

Análise da interface concreto-aço em corpos de prova expostos à intempérie e imersos em água do mar natural

M. R. Sosa¹, T. Pérez^{1*}, V. M. J. Moo-Yam¹, E. Chávez², J.T. Pérez-Quiroz³

*Autor de Contacto: tezperez@uacam.mx

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.203>

Recepção: 27/06/2017 | Aceitação: 21/12/2017 | Publicação: 31/01/2018

RESUMO

Neste estudo foi avaliado o comportamento eletroquímico de estruturas de concreto armado sem e com adição de cloreto de sódio na água de amassamento, em um ambiente marinho/tropical. O monitoramento consistiu em medir o potencial de corrosão (Ecorr), o avanço da frente de carbonatação (xCO₂) e o registro fotográfico da interface concreto/aço em diferentes estágios do período de exposição. Na exposição aos elementos, observou-se que a adição de NaCl favoreceu o avanço da carbonatação, sem mostrar o início da corrosão. A presença de cloreto é determinante no início e desenvolvimento do processo de corrosão, tanto na exposição à intempérie quanto na imersão.

Palavras chave: comportamento eletroquímico; concreto armado; carbonatação, potencial de corrosão; cloreto.

Citar como: M. R. Sosa, T. Pérez, V. M. J. Moo-Yam, E. Chávez, J. T. Pérez-Quiroz (2018), “Análise da interface concreto-aço em corpos de prova expostos à intempérie e imersos em água do mar natural”, Revista ALCONPAT, 8 (1), pp. 16 – 29,
DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.203>

¹Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche, Av. Heroes de Nacozari No. 480, Campus 6 de Investigaciones, C.P. 24070, San Francisco de Campeche, Campeche, México.

²Secretaría de la Defensa Nacional, Dir. Gral. Ings., U.D.E.F.A., E.M. I. Calz. Mex.-Tac. s/n, Del. Miguel Hidalgo, D. F., México.

³Instituto Mexicano del Transporte, área Materiales Alternativos Km 12 + 000 carretera Estatal no. 431 El Colorado – Galindo S/N, Sanfandila, Pedro Escobedo. Queretaro, México; C.P. 76703

Informação Legal

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2018, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2018.

Analysis of the concrete-steel interface in specimens exposed to the weather and immersed in natural sea water

ABSTRACT

The electrochemical behavior in reinforced concrete elements without and with addition of sodium chloride (NaCl) in the mixing water, in exposed in a marine/tropical environment was evaluated. The monitoring consisted in measuring corrosion potential (E_{corr}), carbonation front advance (x_{CO_2}) and photographic record of the concrete/steel interface at different stages of the exposure time period. In the outdoor exposure it was observed that the addition of NaCl in the mixing water favored the advancement of carbonation, without showing the beginning of corrosion. The presence of chloride was determinant in the beginning and development of the process of corrosion, as much in exposure to the intemperie as in immersion.

Keywords: electrochemical behavior, reinforced concrete, carbonation, corrosion potential, chloride.

Análisis de la interfaz concreto-acero en especímenes expuestos a la intemperie e inmersos en agua de mar natural

RESUMEN

Se evaluó el comportamiento electroquímico en elementos de concreto armado sin y con adición de cloruro de sodio (NaCl) en el agua de amasado, en un ambiente marino/tropical. El seguimiento consistió en medir potencial de corrosión (E_{corr}), avance del frente de carbonatación (x_{CO_2}) y registro fotográfico de la interfase concreto/acero en diferentes etapas del período de tiempo de exposición. En la exposición a la intemperie se observó que la adición de NaCl en el agua de amasado favoreció el avance de la carbonatación, sin que se visualizara el inicio de corrosión. La presencia de cloruro fue determinante en el inicio y desarrollo del proceso de corrosión, tanto en exposición a la intemperie como en inmersión.

Palabras clave: concreto reforzado; carbonatación; potencial de corrosión; interfase concreto-acero, ión cloruro.

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade da infraestrutura construída usando concreto armado depende diretamente da qualidade dos materiais e do projeto, considerando o desempenho a ser obtido e o impacto do ambiente particular em que ele será localizado. Quando o concreto é devidamente preparado e moldado, proporciona proteção adequada ao aço que pode ser incorporado ao concreto e durar anos sem mostrar sinais de deterioração. No entanto, a corrosão da armadura ocorre pela destruição do filme de passivação formado naturalmente na sua superfície pelo concreto são. Isso pode ocorrer por dois motivos principais: que existe uma quantidade suficiente de cloretos ou outros íons despassivantes (Rosas et al, 2014), ou que a alcalinidade do concreto diminui ao reagir com CO_2 presente no ambiente [Helene et al, 2009; Castro et al, 2000a; Papadakis et al, 1991a].

Atualmente, a deterioração do concreto por fatores ambientais é um grande problema observado na construção (Papadakis et al, 1991b). Para as áreas urbanas, o mais comum é o processo de carbonatação. Nas regiões costeiras, os principais agressores são cloretos, sulfatos e umidade (Merchers et al, 2009, Ye et al, 2012, Zirou et al, 2007). No entanto, o CO_2 está cada vez mais presente na deterioração do concreto no sudeste do México (Solis et al, 2005, Moreno et al, 2004,

Castro-Borges et al, 2013, Castro et al, 2000b). Quanto à cidade de San Francisco de Campeche, local experimental deste trabalho, observou-se que o processo de ingresso da brisa do mar está condicionado pela direção dos ventos, de tal forma que, embora seja uma zona costeira, o depósito de sais na superfície de elementos de concreto é limitado (Pérez, 2000). Embora não haja presença de indústria, é importante determinar o progresso da carbonatação em elementos de concreto a serem tomados como critério de durabilidade na construção (Chavez-Ulloa et al, 2013, San Miguel et al, 2012).

Um dos parâmetros mais utilizados para estimar a condição da armadura incorporada ao concreto é a medição do potencial de meia-célula, também chamado de potencial de corrosão (E_{corr}). As normas ASTM C876-09 e NMX-C-495-ONNCCCE-2015 estabelecem intervalos de E_{corr} que se aproximam do estado da superfície da armadura. Com os valores obtidos, é viável elaborar um diagnóstico do grau de corrosão da armadura, com a reserva de complementá-lo com medidas de variáveis ambientais, frente de carbonatação e perfil de ingresso de íons cloreto, entre outros. Embora existam métodos indiretos para conhecer o dano por corrosão, a melhor opção, quando possível, é observar diretamente a superfície do aço e fazer um registro fotográfico.

Este artigo apresenta a análise do efeito de duas condições de exposição, do teor de cloreto de sódio e do ataque de carbonatação sobre a deterioração do concreto armado em um ambiente marinho / tropical, no sudeste do México. A presença de cloretos nas amostras expostas à atmosfera (clima) é determinante na condição da interface, refletida no valor do E_{corr} , avanço da frente de carbonatação e oxidação das armaduras. Quanto às amostras expostas em imersão, o íon cloreto é o principal agente agressor que afeta o processo de corrosão da armadura.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Elaboração de Amostras

Para a fabricação do concreto armado, foi utilizado cimento Portland Tipo I de marca comumente usada na região. Os agregados graúdos e miúdos são habituais na região, produto do esmagamento de calcário de Campeche. Foram utilizadas barras convencionais de aço comercial de 0,95 cm de diâmetro. O cloreto de sódio (NaCl) adicionado à água de mistura foi comercial disponível no mercado. A mistura foi feita com água potável do abastecimento municipal.

Duas séries de 3 amostras de concreto armado sem e com 3,5% em peso de cloreto de sódio (NaCl) adicionados na água de amassamento, em similaridade com a concentração salina de água do mar (Genescá, 1994), foram fabricados com a mesma relação água / cimento de 0,66, de acordo com as dosagens presentes na Tabela 1 e as dimensões presentes na Fig. 1.

Tabela 1. Dosagem das amostras de concreto armado (NOM C-159-85).

Cimento (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	NaCl (g/l)
312.5	750	687.5	206.25	35
312.5	750	687.5	206.25	0

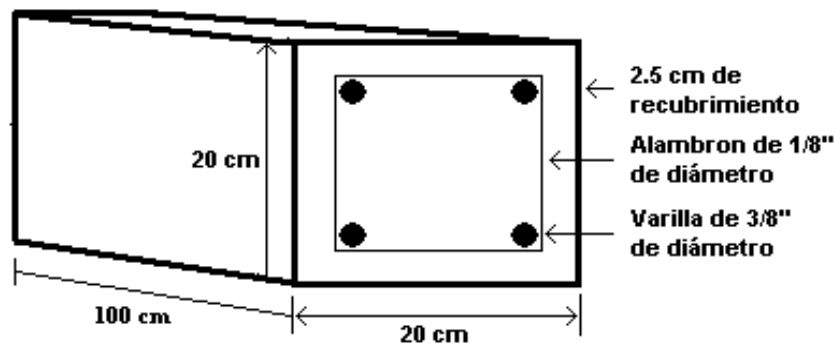


Figura 1. Esquema das amostras estudadas.

A cura foi realizada durante 28 dias (NOM C-159-85, ASTM C 192-02) e mais tarde, as amostras foram expostas no sudeste do México (na cidade de São Francisco de Campeche, Campeche, México, a 300 metros do litoral), para duas condições de exposição: exterior (ATM) e imersão em água do mar natural (INM). Os elementos expostos ao ATM foram colocados verticalmente sobre uma base de concreto a 30 cm do solo. As amostras expostas no INM foram colocadas em pequenas piscinas e a água do mar natural foi periodicamente renovada a cada mês.

2.2. Medição do Potencial de Corrosão

A medida do potencial de corrosão foi feita de acordo com a norma ASTM C876-09. A Fig. 2a mostra a forma como o potencial de corrosão nos elementos expostos ao ATM foi medido, tomado em cinco pontos nas amostras em alturas diferentes da superfície do concreto, usando um eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre saturado (Cu / CuSO₄ (sat)). A medição do potencial de corrosão nas amostras expostas no INM foi feita usando um eletrodo de referência de cloreto de prata saturado de prata (Ag / AgCl (sat)) imerso na água do mar em um lado da amostra, veja Fig. 2b.

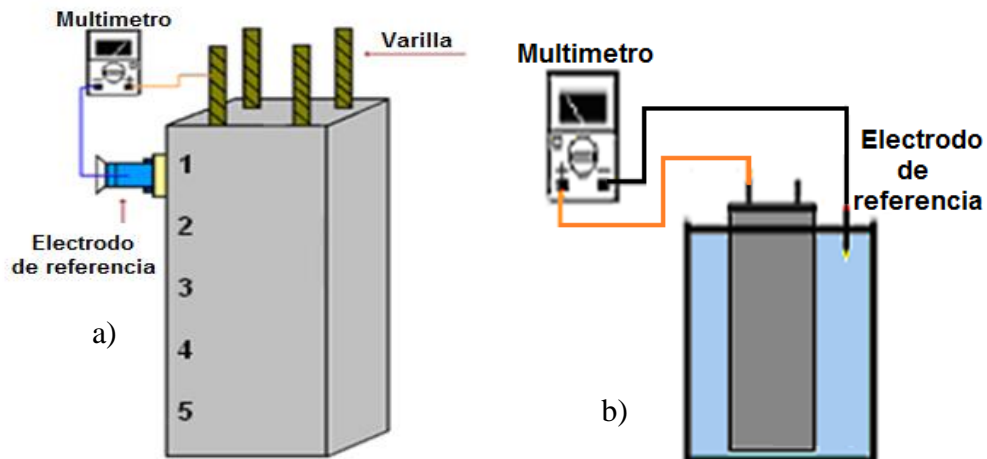


Figura 2. Esquema da medição do potencial de corrosão: a) a ATM e b) em INM.

A Tabela 2 apresenta os critérios propostos para analisar os potenciais de corrosão da armadura (E_{corr}) embutida no concreto. A análise dos potenciais de corrosão será focada no eletrodo de referência cloreto de prata saturado de prata (Ag / AgCl (sat)), de modo que a conversão dos potenciais de corrosão obtidos com o eletrodo de referência de cobre foi realizada - Sulfato de cobre saturado totalizando +50 mV (Berkeley, 1990; Chess, 1998). (Berkeley, 1990; Chess, 1998).

Tabela 2. Critério para medir o potencial de corrosão da armadura no concreto (ASTM C876-09).

E_{corr} vs Cu/CuSO ₄ (sat) (mV)	E_{corr} vs Ag/AgCl(sat) (mV)	Probabilidade de corrosão
Maior que -200	Maior que -150	10% (Zona Passiva)
Entre -200 y -350	Entre -150 y -300	50% (Zona Incerta)
Menor que -350	Menor que -300	90% (Zona Ativa)

2.3. Medida da Frente de Carbonatação

Para este ensaio, três testemunhos de cada série foram extraídos usando um extrator de testemunhos, veja a Fig. 3a (ASTM C42 / C42M). Este procedimento foi realizado em 4 períodos de seis meses (6, 12, 18, 24). Os testemunhos foram removidos na parte do meio e paralelos à armadura, veja a Fig. 3a.

O avanço da frente de carbonatação foi medido usando indicadores ácido-base. A fenolftaleína é o indicador comumente usados e sua variação de cor varia entre pH 8.2 e 9.8 variando a sua cor de violeta incolor para violeta avermelhado. A timolftaleína é outro indicador que foi usado, uma vez que sua variação está entre pH 9,3 e 10,5 com um tom incolor a azul (Troconis de Rincon et al, 1997, Padrão UNE-112-011). Desta forma, é possível apreciar visualmente a mudança de pH da pasta de concreto e determinar o avanço da frente de carbonatação.

Os indicadores ácido-base foram aplicados até 1 cm abaixo do nível da armadura em partes iguais, veja a Fig. 3b. Foi realizado um registro fotográfico do avanço da carbonatação medido por uma régua. Em um concreto de boa qualidade, observa-se a cor característica do indicador utilizado e observa-se um concreto carbonatado na ausência de cor, relacionada à diminuição do pH devido à reação do dióxido de carbono (CO₂) com os componentes alcalinos do concreto.

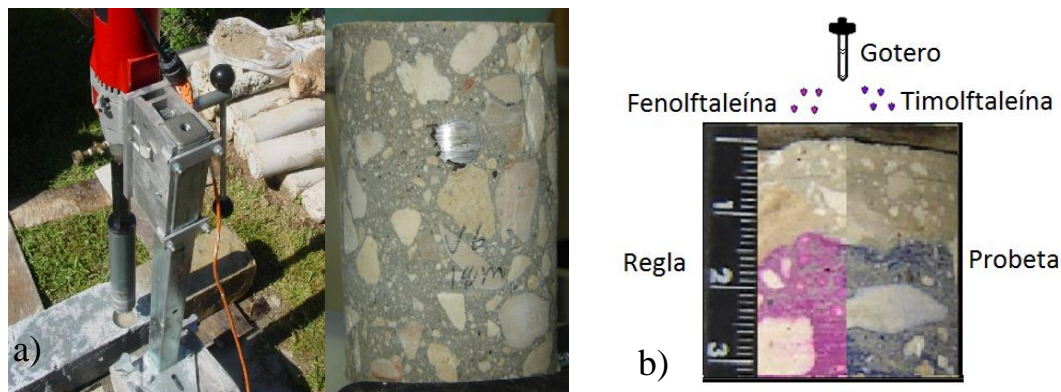


Figura 3. Frente de carbonatação: a) Extração de testemunho e b) Aplicação do indicador.

Os resultados apresentam o avanço médio da frente de carbonatação dos testemunhos extraídos para determinar visual e graficamente o dano que o meio de exposição gerou no concreto e consequentemente a probabilidade de que a corrosão da armadura possa ocorrer.

3. RESULTADOS

3.1. Frente de carbonatação

As Figuras 4 e 5 mostram o registro fotográfico da velocidade de carbonatação nos testemunhos do concreto obtido a partir de amostras feitos sem (0%) e com 3,5% em peso de cloreto de sódio

(NaCl) adicionado na água de mistura, durante dois anos de exposição ao ATM e ao INM, respectivamente.

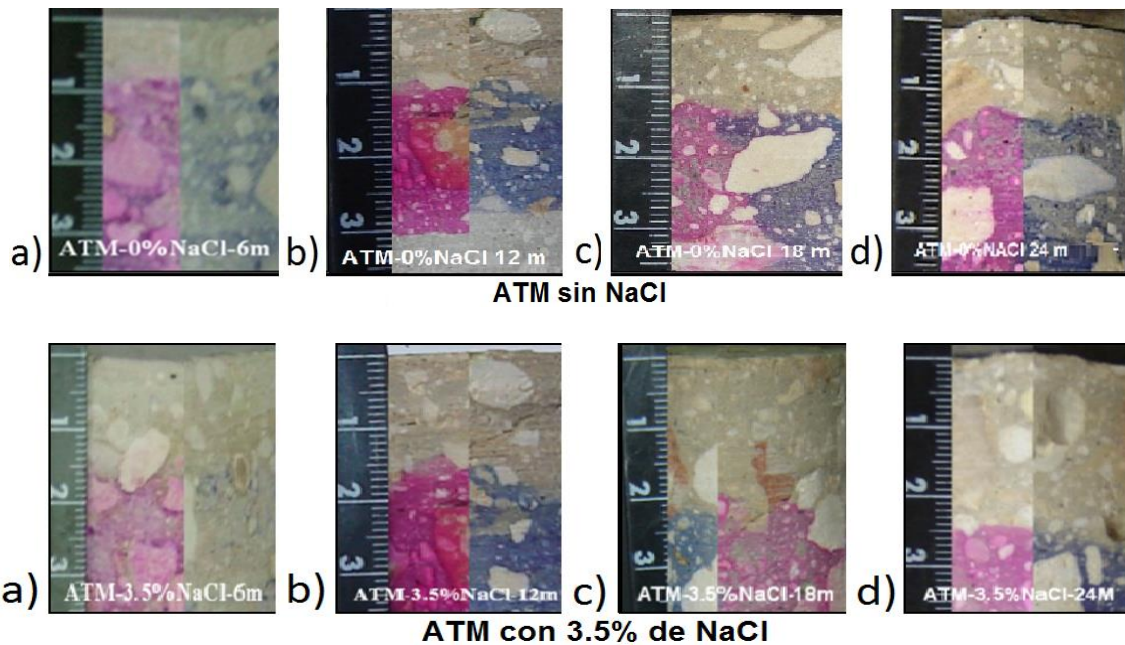


Figura 4. Velocidade de carbonatação: a) 6, b) 12, c) 18 e d) 24 meses, respectivamente sem (0%) e com (3.5%) adição de NaCl, em testemunhos de concreto expostos a ATM.

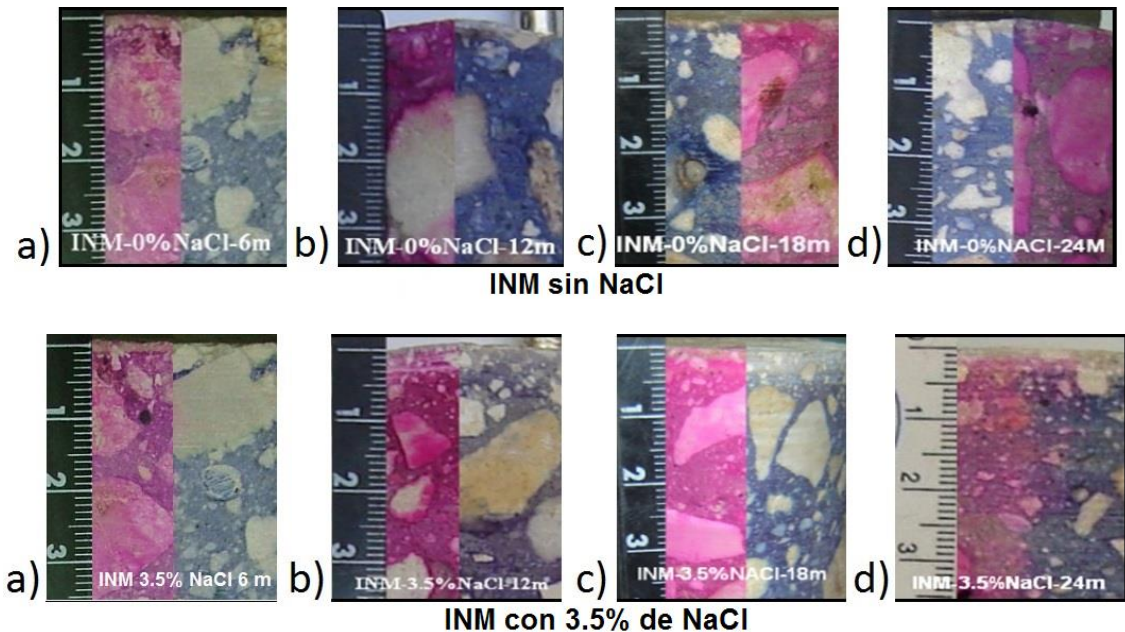


Figura 5. Velocidade de carbonatação: a) 6, b) 12, c) 18 e d) 24 meses, respectivamente sem (0%) e com (3.5%) adição de NaCl, em testemunhos de concreto expostos a INM.

No registro fotográfico dos elementos expostos ao ATM, na Fig. 4, observa-se que aqueles feitos sem adição de NaCl apresentam um progresso médio de 8 mm de profundidade aos 6 meses de exposição e uma profundidade de 15 mm aos 24 meses. O efeito mais notável é observado nos elementos com adição de NaCl na água de mistura, que apresenta um maior avanço na carbonatação, atingindo uma profundidade de 15 mm em média nos primeiros 6 meses e 25 mm em média aos 24 meses, atingindo o nível do cobrimento estabelecido para a armadura.

No caso dos elementos expostos ao INM, Fig. 5, observa-se um avanço insignificante da carbonatação para ambas as condições de fabricação de concreto armado, atingindo uma média aproximada de 1 mm de profundidade durante os 24 meses que o estudo durou. Os resultados eram esperados, devido à baixa solubilidade do CO₂ na água do mar, quando os elementos foram imersos na água do mar.

De acordo com a análise dos resultados da frente de carbonatação, houve apenas um efeito significativo nos elementos expostos ao ATM relacionados ao conteúdo de NaCl adicionado na água de mistura que influenciou o avanço da carbonatação no concreto. Na Tabela 3, os resultados da média de três amostras são registrados. Como esperado, a reação entre o CO₂ e os componentes alcalinos do concreto é favorecida quando o concreto está entre 50% e 80% do teor de água nos poros do concreto, que são as condições ideais para a carbonatação (Pérez, T. et al, 2006; Corvo, F. et al., 2008). Cada condição experimental mostra proximidade em seus valores de k durante o período de exposição. Foi relatado que o padrão de vento em Campeche, devido à sua posição geográfica, é predominante de terra para mar (Gutiérrez e Winant, 1996) e, por isso, é um ambiente marinho tropical atípico (Pérez, T., 2000).

Tabela 3. Frente de carbonatação de elementos expostas às intempéries (ATM).

Tempo (anos)	Avanço da carbonatação (mm)		Constante k (mm/ano ^{1/2})	
	Sem NaCl	Com NaCl	Sem NaCl	Com NaCl
0.5	8	15	11.3	21.2
1.0	10	17	10.0	17.0
1.5	12	21	9.7	17.1
2.0	15	25	10.6	17.6
Média			10.4	18.2

O maior avanço da carbonatação nos elementos com adição de NaCl está relacionado ao fato de que os poros do concreto estavam parcialmente saturados por mais tempo, em condições que favoreceram a entrada de CO₂ e, conseqüentemente, a reação com os componentes do concreto aumentou, acelerando o avanço da carbonatação em concreto (Trocónis de Rincón et al, 1997). Esta proposta coincide devido à umidade relativa (HR) predominante nesta região em aproximadamente 70% de média anual, e principalmente a NaCl devido à sua propriedade higroscópica que favoreceu a manutenção da umidade interna. Juntos propiciaram as condições para acelerar o avanço da carbonatação, como observado nos elementos expostos ao ATM com a adição de NaCl na água de mistura (Pérez et al, 2010).

O avanço da carbonatação nos elementos sem adição de NaCl, mesmo quando em dois anos não atingiram o nível de aço, sua constante na média de 10,4 mm / ano^{1/2} é significativa porque esses valores são mais parecidos com os relatados em ambientes urbanos (Moreno, et al., 2016). A novidade desses resultados em um ambiente marinho / tropical está relacionada a uma maior quantidade de poro devido à relação água / cimento de 0,66 adotada na elaboração dos concretos. Sob essas características, o avanço da carbonatação dependerá da umidade relativa do meio para que permaneça o tempo necessário dentro do concreto e a reação do CO₂ com os componentes alcalinos do concreto possa ser realizada. Propõe-se que as características higroscópicas do NaCl favorecem a retenção de água nos poros do concreto, mantendo as condições de umidade propícias à carbonatação do concreto.

3.2. Potencial de corrosão (Ecorr)

A Fig. 6 mostra os resultados médios de Ecorr da armadura em elementos de concreto fabricados sem (0%) e com 3,5% em peso de cloreto de sódio (NaCl) adicionado na água de amassamento, durante 2 anos de exposição para o ATM e o INM.

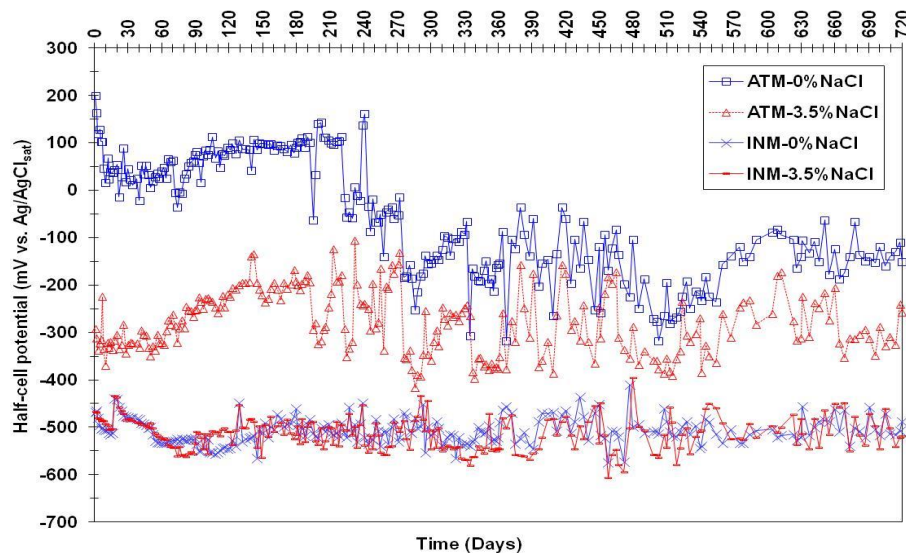


Figura 6. Potencial de corrosão da armadura vs. tempo.

Exposição atmosférica

Os potenciais de corrosão dos elementos preparados sem adição de NaCl expostos ao ATM (ATM-0% NaCl), de acordo com os critérios da Tabela 2, mostraram um comportamento passivo até o dia 270; mais tarde, os potenciais tornaram-se mais negativos com variações entre a zona passiva e incerta, comportamento que prevaleceu até o final do experimento. No caso daqueles fabricados com adição de NaCl expostos à mesma condição (ATM-3,5% NaCl), a armadura começou com uma alta probabilidade de corrosão do aço (zona ativa) durante os primeiros 40 dias, para depois diminuir sua atividade e permanecem dentro da zona incerta até o dia 200 e depois apresentam um comportamento variável até o final do estudo, entre a zona ativa e incerta. A instabilidade do Ecorr é devido a variações nas condições meteorológicas, como temperatura e umidade relativa, bem como a estação chuvosa.

Nas amostras de concreto armado exposto ao ATM, o efeito da carbonatação foi descartado, embora para a série com adição de NaCl atingiu o nível do aço até 24 meses. Vale ressaltar que o efeito é atribuído principalmente à ação dos cloretos, que modificam as condições da interface da armadura do concreto, causando uma polarização que desloca o Ecorr para valores mais negativos. Caso contrário, quando a presença de agentes corrosivos é descartada, seja por ataque de CO₂, cloretos ou ambos, como na série sem a adição da atividade, não é atribuída ao início da corrosão, mas à saturação parcial de água nos poros do concreto devido às condições características da região ao estar em um ambiente tropical, onde a umidade relativa em média é de 65% a 80% (Pérez et al, 2010). Além disso, o fato de que a reação de carbonatação ocorre requer água, o que, em parte, influenciou o progresso da carbonatação no concreto para cada série. Outro aspecto a considerar é a característica química do concreto que envolve a armadura, que no início do estudo é a primeira resistência contra os agentes que causam a corrosão do aço. Como é observado, as amostras sem adição de NaCl são passivas e as fabricadas com adição de NaCl mostram potenciais com alta probabilidade de corrosão.

Exposição por imersão

Quanto aos elementos expostos ao INM, ambas as séries, com e sem 3,5% de NaCl (INM-0% NaCl e INM-3,5% NaCl), permaneceram dentro do intervalo entre -400 e -500 mV vs eletrodo Ag / AgCl que corresponde a um comportamento de alta probabilidade de corrosão da armadura (zona ativa), durante os 720 dias de exposição que duraram o experimento. Estes valores pertencem à área de corrosão ativa que indica uma alta probabilidade de corrosão na armadura. Esse comportamento é devido à polarização induzida pela falta de oxigênio na interface da haste de concreto que produz o deslocamento de E_{corr} para valores mais negativos (Ávila, et al., 1994). Esta condição é predominante sobre a presença de cloreto na água da mistura.

No caso da série exposta ao INM, o ataque de carbonatação é praticamente nulo, deixando como principal causa da corrosão os cloretos presentes na água do mar e a adição na água de mistura. Nesse sentido, ambas as séries apresentaram o mesmo comportamento eletroquímico com alta probabilidade de corrosão. Sob essas características, também é necessário levar em consideração que o aço em condições de imersão é exposto a um meio pobre em oxigênio, o que torna os potenciais mais negativos, semelhante ao que foi relatado.

3.2. Registro fotográfico

As figuras 7 e 8 mostram o registro fotográfico da inspeção visual da interface da armadura do concreto em amostras de concreto feitos sem (0%) e com 3,5% em peso de NaCl adicionado na água de mistura durante 2 anos de exposição ao ATM e ao INM.

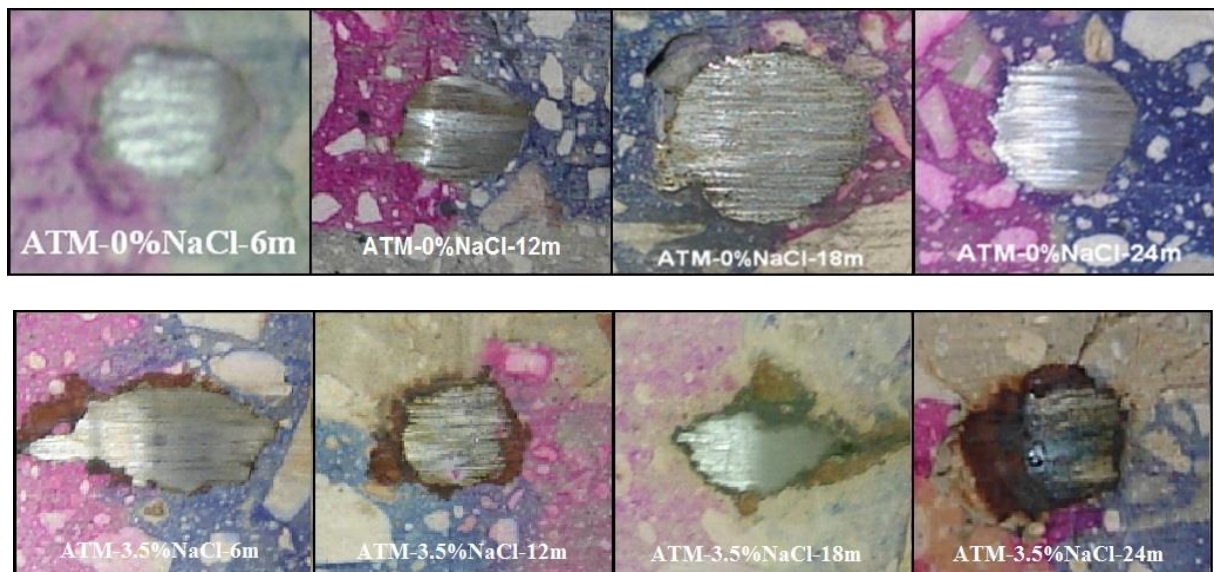
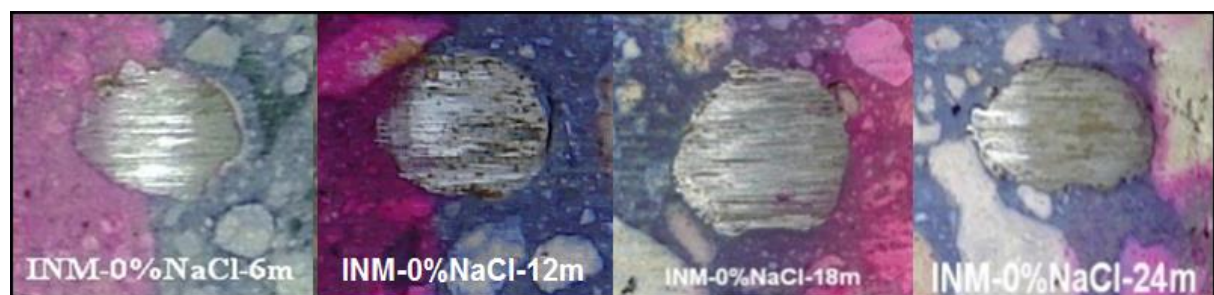


Figura 7. Registro fotográfico a 6, 12, 18 e 24 meses da interface concreto-armadura em amostras de concreto expostas a ATM.



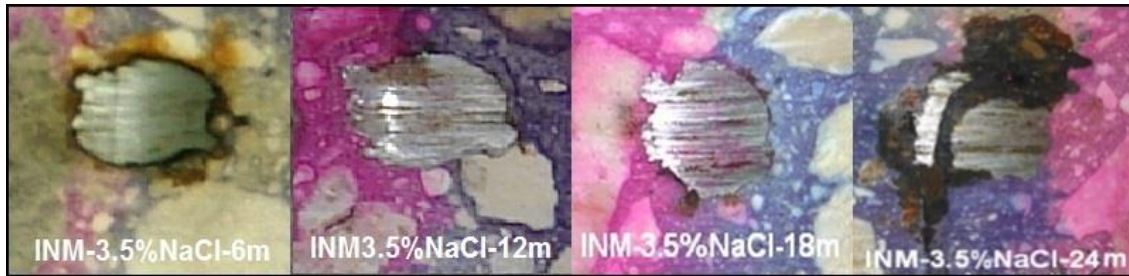


Figura 8. Registro fotográfico a 6, 12, 18 e 24 meses da interface concreto-armadura em amostras de concreto expostas a INM.

Exposição atmosférica.

Nos elementos fabricados sem adição de NaCl exposto ao ATM, Fig. 7, nenhum produto de corrosão é distinguido na interface da armadura do concreto para os quatro períodos. Ao comparar esses resultados com os elementos com adição de 3,5% de NaCl, os produtos de corrosão são observados na interface da armadura do concreto nos primeiros 6 meses e de forma semelhante nos três períodos subsequentes até o final do experimento de 24 meses.

A ausência de produtos de corrosão nos elementos sem adição de NaCl, exposta ao ATM, concorda com o comportamento eletroquímico da passividade do aço reportado nos potenciais de corrosão nos primeiros 270 dias. No entanto, subsequentemente passa a potenciais incertos de corrosão, comportamento possivelmente relacionado à variação de parâmetros ambientais. Quando a ação do CO₂ é descartada, bem como a presença de cloretos ao nível da haste, os potenciais incertos são atribuídos a variações nas condições ambientais, pois nenhum produto de corrosão foi observado durante os 2 anos que o estudo durou. Portanto, esse comportamento é atribuído à umidade relativa, precipitação e temperatura predominantes no sudeste do México, o que favorece e dá as condições para levar o aço a potenciais em valores incertos (Pérez et al, 2010).

A presença de produtos de corrosão nas amostras preparadas com adição de NaCl, exposta ao ATM, é atribuída principalmente aos cloretos presentes desde o início do estudo, quando o efeito da carbonatação foi descartado, já que atingiu o nível da haste em até 2 anos após o encerramento do estudo. Estes resultados concordam com os potenciais de corrosão, no entanto, com o registro fotográfico, não é viável saber com precisão o tempo de início da corrosão. O E_{corr} que indica alta probabilidade de corrosão durante os primeiros 90 dias é evidência de ataque ao aço pela presença de íons de cloreto. Nesse sentido, devemos levar em consideração que o concreto recém-fabricado tem a propriedade química que protege o aço contra a corrosão. No entanto, sob condições de exposição, o aço conseguiu reduzir sua atividade, permanecendo dentro dos potenciais de corrosão da zona incerta, até 210 dias. Portanto, a atividade de corrosão diminui, com valores de E_{corr} menos negativos dentro da zona incerta. A competição das reações de passivação-depassivação na interface é evidência (Pérez, 2000). Neste caso, observou-se um efeito semelhante ao relatado para as amostras sem adição de NaCl, aproximadamente aos 210 dias de exposição, onde a competição entre o ataque dos cloretos e a proteção química do concreto tentam manter a camada passiva no aço. Isso é atribuído ao fato de que os potenciais de corrosão flutuam entre a zona incerta e a zona ativa, mantendo esse comportamento até o final do estudo. Nesse sentido, nas condições apresentadas, os valores incertos obtidos estão relacionados ao ataque dos cloretos para quebrar o filme passivo e continuar a corrosão do aço.

Exposição por imersão

Naqueles expostos ao INM, Figura 8, pode-se observar que nos elementos sem adição de NaCl não há formação significativa de produtos de corrosão na interface da armadura do concreto nos quatro períodos; enquanto que nos elementos com 3,5% de NaCl adicionado na água de mistura,

a oxidação é detectada seis meses após o início da experiência, no entanto, a corrosão não está completa na interface, já que nem todas as áreas apresentam produtos de corrosão. Propõe-se que o dano no filme seja limitado pela falta de oxigênio devido à imersão na água do mar, de modo que o íon cloreto seja a causa da corrosão.

Nas amostras preparadas com adição de NaCl expostas ao INM, a presença de óxidos na interface da armadura do concreto nas quatro etapas do registro fotográfico coincide com os resultados de potenciais de corrosão com alta probabilidade de corrosão obtidos nos 2 anos de estudo. Isto é atribuído principalmente aos cloretos que foram adicionados à água de mistura, uma vez que os elementos de concreto foram assim fabricados, já que o ataque de CO_2 foi descartado.

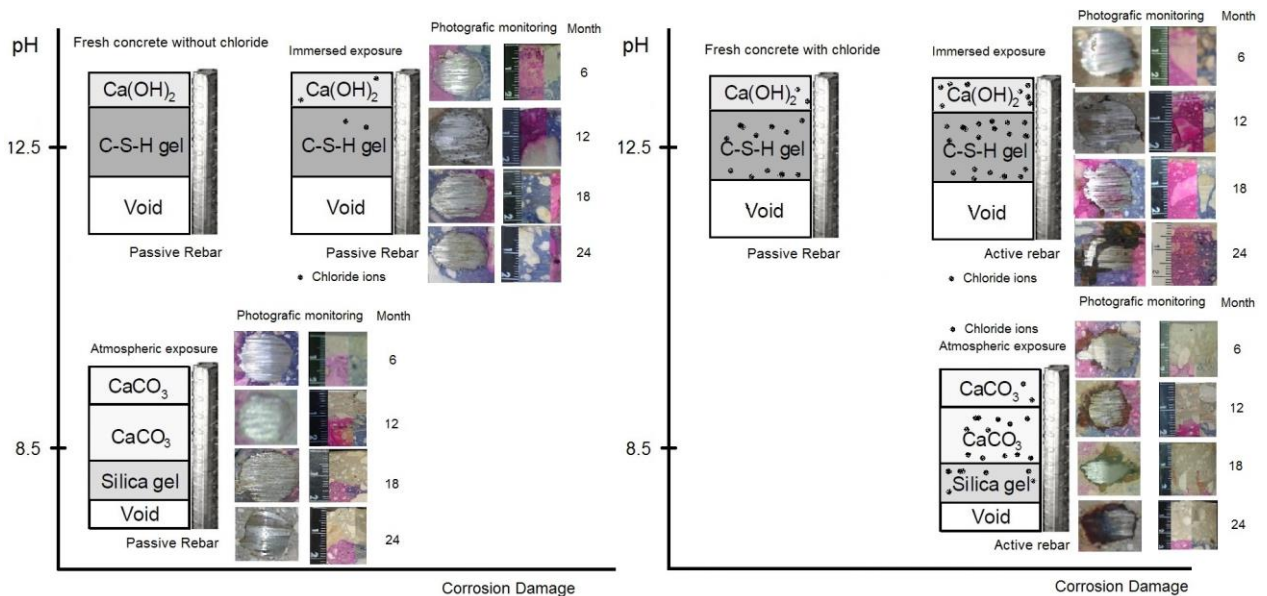


Figura 9. Resumo do progresso de danos no concreto armado sob as condições de exposição analisadas.

A presença do agente agressivo é o fator determinante para a corrosão começar na armadura, desde que as condições sejam favoráveis. Como neste caso e o observado nas amostras com a adição de NaCl exposto ao ATM. Caso contrário, foi observado nas amostras sem adição de NaCl expostas ao ATM e ao INM, onde a ação do CO_2 e a ausência de cloretos no nível da haste foram descartadas, deixando apenas as condições ambientais características do México do sudeste como influência do comportamento eletroquímico e na água do mar. Neste sentido, é importante determinar a presença do agente corrosivo para compreender e interpretar os potenciais de corrosão, como foi observado nas amostras preparadas sem e com adição de NaCl. Uma vez que conhece a presença do agente corrosivo e também a presença significativa de água, um elemento importante e necessário para que as reações químicas de degradação do concreto possam ser realizadas e conseqüentemente a corrosão da armadura.

Em geral, o Ecorr concorda com o registro fotográfico após 6 meses. Os potenciais sozinhos não fornecem informações sobre quando a corrosão do aço poderia ter começado significativamente, como foi observado nas amostras expostas ao ATM com 3,5% de NaCl. Somente se tem a certeza de que a corrosão é inevitável quando os cloretos já estão presentes ao nível da armadura.

A Fig. 9 exemplifica o dano encontrado nas amostras. Para aquelas expostas ao ATM, é evidente que a carbonatação leva a uma diminuição do pH do material, embora não seja suficiente para ativar o aço, tanto para amostras feitas sem como com NaCl. Enquanto isso, os íons de cloreto existentes atingem o ponto crítico para iniciar o surto de corrosão apenas para amostras feitas com NaCl. Nas amostras imersas em água do mar, o detonador é o íon de cloreto, como

observado na existência de óxidos de o primeiro período de exposição para amostras feitas com NaCl. Aquelas feitas sem NaCl não desenvolveram corrosão na interface de concreto-aço.

4. CONCLUSÕES

A carbonação não foi um fator para o desenvolvimento da corrosão em amostras de concreto armado exposto a condições atmosféricas ou em imersão. Somente as amostras preparadas com adição de NaCl na água de amassamento, expostas ao ATM, atingiram uma profundidade de 25 mm ao nível da haste, mas até 2 anos após o início do estudo. Para amostras sem adição de NaCl, o avanço da carbonatação foi menor, com uma profundidade média de 15 mm no final do estudo. A adição de NaCl na água de amassamento e o ambiente característico do sudeste do México favoreceu o avanço da carbonatação para as amostras expostas ao clima, atingindo o nível do aço em dois anos do estudo, ao contrário dos elementos nos quais não foi adicionado NaCl. Isto é devido às propriedades higroscópicas do NaCl, que juntamente com a umidade relativa do ambiente marinho tropical, mantêm a umidade nos poros do concreto por mais tempo, o que é propício para as reações de carbonatação com os componentes alcalinos do concreto.

Nas amostras sem adição de NaCl, expostas ao ATM e ao INM, não foram observados produtos de corrosão na interface do concreto e aço, evidenciando que os íons de cloreto são o fator determinante para depassar a interface.

No caso de amostras com adição de NaCl, observou-se corrosão na interface concreto-aço, que está de acordo com os potenciais de corrosão, para ambas as condições ambientais. Esse comportamento foi atribuído principalmente aos cloretos, já presentes na elaboração das amostras na interface da armadura do concreto. Portanto, os cloretos foram o principal agente para iniciar e desenvolver o processo de corrosão, evidenciando a presença de produtos de corrosão na interface armadura/concreto em ambas as séries de amostras feitas com NaCl na água de mistura. A inspeção visual da interface da armadura do concreto foi decisiva para confirmar os intervalos de valores dos potenciais de corrosão do aço de acordo com as variáveis analisadas.

Os resultados obtidos confirmam que os potenciais de corrosão podem dar origem à inferências incertas quando os poros de concreto estão saturados de água. Portanto, é sabido que, se o agente corrosivo atingiu o nível da armadura (barra/haste), oferece maior certeza para determinar a probabilidade de corrosão na armadura, conforme observado ao comparar as amostras preparadas sem e com a adição de NaCl expostas ao ATM e INM. Isso está relacionado ao tipo de exposição que levou os potenciais a valores mais negativos, devido ao acesso limitado de oxigênio pela saturação de água, nos poros do concreto e não pela corrosão do aço, conforme confirmado pelo registro fotográfico.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CONACYT (projetos CB-2008-01101891 e CB-2002-C01-40484) pelo apoio parcial.

6. REFERÊNCIAS

ASTM International (2002), “*ASTM C192/C192M-02 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*”. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0192_C0192M-02.

ASTM International (2009), “*ASTM C876-09 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*”. Retrieved from, <https://doi.org/10.1520/C0876-09>.

- ASTM International (2012), “ASTM C42/C42M-12 Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete”. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0042_C0042M-12.
- Berkeley, K. G., Pathmanaban, S. (1990), “Cathodic protection of reinforcement steel in concrete”, Ed. Butterworths, United Kingdom, ISBN 0-408-03270-1.
- Castro, P., Moreno, E. I. and Genescá, J. (2000a), “Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings”. Cement and Concrete Research V. 30, pp. 1565-1571, [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00344-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00344-6).
- Castro, P., Sanjuan, M. A. and Genesca, J. (2000b), “Carbonation of concretes in the Mexican Gulf”, Building and Environment., V. 35, pp. 145-149, [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00009-8)
- Castro-Borges, P., Veleza, L., Balancán-Zapata, M., Mendoza-Rangel, J. M., Juárez-Ruiz, L. A. (2013), “Effect of environmental changes on chemical and electrochemical parameters in reinforced concrete. the case of a tropical marine atmosphere”, International Journal of Electrochemical Science, V. 8, Issue 5, pp. 6204-6211.
- Chávez-Ulloa, E., Pérez-López, T., Reyes Trujeque, J., Corvo, Pérez, F. (2013), “Deterioro de elementos de concreto en medio ambiente marino tropical y cámara de carbonatación acelerada”, Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, V. 36, pp 104-113.
- Chess, P., Gronvold and Karnov, (1998), “Cathodic protection of steel in concrete”, E&FN Spon, United Kingdom, ISBN 0-419-23010-6.
- Corvo, F., Pérez, T., Martin, Y., Reyes, J., Dzib, L. R., González-Sánchez, J., Castañeda, A. (2008), “Time of wetness in tropical climate: Considerations on the estimation of TOW according to ISO 9223 standard”, Corrosion Science, V. 50, pp. 206–219.
- Genescá, J. (1994). *Más allá de la Herrumbre III: Corrosión y medio ambiente*. 1ra Edición. Fondo de Cultura Económica. México, D.F.
- Gutiérrez, G. and Winant, C. D. (1996) “Seasonal patterns of winds stress and wind stress curl over the Gulf of Mexico”. Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No. 8, pp. 127.
- Helene, P., Castro-Borges, P. (2009), “A novel method to predict concrete carbonation”, Concr. Cem. Investig. Desarro. V. 1, No. 1, pp. 25-35.
- Melchers, R. E., Li, C. Q. (2009), “Reinforcement corrosion initiation and activation times in concrete structures exposed to severe marine environments”, Cement and Concrete Research, V. 39, issue 11, 1068, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.003>.
- Moreno, E. I., Domínguez Lara, G. G., Cob Sarabia, E. J., Duarte Gómez, F. (2004), “Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración Ingeniería”, Ingeniería, V. 8, No. 2, pp. 117-130.
- NMX-C-495-ONNCCE-2015 (2015), “Industria de la construcción – Durabilidad de estructuras de concreto reforzado – Medición de potenciales de corrosión del acero de refuerzo sin revestir, embebido en concreto – Especificaciones y método de ensayo”
- NOM C-159-85 (1985), “Concreto Elaboración y Curado en Laboratorio de Especímenes”.
- Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis M. N. (1991a), “Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation”. ACI Materials Journal, V. 88, No. 4, pp. 363-373.
- Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis M. N. (1991b), “Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete”, ACI Materials Journal., V. 88, No. 2, pp. 186-196.
- Pérez, T., Castro, P., Genescá, J. (2006), “Influence of meteorological parameters over the chloride ingress to concrete exposed to marine environment”. II Congreso Nacional ALCONPAT México 2006, 8 y 9 de Noviembre de 2006, Tampico, Tamaulipas, México ISBN 968 – 9031 -14 – 7.

- Pérez, T. (2000), “*Kinetics study of the concrete steel embedded reinforcement subject to different exposure conditions at marine environment*”, PhD thesis, UNAM, México.
- Pérez, T., Sosa, M. R., Dzib, L. R., Reyes, J., Camacho, R., Troconis-Rincon, O. y Torres-Acosta, A. (2010), “*Reinforced concrete beams deterioration in tropical marine environment: DURACON-Campeche*”. Concrete Under Severe conditions – Castro Borges et al (eds), Editorial Taylor & Francis Grup, London, pp. 413-420, ISBN: 978-0-415-59316-B.
- Rosas, O., Maya-Visuet, E., Castaneda, O. (2014), “*Effect of chloride ions on the electrochemical performance of LDX 2003 alloy in concrete and simulated concrete-pore solutions*”, J. Appl. Electrochem., V. 44, issue 5, pp. 631-646, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10800-014-0668-0>.
- San Miguel, G. F., Tamez, P. V., Alvarado, M. R., Alcorta, R. G., Garza, R. M., Farias, J. P. (2012), *Deterioro por corrosión de elementos de concreto armado de un edificio industrial*. Revista ALCONPAT, V. 2, No., 3, pp. 195 – 210. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2i3.38>.
- Solís Carcaño, R. G., Moreno, E. I., Castro Borges, P. (2005), “*Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera. Ingeniería*”, Ingeniería, V. 9, pp. 13-18.
- Trocónis de Rincón, O. (1997), *Manual for inspecting, evaluating and diagnosing corrosion in reinforced concrete structures*. DURAR Network Members. CYTED. ISBN 980-296-541-3, Maracaibo, Venezuela. 1997/1998/2001 (1st ed. 2nd ed. and 3rd ed. in Spanish), 2000 (1st ed. in English).
- Trocónis de Rincón, O., Sánchez, M., Millano, V., Fernández, R., de Partidas, E. A., Andrade, C., Martínez, M., Castellote, M., Barboza, F., Irassar, J. C., Montenegro, R., Vera, A. M., Carvajal, R. M., de Gutiérrez, I., Maldonado, J., Guerrero, C., Saborio-Leiva, E., Villalobos, A. C., Tres-Calvo, G., Torres-Acosta, A., Pérez-Quiroz, J., Martínez-Madrid, M., Almeraya-Calderón, F., Castro-Borges, P., Moreno, E. I., Pérez-López, T., Salta, M., de Melo, A. P., Rodríguez, G., Pedrón, M., Derrégibus, M. (2007) “*Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED*”, Corrosion Science, V. 49, Issue 7, pp. 2832-2843.
- UNE-112-011 (1994), *Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio.*, Madrid, Ed. AENOR.
- Ye, H., Jin, N., Jin, X. and Fu, C. (2012), “*Model of chloride penetration into cracked concrete subject to drying-wetting cycles*”, Construction and Building Materials, V. 36, pp. 259-269.
- Zitrou, E., Nikolaou, J., Tsakiridis, P. E. and Papadimitriou, G. D. (2007), “*Atmospheric corrosion of steel reinforcing bars produced by various manufacturing processes*”, Construction and Building Materials, V. 21, Issue 6, 1161-1169, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.004>.