



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

Relação entre a velocidade de corrosão da armadura e a largura das fissuras em vigas de concreto armado expostas a ambientes que simulam o ambiente marinho

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.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org.

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Derechos de 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.

RESUMO

Esta pesquisa apresenta uma relação empírica entre a velocidade 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 velocidade 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.

ABSTRACT

This investigation presents an empirical correlation between the rebar corrosion rate and the corrosion-induced fissura 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-fissuraing evaluation was performed once every month, to determine the relation between fissura width and the rebar corrosion loss. The results showed a direct relation between fissura width propagation and rebar corrosion rate, showing wider fissuras in the loaded beams.

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

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.

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

1. INTRODUÇÃO

A corrosão de estruturas de concreto armado em ambientes marinhos é um problema grave, não apenas pelos custos de reparo que podem resultar, mas em algumas situações afetar a segurança das pessoas. No caso das vigas de concreto armado, de um modo geral, o problema pode ser agravado porque, ao estar submetida a esforços de tração, é praticamente impossível evitar a microfissuração da mesma, o que representa um caminho onde o agente agressivo irá iniciar sua penetração. Em uma viga bem projetada, fissuras de flexão são finas, quase invisíveis e garantem pouca ou nenhuma corrosão da armadura. À medida que as cargas aumentam gradualmente acima das cargas de fissuração, tanto a quantidade como a largura das fissuras aumentam e pode se encontrar uma largura comum das fissuras de cerca de 0,25mm. Se as cargas forem aumentadas, a largura das fissuras aumenta, embora a quantidade permaneça mais ou menos estável (ACI 224, 1992).

No modelo proposto por Tuutti (Tuutti, 1992) para determinar a durabilidade da armadura, se define T_1 como o tempo de início da corrosão compreendendo desde a construção da estrutura e o início da corrosão, e T_2 como o período de propagação compreendido entre o início da corrosão e a manifestação de danos externos, que conduz a um grau inaceitável de deterioração do ponto de vista da segurança, funcionalidade e/ou estética da estrutura. Além das etapas T_1 e T_2 do modelo de Tuutti, tem-se definido o estágio de vida residual, que é o que se inicia no momento do aparecimento visível de quaisquer sintomas de degradação, tais como fissuras de largura $> 0,1$ mm, delaminação da camada de concreto, perda visível de seção de aço, etc. e termina com o seu colapso. Esta etapa mostra a tendência progressiva de degradação da capacidade portante de uma estrutura que está corroendo e corresponde ao que seria a sua vida residual (Troconis Rincon et al., 1997). Por tanto, a vida residual pode ser considerada como o tempo em que a estrutura tem de ser reparada antes que possa entrar em colapso.

Durante uma inspeção visual, a fase onde aparecem fissuras largas, manchas de óxidos na superfície e desprendimentos é a mais fácil de detectar (vida residual). Em vez disso, para avaliar se a estrutura está na fase T_1 ou T_2 (vida útil) é necessário realizar um diagnóstico mais complexo e caro do que uma simples inspeção visual. Para isto, deve-se, além da inspeção visual, realizar a monitorização de potencial para determinar a ativação do aço, a estimativa da velocidade de corrosão, extração de testemunhos de concreto para determinar a concentração de cloreto na profundidade da armadura, etc. Uma avaliação dos danos da estrutura poderia ser previsto conhecendo a velocidade de corrosão e perda da seção do aço no momento da avaliação realizada.

A medida da intensidade de corrosão indica a quantidade de metal que é convertido em óxido por unidade de área da armadura e do tempo. A quantidade de óxidos gerada pode estar diretamente relacionada com a fissuração do cobrimento do concreto e da perda de aderência, ao mesmo tempo que a redução da seção transversal do aço afeta a capacidade de suporte da estrutura. Portanto, a velocidade de corrosão pode ser um indicador do decréscimo da capacidade portante da estrutura. A redução da capacidade portante do elemento de concreto armado afetado por corrosão das armaduras é devida principalmente a quatro efeitos que são causados diretamente pela corrosão: redução da seção da armadura, redução da ductilidade das barras, redução da aderência e perda de seção efetiva do concreto devido à fissuração e a fissuras do cobrimento (Torres e Martinez, 2001).

Em estudos anteriores (Andrade et al., 1993; Cabrera, 1996; Rodrigues et al., 1996; Rodriguez et al., 1997; Tachibana et al., 1990; Torres e Sagües, 2000; Torres, 1999; Torres, Castro, Sagües, 1999; Torres et al., 2007) foram avaliadas amostras por ensaios eletroquímicos e mapeamento de fissuras, para determinar o valor de CC_{CORR} (capacidade de carga restante por corrosão) de elementos estruturais por corrosão generalizada em função de danos de fácil obtenção como por exemplo a largura média da fissura por corrosão presente na superfície de concreto.

Com base nos dados experimentais destes estudos (Torres e Martinez, 2003; Torres et al., 2007), é na etapa de vida residual onde a estrutura começa a diminuir significativamente a sua capacidade portante (resistência) remanescente, CC_{COR} . Neste estudo se observou que quanto maior o diâmetro da armadura, maior a largura das fissuras. Portanto, neste trabalho foram determinadas correlações para

avaliar como a corrosão da armadura afeta o início e a propagação de fissuras no concreto armado, tanto em largura e comprimento, para prever a durabilidade das estruturas e assim atuar na prevenção da sua degradação, causando altos custos de reparo, bem como a eventual fralha da mesma, em vigas de concreto armado sob carga ou não.

2. PROCEDIMENTO

Foram moldadas 24 vigas (16 com 1% de Cl^- /massa de cimento, incorporado ao concreto, e 8 sem Cl^-), de dimensões 120 x 10 x 15 cm, com uma barra de aço de 0,952 cm de diâmetro e cobrimento de 2,5 cm. Foram determinadas a sua absorção capilar e porosidade efetiva utilizando a Norma Sueca de Fagerlund (Fagerlund, 1986), utilizando corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, que foram secos a 50°C até obter massa constante e, em seguida, colocados sobre uma esponja úmida para determinar a quantidade de água absorvida pelos poros capilares do concreto, que potencialmente podem provocar danos na armadura.

Sobre as 24 vigas de concreto foi aplicado ainda, por aspersão, uma solução salina de NaCl a 3,5% p/p, somente na parte central destas num trecho de 25 cm, duas vezes por semana, com o objetivo de acelerar, por difusão de íons cloreto, o processo de corrosão das barras de aço.

De dois grupos de vigas (16 com e 8 sem cloreto incorporados) foi seleccionada metade delas para ser submetidas a uma pré-carga constante por flexão por um período de cerca de 200 dias, a fim de avaliar o efeito combinado da flexão e cortante na velocidade de corrosão e durabilidade das vigas em geral; uma vez que estas simulam cargas normais em vigas reais. Esta pré-carga foi aplicada nas 8 vigas com cloreto incorporado inicialmente e 4 vigas sem cloreto, a partir da idade de 900 dias de avaliação até o término dos ensaios a 1.100 dias.

2.1 Avaliação das vigas de concreto

As vigas foram avaliadas eletroquimicamente por meio de potencial de corrosão da armadura utilizando um eletrodo de Cu/CuSO₄ saturado (ASTM C876, 2009), duas vezes por semana, em três pontos diferentes ao longo da barra de aço. A velocidade de corrosão foi também determinada usando o método de polarização linear, por meio de equipamentos GECORR6, em três pontos sobre a barra de aço (região central e extrema da barra).

Em 12 das vigas moldadas foi aplicada a pré-carga de flexão constante (500 kg), a fim de simular como influencia a tensão de flexão na corrosão da armadura numa estrutura de concreto. O sistema consistiu em aplicar a pré-carga através de um método de três pontos (centro e ambas as extremidades das vigas), como mostrado na Figura 1, com 6 sistemas de pré-carga com duas vigas cada.

Uma vez ao mês, foi realizada a inspeção visual e o levantamento das fissuras de todas as vigas (24), de modo a monitorar a eventual abertura de fissuras, caracterizando-as por comprimento e abertura.

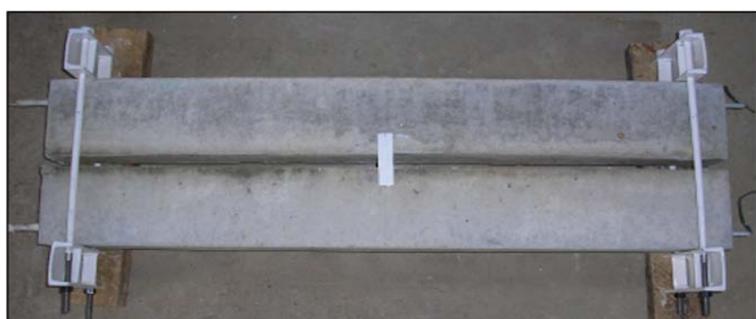


Figura 1. Sistema de pré-carga aplicado nas vigas de concreto

2.2. Análise para a determinação de correlações

Usando os resultados da velocidade de corrosão medidos foi calculada a perda de seção da armadura, utilizando a Lei de Faraday:

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

onde:

ΔW_F = perda de massa (g)

n = Valência do ferro (Fe^{+2})

F = constante de Faraday = 96500 coul / mol

Peso atômico Fe = 55,85 g / mol

$\int I.dt$ = $\int icorr (A) dt$ = Área sob a curva icorr vs. tempo

Este valor da perda de massa foi utilizado para estimar a espessura média de aço perdido por corrosão (x_{PROM}) expresso em mm/ano (Geocisa, 2000). Estes valores de x_{PROM} foram correlacionados com as larguras de fissuras do concreto ao longo do tempo.

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

Onde:

ρ = Densidade do Fe (7,86 g/cm³)

ϕ = Diâmetro da armadura (0,95 cm)

L = Comprimento da armadura (100 cm)

3. RESULTADOS

O estudo de traço foi realizado de acordo com o método do ACI 211.1 (ACI 211.1, 1993), com uma relação água/cimento (a/c) de 0,60. As vigas foram moldadas usando um concreto de desempenho moderado em ambientes marinhos, com absorção capilar de $1,50 \times 10^{-4}$ m/s^{0,5} e porosidade efetiva entre 8,3-8,8%. A resistência à compressão média, aos 28 dias de cura, foi de 33 MPa.

3.1. Avaliação eletroquímica

Na Figura 2 observa-se a avaliação eletroquímica das 24 vigas por meio de potenciais de corrosão durante 3 anos (cerca de 1.100 dias); permitindo assim que todas as barras chegassem a um estado mínimo de corrosão de < -200mV vs. Cu/CuSO₄. Observa-se que, aparentemente, a pré-carga aplicada não afetou de forma significativa os valores de potencial de corrosão, porque a barra já se encontrava ativa quando a pré-carga foi aplicada.

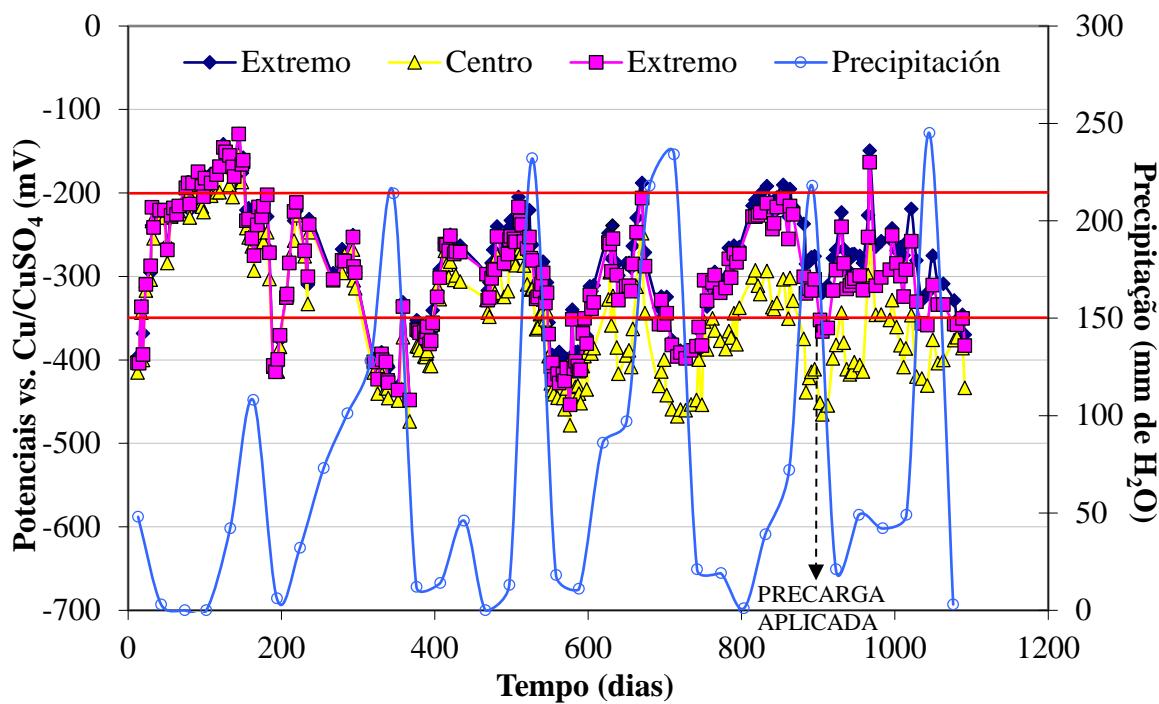


Figura 2. Variação do potencial durante o tempo de avaliação das 8 vigas contaminadas inicialmente com cloreto e pré-carregadas.

Note-se também que os potenciais na área central são mais negativos, devido à pulverização com uma solução de NaCl e não à pré-carga aplicada. Além disso, o efeito de molhagem das vigas se manifesta na maior ativação da barra, o que é lógico já que a resistividade do concreto diminui. Na Figura 3 se observa que nas 4 vigas sem contaminação inicial por cloreto e pré carregadas, os valores de potencial vs. eletrodo de Cu/CuSO₄ mostraram que não há nenhum efeito significativo da pré-carga aplicada, como foi observado nas 8 vigas inicialmente contaminadas com cloreto na massa do concreto.

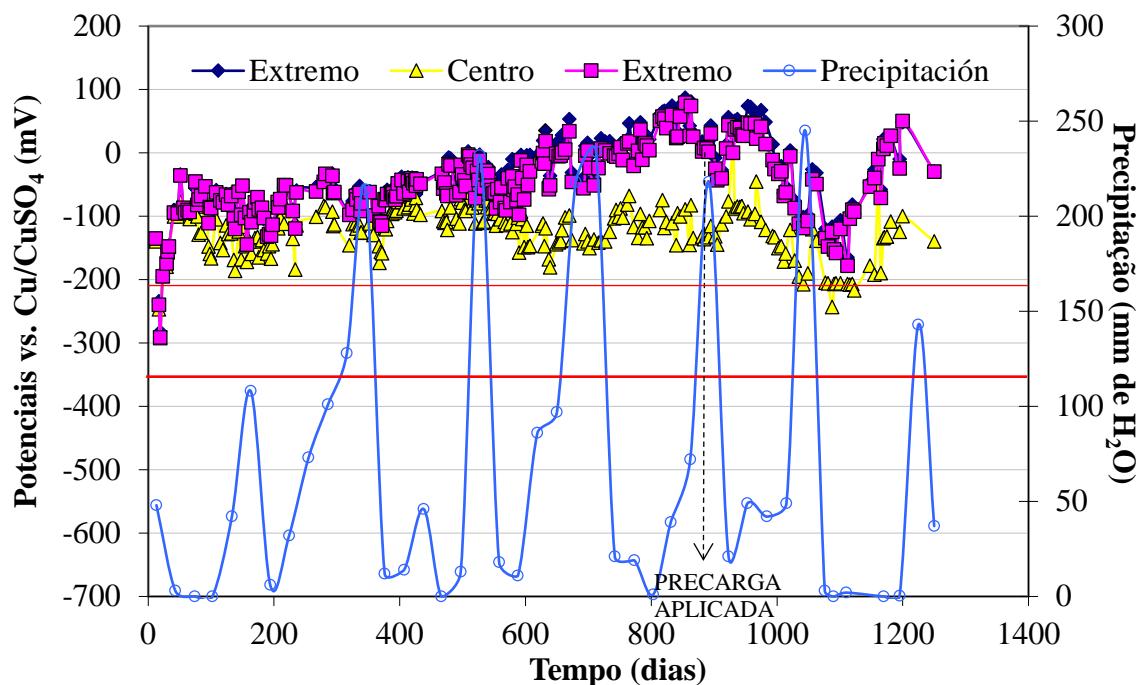


Figura 3. Variação do potencial durante o tempo de avaliação das 4 vigas sem contaminação inicial por cloreto e pré-carregadas

Na Figura 4, a velocidade de corrosão das barras é observada, mostrando, como as medidas de potencial (Figura 2), que a pré-carga aplicada não afeta significativamente os valores da velocidade de corrosão. Apenas se observa que na área central é maior, pela pulverização com uma solução de NaCl antes e depois da pré-carga. A variação nos valores da velocidade de corrosão é devida ao efeito da molhagem, que diminui a resistividade do concreto no entorno.

As vigas pré-carregadas, sem contaminação inicial de cloreto e aspergidas em sua área central com NaCl (Figura 5) mostraram que, embora inicialmente todos os pontos avaliados mostraram alguma atividade, logo a passividade da armadura foi alcançada e não foi até, aparentemente, a aplicação da carga que se nota a ativação do aço, o que corrobora os resultados da medição do potencial. Além disso, ao avaliar o comportamento das vigas sem pré-carga, o mesmo efeito é observado; de modo que a pré-carga não é a causa da ativação das barras, mas o efeito dos íons cloreto, juntamente com a molhagem com água que ocorreu neste tempo.

No final ao alcançar o estado seco é notada uma diminuição na velocidade de corrosão, mas com valores que ainda indica a ativação da armadura ($0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), especialmente na região central, que era aspergida periodicamente com íons cloreto.

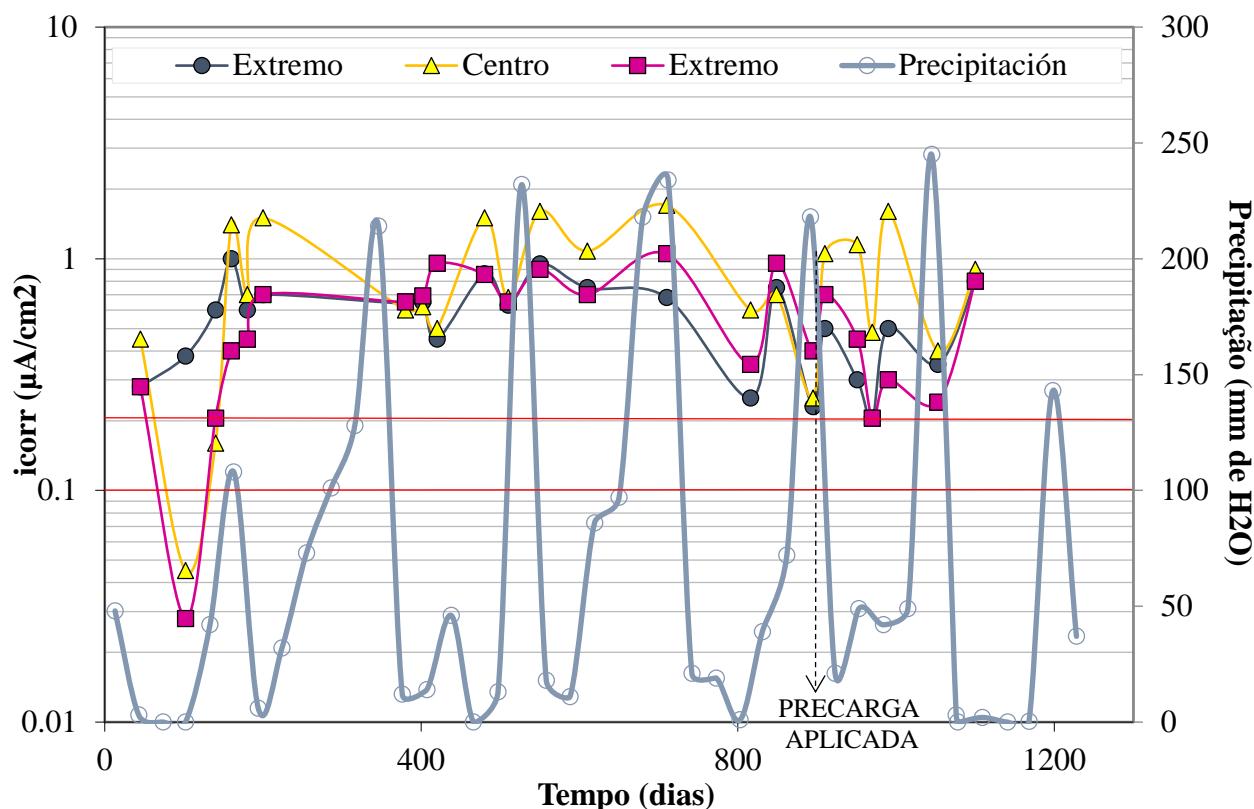


Figura 4. Variação da velocidade de corrosão durante o tempo de avaliação das vigas inicialmente contaminadas com cloreto e pré-carregadas.

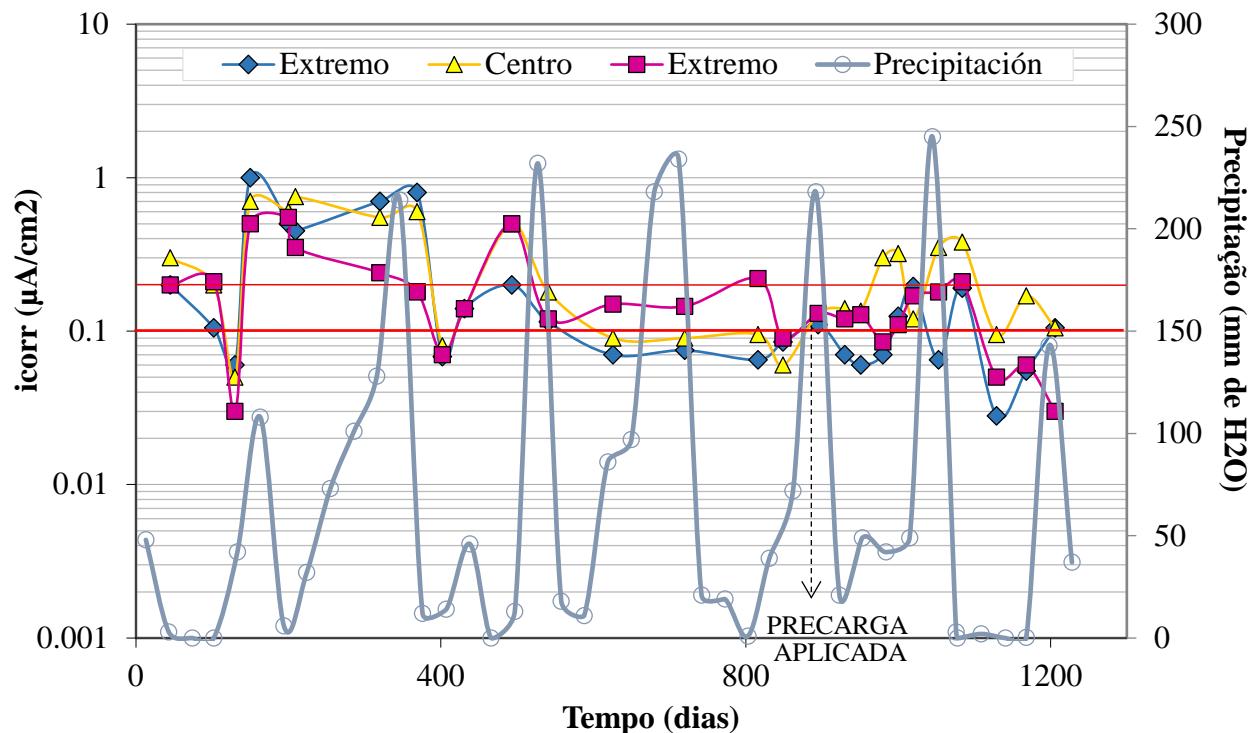


Figura 5. Variação da velocidade de corrosão durante o tempo de avaliação das vigas sem contaminação inicial com cloreto e pré-carregadas.

3.2 Inspeção visual e levantamento de fissuras

Quando as vigas apresentaram fissuras por corrosão, foi realizada mensalmente a inspeção visual mensal e a caracterização das fissuras. Após esta avaliação, as vigas foram ensaiadas mecanicamente até a ruptura final.

3.2.1. Sistemas de vigas sem contaminação inicial de cloretos

Nas vigas sem pré-carga aplicada (Figura 6a), aspergidas periodicamente apenas 25 cm da área central, não foram observadas fissuras paralelas ou perpendiculares à armadura, mesmo quando a velocidade de corrosão já indicava a atividade da mesma ($> 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$); não sendo suficiente para fissurar o concreto no período de tempo observado.

No caso das vigas pré-carregadas (Figura 6b) estas apresentaram fissuras perpendiculares, produto da aplicação da carga, com aberturas menores do que 0,15mm, o que, como já foi demonstrado na medição dos parâmetros eletroquímicos, não potencializou a corrosão durante o tempo de exposição avaliado.



Figura 6. Vigas sem contaminação inicial de cloretos, aspergidas a 25 cm na região central (a) sem pré-carga aplicada (b) com pré-carga aplicada

3.2.2. Sistemas de vigas com contaminação inicial de cloreto

Diferentemente das anteriores, nas vigas sem aplicação de pré-carga (Figura 7a), observou-se que na região onde foram aspergidas, foram apresentadas fissuras paralelas à barra de aço, com uma espessura máxima de 0,40 mm. Nas vigas com aplicação de pré-carga (Figura 7b), as fissuras por corrosão atingiram larguras maiores, da ordem de 0,8 mm. Isto indica que o efeito da corrosão da barra devido à contaminação inicial de cloreto facilitou a abertura destas fissuras.

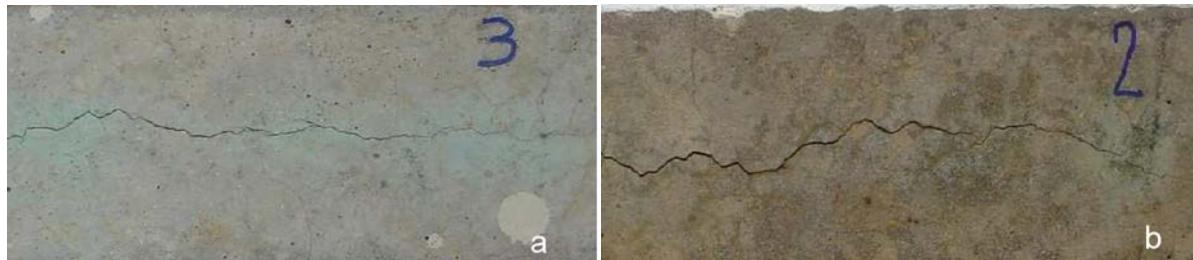


Figura 7. Vigas com contaminação inicial de cloreto, aspergidas 25 cm na região central (a) sem pré-carga aplicada (b) com pré-carga aplicada

3.3. Correlações entre a abertura da fissura vs. espessura de aço perdido por corrosão

Na Figura 8 estão detalhadas as características médias de cada condição estudada. Nota-se que na área central das vigas carregadas e não carregadas, a velocidade de corrosão média não apresenta diferença significativa (1,080-0,989 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectivamente). O mesmo comportamento é observado na velocidade de corrosão das extremidades das mesmas vigas (0,584-0,519 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectivamente) (Figuras 4 e 5). Comparando os valores da velocidade de corrosão da área central com as das extremidades, se observa uma diferença significativa, devido à pulverização com solução salina.

Condição	Velocidade de Corrosão média ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Espessura de aço perdido por corrosão (mm/ano)
Centro carregado	1,080	0,752
Centro sem carga	0,989	0,619
Extremidade carregada	0,584	0,267
Extremidade sem carga	0,519	0,225

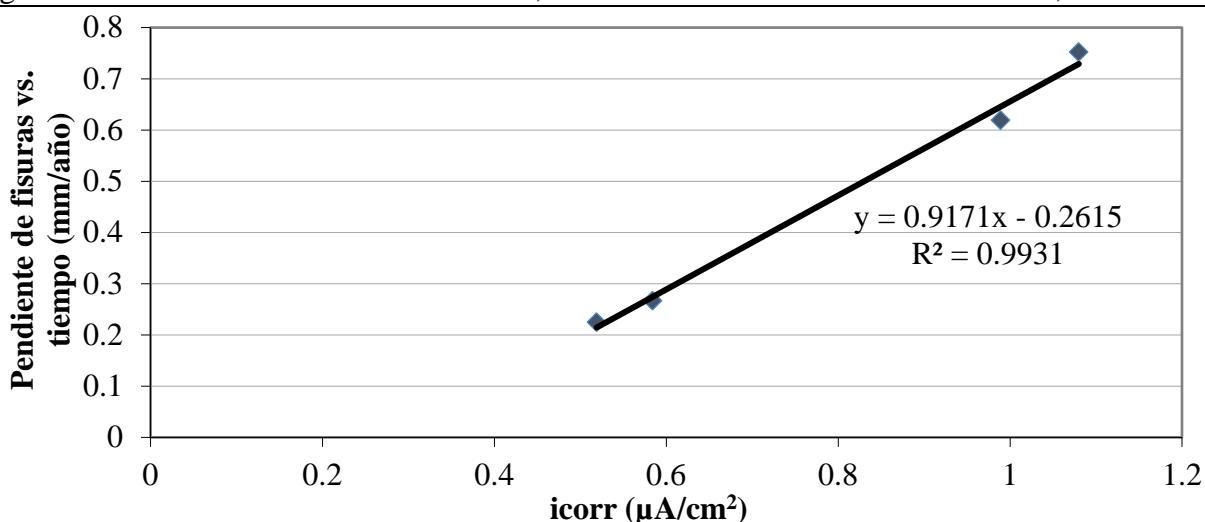


Figura 8. Espessura de aço perdido por corrosão vs. velocidade de corrosão da armadura (Hernández, 2009)

Da figura 8 pode-se observar que existe uma correlação entre a espessura de aço perdido por corrosão com a velocidade de corrosão da armadura. Este fenômeno foi estudado por Alonso (Alonso et al., 1998), no qual foi utilizado um método acelerado de corrosão por corrente impressa anódica (10 e $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) para a armadura dentro do concreto contaminado por cloretos. Como resultado, obteve-se que a uma menor intensidade de aplicação de corrente (menor velocidade de corrosão) as fissuras se propagam mais rápido. Ao contrário do obtido por Alonso (Alonso et al., 1998), este trabalho demonstra que na corrosão natural e para valores de i_{cor} inferiores a $1,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, a espessura de aço perdido por corrosão no tempo é diretamente proporcional à velocidade de corrosão.

A Figura 9 mostra a correlação entre as aberturas de fissuras médias com a espessura média de aço perdido por corrosão, observada na armadura de vigas de concreto submetidas ou não a pré-carga e submetidas à corrosão natural no CEC - Centro de Estudos de corrosão. Apresenta-se também nesse Figura 9 os resultados obtidos por outros autores (Andrade et al., 1993, Cabrera, 1996, Rodriguez et al., 1996, Rodriguez et al., 1997; Tachibana et al., 1990; Torres e Sagües, 2000; Torres, 1999; Torres, Castro, Sagües, 1999; Torres et al., 2007).

Observa-se nesta pesquisa do CEC, ora relatada, que as vigas com pré carregamento apresentaram maiores aberturas de fissuras que as sem pre-carga. Os resultados demostram que existe uma relação direta entre a abertura das fissuras e a velocidade de corrosão da armadura, encontrando-se fissuras de maior abertura nas vigas pré-carregadas.

A Figura 9 mostra a diferença nas linhas de tendência da correlação empírica entre a espessura de aço perdido por corrosão da armadura e a abertura das fissuras nas vigas de concreto estudadas, sendo que a abertura de fissuras é mais pronunciada nesta pesquisa de exposição natural, comparativamente aos resultados de outros pesquisadores em suas pesquisas com exposição acelerada.

No caso de corrosão acelerada, a ocorrência de uma fissura ocorre com menos perda de material, uma vez que os produtos de corrosão, ao aparecer, rapidamente se acumulam nas proximidades da armadura, gerando elevadas tensões de tração que causam fissuras. Além disso, esta corrente anódica poderia gerar acidez na interface aço/concreto, dependendo do potencial, o que, sem dúvida, diminuirá a aderência entre a armadura e o concreto permitindo mais facilmente o aparecimento de fissuras. Em vez disso, nas condições naturais estudadas neste trabalho, a corrosão é consideravelmente mais lenta, permitindo a migração dos produtos gerados, necessitando então de uma maior quantidade de produtos de corrosão para que se inicie a fissura.

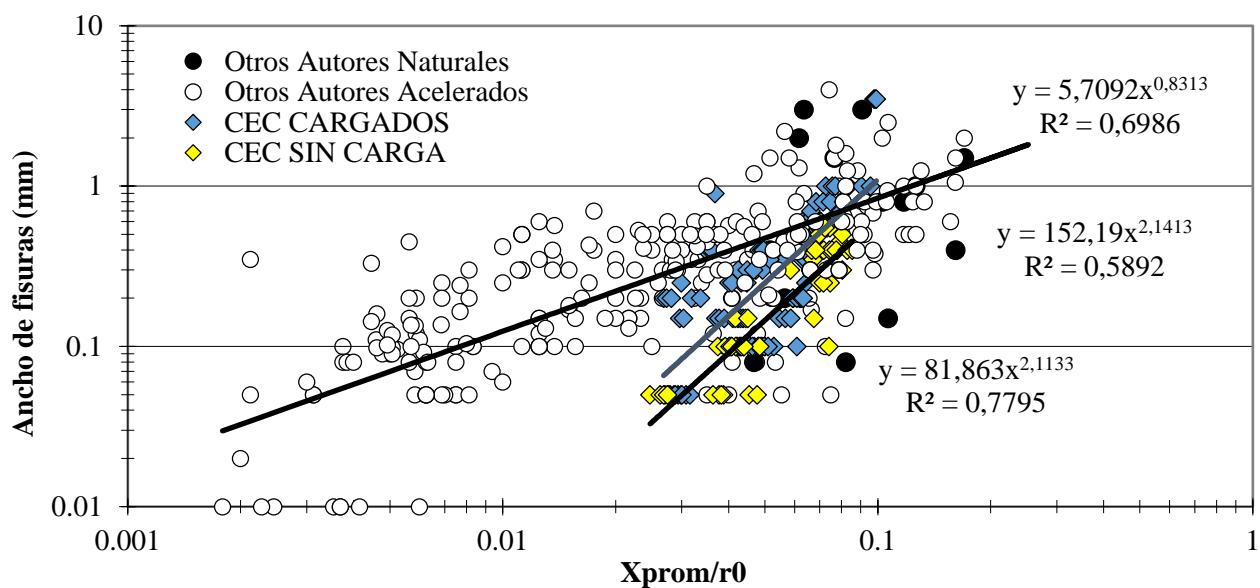


Figura 9. Comparação da abertura de fissura na viga de concreto vs. espessura de aço perdido por corrosão (X_{prom}/r_0). Dados desta pesquisa no CEC e de outros autores

Isso indica que os processos de corrosão acelerada para simular a degradação em estruturas reais nem sempre dão resultados automaticamente comparáveis com os de corrosão natural.

Ao analisar a concentração de íons cloreto ao nível da armadura (Figura 10), observou-se que as vigas fissuradas têm a maior concentração de cloretos no concreto perto da armadura provavelmente porque a solução de NaCl pode penetrar mais facilmente nas fissuras atingindo a armadura, aumentando assim as concentrações até valores superiores ao valor limite de risco (4.000 ppm Cl⁻) com relação às vigas não fissuradas.

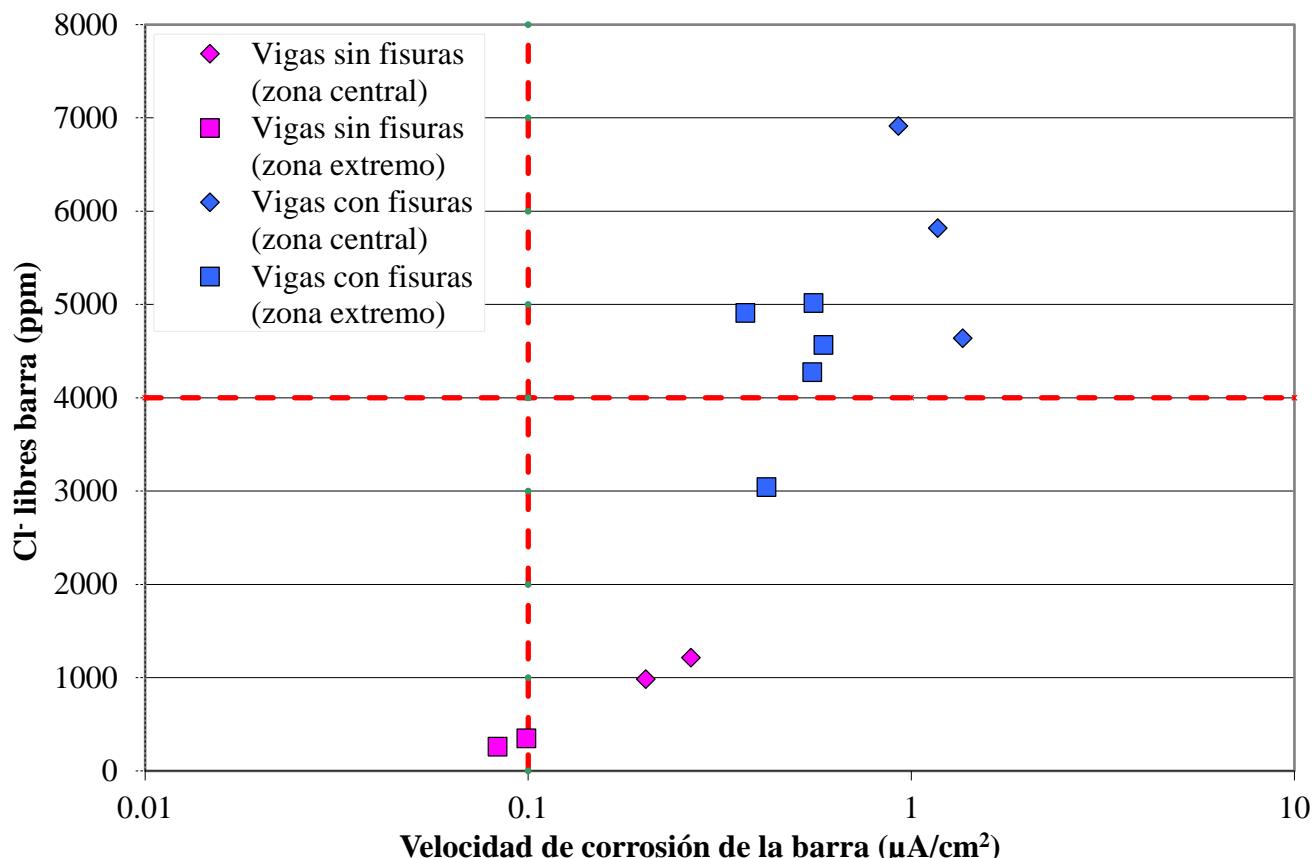


Figura 10. Concentração de íons cloreto ao nível da armadura vs. velocidade de corrosão, em vigas de concreto com e sem fissuras (Hernández, 2009)

Isto coincide com os resultados de outros autores que observaram que nas zonas fissuradas de diversas pontes, os cloretos penetraram com maior facilidade, apresentando concentração de cloretos na armadura das regiões fissuradas, 10 vezes superior que nas áreas sem fissuras da mesma ponte (Sagües et al., 2001).

Os resultados desta pesquisa indicaram maior teor de cloretos livres e maior velocidade de corrosão na zona central das vigas, corroborando que a carga aumenta ainda mais a penetração de cloretos (pela maior rapidez na abertura de fissuras) e a velocidade de corrosão aumenta por este aumento na concentração de cloretos livres junto à barra.

4. CONCLUSÕES

1. De acordo com os resultados eletroquímicos das vigas, abertura de fissuras inferiores a 0,15 mm, não potencializaram a corrosão das armaduras durante o tempo de exposição avaliado.
2. A aplicação de pré-carga acelera a corrosão das armaduras ao permitir um maior ingresso de agentes agressivos.

3. Quando a corrosão de um elemento é acelerada, o aparecimento de uma fissura ocorre com menor perda de material, no entanto, quando a corrosão é natural, é necessária uma maior quantidade de produtos de corrosão para que se inicie a fissura.
4. Os resultados mostraram que existe uma correlação direta entre a abertura da fissura e a espessura de aço perdido por corrosão da armadura, encontrando-se fissuras de maior abertura em elementos solicitados à flexão.
5. Na corrosão natural, para se obter uma determinada abertura de fissura, é necessária menor perda de material por corrosão quando as vigas estão carregadas que sem carga aplicada.

5. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao CONDES (Maracaibo-Venezuela) e ao Instituto Mexicano de Transportes (Queretaro-México) pelo apoio financeiro para este projeto.

6. REFERÊNCIAS

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.