuradas.

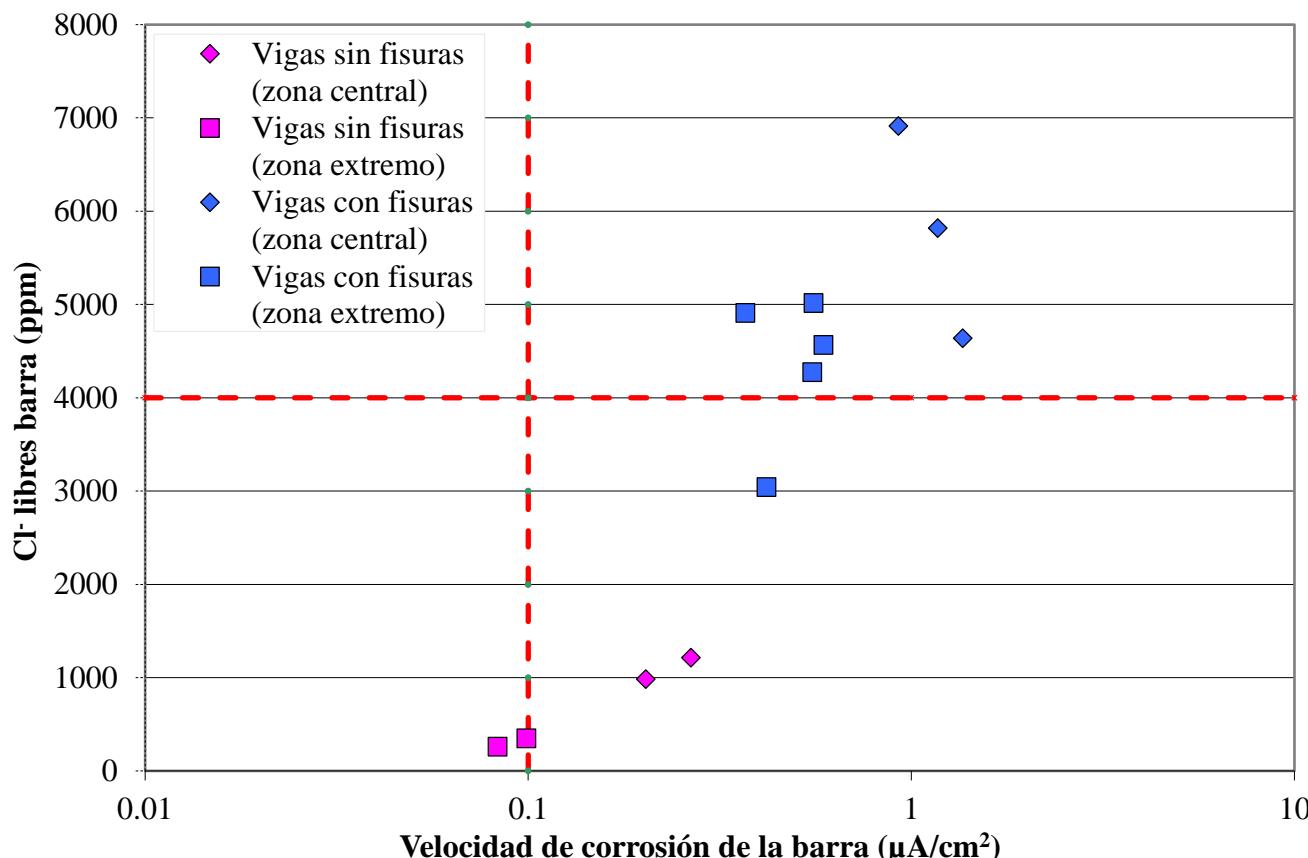


Figura 10. Concentración de ión cloruro a nivel de la armadura vs. velocidad de corrosión, vigas de concreto con y sin fisuras (Hernández, 2009)

Esto corrobora los resultados de otros autores que han evaluado testigos de concreto de puentes fisurados estructuralmente, dando como resultado que en las zonas fisuradas del puente los cloruros han penetrado con mayor facilidad, incrementándose a la profundidad de la barra 10 veces más que en las zonas sin fisuras del mismo puente (Sagües y col., 2001). Los resultados indicaron mayor contenido de cloruros libres y mayor velocidad de corrosión en la zona central de las vigas, corroborando que la carga incrementa aún más la penetración de cloruros (por la mayor rapidez en apertura de fisura) y la velocidad de corrosión aumenta por este aumento en la concentración de cloruros libres.

4. CONCLUSIONES

1. Segundo los resultados electroquímicos de las vigas, anchos de fisura menores a 0,15 mm, no potencian la corrosión de la armadura durante el tiempo de exposición evaluado.
2. La aplicación de precarga acelera el proceso de corrosión de las armaduras al permitir mayor ingreso de los agentes agresivos.

3. Cuando se acelera la corrosión de un elemento, la aparición de una fisura se produce con menos pérdida de material, en cambio, cuando la corrosión es natural, se necesitará mayor cantidad de productos de corrosión para que se inicie la fisura.
4. Los resultados verifican que existe una relación directa entre el ancho de fisuras y la pérdida de diámetro por corrosión de la barra, encontrándose fisuras de mayor ancho en elementos solicitados a flexión.
5. En corrosión natural, para obtener un determinado ancho de fisura, se necesita menor pérdida de material por corrosión cuando las vigas están cargadas que sin carga aplicada.

5. AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al CONDES (Maracaibo-Venezuela) y al Instituto Mexicano del Transporte (Querétaro-México) por el apoyo económico para la realización de este proyecto.

6. REFERENCIAS

- ACI Committee 224. *American Concrete Institute. Farmington Hills*. Detroit, Michigan, USA. (1992).
- Alonso C., Andrade C., Rodríguez J., Diez J. (1998). “*Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion*”. Materials and Structures. Vol. 31. pp. 435-441.
- Andrade, C., Alonso, C., Molina, F. J. (1993). “*Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part I - experimental test*”, Materials and Structure, 26, pp. 453-464.
- Cabrera, J. G. (1996). “*Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion*,” Cem. & Conc. Composites, 18, pp. 47-59.
- Geocisa e Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. (2000). “*Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura*”. Proyecto de Innovación CONTECVET IN 309021.
- Fagerlund, G. “*On the capilarity of concrete*”. Nordic Concrete Research. No.1 Oslo Paper, No.6 (1986).
- Hernández, Y. (2009). “*Evaluación de microsílice en la reparación de vigas de hormigón armado contaminado con cloruros*”. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, España. p. 1-165
- Norma ACI 211.1. (1993), *Proporcionamiento de Mezclas. Concreto Normal, Pesado y Masivo*.
- Norma ASTM C 876. (2009), *Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*.
- Rodríguez, J., Ortega, L. M. y Casal, J., (1996), “*Load bearing capacity of concrete columns with corroded reinforcement*”, Proceedings 4th SCI International Symposium on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, C.L. Page, P.B. Bamforth, and J.W. Figg eds., E&FN Spon, Cambridge, UK, pp.220-230.
- Rodríguez, J., Ortega, L. M. y Casal, J. (1997). “*Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement*”, Constr. and Build. Mats., 11(4), pp. 239-248.
- Sagües, A., Kranc, S., Moreno, P., Rey, D., Torres A., Yao, L. (2001). “*Corrosion forecasting for 75-year durability design of reinforced concrete*”. Final Report BA-502, University of South Florida. pp. 1-10.
- Tachibana, Y., Maeda, K., Kajikawa, Y y Kawaumura, M. (1990). “*Mechanical behaviour of RC beams damaged by corrosion of reinforcement*”, in Corrosion of Reinforcement in Concrete, C.L. Page, K.W.J. Treadaway, and P.B. Bamforth eds., pp. 178-187.
- Torres, A., (1999), “*Cracking induced by localized corrosion of reinforcement in chloride contaminated concrete*” Ph.D. Dissertation, University of South Florida.

- Torres, A., Castro, P., and Sagüés, A. (1999). “*effect of corrosion rate in the cracking process of concrete*” Proceedings of XIV National Congress of the Mexican Electrochemical Society, Merida, Mexico, August 24 – 28.
- Torres, A., Martínez, M. (2001). “*Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad*”. Publicación Técnica No. 181. Instituto Mexicano del Transporte. ISSN 0188-7297. Querétaro, México. p. 1-86.
- Torres, A., Martínez, M. (2003). “*Remaining structural capacity of concrete beams with localized corrosion of the embedded reinforcing steel. Materiales de construcción*”. Vol. 53, No. 271-272. pp. 125-133.
- Torres A., Navarro S., Terán J. (2007). “*Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beam*”. Engineering Structures. Vol. 29. pp. 1145-1152.
- Torres, A., Sagüés, A., (2000), “*Concrete cover cracking with localized corrosion of reinforcing steel*” Proceedings 5th CANMET/ACI Int. Conf. Durability of Concrete, V. Malhotra ed., ACI, Farmington Hills, Michigan, pp. 591-611.
- Trocónis de Rincón, Oladis, y colaboradores. (1997). “*Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Concreto Armado*”. Red DURAR-CYTED. Programa Ibero-American de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Subprograma XV, Corrosión/Impacto Ambiental en Materiales. ISBN 980-296-541-3. 1^{era} Edición.
- Tuutti K. (1982). “*Corrosion of steel in concrete. Swedish cement and concrete research institute*”. Sweden.