

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

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>

Recepción: 14/12/2017 | Aceptación: 22/12/2017 | Publicación: 31/01/2017

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.

Palabras clave: inspección; torre; concreto reforzado; diagnóstico; vida de servicio.

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. 94 – 107, 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

Información Legal

Revista ALCONPAT 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. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2018 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2018.

Evaluation of pathological problems associated with carbonation and sulfates in a concrete tower with more than 50 years in 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, diagnosis, service life.

Avaliação de patologias associadas com carbonatação e sulfatos em uma torre de concreto com mais de 50 anos de serviço

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.

1. INTRODUCCIÓN

Con la reciente Reforma Energética que se ha impulsado en nuestro país, el gobierno federal se ha visto en la necesidad de realizar la compra-venta con particulares de bienes inmuebles improductivos, que por décadas han sido abandonados y por tal motivo su degradación por el fenómeno de corrosión ha sido acelerado. Esto, debido a la falta de mantenimiento y a la exposición a los ambientes agresivos donde se encuentran ubicados.

La corrosión de estructuras de concreto reforzado (ECR), particularmente en ambientes industriales, es un problema grave, ya que se pueden presentar manifestaciones patológicas de significativa intensidad, lo que puede llevar a problemas graves de funcionamiento, seguridad, costos excesivos de rehabilitación y prestación de servicios, pérdida de estética y dependiendo del grado de daño, podrían ponerse en riesgo vidas humanas (Helene, 2003; Sulaimani 1992, Andrade 1992; del Valle et al, 2006)

Para que estos bienes inmuebles específicamente plantas petroleras se vuelvan nuevamente productivas, impera la necesidad de rehabilitarlas y para esto, se requiere entender las causas de las fallas relacionadas con la corrosión y la compleja relación entre las propiedades físicas, químicas y mecánicas del concreto y del acero de refuerzo.

La importancia de este estudio radica en la necesidad de rehabilitar y poner en operación las torres de concreto reforzado, que representan un activo petrolero de vital importancia económica para el sur del estado de Veracruz; por este motivo, se realizó una evaluación mediante una inspección desde el punto de vista de durabilidad, que contempló ensayos destructivos y no destructivos, como inspección visual mediante reconocimiento con vehículos aéreos no tripulados (VANT), pruebas electroquímicas, químicas y mecánicas.

En este estudio se discuten las evaluaciones y el diagnóstico de la estructura mostrando los mecanismos que permitieron la potenciación de la corrosión, con el objetivo de determinar las medidas correctivas necesarias para ampliar la vida de servicio de estos activos petroleros existentes.

2. PLAN DE INSPECCIÓN

2.1. Inspección preliminar.

Esta etapa consistió principalmente en una visita de reconocimiento de la estructura, medio de exposición y los levantamientos de daños y fotográficos de los elementos que componen la estructura de la torre analizada, debido a la complejidad y dimensiones de ésta. El reconocimiento visual se realizó mediante un VANT Dron Phantom 4, siguiendo los esquemas programados según se especifica en el Manual DURAR (Troconis del Rincón et al, 1997).

2.2. Inspección detallada.

Las fallas prematuras que presentan las estructuras de concreto armado se deben principalmente a la falta de control de calidad y errados procedimientos de construcción, reparación y rehabilitación (DURACON, 2007). Por ello es importante realizar una serie de ensayos y mediciones necesarias para la obtención de la información requerida y establecer adecuadamente las causas y la etapa de prevención adecuada. Dicha información permitió una evaluación de los problemas, pudiendo de esta forma definir la naturaleza y mecanismo de la corrosión.

2.1.1. Evaluación Electroquímica.

Con el uso del pachómetro se detectó la posición del acero, en las áreas donde se realizaron las siguientes medidas electroquímicas:

Medición de potenciales E_{corr} vs Cu/CuSO₄, de acuerdo con lo establecido en ASTM C876-09 (2009) y NMX-C-495-ONNCCE-2015 (2015).

Velocidad de corrosión (i_{corr}), mediante la técnica de resistencia a la polarización, utilizando un corrosímetro de campo GECOR 10 (Feliú et al, 1993) y lo establecido en NMX-C-501-ONNCCE-2015 (20015). La información obtenida con estas medidas fue útil ya que permitieron definir claramente los puntos de corrosión activa en la estructura.

2.1.2. Evaluación fisicoquímica.

Esta se llevó a cabo mediante la extracción de testigos (núcleos) tomados en sitio con el fin de conocer la calidad y potencialidad del concreto a corroer a la armadura; realizando los ensayos de profundidad de carbonatación mediante NMX-C-515-ONNCCE-2016 (2016), concentración de cloruros ASTM C114-05 (2005) y ataque químico por sulfatos. Además, se hizo la evaluación de la resistencia a la compresión simple del concreto mediante ensayo a núcleos de concreto endurecido NMX-C-083-ONNCCE 2010 (2010).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La torre estudiada se encuentra expuesta a un ambiente agresivo, clasificado como B2 de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias de Distrito Federal (NTC-DF); esto debido a que se encuentra localizada entre grandes masas de agua marina, y gases industriales. 700 m al Norte se localiza la Laguna de Pajaritos, a 2700 m y 600 m al Este se encuentra el río Coatzacoalcos y al sur un Complejo Petroquímico, ésto se muestra en la Figura 1.

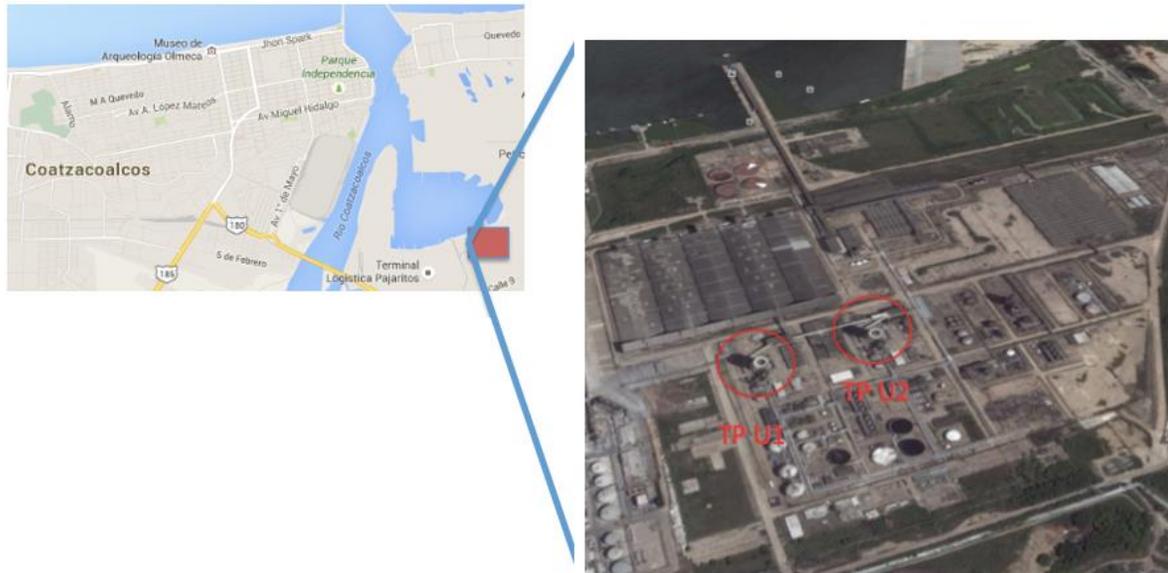


Figura 1. Ubicación de la torre en estudio, en la imagen se ubica como U2.

En esta zona se mantiene un clima tropical húmedo con temporadas de lluvias de junio a septiembre, con mayor precipitación en los meses de agosto y septiembre, donde el porcentaje de lluvias anual oscila entre 6 y 10.5% con respecto a las lluvias del mes más seco.

La estructura en estudio es una torre cilíndrica de 23 m de diámetro y más de 70 m. de altura, con espesor de muros mayores a 30 cm. construida a base de elementos de concreto reforzado con acero AISI 1018. El agregado empleado para la fabricación del concreto de los elementos estructurales de las torres es arena silíceo y agregado grueso cuarzoso. Este material se caracteriza por tener alta dureza debido a la posición que ocupa en la escala de Mohs y composición química donde prevalece SiO_2 , sin embargo, la forma de la partícula es redondeada, lo cual determina una tracción débil en la masa de concreto. Debido a que las estructuras cuentan con más de 50 años de servicio y se localizan en un ambiente industrial-marino, ya presentan zonas con deterioros casi imperceptibles y otras con daños evidentes.

3.1. Inspección visual mediante VANT.

Debido a la complejidad geométrica de la estructura, limitación de acceso a zonas muy elevadas y para acelerar los tiempos del levantamiento de daños, se tomó la decisión de realizar la inspección visual mediante un VANT, para lo cual se diseñó una misión autónoma mediante un plan de vuelo basado en puntos secuenciales mediante GPS por las caras de la torre, dividiéndolas en Norte, Este, Sur y Oeste; se controló la velocidad crucero del equipo de modo que se obtuvieran imágenes de alta calidad donde se apreciaran los daños visibles de la estructura. En gabinete se realizó un post proceso, donde se generaron mapas 2D y se delimitaron las áreas con mayor daño visual, como se observa en la Figura 2.

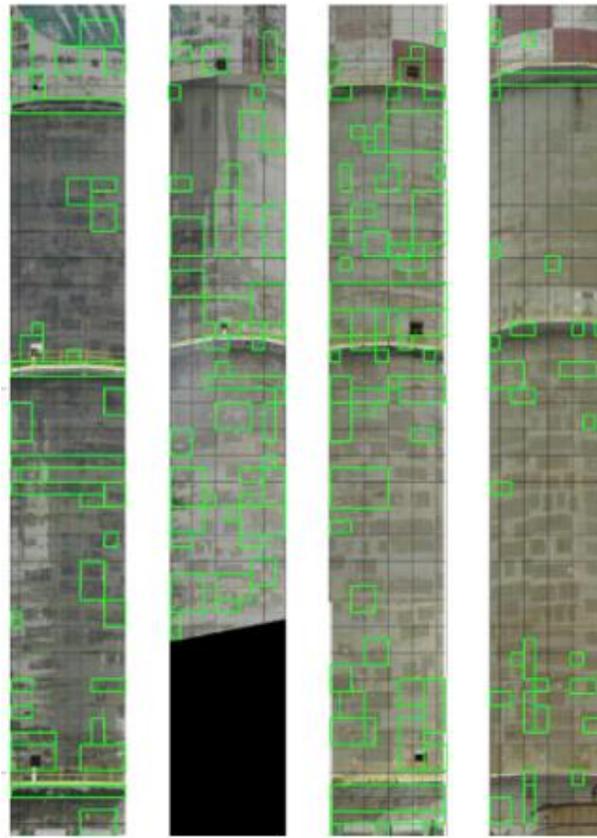


Figura 2. Mapa 2D, Inspección realizada con vehículo aéreo no tripulado donde se delimitan las zonas con mayor daño visual.

En las imágenes obtenidas con el dron, se observó que la estructura en estudio presentaba una clara evidencia de reparaciones localizadas hechas con anterioridad, ya que éstas, de no haberse realizado correctamente, pudieron acelerar los procesos de deterioro en el sistema acero-concreto (ver Figuras 3 y 4). Además, se encontraron zonas con desprendimientos de concreto, delaminaciones, acero de refuerzo expuesto y disminución de la sección de éste, así como grietas con longitud que variaba desde 0.50 m hasta 5.00 m aproximadamente, en anchos de 3 mm y mayores.



Figura 3. Se observa acero de refuerzo expuesto, corrosión, delaminación de concreto y en forma de rectángulos múltiples zonas de reparaciones localizadas realizadas con anterioridad



Figura 4. Detalle de reparaciones localizadas donde se observa la separación de concreto reciente y anterior, lo que ocasiona delaminación del concreto y zonas anódicas que favorecen a la formación de celdas de corrosión.

En esta etapa se decidió ubicar 12 zonas de estudio en las que se utilizó la técnica de Resistencia a la Polarización Lineal empleando anillo de guarda para confinar la corriente (Andrade et al, 2004), potenciales de media celda, y pruebas químicas para obtener el perfil de carbonatación y la concentración de cloruros y sulfatos, así como resistencia a la compresión y medición de recubrimiento con pachómetro.

En la Tabla 1 se describe la nomenclatura de la clave de localización de las zonas de ensaye.

Tabla 1. Descripción de nomenclatura en zona de ensayos

Clasificación	-	Nivel al que se realizó el ensaye	-	Número de punto o zona ensayada
U2 (Torre)		Np (nivel de piso) P1 (pasarela 1) P2 (pasarela 2) P3 (pasarela 3)		01-12
Ejemplo U2-P1-P01 Torre -Nivel de pasarela 1-Zona de ensaye 01				

En la Tabla 2 se presenta el resumen de resultados de los ensayos realizados en la torre analizada.

3.2. Inspección detallada

3.2.1. Resistencia a la compresión simple del concreto ($f'c$).

Como se puede apreciar en la Tabla 2, resistencia a la compresión, se obtuvieron $f'c$ menores de 250 kg/cm^2 , y en las zonas de ensaye U2-P1-P04, se obtuvieron valores menores al 50% de las recomendadas en las NTC-DF (300 kg/cm^2), valores especificados para un ambiente de exposición B2 (Superficies de miembros en contacto con el terreno y expuestos a ambientes exteriores que son agresivos) de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias de DF (NTC-DF, 2008).

Tabla 2. Resumen de resultados

Clave Localización	U2-NP-P01	U2-P1-P02	U2-P1-P03	U2-P1-P04	U2-P1-P05	U2-NP-P06
Orientación	Oeste	Sur	Sur	Sur	Sur	Norte
Altura a partir de la base de la estructura (m)	Nivel de piso	16	16	16	16	Nivel de piso
Resistencia a la Compresión Simple f'_c (kg/cm ²)	246.09	---	181.30	114.92	---	
	Resistencia mínima para concretos expuestos a sulfatos, 350 kg/cm² de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño Construcción de estructuras de Concreto					
Concentración de Cloruros a los 3 cm de profundidad (% en peso de concreto)	---	---	0.05	0.039	---	0.079
	Umbral de cloruros 0.11% pp de concreto (P. Castro-Borges, 2013) en ambiente marino					
Concentración de Cloruros a los 3 cm de profundidad (% pp de concreto)	---	---	0.65	0.41	---	0.81
	Concentración Máxima admisible (Andrade et al 1998), 0.45 % pp de concreto					
Concentración de Sulfatos a los 3 cm de profundidad (% pp de concreto)	19.35	---	21.77	46.09	---	---
	13.37					
Potencial de Corrosión (mV vs Cu/CuSO ₄)	>-200	>-200	>-200	<-350	>-200	>-200
Velocidad de Corrosión (μA/cm ²)	0.1 – 0.5	> 1	0.1 – 0.5	> 1	> 1	0.1 – 0.5
	Moderada	Muy Elevada	Moderada	Muy Elevada	Muy Elevada	Moderada
Recubrimiento promedio (mm)	30.5	38	34.5	34.5	28	36
	Recubrimiento mínimo para un ambiente B2, 45 mm de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto					
Diámetro varilla promedio (mm)	17.9	17.9	16.9	19.5	19.6	24.9

Clave Localización	U2-NP-P07	U2-NP-P08	U2-P2-P09	U2-P2-P10	U2-P3-P11	U2-P3-P12
Orientación	Sur	Este	Este	Sur	Sur	Este
Altura a partir de la base de la estructura (m)	Nivel de Piso	Nivel de Piso	45	45	60	60
Resistencia a la Compresión Simple f'_c (kg/cm ²)	164.57	186.89	---	---	---	---
	Resistencia mínima para concretos expuestos a sulfatos, 350 kg/cm² de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño Construcción de estructuras de Concreto					
Concentración de Cloruros	0.03	---	0.037	---	0.032	---

a los 3 cm de profundidad (% pp de concreto)	Umbral de cloruros 0.11% pp de concreto (P. Castro-Borges, 2013) en ambiente marino					
Concentración de Sulfatos a los 3 cm de profundidad (% pp de concreto)	0.38	---	0.25	---	0.30	---
	Concentración Máxima admisible (Andrade et al 1998), 0.45 % pp de concreto					
Profundidad de Carbonatación (mm)	11.11	13.42	---	---	---	---
Potencial de Corrosión (mV vs Cu/CuSO ₄)	-200 a -350	>-200	>-200	-200 a -350	>-200	>-200
Velocidad de Corrosión (μA/cm ²)	0.1 – 0.5	0.5 – 1	> 1	> 1	0.5 – 1	0.5 – 1
	Moderada	Elevada	Muy Elevada	Muy Elevada	Elevada	Elevada
Recubrimiento promedio (mm)	39	50	22	36.5	30.5	27.3
	Recubrimiento mínimo para un ambiente B2, 45 mm de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño Construcción de Estructuras de Concreto					
Diámetro varilla promedio (mm)	21.1	20.3	20.9	30.6	22.5	20.4

3.2.2. Profundidad de carbonatación.

En la Figura 5, correspondiente al ensaye de carbonatación en la zona U2-P1-P04, se aprecia claramente la zona incolora después de la aplicación de la solución de fenolftaleína, lo que indica una reducción considerable del pH del concreto y que llega a la profundidad del acero de refuerzo mismos que se muestran en la Tabla 2, además en la misma Figura se observa un severo daño ocasionado por grietas paralelas a la superficie del muro.

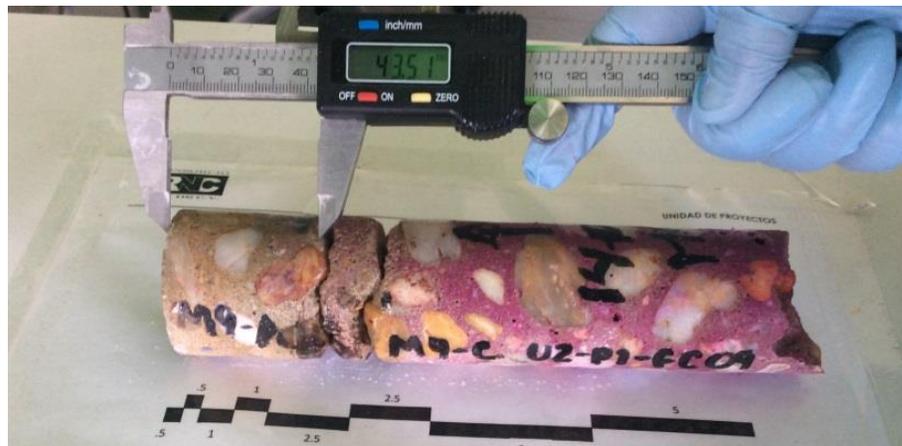


Figura 5. Profundidad de carbonatación en la zona U2-P1-P04, donde se observa una profundidad de daño considerable y grietas paralelas a la superficie.

3.2.3. Concentración de sulfatos.

En la Figura 6 se ilustran los resultados del contenido de sulfatos, se aprecia que los valores encontrados desde la superficie varían de 0.25 hasta 1.0% pp del contenido de concreto y a los 3 cm de profundidad se encuentran concentraciones de 0.50 hasta 0.80% pp del contenido de concreto, estos resultados se consideran muy elevados, ya que el umbral limite es 0.40% pp del

contenido de concreto. El agua de mar, los gases de las zonas industriales y particularmente el agua que se emplea en las torres de enfriamiento adyacentes, son fuentes con contenidos elevados de sulfatos. Las dos consecuencias del ataque por sulfatos en los componentes del concreto mejor conocidas son la formación de etringita y yeso.

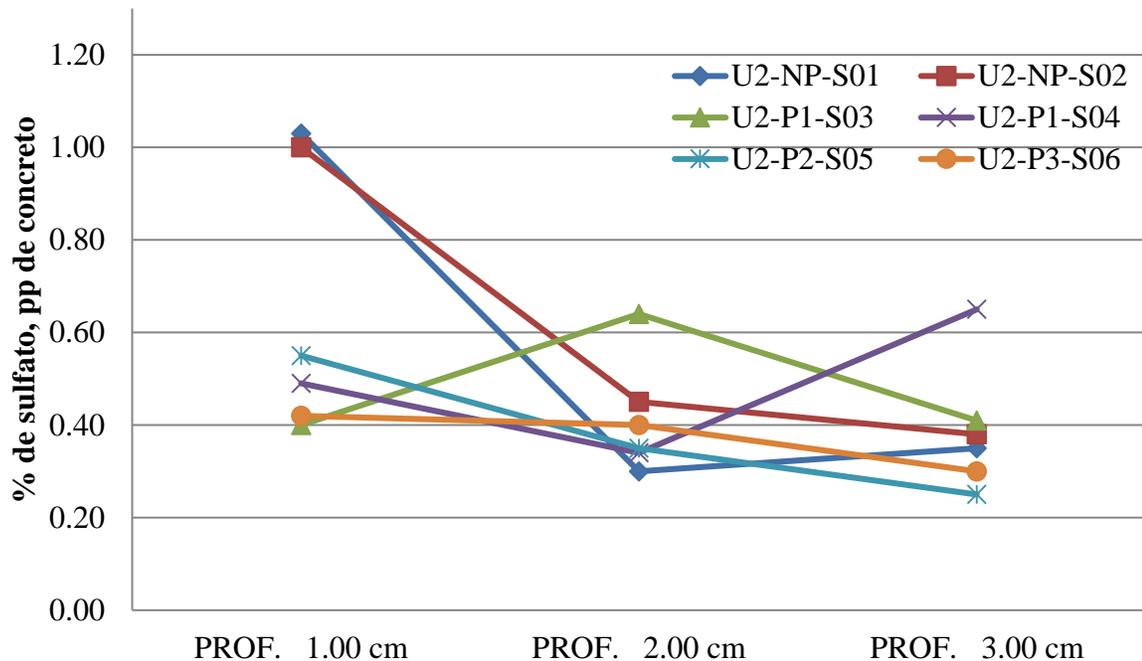


Figura 6. Resultados de concentración de sulfatos, donde se observa que todas las zonas de ensaye están dañadas por sulfatos, debido que se rebasa el umbral límite establecido en 0.40 % pp de concreto.

3.2.4. Concentración de cloruros.

En cuanto al ataque ocasionado por cloruros (ver Tabla 2), se puede afirmar que este no afecta gravemente a la estructura debido a que el cloruro no ha alcanzado la concentración que inicia y desencadena los problemas de corrosión del acero en concreto (Troconis et al, 1997; DURACON, 2006; DURACON, 2007). Aunque la zona costera se encuentra cerca de las estructuras, no ha sido factor determinante para este tipo de contaminación a la estructura.

3.2.5. Velocidad de corrosión.

Aunque existen zonas con acero expuesto, y la corrosión de la varilla es más que evidente, se realizaron ensayos no destructivos de velocidad de corrosión.

De acuerdo con la Tabla 2, fue más recurrente encontrar valores de velocidad de corrosión moderada a muy elevada en la mayoría de los casos con valores cercanos a $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ como se aprecia en la Figura 7.

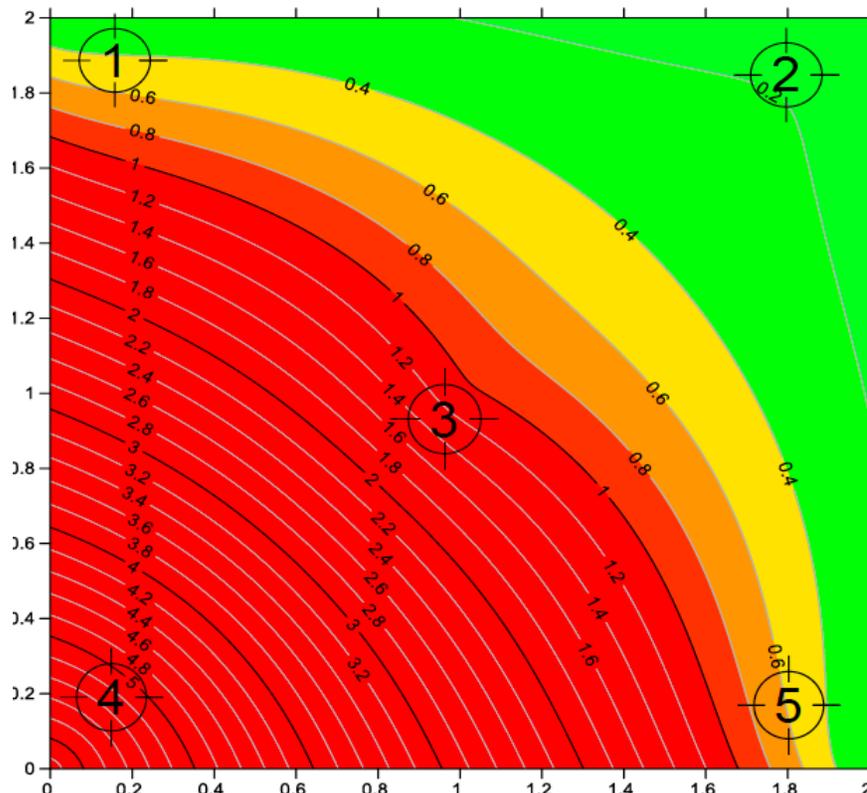


Figura 7. Zona de estudio U2-P1-P04, donde se observan isovalores de velocidad de corrosión, muy elevada.

Los valores de corrosión muy elevados pueden ser originados por las reparaciones localizadas, realizadas con materiales no compactados que han provocado grietas y delaminaciones entre concreto reciente y el preexistente, desafortunadamente en estructuras reales este efecto en la interfaz acero-concreto es muy común, como resultado del efecto “Top-bar”, el cual es una disminución de adherencia del acero de refuerzo en función del recubrimiento, esto en concretos con espesores considerables y compactaciones inadecuadas (P.R. Jeanty et al, 1988; A. Castel, 2006); o también se puede explicar como el resultado de la corrosión ocasionada por corrientes galvánicas dentro de una macrocelda, debido a la conexión eléctrica de barras de acero expuestas en diferentes entornos electroquímicos, es decir, acero pasivo en zonas de reciente reparación y acero activo en zonas carbonatadas (J. Gulikers y M. Raupach, 2006; J. Warkus y M. Raupach, 2006), que conduce a altas corrientes galvánicas y consecuentemente altos niveles de corrosión de acuerdo con la recomendación de RILEM (A. Nasser et al, 2010)

Es muy importante evaluar las características del electrolito del sistema, debido que en él se pueden conocer los elementos necesarios de contaminación por agentes agresivos y de esta manera conocer los mecanismos de corrosión de la estructura en estudio.

La torre estudiada se encuentra dentro de una central petroquímica, y adyacente a una serie de torres de enfriamiento, donde el principal mecanismo para la disminución de la temperatura del agua es su evaporación parcial, que provoca una disminución gradual en la cantidad de agua circulante y, por otro lado, un aumento continuo en la concentración de compuestos químicos en el sistema del condensador, emitiendo continuamente soluciones de sulfato

El ingreso de iones sulfato y los bajos valores de resistencia a la compresión son dos razones significativas para inducir la degradación de las propiedades estructurales en la estructura estudiada. Varios estudios han demostrado que el ataque químico por sulfatos es bastante complicado (E.F. Irassar, 2009), sin embargo, existen algunos factores predominantes que pueden

afectar la evolución de las propiedades de los concretos como la concentración de la solución de sulfato, temperatura de exposición elevada, y bajo pH del concreto (J. Skalny, 2002), En la estructura analizada se observaron estos tres factores. Cabe resaltar que la concentración de sulfatos excedió considerablemente la concentración máxima propuesta por C. Andrade (1998), generando la posible formación de etringita y yeso, la cual pudo haber acelerado la degradación del concreto por los productos de hidratación del cemento y la solución de iones sulfato provocando expansión y fisuración (C. Yu et al, 2015; F. Bellmann et al, 2006). Esta exposición a sulfatos solubles puede sufrir ablandamiento de su matriz cementicia o aumento en la porosidad global, todos estos efectos pueden reducir la durabilidad de la estructura.

3.3. Propuesta de rehabilitación-reforzamiento.

Después de la inspección realizada, se recomienda realizar de manera inmediata los trabajos de reparación, rehabilitación y reforzamiento que se describen abajo, a través de un proyecto ejecutivo, el cual incluirá mayores detalles. Para incrementar la vida de servicio residual de la estructura; es importante que los trabajos se realicen en la totalidad de la torre, para evitar la generación de zonas vulnerables a los efectos galvánicos.

Preliminares.

Se deberá hacer el retiro de concreto deteriorado y/o contaminado únicamente en zonas anódicas; limpieza del acero de refuerzo, y preparación del sustrato de acuerdo con lo estipulado en NMX-C-518-ONNCCE-2016 (2016), revisión y reposición en caso de ser necesario.

Etapa 1

Debido a los resultados de velocidad de corrosión elevados, es posible que existan zonas de la torre donde la pérdida de sección del acero de refuerzo haya disminuido considerablemente; en los sitios que presenten disminución del diámetro nominal original en más del 10%, se deberá realizar el reforzamiento de la estructura mediante la sustitución con varillas de acero del diámetro original y mismo límite de fluencia (f_y) cumpliendo la norma NMX-B-457-CANACERO-2013 (2013). La secuencia y geometría de la reparación debe ajustarse al manual de la red Rehabilitar (Helene, 2003).

Etapa 2

Debido a las condiciones geométricas propias de la estructura y la dificultad de colocar cimbra o aplicar concreto lanzado en grandes alturas, se recomienda realizar la recuperación de la sección con mortero de reparación estructural fabricado con cemento Portland del Tipo RS (resistente a sulfatos) NMX-C-414-ONNCCE-2014 (2014) y que cumplan con NMX-C-418-ONNCCE-2015 (2015) con la fluidez adecuada para que sea aplicado a mano.

Etapa 3

Para disminuir la probabilidad de corrosión en las zonas reparadas se recomienda utilizar inhibidor de corrosión del tipo de nitrito de calcio de acuerdo con ASTM C494 / C494M-17 (2017).

Etapa 4

Debido a la resistencia a la compresión tan baja observada en los resultados, se realizará un reforzamiento en la base de la estructura con sistema CFRP (fibra de carbono), hasta nivel de pasarela 1; además con este sistema se podrá incrementar el confinamiento, resistencia al esfuerzo cortante y a las cargas externas como viento y sismos, pero sin disminuir la ductilidad del elemento ACI-440R-07 (2007).

Etapa 5

Se deberá colocar un recubrimiento de protección anti-carbonatación e impermeable a cloruros con capacidad de puenteo de fisuras (proveer de un acabado estético para prevenir fisuras en el concreto en caso de aparición, ya que éstas son el medio de ingreso de más contaminantes), con componentes químicos que estén de acuerdo con lo establecido en ASTM C494 / C494M-17 (2017).

4. CONCLUSIONES

El empleo de vehículos aéreos no tripulados para la inspección de estructuras de concreto reforzado es una herramienta potente que permite visualizar zonas donde el personal no puede acceder.

El mecanismo que gobierna la corrosión en la estructura estudiada es la carbonatación, debido a la elevada concentración de CO₂ en el ambiente y una humedad relativa considerable, lo que ha ocasionado que se reduzca el pH del concreto y se genere la despasivación del acero de refuerzo.

Las emisiones de sulfatos en el ambiente industrial y el depósito de éstos en las paredes de concreto, ha generado una disminución considerable de la resistencia mecánica, lo cual se ve reflejado en las grietas y delaminaciones.

Las reparaciones localizadas realizadas con anterioridad aceleraron los daños por corrosión en las zonas adyacentes debido a la generación de celdas galvánicas.

Los bajos valores de resistencia mecánica del concreto y la elevada velocidad de corrosión en diversas zonas de estudio, comprometen estructuralmente a la torre, y la seguridad del personal que en ella labora, requiriendo una inmediata intervención de rehabilitación y reforzamiento.

Se presentó un resumen de propuesta de reparación en cinco etapas que deben traducirse en un proyecto ejecutivo completo de reparación.

5. REFERENCIAS

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 de 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, Vennessland, 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)
- 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. Austiín, C. Andrade, J.A. Bolaño, F. Jiménez F. (1993), *U.S. Patent No. 5.259.944*. (1993)