

Avaliação de problemas patológicos associadas à carbonatação e sulfatos em uma torre de concreto com mais de 50 anos de serviço

E. E. Maldonado-Bandala^{1*}, D. Nieves-Mendoza¹, J. L. Vela-Jiménez², P. Castro-Borges³.

*Autor de Contacto: erimaldonado@uv.mx

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.284>

Recebido: 14/12/2017 | Aceito: 22/12/2017 | Publicado: 30/01/2018

RESUMO

Este artigo apresenta e discute os resultados da inspeção de corrosão e uma proposta para reparar as paredes exteriores de uma torre de concreto armado localizada na costa sul do estado de Veracruz. A inspeção incluiu uma pesquisa de danos com um drone e testes físicos, químicos, mecânicos e eletroquímicos que permitiram a caracterização de danos de concreto e corrosão. O mecanismo governante de corrosão na estrutura estudada foi a carbonatação. No entanto, a emissão de sulfatos neste ambiente industrial foi refletida na resistência à compressão, fissuras e delaminações. As condições acima foram contempladas nas ações de reparo propostas para ampliar sua vida útil.

Palavras chave: inspeção, torre, concreto armado, taxa de corrosão, diagnóstico, vida útil.

Citar como: E. E. Maldonado-Bandala, D. Nieves-Mendoza, J. L. Vela-Jiménez, P. Castro-Borges (2018), “Evaluación de problemas patológicos asociados a carbonatación y sulfatos en una torre de concreto con más de 50 años de servicio”, Revista ALCONPAT, 8 (1), pp. x-x, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.284>

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana, Circ. Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, C.P. 91000, Xalapa, Veracruz, México.

² Consorcio RNC S.A. de C.V. Esteban Mascareñas 44, Col Mártires de Chicago C.P. 91090, Xalapa, Veracruz, México.

³ Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Mérida, Antigua Carretera a Progreso Km. 6, 97310 Mérida, Yucatán, México; Tels. (999) 942-94-00. Fax: (999) 981-29-23

Informação Legal

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

Editor: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos ao No. 04-2013-011717330300-203 uso exclusivo, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional do Direito de Autor. Responsável pela atualização mais recente deste número, ALCONPAT Unidade Computing, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

A reprodução total ou parcial do conteúdo e imagens publicadas sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C é proibida.

Qualquer discussão, incluindo a réplica dos autores, serão publicados na terceira edição do 2018, desde que a informação é recebida antes do encerramento da segunda edição de 2018.

Evaluation of pathologies associated with carbonation and sulphates in a concrete tower with more than 50 years of service

ABSTRACT

This work presents and discuss the results of a corrosion inspection, as well as a repair proposal for the external walls of a reinforced concrete tower which is in the southern coast of the Veracruz state. The inspection included a drone guided damage survey together with physical, chemical, mechanical and electrochemical tests that allowed the concrete characterization and corrosion damage. The governing deterioration mechanism of the structure was carbonation of concrete. However, the sulfate emission in this industrial environment was reflected on the compressive resistance, cracks and delaminations. These conditions were taken into account on the proposed actions for repairing and extending the service life of the structure.

Keywords: Inspection, tower, reinforced concrete, corrosión rate, diagnosis, service life.

Evaluación de problemas patológicos asociados a carbonatación y sulfatos en una torre de concreto con más de 50 años de servicio

RESUMEN

En este trabajo se presentan y discuten los resultados de la inspección por corrosión, y una propuesta de reparación de los muros exteriores de una torre de concreto reforzado localizada en la costa sur del estado de Veracruz. La inspección incluyó un levantamiento de daños con un dron, y ensayos físicos, químicos, mecánicos y electroquímicos que permitieron caracterizar el concreto y los daños por corrosión. El mecanismo gobernante de la corrosión en la estructura estudiada fue la carbonatación. Sin embargo, la emisión de sulfatos en ese ambiente industrial se reflejó en la resistencia a la compresión, grietas y delaminaciones. Las condiciones anteriores fueron contempladas en las acciones propuestas de reparación para extender su vida de servicio.

Palavras-chave: inspección, torre, concreto reforzado, diagnostico, vida de servicio.

1. INTRODUÇÃO

Com a recente Reforma Energética que foi implantada no México, o governo federal viu a necessidade de fazer a compra e venda de imóveis improdutivos, que há décadas foram abandonados e, por essa razão, sua degradação devido ao fenômeno de corrosão foi acelerada. Isso, devido à falta de manutenção e exposição a ambientes agressivos onde estão localizados.

A corrosão das estruturas de concreto armado (ECA), particularmente em ambientes industriais, é um problema sério, uma vez que podem ocorrer manifestações patológicas de intensidade significativa, o que pode levar a sérios problemas de funcionamento, segurança, custos excessivos de reabilitação do desempenho desejado, perda de estética e, dependendo do grau de dano, vidas humanas poderiam ser colocadas em risco (Helene, 2003, Sulaimani 1992, Andrade 1992, del Valle et al, 2006)

Para que estruturas como plataformas e instalações de petróleo sejam novamente produtivas, é necessário reabilitá-las e, para isso, é necessário compreender as causas das falhas relacionadas à corrosão e a relação complexa entre as propriedades físicas, químicas e mecânicas do concreto e da armadura.

A importância deste estudo reside na necessidade de reabilitar e colocar em operação as torres de concreto armado, que representam um ativo petrolífero de vital importância econômica para o sul

Avaliação de problemas patológicos associadas à carbonatação e sulfatos em uma torre de concreto com mais de 50 anos de serviço

do estado de Veracruz; por esta razão, uma avaliação foi realizada por meio de uma inspeção do ponto de vista da durabilidade, que contemplou ensaios destrutivos e não destrutivos, como inspeção visual por meio de reconhecimento com veículos aéreos não tripulados (drone), ensaios eletroquímicos, químicos e mecânicos.

Neste estudo, as avaliações e o diagnóstico da estrutura são discutidos, mostrando os mecanismos que permitiram a ocorrência da corrosão, a fim de determinar as medidas corretivas necessárias para ampliar a vida útil desses ativos petrolíferos existentes.

2. PLANO DE INSPEÇÃO

2.1. Inspeção preliminar.

Esta etapa consistiu principalmente em uma visita de reconhecimento da estrutura, caracterização da agressividade do meio ambiente e levantamentos de danos registrados por fotografia dos elementos que compõem a estrutura da torre analisada, devido à complexidade e dimensões da mesma. O reconhecimento visual foi realizado usando um VANT Dron Phantom 4, seguindo o procedimento geral de inspeção preliminar em conformidade com o especificado no Manual DURAR (Troconis del Rincón et al, 1997).

2.2. Inspeção detalhada.

As falhas prematuras de estruturas de concreto armado são principalmente decorrentes da falta de controle de qualidade e equivocados procedimentos de construção, reparação e, até mesmo, reabilitação incorreta (DURACON, 2007). Por esta razão, é importante realizar uma série de ensaios e medidas necessárias para obter as informações requeridas e estabelecer adequadamente as causas para a fase de prevenção apropriada. A referida informação permitiu uma avaliação dos problemas, podendo assim definir a natureza e o mecanismo da corrosão.

2.1.1. Avaliação Eletroquímica.

Com o uso do pacômetro, a posição do aço foi detectada nas áreas onde foram feitas as seguintes medidas eletroquímicas:

- Medição de potenciais E_{corr} vs Cu / CuSO₄, de acordo com as disposições da ASTM C876-09 (2009) e NMX-C-495-ONNCCE-2015 (2015).
- Taxa de corrosão (i_{corr}), utilizando a técnica de resistência à polarização, utilizando um corrosímetro de campo GECOR 10 (Feliú et al, 1993) e as prescrições da norma NMX-C-501-ONNCCE-2015 (2015). As informações obtidas com essas medidas foram úteis, uma vez que permitiram definir claramente os pontos de corrosão ativos na estrutura.

2.1.2. Avaliação físico-química.

Esta avaliação foi realizada através da extração de testemunhos retirados no local para conhecer a qualidade e o potencial real do concreto para proteger ou não a armadura; os ensaios de profundidade de carbonatação foram realizados em conformidade com a norma NMX-C-515-ONNCCE-2016 (2016); a concentração de cloretos foi determinada em conformidade com a norma ASTM C114-05 (2005) e, foi ainda avaliado o ataque químico por sulfatos. Além disso, a avaliação da resistência à compressão simples do concreto foi feita ensaiando os testemunhos em conformidade com a norma NMX-C-083-ONNCCE 2010 (2010).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A torre estudada está exposta a um ambiente agressivo, classificado como B2 de acordo com as Normas Técnicas Complementares do Distrito Federal (NTC-DF). Isso ocorre porque está localizada entre grandes massas de água do mar e gases industriais. 700 m ao norte fica a Lagoa dos Pajaritos, a 2700 m e 600 m ao leste, se encontra o rio Coatzacoalcos e, ao sul, um Complexo Petroquímico, conforme se mostra na Fig. 1.

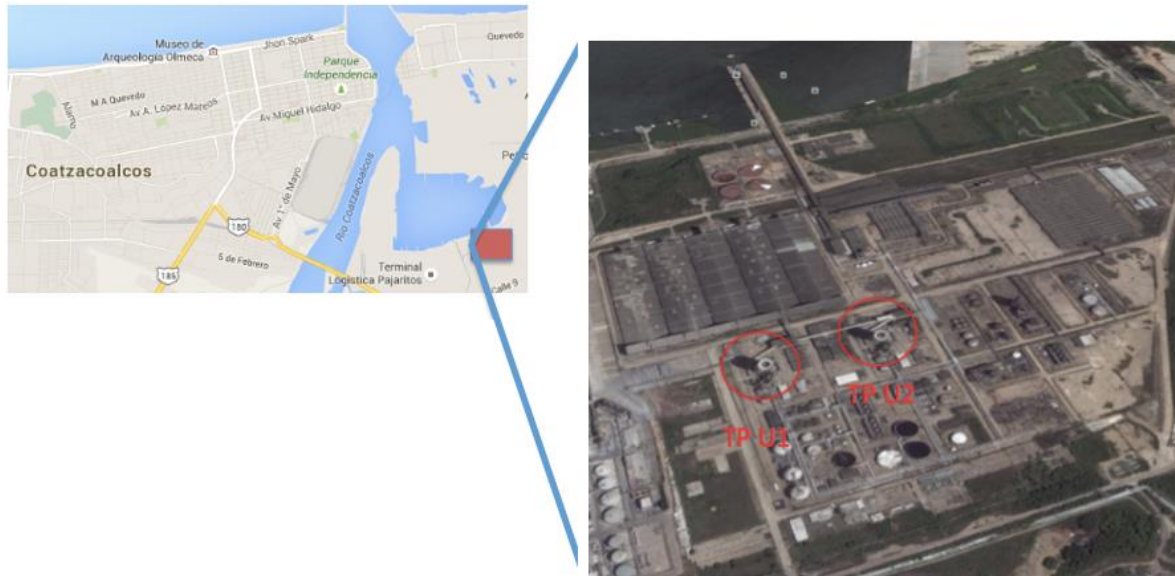


Figura 1. Localização da torre estudada, na imagem está localizada como U2.

Nesta zona, existe um clima tropical úmido com estações chuvosas de junho a setembro, com maior precipitação nos meses de agosto e setembro, onde a porcentagem de chuvas anual oscila entre 6% e 10,5% em relação às chuvas do mês mais seco.

A estrutura em estudo é uma torre cilíndrica com 23 m de diâmetro e mais de 70 m de altura, com espessura de paredes maiores que 30 cm. Construída com elementos de concreto armados com aço AISI 1018, o agregado utilizado para a fabricação do concreto dos elementos estruturais das torres é a areia silicosa e o agregado graúdo de quartzo. Este material é caracterizado por ter alta dureza devido à posição que ocupa na escala de Mohs e composição química onde prevalece o SiO_2 , com forma da partícula arredondada, o que determina uma fraca resistência à tração no concreto. Como as estruturas têm mais de 50 anos de serviço e estão localizadas em um ambiente industrial-marinho, já possuem áreas com deterioração evidentes, alternadas com outras com deterioração imperceptível a olho nú.

3.1. Inspeção visual mediante VANT (drone).

Devido à complexidade geométrica da estrutura, ao acesso limitado a áreas muito altas e para acelerar a pesquisa de danos, foi tomada decisão para realizar a inspeção visual por meio de um VANT (drone), para o qual foi projetada uma missão autônoma através de um plano de voo com base em pontos sequenciais por meio do GPS pelas faces da torre, dividindo-as em Norte, Leste, Sul e Oeste; a velocidade de cruzeiro do equipamento foi controlada de modo a obter imagens de alta qualidade onde os danos visíveis da estrutura pudessem ser apreciados. No escritório foi realizado um pós-processo, onde mapas 2D foram gerados e áreas com maior dano visual foram

delimitadas, como mostrado na Fig. 2.

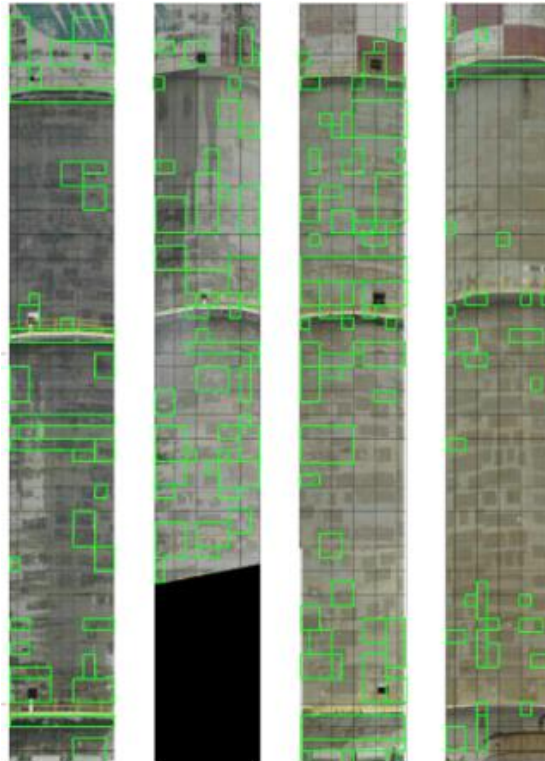


Figura 2. Mapa 2D, Inspeção realizada com veículo aéreo não tripulado (drone) onde se delimitam as zonas com maior dano visual.

Nas imagens obtidas com o drone, observou-se que a estrutura em estudo apresentava uma evidência clara de reparos localizados feitos anteriormente, uma vez que não foram feitos corretamente, acabaram por acelerar os processos de deterioração no sistema aço/concreto (ver Fig. 3 e 4). Além disso, foram encontradas áreas com desprendimentos de concreto, delaminações, armadura exposta com diminuição da seção transversal, bem como fissuras com comprimento variando de 0,50 m a aproximadamente 5,00 m, com aberturas de 3 mm e maiores.



Figura 3. Observam-se armaduras expostas, corrosão, delaminações de concreto em forma de retângulos; Zonas de reparo localizadas realizadas anteriormente.



Figura 4. Detalhe de reparos localizados onde se observa a separação do concreto recente do anterior, o que provoca a delaminação das zonas de concreto de carácter anódico, que geram células de corrosão.

Nesta fase, foi decidido localizar 12 áreas de estudo, nas quais foi aplicado o método de Resistência de Polarização Linear com anel de guarda para confinar a corrente (Andrade et al, 2004), medida de potenciais de meia-célula e ensaios químicos para obter o perfil de carbonatação e a concentração de cloretos e sulfatos, bem como resistência à compressão e medida do cobrimento da armadura com pacômetro.

A Tabela 1 descreve a nomenclatura do código de localização das áreas de ensaio.

Tabela 1. Descrição da nomenclatura na zona de ensaios

Classificação	-	Nível onde foi realizado o ensaio	-	Número de pontos ou zona ensaiada
U2 (Torre)		Np (nível de piso) P1 (passarela 1) P2 (passarela 2) P3 (passarela 3)		01-12
Exemplo U2-P1-P01 Torre -Nível de passarela 1-Zona de ensaio 01				

A Tabela 2 mostra o resumo dos resultados dos ensaios realizados na torre analisada.

3.2. Inspeção detalhada

3.2.1. Resistência à compressão simples do concreto (f_{ck}).

Como pode ser visto na Tabela 2, a resistência à compressão, f_{ck} obtida foi abaixo de 250 kgf/cm², e nas áreas de ensaio U2-P1-P04, foram encontrados valores inferiores a 50% dos recomendados na norma NTC-DF (que é de 300 kgf/cm²), correspondente a um ambiente de exposição classe B2 (superfícies dos membros em contato com o solo e expostos a ambientes externos que são agressivos) de acordo com os Padrões Técnicos Complementares da norma DF (NTC-DF, 2008).

Tabela 2. Resumo de resultados

Chave de localização	U2-NP-P01	U2-P1-P02	U2-P1-P03	U2-P1-P04	U2-P1-P05	U2-NP-P06
Orientação	Oeste	Sul	Sul	Sul	Sul	Norte
Altura a partir da base da estrutura (m)	Nível do piso	16	16	16	16	Nível do piso
Resistência a compressão Simples f_{ck} (kgf/cm ²)	246	---	181	115	---	
	A resistência mínima para concretos expostos a sulfatos deve ser de 350 kgf/cm² de acordo com as Normas Técnicas Complementares para Projeto e Construção de estruturas de Concreto					
Concentração de cloretos a 3 cm de profundidade (% em peso de concreto)	---	---	0.05	0.039	---	0.079
	Limite de cloreto 0.11% pp de concreto (P. Castro-Borges, 2013) em ambiente marino					
Concentração de cloretos a 3 cm de profundidade (% pp de cimento)	---	---	0.65	0.41	---	0.81
	Concentração máxima permitida (Andrade et al 1998), 0.45 % pp de cimento					
Concentração de sulfato a 3 cm de profundidade (% pp de concreto)	19.35 13.37	---	21.77	46.09	---	---
Potencial de Corrosão (mV vs Cu/CuSO ₄)	>-200	>-200	>-200	<-350	>-200	>-200
Velocidade de Corrosão (µA/cm ²)	0.1 – 0.5	> 1	0.1 – 0.5	> 1	> 1	0.1 – 0.5
	Moderada	Muito Elevada	Moderada	Muito Elevada	Muito Elevada	Moderada
Cobrimento médio (mm)	30.5	38	34.5	34.5	28	36
	Cobrimento mínimo para um ambiente B2, 45 mm de acordo com as Normas Técnicas Complementares para Projeto e Construção de estruturas de Concreto					
Diâmetro médio (mm)	17.9	17.9	16.9	19.5	19.6	24.9

3.2.2. Profundidade de carbonatação.

Na Fig. 5, correspondente ao teste de carbonatação na zona U2-P1-P04, a zona incolor é claramente visível após a aplicação da solução de fenolftaleína, o que indica uma redução considerável do pH do concreto e que atinge a profundidade da armadura do mesmo modo que mostrado na Tabela 2, além disso, na mesma Figura, observa-se dano severo causado por fissuras paralelas à superfície da parede.

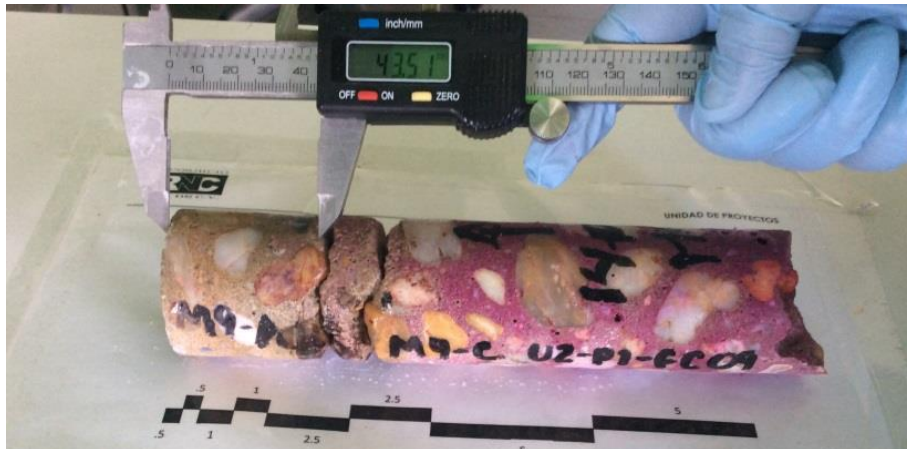


Figura 5. Profundidade de carbonatação na zona U2-P1-P04, onde são observadas profundidades consideráveis de dano e fissuras paralelas à superfície.

3.2.3. Concentração de sulfatos.

Na Fig. 6 estão ilustrados os resultados do teor de sulfato, onde se observa que os valores encontrados a partir da superfície variam de 0,25 a 1,0% pp de concreto e a 3 cm de profundidade existem concentrações de 0,50 a 0,80% pp do conteúdo de concreto, esses resultados são considerados muito altos, uma vez que o limite é de 0,40% pp do conteúdo de concreto. A água do mar, os gases das áreas industriais e, em particular, a água utilizada nas torres de resfriamento adjacentes são fontes com alto teor de sulfato. As duas consequências do ataque de sulfato nos componentes de concreto mais conhecidos são a formação de etringita e gesso.

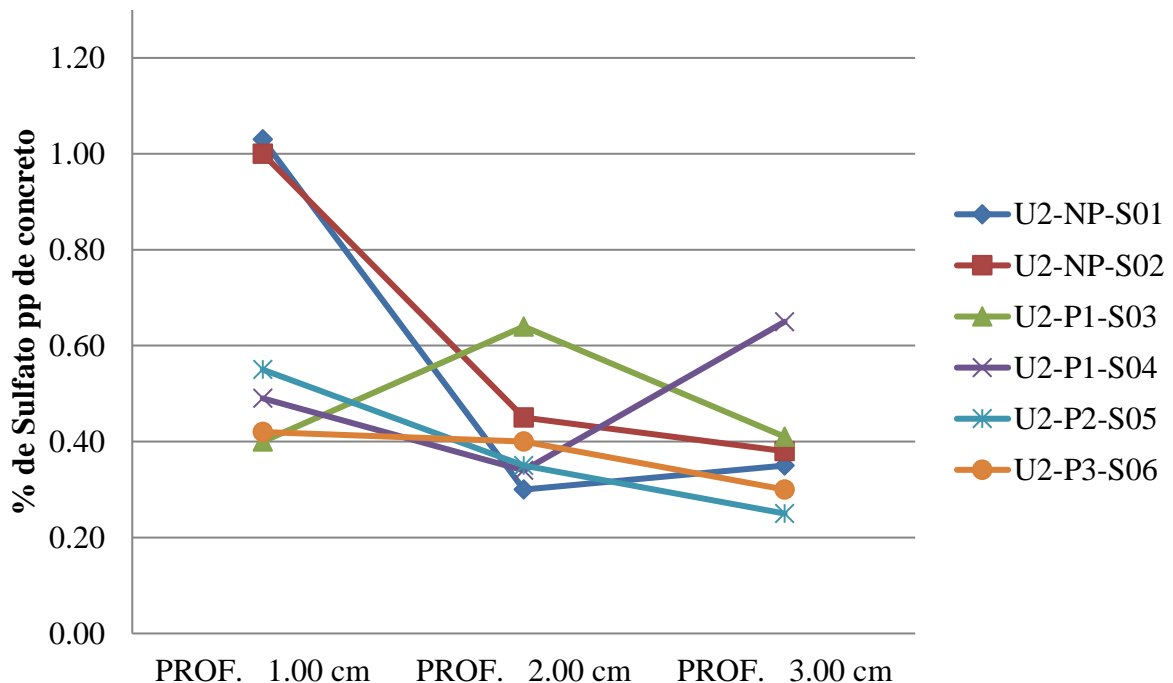


Figura 6. Resultados da concentração de sulfatos, onde se observa que todas as áreas de teste são danificadas por sulfatos, devido ao excesso de sulfatos cujo limite deveria ser de 0,40% pp de concreto.

3.2.4. Concentração de cloretos.

Quanto ao ataque causado por cloretos (ver Tabela 2), pode-se afirmar que isso não afeta seriamente a estrutura porque o cloreto não atingiu a concentração que inicia e desencadeia os problemas de corrosão do aço no concreto (Troconis et al. , 1997, DURACON, 2006, DURACON, 2007). Embora a zona costeira esteja próxima das estruturas, não foi um fator determinante para esse tipo de contaminação para a estrutura.

3.2.5. Velocidade de corrosão.

Embora existam áreas com aço exposto, e a corrosão da barra é mais do que evidente, foram realizados ensaios de taxa de corrosão não destrutivos.

De acordo com a Tabela 2, foi mais frequente encontrar valores de velocidade de corrosão moderada a muito alta na maioria dos casos, com valores próximos de até $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, como mostrado na Figura 7.

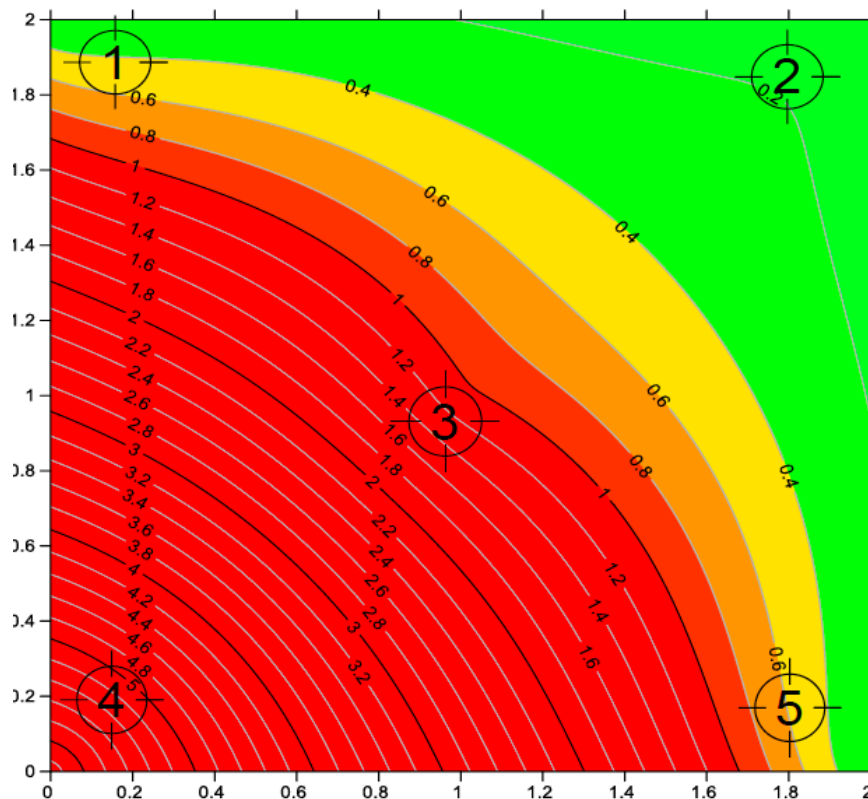


Figura 7. Zona de estudo U2-P1-P04, onde se observam isovalores de velocidade de corrosão muito elevados.

Valores de corrosão muito elevados podem ser causados por reparos localizados errôneos, feitos com materiais e procedimentos inadequados que causaram fissuras e delaminações entre o concreto recente e o pré-existente. Infelizmente, em estruturas reais, esse efeito na interface aço-concreto é muito comum, como resultado do efeito "Top-bar", que é uma diminuição na aderência da armadura em função do cobrimento, isto em concreto com espessuras consideráveis e compactação inadequada (PR Jeanty et al, 1988, A. Castel, 2006); ou também pode ser explicado como resultado da corrosão causada por correntes galvânicas dentro de uma macrocélula, devido à conexão elétrica de barras de aço expostas em diferentes ambientes eletroquímicos, isto é, aço passivo em áreas de recente reparo e aço ativo em zonas carbonatadas (J. Gulikers e M. Raupach, 2006, J. Warkus e M.

Raupach, 2006), o que leva a altas correntes galvânicas e conseqüentemente altos níveis de corrosão de acordo com a recomendação da RILEM (A. Nasser et al, 2010)

É muito importante avaliar as características do eletrólito do sistema, porque nele podemos conhecer os elementos necessários de contaminação por agentes agressivos e, assim, conhecer os mecanismos de corrosão da estrutura em estudo.

A torre estudada está localizada dentro de uma planta petroquímica e adjacente a uma série de torres de resfriamento, onde o mecanismo principal para a diminuição da temperatura da água é a evaporação parcial, o que provoca uma diminuição gradual da quantidade de água circulante e, por outro lado, um aumento contínuo na concentração de compostos químicos no sistema condensador, emitindo continuamente soluções de sulfato.

A entrada de íons de sulfato e os baixos valores de resistência à compressão são duas razões significativas para induzir a degradação das propriedades estruturais na estrutura estudada. Vários estudos mostraram que o ataque químico por sulfatos é bastante complicado (EF Irassar, 2009), no entanto, existem alguns fatores predominantes que podem afetar a evolução das propriedades do concreto, como a concentração da solução de sulfato, a temperatura de exposição alta e baixo pH do concreto (J. Skalny, 2002). Na estrutura analisada, estes três fatores foram observados. Deve-se notar que a concentração de sulfatos excedeu consideravelmente a concentração máxima proposta por C. Andrade (1998), gerando a possível formação de etringita e gesso, o que poderia ter acelerado a degradação do concreto por produtos de hidratação de cimento e a solução de íons sulfato que causam expansão e fissuração (C. Yu et al, 2015, F. Bellmann et al, 2006). Esta exposição a sulfatos solúveis pode acarretar a fragmentação da matriz cimentícia ou aumentar a porosidade global, onde todos esses efeitos podem reduzir a durabilidade da estrutura.

3.3. Proposta de reabilitação-reforço.

Após a inspeção, recomenda-se realizar imediatamente os trabalhos de reparação, reabilitação e reforço descritos abaixo, através de um projeto executivo, que incluirá maiores detalhes. Para aumentar a vida útil residual da estrutura, é importante que os serviços sejam realizados em toda a torre, para evitar a formação de zonas vulneráveis a efeitos galvânicos.

Preliminares.

A remoção do concreto deteriorado e / ou contaminado só deve ser feita em áreas anódicas; limpeza da armadura e preparação do substrato de acordo com as disposições da norma NMX-C-518-ONNCCE-2016 (2016), revisão e substituição, se necessário.

Passo 1

Devido aos altos resultados da taxa de corrosão, é possível que existam áreas da torre onde a seção do aço diminuiu consideravelmente; em locais com uma diminuição do diâmetro nominal original em mais de 10%, a armadura da estrutura deve ser substituída por barras de aço do diâmetro original e a mesma resistência ao escoamento (f_y), em conformidade com a norma NMX-B-457. - CANACERO-2013 (2013). A sequência e a geometria do reparo devem estar em conformidade com o manual da red Rehabilitar (Helene, 2003).

Passo 2

Devido às condições geométricas da estrutura e à dificuldade de instalar escoras ou a aplicação de concreto em alturas elevadas, recomenda-se a recuperação da seção com argamassa de reparo estrutural fabricada com cimento Portland Tipo RS (resistente a sulfatos) conforme norma NMX-C-414-ONNCCE-2014 (2014) e que cumpram com a norma NMX-C-418-ONNCCE-2015 (2015) com a consistência apropriada para ser aplicada à mão.

Passo 3

Para reduzir a probabilidade de corrosão em áreas reparadas, recomenda-se o uso de inibidor de corrosão do tipo nitrito de cálcio de acordo com ASTM C494 / C494M-17 (2017).

Passo 4

Devido à baixa resistência à compressão observada nos resultados, o reforço será realizado na base da estrutura com sistema CFRP (fibra de carbono), até o nível da passarela 1; além disso, com este sistema de confinamento, a resistência ao esforço de cisalhamento e às cargas externas, como vento e terremotos, serão aumentadas sem reduzir a ductilidade do elemento ACI-440R-07 (2007).

Passo 5

Deve ser instalado um revestimento protetor anti-carbonatação e impermeável a cloretos com capacidade de selagem de fissuras (fornecer um acabamento estético para evitar quebrar o concreto em caso de aparência, pois estes são os meios de entrada de mais poluentes), com componentes químicos que estão de acordo com as disposições da ASTM C494 / C494M-17 (2017).

4. CONCLUSÕES

O uso de veículos aéreos não tripulados (drones) para a inspeção de estruturas de concreto armado é uma ferramenta poderosa que permite a visualização de áreas onde o pessoal não pode acessar.

O mecanismo que governa a corrosão na estrutura estudada é a carbonatação, devido à alta concentração de CO₂ no meio ambiente e a uma umidade relativa considerável, o que causou a redução do pH do concreto e a despassivação da armadura.

As emissões de sulfato no ambiente industrial e o depósito destes nas paredes de concreto geraram uma diminuição considerável da resistência mecânica, que se reflete nas fissuras e delaminações.

Reparos localizados feitos anteriormente aceleraram os danos por corrosão em áreas adjacentes devido à geração de células galvânicas.

Os baixos valores de resistência mecânica do concreto e a alta velocidade de corrosão em várias áreas de estudo comprometem estruturalmente a torre e a segurança do pessoal que atua nela, exigindo uma intervenção imediata de reabilitação e reforço.

5. REFERÊNCIAS

- A. Castel, T. Vidal, K. Viriyametanont, R. François, “*Effect of Reinforcing Bar Orientation and Location on Bond With Self-Compacting Concrete*”, ACI Struct. J. 3 Vol. 4 (2006) 559–567.
- A. del Valle, J. Perez, A. Torres, M. Madrid, “*Evaluación del Puente Pajaritos: Una Estructura de Concreto de 50 Años en el Ambiente Agresivo del Golfo de México*” Ingeniería de Construcción,

Vol (21) 1, (2006)

A. L. Sulaimani, J. Kaleemullah, M. Bsulbul, A. Rasheeduzzafar, “*Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete Members*”. ACI structural Journal. (1992) pp. 220-231.

A. Nasser, A. Clement, S. Laurens, A. Castel, “*Influence of Steel-Concrete Interface Condition on Galvanic Corrosion Currents in Carbonated Concrete*”, Corros. Sci. Vol. 52 (2010) 2878–2890, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.04.037>

ACI 440R-07 Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, American Concrete Institute (2007)

ASTM C114-05, *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2005) DOI: <https://doi.org/10.1520/C0114-05>

ASTM C494 / C494M-17, *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. DOI: https://doi.org/10.1520/C0494_C0494M-17

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

C. Andrade, “*Manual Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras*” CSIC (1998)

C. Andrade, “*Vida útil de las Estructuras de Hormigón Armado: Obras Nuevas y Deterioradas*” Seminario Internacional EPUSP/FOSROC sobre patología das estruturas de concreto-Uma Visao moderna. Anis. San Paulo. (1992)

C. Andrade, C. Alonso, J. Gulikers, R. Polder, R. Cigna, Vennesland, M. Salta, A. Raharinaivo, B. Elsener “*Thest Metod for On-Site Corrosion rate Measurement of Steel Reinforcement in Concrete by Means of the Polarization Resistance Method*” Material and Structures/Matériaux et Constructions. Vol 37 (2004) pp. 623-643. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02483292>

C. Yu, W. Sun, K. Scrivener “*Degradation Mechanism of Slag Blended Mortars Immersed in Sodium Sulfate Solution*” Cem. Concr. Res., Vol. 72 (6) (2015), pp. 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.015>.

Cem. Concr. Res., Vol. 39 (3), (2009), pp. 241-254

DURACON Collaboration, O. Trocónis de Rincón and coauthors. “*Durability of concrete structures: Duracon, an Iberoamerican Project. Preliminary results*”. Building & Environment. Elsevier Science LTD Publication. Vol 41 (7). (2006). pp. 952-962.

DURACON Collaboration, O. Trocónis de Rincón and coauthors. “*Effect of the Marine Environment on Reinforced Concrete Durability in Iberoamerican Countries: DURACON Project/CYTED*”. Corrosion Science. Elsevier Science LTD Publication. Vol. 49 (7). (2007). pp. 2832-2843. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.02.009>.

E. F. Irassar “*Sulfate Attack on Cementitious Materials Containing Limestone Filler – A Review*” Cem. Concr. Res., Vol. 39 (3), 2009, Pages 241-254. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.007>.

F. Bellmann, B. Möser, J. Stark “*Influence of Sulfate Solution Concentration on the Formation of Gypsum in Sulfate Resistance Test Specimen*” Cem. Concr. Res., Vol. 36 (2) (2006), pp. 358-363. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.04.006>.

J. Gulikers, M. Raupach, “*Numerical Models for the Propagation Period of Reinforcement Corrosion – Comparison of a Case Study Calculated by Different Researchers*”, Mater. Corros. Vol. 57 (8) (2006) 618–627. <https://doi.org/10.1002/maco.200603993>

J. Skalny, J. Marchand, I. Odler, “*Sulfate Attack on Concrete*” Spon Press, New York (2002)

J. Warkus, M. Raupach, “*Modelling of Reinforcement Corrosion – Corrosion With Extensive Cathodes*”, Mater. Corros. Vol. 57 (12) (2006) 920–925. <https://doi.org/10.1002/suco.201200003>

NMX-B-457-CANACERO-2013, *Industria Siderúrgica – Varilla Corrugada de Acero de Baja Aleación para Refuerzo de Concreto – Especificaciones y Métodos de Prueba*, CANACERO (2013)

Avaliação de problemas patológicos associadas à carbonatação e sulfatos em uma torre de concreto com mais de 50 anos de serviço

- NMX-C-083-ONNCCE 2010, *Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes – Método de Ensayo*, ONNCCE, México DF, (2010)
- NMX-C-414-ONNCCE-2014, *Industria de la Construcción – Cementantes Hidráulicos – Especificaciones y Métodos de Ensayo*. ONNCCE, México DF, (2014)
- NMX-C-418-ONNCCE-2015, *Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos – Determinación del Cambio de Longitud de Morteros con Cemento Hidráulico Expuestos a una Solución de Sulfato de Sodio*. ONNCCE, México DF, (2015)
- NMX-C-495-ONNCCE-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*. ONNCCE, México DF, (2015)
- NMX-C-501-ONNCCE-2015, *Industria de la Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Medición de Velocidad de Corrosión en Campo - Especificaciones y Método de Ensayo*. ONNCCE, México DF, (2015)
- NMX-C-515-ONNCCE-2016, *Industria de la Construcción – Concreto Hidráulico – Durabilidad – Determinación de la Profundidad de Carbonatación en Concreto Hidráulico – Especificaciones y Método de Ensayo*. ONNCCE, México DF, (2016)
- NMX-C-518-ONNCCE-2016, *Industria de la Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado – Procedimientos de Preparación y Limpieza de Superficies para Reparación*. ONNCCE, México DF, (2016)
- NTC DF *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto* México DF (2008)
- O. Troconis de Rincón y Miembros de la Red DURAR. *Red Temática XV.B. Durabilidad de la Armadura. Manual De Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*, CYTED Maracaibo. Venezuela. (1997).
- P. Castro-Borges, M. Balancán-Zapata, A. López-González, “*Analysis of tools to evaluate chloride threshold for corrosion onset of reinforced concrete in tropical marine environment of Yucatán, México*”. *Journal of Chemistry*, (2013), Article ID208619, Hindawi Publishing Corporation, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/208616>, 8p.
- P. Helene, F. Pereira (2003), *Manual de Rehabilitación de Estructuras de hormigón. Reparación, Refuerzo y Protección*. Rehabilitar Red Temática XV.F CYTED. Primera edición .
- P.R. Jeanty, D. Mitchell, M.S. Mirza, “*Investigation of Top Bar effects in Beams*”, *ACI Struct. J.* Vol.85 (3) (1988) 251–257.
- Paweł Regucki, R. Krzyzyska, Z. Szeliga, H. Jouhara, “*Mathematical Model of Sulphate ion Concentration in a Closed Cooling System of a Power Plant*” *Thermal Science and Engineering Progress* Vol.4 (2017) 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.09.012> .
- S. Feliú, J.A. González, V. Feliú, Jr S. Feliú, M.L. Escudero, I. Rz Maribona, V. Austián, C. Andrade, J.A. Bolaño, F. Jiménez F. (1993), *U.S. Patent No. 5.259.944*. (1993)