Diagnóstico del estado de deterioro de un techo tipo reticular de concreto armado mediante técnicas no destructivas y semi-destructivas

Diagnosis of the deterioration state of a reticular reinforced concrete roof using non-destructive and semi-destructive techniques

MARTÍNEZ-BARRITA, Rolando^{1†*}, LÓPEZ-CALVO, Herwing Zeth², GÓMEZ-BARRANCO, Heidy², MUCIÑO-VÉLEZ, Alberto³

¹Facultad de Arquitectura “5 de Mayo”, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca (UABJO).
²Facultad de Arquitectura “5 de Mayo”, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca (UABJO), Cuerpo Académico “Tecnología y Sustentabilidad”, 5 de Mayo No.111, Centro Histórico, Oaxaca, Oax. México
³Facultad de Arquitectura, Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Ciudad Universitaria, Av. Universidad 3000, Del. Coyoacán, Cd. de México.

ID 1^{er} Autor: Rolando, Martínez-Barrita / ORC ID: 0000-0002-9813-0975
 ID 1^{er} Coautor: Herwing, López-Calvo / ORC ID: 0000-0001-6058-0981, Researcher ID Thomson: X-2136-2018, CVU CONACYT ID: 59541
 ID 2^{do} Coautor: Heidy, Gómez-Barranco / ORC ID: 0000-0001-7221-1438, Researcher ID Thomson: G-3415-2019, CVU CONACYT ID: 808434
 ID 3^{er} Coautor: Alberto, Muciño-Vélez / ORC ID: 0000-0002-6386-0249, CVU CONACYT ID: 231700

DOI: 10.35429/JCE.2019.7.3.12.20 Recibido 03 de Enero, 2019; Aceptado 30 Marzo, 2019

Resumen	Abstract
<p>En el presente artículo, se describen los trabajos de una investigación efectuada para diagnosticar el estado de deterioro de un techo tipo reticular, ubicado en el Centro Histórico de la ciudad de Oaxaca México, mediante técnicas no destructivas (TND) y semi-destructivas (TSD). El techo fue construido con un sistema estructural no convencional, el cual, consistió en el uso de vigas tipo reticular, casetones perdidos de block hueco y una losa de compresión. Durante la inspección visual, se observaron signos de deterioro en la estructura, como: filtraciones, lixiviación de sales, desprendimiento del recubrimiento y corrosión del acero de refuerzo. En concordancia, las TND y TSD seleccionadas para ejecutar el diagnóstico del estado de deterioro de la estructura, consistieron en la estimación de la resistencia a la compresión por medio de pruebas de esclerometría y de compresión en núcleos de concreto, determinación de los efectos de lixiviación de sales en el pH del concreto, estimación de la cantidad y ubicación del acero de refuerzo con pacómetro digital y estimación del estado de corrosión en varillas selectas mediante pruebas electroquímicas. Los resultados obtenidos revelaron la factibilidad del empleo de las TND y TSD para diagnosticar el estado de deterioro de manera poco invasiva.</p>	<p>In the present article, an investigation carried out to diagnose the state of deterioration of a reticular type slab, located in the Historic Center of Oaxaca city Mexico, using non-destructive (TND) and semi-destructive (TSD) techniques, is described. The roof was built with an unconventional structural system, which consisted of the use of reticular beams, missing hollow block cases and a compression slab. During the visual inspection, various signs of deterioration in the structure were observed, such as: leaks, salt leaching, shedding of the rebar cover and corrosion of the reinforcing steel. Accordingly, the TND and TSD selected to perform the diagnosis of the state of deterioration of the structure were the following: estimation of the compressive strength ($f'c$), by means of sclerometry test and compression test in concrete cores, determination of the effects of salts leaching on the pH of the concrete, estimation of the amount and location of the reinforcing steel with a digital pacometer and estimation of the corrosion state in selected rebars by electrochemical testing. The results obtained revealed the feasibility of using NDT and SDT to reliably diagnose the state of deterioration of a reticular slab of reinforced concrete in a non-invasive manner.</p>
<p>Diagnostico, Deterioro, Técnicas no destructivas, Semi-destructivas, Seguridad estructural</p>	<p>Diagnosis, Deterioration, Non-destructive, Semi-destructive techniques, Structural safety</p>

Citación: MARTÍNEZ-BARRITA, Rolando, LÓPEZ-CALVO, Herwing Zeth, GÓMEZ-BARRANCO, Heidy, MUCIÑO-VÉLEZ, Alberto. Diagnóstico del estado de deterioro de un techo tipo reticular de concreto armado mediante técnicas no destructivas y semi-destructivas. Revista de Ingeniería Civil. 2019. 3-7: 12-20

* Correspondencia del Autor (barrita1994@hotmail.com)
 † Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Debido a su interacción con los agentes ambientales, las estructuras de concreto armado son comúnmente afectadas por diversas causas a través de su vida útil; dichas afectaciones, suelen desencadenarse y agravarse como consecuencia de los defectos de construcción de la estructura, el tipo de mecanismo del daño y la presencia de una fuente de deterioro. Los factores que podrían impactar en la reducción de la vida útil de una estructura de concreto, se esquematizan en la Figura 1.

Figura 1 Factores desencadenantes de la reducción de la vida útil de una estructura de concreto reforzado
Fuente: Elaboración Propia

Para coadyuvar en el diagnostico del estado de deterioro de los materiales que componen una estructura de concreto reforzado, se han desarrollado diversas técnicas, semi-destructivas (TSD) y no destructivas (TND), que permiten la evaluación de la estructura de manera poco invasiva. Entre las TSD y TND más comunes, encontramos los equipos para la estimación de la resistencia del concreto, equipos de laboratorio y campo para estimar la probabilidad y velocidad de corrosión del acero de refuerzo, equipos analíticos para determinar la alcalinidad y potencial de hidrogeno del concreto, detectores de metal denominado como pacómetro, utilizado para estimar la cuantía y localización de los armados de la estructura, entre otros.

A pesar de la existencia de diversas TND y TSD para el diagnóstico del estado de deterioro de las estructuras de concreto reforzado, poco trabajo de aplicación de estas se ha desarrollado en México, y esta situación es aún más incipiente en el estado de Oaxaca.

Lo anterior, ha llevado a que los profesionales de construcción no cuenten con la información necesaria para el uso de estas técnicas; además, de contar con poco o nulo conocimiento de la normativa vigente en la materia.

Planteamiento del problema

Hoy en día, los avances tecnológicos y de investigación han permitido el desarrollo de TND y TSD para diagnosticar el estado de deterioro que guardan las estructuras de concreto armado expuestas a los agentes de degradación existentes en el medio ambiente. Sin embargo, en nuestro medio, a pesar de la disponibilidad de dichas técnicas, estas han sido poco ensayadas por los profesionales de la construcción para diagnosticar la integridad estructural de las edificaciones; esto, debido quizás a que no se cuenta con los conocimientos necesarios para determinar su factibilidad y confiabilidad. Lo anterior es una problemática que es de vital importancia atender, sobre todo en un estado como Oaxaca, al estar ubicado en una de las zonas con mayor incidencia sísmica de la república mexicana.

Justificación

Es en el contexto mencionado previamente, que los esfuerzos de investigación encaminados a evaluar la factibilidad y confiabilidad del empleo de TND y TSD para el diagnóstico de estructuras de concreto armado, se justifican ampliamente; ya que, dichas técnicas permiten recabar información confiable y sistemática sobre el estado de deterioro de las estructuras de manera poco invasiva. Lo anterior, es de vital importancia para garantizar la integridad y seguridad estructural de las edificaciones.

Hipótesis

El empleo sistemático de TND y TSD, permitirá diagnosticar el estado de deterioro de una techumbre de concreto armado para garantizar su integridad y seguridad estructural de manera confiable para sus usuarios.

Objetivos

Objetivo General

Diagnosticar mediante el uso de TND y TSD el estado de deterioro de una techumbre de concreto reforzado con el fin de garantizar su integridad y seguridad estructural sin alterar de manera invasiva las propiedades de los materiales que la componen.

Objetivos específicos

- Evaluar de la resistencia a la compresión del concreto (f'_c) mediante pruebas de esclerometría y en núcleos de concreto, extraídos de la estructura.
- Determinar la ubicación de los armados y cuantía de acero de refuerzo mediante la utilización de inducción de impulsos electromagnéticos con el equipo Profoscope.
- Determinación del estado de corrosión del acero de refuerzo por medio de pruebas electroquímicas de potenciales de corrosión (E_{corr}).
- Determinar los efectos de la lixiviación de sales de hidróxido de calcio y magnesio en el pH del concreto.

Materiales y métodos

Descripción de la estructura e inspección visual

El techo fue realizado con un sistema constructivo no convencional, el cual, consiste en trabes tipo reticular con una longitud variable de entre 3.50 y 4.90 m. Es relevante mencionar que, para el colado de la estructura, fueron utilizados como moldes perdidos, “casetones”, una serie de bloques huecos pesados, manufacturados con mortero cemento-arena (ver Figura 2).

Dichas trabes, se componen de tres nervaduras de sección transversal de 200 mm de peralte y 100 mm de ancho, ligadas entres si en su parte intermedia, por una nervadura de concreto reforzado con sección trasversal de 200 x 150 mm, aproximadamente. En la Figura 3, se ilustra una sección transversal de una de las nervaduras con sus dimensiones exteriores.

Figura 2 Vista general de la techumbre (Zona 1).

Figura 3 Lixiviación de los productos solubles (Vista del lecho inferior de la techumbre)

Durante el proceso de inspección visual, fue notoria la presencia de diversos signos de deterioro en la estructura, consistentes en agrietamientos, presencia de humedades, signos de corrosión del acero de refuerzo y presencia de sales de lixiviación en el lecho inferior y la parte lateral de las nervaduras. De acuerdo con la literatura, es posible inferir que la presencia de dichas sales es un síntoma de la lixiviación de los productos solubles presentes en la pasta de cemento (sales de hidróxido de calcio y de magnesio), que no fueron estabilizadas químicamente durante los procesos de hidratación (DePuy, 1994), como se puede mostrar en la Figura 3.

Ejecución de pruebas mediante TND y TSD

Derivado de los daños observados durante el proceso de inspección visual, se determinó llevar a cabo el diagnóstico del estado de deterioro que guarda la estructura por medio de TND y TSD.

Las propiedades a evaluar fueron: la resistencia a la compresión ($f'c$) por medio de pruebas de martillo de rebote (esclerómetro) y pruebas de compresión en núcleos de concreto obtenidos directamente de la estructura. Así también, se llevó cabo la estimación de la cuantía y localización de los armados de las nervaduras, determinación del estado de la corrosión del acero de refuerzo por medio de pruebas electroquímicas de potenciales de corrosión (E_{corr}), y determinación de los efectos de la lixiviación de sales en el pH del concreto.

Determinación del $f'c$ mediante martillo de rebote y extracción de núcleos de concreto.

Las lecturas de martillo de rebote (MR), fueron realizadas de acuerdo con la NMX-C-192 (ONNCCE-1997). Las mediciones fueron tomadas en la zona lateral de las nervaduras, esto se realizó con el fin de lograr, dentro de lo posible, ejecutar las pruebas en zonas con poco congestionamiento del acero de refuerzo (estribos y varillas longitudinales); para ello, fueron seleccionadas de manera aleatoria 6 nervaduras ubicadas en las 4 diferentes zonas de la techumbre, localizadas de acuerdo con el plano mostrado en la Figura 4.

Figura 4 Planta estructural de la techumbre

Cada nervadura fue dividida en 10 secciones de manera longitudinal y en cada sección se realizaron tres lecturas de MR con el fin de obtener un total de 30 lecturas por cada nervadura, y el valor promedio de ellas fue considerado como el $f'c$ final.

Posteriormente, con el fin de validar los datos obtenidos mediante la prueba de MR, se realizaron pruebas mediante TSD, consistentes en la obtención de núcleos de concreto y su posterior evaluación a la compresión de acuerdo con la NMX-C-169 (ONNCCE-2009). La extracción de los núcleos, se realizó por medio de una broca de diamante de 2 pulgadas de diámetro. Se obtuvieron un total de 3 núcleos de concreto de geometría cilíndrica de 48 mm de diámetro y una altura variable (ver Figuras 5 y 6).

Figura 4 Extracción de núcleos de concreto con broca de diamante de 2". (Del Viso, J. R., et al., 2008)

Para poder ejecutar las pruebas con una mayor precisión, una vez extraídos los cilindros, estos fueron cortados en sus extremos con una sierra de diamante con el fin de lograr dos caras paralelas entre sí (Fig. 6).

Figura 6 Núcleos de concreto para pruebas de compresión

Una vez obtenidos los núcleos, estos fueron probados a compresión axial, de acuerdo con (ASTM C39/C39M-12. 2012) utilizando una prensa digital de 150 toneladas marca Controls® (Figura 7). Los datos de f'_c obtenidos tras la evaluación de los núcleos, se ajustaron matemáticamente para poder equiparar los resultados con los que pudieran haber sido obtenidos en especímenes cilíndricos con una dimensión estándar.

Figura 7 Ejecución de las pruebas de compresión

Estimación de la cuantía de acero y localización de los armados

Para determinar la ubicación y cuantía del acero de refuerzo, se seleccionaron 12 nervaduras de manera aleatoria. Al igual que en la evaluación realizada para estimar la resistencia a la compresión, cada nervadura fue dividida en 10 partes en su sección longitudinal y en cada una de ellas se tomaron tres mediciones, para un total de 360 lecturas (Figura 8). El escaneo se llevó a cabo utilizando un pacómetro digital (detector de varillas) marca Profoscope®.

El equipo detector utiliza la tecnología de inducción de impulsos electromagnéticos para detectar las varillas. Las bobinas de la sonda se cargan periódicamente mediante impulsos de corriente, lo que genera un campo magnético. En la superficie de cualquier material conductor de corriente eléctrica dentro del campo magnético se producen corrientes de remolino, dichas corrientes inducen un campo magnético en sentido opuesto. El cambio de tensión resultante puede utilizarse para la detección del acero embebido en la estructura de concreto, hasta una profundidad de 100 mm.

Figura 8 Estimación de la cuantía y ubicación del acero con pacómetro digital Marca Profoscope®

Determinación del estado de la corrosión del acero de refuerzo

Durante la fase de la inspección visual, se pudo constatar la existencia de signos de corrosión en el acero de refuerzo embebido en las nervaduras. Debido a ello, se determinó realizar pruebas de potenciales de corrosión (E_{corr}) en una muestra de nervaduras que presentarán mayores daños visibles. Dichas pruebas se ejecutaron con el objetivo de conocer la posible presencia de corrosión activa en las varillas de refuerzo. En la Figura 9, se ilustra la toma de lecturas de E_{corr} utilizando un electrodo de referencia (media celda) de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄) de acuerdo con (Assouli, B., et., al. 2008).

Figura 9 Arreglo de media celda para pruebas de potenciales de corrosión (E_{corr})

Los resultados obtenidos fueron analizados y comparados de acuerdo con la Tabla 1, donde se pueden observar lo valores de la probabilidad de corrosión activa ocurriendo en la estructura, siendo -200 mV ó más positivo para un <5% de probabilidad de corrosión (pasivo), entre -200 y -350 mV se considera 50% de probabilidad de corrosión (intermedio) y más negativo que -350 mV, puede considerarse un 95% corrosión activa ocurriendo.

Probabilidad de corrosión activa	Lectura del potencial de media celda
	Cu-CuSO4 Electrodo
> 95 por ciento	Mas negativo que -350 mV
50 por ciento	- 200 a - 350 mV
< 5 por ciento	Mas positivo que -200 mV

Tabla 1 Valores de potenciales de corrosión (E_{corr}) para electrodo de referencia Cu/CuSO₄ (Broomfield, 2003)

Determinación del pH del concreto

De acuerdo con los resultados obtenidos en la etapa de inspección visual, como se comentó previamente, se pudo observar la presencia de eflorescencia de sales, fenómeno que se caracteriza por la presencia de manchas con polvo color blanco. Con el objetivo de conocer los efectos de lixiviacion en el pH del concreto, se llevaron a cabo pruebas de cuantificación de los potenciales de hidrogeno (pH) en polvos obtenidos de las trabes que presentaron mayor presencia de lixiviación de sales.

Para ello, se utilizó una broca de 5/8” con punta de diamante, y se obtuvieron muestras de polvo en capas de 10 mm en 10 mm hasta la profundidad de la varilla de entre 40 a 50 mm de profundidad. Los polvos obtenidos, fueron pesados y disueltos en agua des-ionizada en proporción de 75 ml por cada 10 gramos de polvo. Una vez homogenizada la muestra, como se observa en la Figura 10, se procedió a cuantificar el pH utilizando un potenciómetro digital Marca Hanna®.

Adicionalmente, con el objetivo de verificar de manera cualitativa los resultados obtenidos, se procedió a realizar una prueba de titulación por medio de la adición de fenolftaleína al 1% diluida en alcohol etílico. (steindl, y otros, 2019)

Figura 10 Pruebas de medición del pH por medio de potenciómetro digital Marca Hanna®

Resultados y discusión

Análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de esclerometría y resistencia a la compresión en núcleos

Los resultados de las pruebas de compresión obtenidos por medio de esclerometría y pruebas de compresión en núcleos, se enlistan en la Tabla 2. Como se puede observar, se realizaron un total de 60 pruebas, 10 lecturas por cada una de las 6 trabes selectas, ubicadas en las 4 diferentes zonas de la estructura. Cada una de las trabes está formada por 2 nervaduras, las cuales fueron divididas en 10 partes a lo largo de su sección.

Zona 1*		Zona 2*		Zona 3*	Zona 4*		f_c
Trabe A	Trabe B	Trabe C	Trabe D	Trabe E	Trabe F	Promedio	
240	248	298	281	208	227	244	
230	237	290	254	252	265		
250	253	268	248	256	261		
245	245	293	252	217	275		
245	235	276	283	198	283	219	
250	242	276	267	242	270		
230	243	281	228	253	264		
249	209	275	267	242	270		
250	232	272	228	253	264	223	
230	242	268	254	256	261		
242**	239**	280**	256**	238**	264**		
DV: 8.79	DV:12.03	DV:10.55	DV:18.89	DV:21.73	DV:14.71	DV:13.43	

* Ver ubicación en Figura 4- Planta estructural; DV: Desviación estándar. ** Valores de f_c promedio obtenido de 10 lecturas tomadas en dos nervaduras

Tabla 2 Resultados de las pruebas de esclerometría y compresión en trabes

La prueba de resistencia a la compresión se realizó en 3 núcleos tomados de diversos puntos de la estructura. Los resultados mostrados en la Tabla 2, demuestran que ambas técnicas utilizadas, TND con el martillo de rebote y TSD mediante compresión en núcleos concreto, presentan resultados de f_c , dentro de rangos similares, por lo que los resultados obtenidos con el martillo de rebote pueden ser considerados como válidos.

Es importante mencionar que, al momento de obtener los núcleos de concreto en la zona de la azotea, la sección de la losa de compresión se despegó del concreto de la nervadura, esto evidencia claramente que ambos concretos fueron colados en dos diferentes etapas, por lo que se puede inferir que las nervaduras y losa de compresión, no fueron coladas de manera monolítica (ver Figura 11).

Figura 11 Núcleo de concreto y sección de la losa de compresión

Cuántía de los armados

De acuerdo con el esquema presentado en la Figura 12, cada una de las trabes está estructurada por tres nervaduras longitudinales unidas en la parte central por medio de una nervadura intermedia.

Figura 12 Sección transversal y longitudinal de las nervaduras y su reforzamiento

La nervadura longitudinal intermedia (NLI), está compuesta por una sección de concreto de 150 mm de ancho, 200 mm de peralte y reforzada con 4 varillas de 5/8", dos en el lecho superior y dos en el inferior, y estribos de 1/4" a cada 150 mm. Por su parte las nervaduras longitudinales laterales (NL), están reforzadas con 2 varillas de 5/8", una en el lecho superior, otra en el inferior y un cumpio de varilla de 5/8" con estribos de 1/4" a cada 150 mm.

Derivado de las mediciones, se pudo determinar que los recubrimientos de las varillas presentan diversos espesores que fluctuaron entre los 10 y 60 mm, lo cual, evidencia las deficiencias y falta de consistencia en los procesos de construcción de la estructura.

Estado de la corrosión del acero de refuerzo

Los resultados de potenciales de corrosión (E_{corr}) obtenidos de 5 nervaduras que presentaron mayores evidencias de corrosión activa, son presentados por medio de una escala colorimétrica, como se ilustra en la Figura 13. Dicha escala colorimétrica fue utilizada con el fin de ilustrar de una manera más visual, el comportamiento de la potencialidad de corrosión ocurriendo en las nervaduras.

De acuerdo con la escala colorimétrica propuesta, el color rojo indica corrosión activa ocurriendo con una probabilidad del 95% (valores iguales o menores a -350 mV), el color naranja indica 50% de probabilidad intermedia de corrosión (valores entre -200 a -350 mV), y color amarillo representa probabilidades menores al 5%; es decir, que el acero se encuentra en estado pasivo (valores más positivos que -200 mV).

Figura 13 Potenciales de corrosión en nervaduras, Zona 1-4

Los resultados de E_{corr} , revelaron que existe una actividad de corrosión intermedia generalizada en todas las zonas de la techumbre. Sin embargo, es importante mencionar que, las zonas 1 y 4 presentan condiciones de pasividad del acero en diversas zonas con valores más positivos que -200 mV; en contraste, las zonas 2 y 3 presentaron potenciales de corrosión activa.

En especial la nervadura C, localizada en la Zona 2, presenta potenciales de corrosión activa generalizada con valores promedio de entre -350 a -625 mV, por lo que, se puede inferir, que dicha condición está presente en otras trabes de estas zonas. Es importante mencionar que, durante la etapa de inspección visual, se observó la presencia de escombros y diversos materiales de desecho acumulados en la parte superior de la techumbre, por lo que es posible especular que la presencia de estos materiales son un factor determinante en la presencia de humedad constante y falta ventilación de los espacios, lo que podría jugar un papel determinante en desencadenar y acelerar el proceso de deterioro por corrosión de la estructura. (Calvo, L. 2012).

Efectos de la lixiviación de sales en el PH del concreto

Los resultados de determinación de valores de pH, medidos en polvos obtenidos en 5 nervaduras a diferentes profundidades (de 0 a 50 mm), se muestran en la Figura 14. Los datos revelaron que el pH del concreto medido desde la superficie y hasta el nivel de la varilla, aún se encuentra en valores de entre 11.9 a 15.3. Lo anterior indica que, a pesar de la evidente disolución y lixiviación de compuestos solubles de hidróxido de calcio y de magnesio que se observan en el lecho bajo y cara lateral de las nervaduras, la alcalinidad del concreto aún se encuentra en valores estables para mantener en estado pasivo el acero de refuerzo. (Taha, y otros, 2019)

Figura 14 Datos de pH en polvos obtenidos de 5 nervaduras a diferentes profundidades (mm)

Cabe destacar que los resultados antes mencionados, fueron corroborados con la prueba de colorimetría, donde los polvos disueltos con pH mayores a 9, se tornaron magenta en todos los casos al adicionar el reactivo a base de fenolftaleína (Ver Figura 15).

Figura 15 Pruebas de colorimetría en polvos obtenidos a diferentes profundidades

Conclusiones

Con base a los datos recabados del diagnóstico de un techo tipo reticular de concreto armado mediante técnicas no destructivas y semi-destructivas, las siguientes conclusiones pueden ser propuestas:

1. Las pruebas de esclerometría y resistencia a la compresión en núcleos, indican que el f'_c del concreto fluctuó entre 240 y 280 kg/cm²; por lo que, se puede confirmar que dichos valores son aceptables para concretos de acuerdo con el Reglamento de Construcciones y Seguridad Estructural para el Estado de Oaxaca (RCSEEO); el cual, solicita valores de f'_c , iguales o superiores a 200 kg/cm² para concretos estructurales.

2. El análisis de cuantía de acero, permitió determinar la existencia de varillas de 5/8" como reforzamiento longitudinal en las nervaduras, tanto en el lecho superior como en el lecho inferior, y estribos de 1/4" a cada 15 cm en todas las nervaduras analizadas.

3. La evaluación del estado de la corrosión del acero, reveló la presencia de corrosión intermedia (50% de probabilidad) ocurriendo de manera generalizada en todas las nervaduras. En especial en las zonas 2 y 3, donde se encontró más humedad, se estimaron potenciales de corrosión con valores promedio de entre -350 a -625 mV, indicando corrosión activa con probabilidad del 95%. Sin embargo, a pesar de los altos potenciales de corrosión observados, aún no se observaron agrietamientos y desconchamiento del concreto causado por la expansión de productos de corrosión, lo que indica que el deterioro de estos elementos aún se encuentra en su etapa inicial.

4. Los resultados del análisis de los polvos para determinar efectos de la lixiviación de sales en el pH del concreto, mostraron que la pasta de cemento aún esta químicamente estable, ya que presento valores de pH entre 12 y 15 en todos los casos. Por lo anterior, se puede inferir que las varillas están protegidas en un medio suficientemente alcalino de acuerdo con los niveles normales del concreto (pH entre 12 y 14). Por lo anterior, se puede especular que los productos de lixiviación que se observan de manera superficial en el lecho bajo de la techumbre, podrían provenir de la losa superior, dado su excesivo grado de deterioro.

5. Los resultados obtenidos durante este trabajo de investigación, demuestran la factibilidad del uso de las TND y TSD utilizadas, para el diagnóstico de estructuras de concreto armado afectadas por diversas patologías. Sin embargo, se recomienda llevar a cabo más investigación relacionada con el uso de dichas técnicas, tanto en campo como en laboratorio, con el fin de garantizar su total confiabilidad.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Laboratorio de Materiales, Edificación y Medio Ambiente de la Facultad de Arquitectura “5 de Mayo” (LMEM-FA5M) de la UABJO. Al Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México (LMSE-UNAM). Y un agradecimiento muy especial a la Arquitecta Verónica Paulín Arredondo, por las facilidades prestadas para la ejecución de los trabajos de campo.

Referencias

Assouli, B., Ballivy, G., & Rivard, P. (2008). Influence of environmental parameters on application of standard ASTM C876-91: half cell potential measurements. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 43(1), 93-96.

ASTM, C. (2012). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. *ASTM C39/C39M-12*.

Broomfield, J. P. (2003). *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair*. CRC Press.

Calvo, L. y Zeth, H. (2012). Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete.

Del Viso, J. R., Carmona, J. R., & Ruiz, G. (2008). Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 38(3), 386-395.

DePuy, G. W. (1994). Chemical resistance of concrete. In *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. ASTM International.

Norma Mexicana, N. M. X. C-170-ONNCCE-1997. Agregados-Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidos en el Campo al Tamaño Requerido de las Pruebas. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, SC Available online: www.onncce.org.mx (accessed on 18 February 2017).

Steindl, F. R., Baldermann, A., Galan, I., Sakoparnig, M., Briendl, L., Dietzel, M., & Mittermayr, F. (2019). Chemical resistance of eco-concrete–Experimental approach on Ca-leaching and sulphate attack. *Construction and Building Materials*, 223, 55-68.

Taha, Y., Benarchid, Y., & Benzaazoua, M. (2019). Environmental behavior of waste rocks based concrete: Leaching performance assessment. *Resources Policy*, 101419.