



Revista de Arquitectura e Ingeniería
ISSN: 1990-8830
Olga-Toledo@empai.co.cu
Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería
de Matanzas
Cuba

El georradar en la evaluación de estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión.

Ballote Álvarez, Ing. Javier; Hernández Martín, Ing. Ernesto A.; Carraz Hernández, Ing. Orlando R.
El georradar en la evaluación de estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión.
Revista de Arquitectura e Ingeniería, vol. 15, núm. 1, 2021
Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería de Matanzas, Cuba
Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193966527002>

El georradar en la evaluación de estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión.

The georadar in the evaluation of reinforced concrete structures affected by corrosion.

Ing. Javier Ballote Álvarez javiab93@gmail.com
Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (Cujae)., Cuba

Ing. Ernesto A. Hernández Martín ernestohm96@gmail.com
Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (Cujae)., Cuba

Ing. Orlando R. Carraz Hernández
orlando@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (Cujae)., Cuba

Revista de Arquitectura e Ingeniería, vol. 15, núm. 1, 2021

Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería de Matanzas, Cuba

Recepción: 16 Diciembre 2020
Aprobación: 10 Febrero 2021

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193966527002>

Resumen: El método geofísico del Georradar (Ground Penetrating Radar, por sus siglas en idioma inglés, GPR) presenta varias aplicaciones en el ámbito de la ingeniería civil, siendo una de las de mayor campo, la evaluación del estado técnico de las estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión. En Cuba, este método ha sido poco difundido como Ensayo No Destructivo (END), en gran parte, por el desconocimiento de sus potencialidades en la ingeniería civil. En este artículo se realiza un análisis crítico de algunas investigaciones en las que se aplica el georradar para evaluar el estado técnico de túneles, puentes y edificaciones. Se aborda el marco regulatorio que ampara la utilización del Georradar como END en el mundo y las aplicaciones que ha tenido hasta el momento en Cuba. También se presentan las respuestas electromagnéticas del método ante diversas lesiones y causas que provocan daños en el hormigón armado como fracturas, oquedades, zonas de humedad, penetración de cloruros y la propia corrosión.

Palabras clave: georradar, GPR, hormigón, corrosión.

Abstract: Ground Penetrating Radar (GPR) is a geophysical method that has several applications in the field of civil engineering, one of the largest fields being the evaluation of the technical state of the affected reinforced concrete structures by corrosion. In Cuba, this method has not been widely used as a Non Destructive Test (NDT), largely due to the lack of knowledge of its potential in civil engineering. This article performs a critical analysis of some investigations in which the georadar is applied to evaluate the technical state of tunnels, bridges and buildings. The regulatory framework that protects the use of the Georradar as NDT in the world and the applications that it has had so far in Cuba are addressed. The electromagnetic responses of the method to various injuries and causes that cause damage to reinforced concrete such as fractures, cavities, areas of humidity, chloride penetration and corrosion itself are also presented.

Keywords: GPR, concrete, corrosion.

I. Introducción

La durabilidad de las estructuras de hormigón está determinada por el tipo e intensidad de los mecanismos de degradación que actúan sobre ella y por la resistencia a los factores físicos degradantes (procesos reológicos,

erosión, cristalización, lixiviación, sobrecarga, fatiga, influencia de las temperaturas y la humedad), a los mecanismos relacionados con fenómenos químicos (carbonatación, corrosión, impacto ambiental agresivo, reacciones entre componentes materiales) y a los mecanismos biológicos causados en la estructura de hormigón por la acción de organismos vivos como plantas, microorganismos y animales [1].

Como regla, en la práctica se producen combinaciones de los diferentes mecanismos, en forma de procesos de degradación complejos que causan daños a la estructura y, en última instancia, determinan su vida útil [1]. Uno de los mayores problemas que afecta la vida útil del hormigón es la corrosión del acero de refuerzo. Consiste en la oxidación destructiva del acero cuando el hormigón se encuentra expuesto a ambientes agresivos, en especial frente a la exposición a iones cloruros y/o dióxido de carbono. Las consecuencias de la acción destructiva de la oxidación se presentan como una disminución de la sección del acero, fisuramiento en el hormigón e incluso laminación del mismo, debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo y a la disminución o desaparición de la adherencia entre el refuerzo y el hormigón [2].

Cuba, es un archipiélago estrecho y alargado, presenta un clima tropical con una humedad relativa alta. Al estar rodeado completamente de mar, es afectado por la acción constante de los aerosoles marinos, siendo las estructuras cercanas al litoral costero las más afectadas por estos procesos. Este escenario produce un deterioro intenso y anticipado de las estructuras de hormigón armado debido a la corrosión del acero de refuerzo que comprometen el estado técnico de construcciones e instalaciones en el país.

Para la evaluación del estado técnico de las estructuras de hormigón armado existen ensayos o técnicas denominados destructivos y no destructivos. Dentro de los destructivos se encuentran: extracción y rotura de probetas testigo de hormigón y toma de muestras de armaduras [3]. Mientras que los no destructivos incluyen ensayo esclerométrico o índice de rebote, ensayos ultrasónicos, corrosímetros, resistividad eléctrica, termografía infrarroja, métodos radioactivos y electromagnéticos. Específicamente, para la evaluación de aquellas que están afectadas por la corrosión, existe un conjunto de técnicas y procedimientos no destructivos que permiten determinar el grado de afectación pero la práctica resulta difícil tener el equipamiento para ejecutar todas estas técnicas, lo más racional sería utilizar un conjunto de métodos que disminuyan los costos, pero que sean efectivos. Atendiendo a esto, el Georradar o Ground Penetrating Radar (GPR), es un método no destructivo idóneo para los estudios de corrosión, pues con el análisis de los radargramas y de la amplitud de la señal de la onda reflejada, se pueden obtener valores relacionados con el grado o nivel de la corrosión y su localización.

Las mayores aplicaciones del Georradar en la ingeniería civil son en estudios de Geotecnia, cimentaciones y para evaluar el estado técnico de pavimentos. A pesar de que se han dado importantes pasos en los estudios del hormigón armado mediante esta técnica, su utilidad

y versatilidad, es prácticamente desconocida por la comunidad de ingenieros y arquitectos de Cuba. El presente artículo tiene como objetivo mostrar las potencialidades del método del Georradar como END en el estudio de patologías en las estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión

II. Materiales y métodos

En este trabajo se hace una investigación bibliográfica sobre las potencialidades del Georradar como ensayo no destructivo para evaluar el estado técnico de las estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión.

III. Resultados

El Georradar, entre todas las técnicas no destructivas, es la que presenta las mayores ventajas por su gran versatilidad. Prácticamente con él pueden investigarse la mayoría de las patologías que afectan a las estructuras de hormigón armado, en el área de la defectología. Una de las mayores ventajas, es que permite obtener una imagen 2D o 3D de la estructura, de forma rápida y con una alta precisión, en dependencia de la frecuencia con la que se opere. Además, brinda la posibilidad de visualizar los datos en tiempo real, y de realizar un procesamiento “mínimo” con el equipo. Todo ello hace que el georradar sea especialmente útil en la ingeniería civil

Principio físico

El georradar consiste en la emisión de pulsos de ondas de alta frecuencia al medio y la recepción de la ondas reflejadas y difractadas producidas por las variaciones de las propiedades electromagnéticas del mismo. El equipo consta básicamente de antenas emisora y receptora, que pueden estar en un mismo dispositivo o separadas, y una unidad central que realiza el control de la emisión y recepción de las señales. La antena emisora emite un impulso electromagnético que se transmite por el interior de un medio y es reflejado por toda superficie que presente una impedancia eléctrica diferente. Las reflexiones en distintas interfases son recogidas por la antena receptora, y el conjunto de todas ellas, que constituirá la respuesta del material, queda registrado en una traza (A-scan). El conjunto de trazas registradas a lo largo del tiempo en un material se denomina radargrama (B-scan), Fig 1.

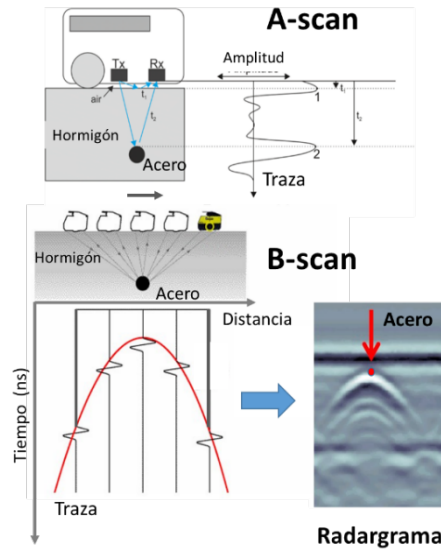


Figura 1

Adquisición de datos con GPR en la variante A-scan (traza) y B-scan (radargrama). La variante B-scan muestra la hipérbola de reflexión característica de los aceros embebidos en el hormigón u otros objetos como tuberías y cables. El ápice de la hipérbola muestra la localización del acero.

Tomado de Tosti y Ferrante [4]. Arreglos del autor

La propagación de las ondas en un material está determinada por los parámetros electromagnéticos: conductividad (σ), permitividad dieléctrica (ϵ) y permeabilidad magnética (μ), de manera que las reflexiones de las ondas se producen debido a los contrastes de dichas propiedades, lo cual permite caracterizar al medio. Las propiedades electromagnéticas de un medio están muy relacionadas con otras propiedades físicas (densidad, contenido de humedad, porosidad), con su composición y estructura a pequeña escala. Es por ello que se ha comenzado a utilizar en la caracterización de materiales. Específicamente, su aplicación en el estudio del hormigón ha dado resultados muy prometedores. [6]

La permitividad o constante dieléctrica es una medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Su rango de variación es entre 1 (aire) y 81 (agua a 20°C). La respuesta del GPR depende en gran medida de la permitividad dieléctrica, dado que la mayoría de los materiales son no magnéticos ($\mu = \mu_0$) y dieléctricos ($\sigma = 0$). Bajo estas condiciones, la velocidad de propagación (Ecuación 1) depende únicamente de la velocidad de la luz en el vacío ($c = 3 \times 10^8$ m/s) y de la constante dieléctrica relativa del medio (ϵ_r) [7].

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ m/s} = \frac{30}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ cm/ns}$$

Ecuación 1

La constante dieléctrica de los materiales de construcción está relacionada con las propiedades volumétricas de estos y puede utilizarse

en la identificación de los defectos o agotamientos dentro de las estructuras. En el caso del hormigón se correlaciona con el tipo de agregado, la relación agua-cemento y el contenido de cloruros. En general, el valor de permitividad suele ser tomado de tablas o determinado experimentalmente. Durante la propagación de una onda electromagnética por un medio se producen pérdidas de energía (atenuación) debido a diferentes causas. Esta disminución de la amplitud de la onda determina la profundidad máxima teórica que se podrá alcanzar en cada caso. Otros efectos tales como una mala relación señal/ruido, problemas con los equipos o un tratamiento incorrecto, harán que este valor sea, en la práctica, todavía menor que el esperado [8]. Los fenómenos de absorción y dispersión de la señal, siempre estarán presentes durante el paso de la onda por un material.

Una forma muy común de caracterizar a las antenas es por la frecuencia central de su emisión. La longitud de onda del pulso emitido depende de esta frecuencia y de la velocidad de onda en el medio a través de la Ecuación 2:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Ecuación 2

Donde λ es la longitud de onda, v es la velocidad de la onda y f es la frecuencia.

A mayor frecuencia de emisión, la onda sufre una mayor atenuación en su propagación. Por esta razón las antenas habrá que elegir las en función a las aplicaciones concretas a las que se quiera destinar el radar. Así, antenas de baja frecuencia (<100 MHz) tienen una gran capacidad de penetración (>9 metros), pero una escasa resolución. Por su parte, las antenas de alta resolución profundizan muy poco en el terreno, y permiten distinguir objetos de muy pequeño tamaño.

Cuando la antena emite un impulso, esta tiene cierta polaridad, que puede ser positiva o negativa. La señal reflejada puede conservar o no la polarización del impulso original, esto depende de la diferencia entre el valor dieléctrico de los materiales [9]. El parámetro R (Ecuación 3) indica la polaridad y amplitud de la reflexión, este se conoce como coeficiente de reflexión:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}}$$

Ecuación 3

Donde: ϵ_1 y ϵ_2 son las permitividades dieléctricas relativas del primer y segundo medio.

La magnitud del coeficiente de reflexión R está relacionada directamente con la amplitud de la reflexión de la onda recibida, es decir, la claridad con que se observa el reflector en el radargrama. La polaridad de la señal recibida, también es una información valiosa acerca del objeto que provoca la reflexión.

Los reflectores en los radargramas pueden ser hipérbolas de reflexión o reflexiones coplanares. Las hipérbolas de reflexión o de difracción se producen cuando la onda se refleja en un “objeto” inmerso en un medio circundante, por ejemplo, los aceros embebidos en el hormigón (Fig 1), oquedades y tuberías. También se producen en zonas puntiagudas donde exista un cambio de permitividad dieléctrica. Los reflectores coplanares se observan en contactos plano-paralelos u objetos de grandes dimensiones que el frente de onda lo aprecia como una superficie. Este tipo de reflectores se pueden distinguir en los contactos hormigón seco-hormigón húmedo, hormigón-roca, capas del pavimento, entre otros.

Corrosión del hormigón armado

La corrosión del hormigón armado es una de las causas más comunes de deterioro en este material [10,11]. La corrosión tiene lugar cuando se altera la protección de hormigón que le corresponde a cada estructura, al formarse una capa que pasiva la interface hormigón- acero. El hormigón le ofrece protección contra la corrosión al acero de refuerzo, ya que el oxígeno presente dentro de este material, forma una película de óxido en las barras, que constituye una capa pasiva que impide una corrosión profunda [12]. El acero reforzado que se encuentra embebido en el hormigón es vulnerable ante la corrosión una vez que se haya expuesto y que no esté protegido por el $\text{pH} > 10,5$. Sin embargo, hay dos componentes químicos que rompen la capa pasiva sin destruir el hormigón. El carbono, juntamente con los iones cloruro, son los principales responsables de la despasivación de las armaduras y por eso, son los principales factores desencadenantes de la corrosión de las armaduras [13]

Los procesos de corrosión son provocados por el fenómeno de difusión, en los poros del hormigón, de sustancias como el oxígeno, dióxido de carbono o los iones cloruro, que, combinados con la humedad ambiental, aceleran el deterioro del acero. Un hormigón fabricado con una alta

relación, una mala compactación, segregación de la mezcla, un deficiente curado y un secado prematuro por efectos del viento o la radiación solar, se convierte en un hormigón con alta porosidad y permeabilidad en la zona del recubrimiento, que facilita el ingreso de sustancias agresivas que corroen las armaduras y deterioran el elemento estructural.

Aplicaciones del GPR

A continuación, se realiza un análisis de la bibliografía más destacada a nivel internacional referida al uso de la técnica del GPR para la evaluación del estado técnico de diferentes estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión.

El GPR en estudios de edificaciones, túneles y puentes

Una metodología para estudiar la base de hormigón armado y determinar el contenido de humedad del piso de un edificio en Valencia, España fue confeccionada por Pérez-Gracia et al., [14]. Las mediciones se tomaron en dos momentos diferentes, en tiempo de seca y en tiempo de lluvia con cuatro tipos de antenas. Con la antena de 1,5 GHz se pudo detectar fácilmente los aceros a partir de las hipérbolas de reflexión. Las zonas con fracturas se detectaron por los cambios drásticos de amplitud. Según los autores, las posibles zonas de humedad se relacionaban con secciones de baja reflexión y con baja velocidad de la onda. Hugenschmidt y Kalogeropoulos [15], también realizaron un estudio similar, utilizando diferentes frecuencias (1,5 GHz, 900 MHz y 400 MHz). Con las tres antenas se pudieron detectar los aceros embebidos, pero la antena de 1,5 GHz, al igual que en Pérez-Gracia et al., [14], resulta la idónea para esa investigación.

Dinh et al., [16] realizó un estudio en un parqueo subterráneo, para conocer si los aceros embebidos estaban corroídos o no. Se detectó también un sector donde se produce una atenuación de la señal hasta la base de la losa de hormigón (Fig 2). Esta disminución de la amplitud está relacionada con la alta humedad existente en la zona, que hace que la velocidad de propagación de la onda disminuya drásticamente y se pueda delimitar esta área como una zona de corrosión.

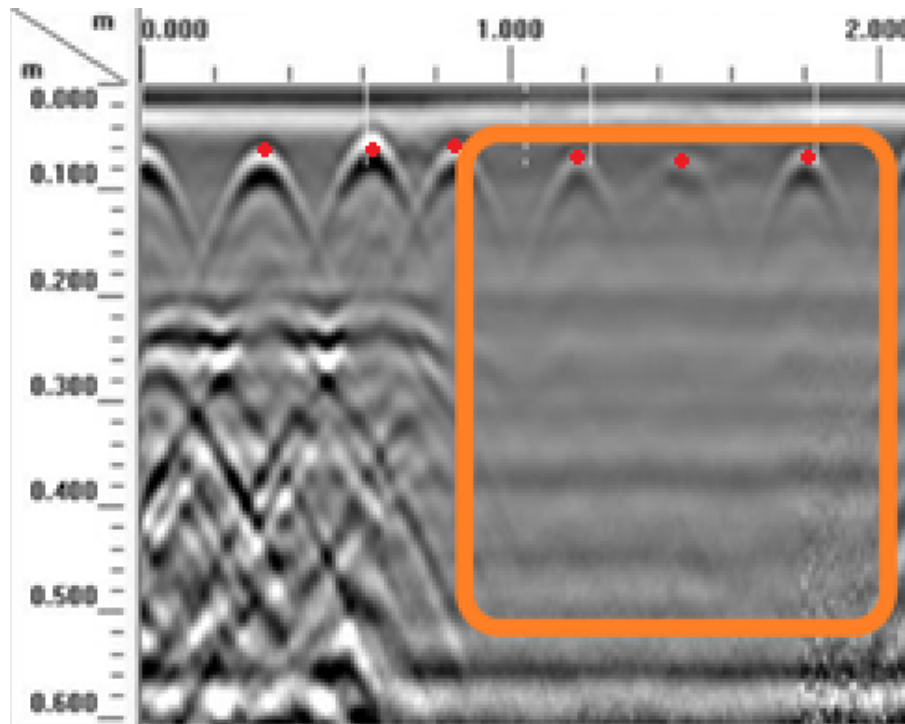


Figura 2

Ubicación de los aceros con puntos rojos y dentro del cuadro naranja zona de máxima humedad y área de corrosión de aceros.

Fuente: Dinh et al., [16].

Para delimitar zonas donde está corroído el acero de refuerzo y determinar otras lesiones como grietas, humedades y oquedades, Solla et al., [17] utilizaron dos END: el GPR con antena de 2.3 GHz y la termografía infrarroja. Según los autores al aumentar el contenido de agua en el material, la velocidad de propagación disminuye; posterior a este momento las partículas de óxidos ocupan los poros en el hormigón y aumenta el volumen, lo que produce un incremento de la amplitud de la señal reflejada. Durante la fase de migración de los cloruros y óxidos disminuye el espectro de frecuencia y en el momento que disminuye el diámetro del acero, la amplitud de la señal disminuye. Esto permitió caracterizar cada una de las patologías a partir de un análisis conjunto, teniendo en cuenta la variación de la amplitud de la onda, la velocidad de propagación de la onda, la amplitud del espectro y la polaridad de la señal. Con la termografía infrarroja, atendiendo a las variaciones de las propiedades térmicas, se puede confirmar si la señal que se atenúa en el radargrama es causada por el alto contenido de humedad o por el contenido de sales minerales debido a la cercanía de la edificación al mar, pues la temperatura debido a la humedad es menor que la de las sales minerales.

Las principales aplicaciones del GPR en el diagnóstico de túneles están dirigidas a determinar el espesor y la condición de la pared del muro, incluyendo el análisis del estado del refuerzo, así como el estudio de las posibles oquedades existentes entre el hormigón y la roca [6]. Parkinson y Ékes [18] realizaron un levantamiento con una antena de 1 GHz

para identificar los problemas constructivos que pudiera presentar un túnel. Fueron detectados los aceros de refuerzo y también oquedades que se encontraban entre el hormigón armado y la roca; estas últimas se identificaron en el radargrama por tener mayor amplitud en la línea de separación entre el hormigón y la roca de caja, como si fuese un “punto brillante”. Se definieron áreas con hormigón de baja calidad, el cual se encontraba poroso y relleno de aire. Además, fueron señalados trozos de maderas que quedaron impregnados en la solución del hormigón que se caracterizan en los radargramas por presentar bandas anchas paralelas de gran amplitud. Se corroboró esto con algunas perforaciones que se realizaron.

Cassidy et al., [19] desarrollaron un estudio para detectar oquedades por debajo del túnel del metro. Se observaron hipérbolas coherentes, fuertes y uniformes que estaban espaciadas regularmente como consecuencia de los aceros de refuerzos enterrados. Grosso modo, las zonas de fracturas se distinguen por fuertes contrastes de amplitudes en la imagen del GPR [19, 20, 21] y las zonas de debilidades de reflexión son debido a la fuga de agua por las zonas de fractura [21].

Prego et al., [22] investigaron con una antena de 1 GHz un túnel ferroviario de alta velocidad de Galicia, España durante su etapa constructiva. A través de los radargramas se pudo comprobar el espesor del gunitado, zona que tiene una heterogeneidad y un aumento de la amplitud en las reflexiones por la existencia de fibras de acero agregadas durante el propio proceso de relleno. También, teniendo en cuenta los cambios de amplitudes de los reflectores cartografiaron las zonas de humedad y las oquedades.

El GPR también se emplea como herramienta de diagnóstico de puentes realizados con pétreos naturales o con hormigón, para localizar la posición de las armaduras en la losa de hormigón, estudiar el estado del recubrimiento del hormigón, estimar las dimensiones de la losa y su posible deterioro. Kim et al., [23] efectuaron varias mediciones con el GPR en un puente ubicado en Missouri, con una antena de 1,5 GHz. Estos levantamientos se llevaron a cabo en diferentes períodos del año, destacar que no variaron mucho, pero atendiendo a la intensidad de la magnitud de las reflexiones, estas fueron ligeramente mayores en el período de humedad que en seca, mientras que el tiempo de llegada de la onda fue mayor en condiciones húmedas que en sequía. Se ubicaron los aceros de refuerzos, se delimitaron dos zonas que presentaban baja amplitud y un aumento del tiempo de viaje de la onda, relacionados con el alto contenido de humedad y con la concentración de cloruros, lo cual intensifica la corrosión de los aceros. Por otra parte, Ekes, [24] determinó la posición y espaciamiento de los aceros en una viga de un puente.

Morris et al., [25] determinaron una cobertura insuficiente de hormigón, lo que provoca una alta probabilidad de exposición de los aceros de refuerzo. Además, relacionaron la zona de mayor amplitud con la presencia del hormigón más consolidado, se detectó una oquedad por una gran reflectividad debido al contraste de las constantes dieléctricas del hormigón y el aire. Kim et al., [23], Ekes, [24], Morris et al., [25] Istiaque

et al., [26] y Beben et al., [27], utilizaron antenas de más de 1 GHz para estudiar los puentes.

Estudios de humedad

Laurens et al., [28] ensayan el efecto de la humedad en la propagación de la onda electromagnética mediante GPR con una antena de 1,5 GHz. Como resultado, entre la saturación de agua en el hormigón y la constante dieléctrica existe una relación directa, es decir, a medida que aumenta el porcentaje de saturación de agua, aumenta la constante dieléctrica. Los autores definieron también el efecto de la humedad en la amplitud y demostraron que existe una relación inversa con la amplitud.

Algunas investigaciones estiman el contenido de agua libre en el hormigón por medio del estudio de distintos parámetros de la onda electromagnética [28]. Otros se centran en caracterizar el sistema poroso del hormigón endurecido, o bien en la determinación del contenido volumétrico de agua en el hormigón, y la estimación del grado de penetración del agua. Incluso algunos analizan la relación entre los parámetros de onda registrados por medio de GPR con algunos indicadores relacionados con la durabilidad, en particular los contenidos de agua y cloruros en el hormigón [6].

Determinación del radio de los aceros

La determinación del radio del acero mediante GPR es un proceso que resulta extremadamente complejo y se realiza fundamentalmente en los trabajos experimentales. En este sentido, se han desarrollado varias formulaciones matemáticas que permiten estimar, con cierto grado de incertidumbre, el radio de los aceros a partir de las hipérbolas de reflexión. Entre ellas, se encuentran las ecuaciones de Shihab et al., [29] y Lakshmi et al., [30]. En los últimos años se han desarrollado algoritmos automatizados para la detección e interpretación de datos de GPR a partir de la signatura hiperbólica típica de los aceros.

Estudios experimentales para determinar el grado de corrosión

Una práctica común para los ensayos experimentales de corrosión en el hormigón armado, es acelerar el proceso de corrosión sumergiendo una losa de hormigón armado en una solución salina de NaCl al 5% [31-34]. Luego de un tiempo determinado, se extrae la muestra y se aplica corriente eléctrica en el rango de 1 Amperes y 10 Volts, seguidamente se mide con el GPR, ya sea de forma puntual o mediante perfiles. El ensayo simula una pila electroquímica, donde uno de los aceros funciona como cátodo y otro como ánodo, así ocurren los procesos de reducción y oxidación utilizando como medio el hormigón armado (Fig 3). Con esta metodología es posible observar, mediante mediciones continuas, los cambios que se producen en la señal electromagnética en cada una de las fases de corrosión, lo que

permite establecer criterios comparativos para evaluar grados de corrosión en diferentes estructuras de hormigón armado.

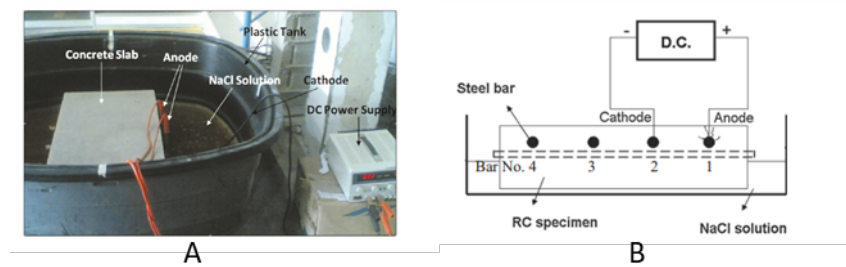


Figura 3

(A) Ensayo típico para llevar a cabo la corrosión del hormigón armado. Fuente: Zaki et al., [34]. (B) esquema conceptual ánodo-cátodo, se observa claramente como en una muestra de hormigón armado, un acero hace función de cátodo (reducción) y otro de ánodo (oxidación) al pasar corriente mientras se encuentran sumergidos en una solución de NaCl. Fuente: Hong et al., [32].

Para determinar el daño producido por la corrosión en una losa de hormigón, Kabir y Zaki [35] se basan en el uso conjunto del GPR y el método de potencial de media celda (HCP, por sus siglas en inglés). En este caso, los aceros fueron colocados en una solución de cloruro de sodio e hicieron incidir sobre ellos una corriente directa durante 1, 3 y 7 días. Luego, los aceros fueron embebidos en una mezcla de hormigón. Después de 28 días de curado, se midió con una antena de 2 GHz de frecuencia de tres modos: A-scan, B-scan y C-scan (Fig 4 A, B y C). Se observó que el primer acero, al cual no se le suministró corriente, se mantenía en perfectas condiciones con una gran intensidad; por otro lado, a medida que aumentaban los días de exposición a la corrosión, mayor era la amplitud, lo cual se evidencia en las barras de color rojo que representan los aceros con mayor corrosión.

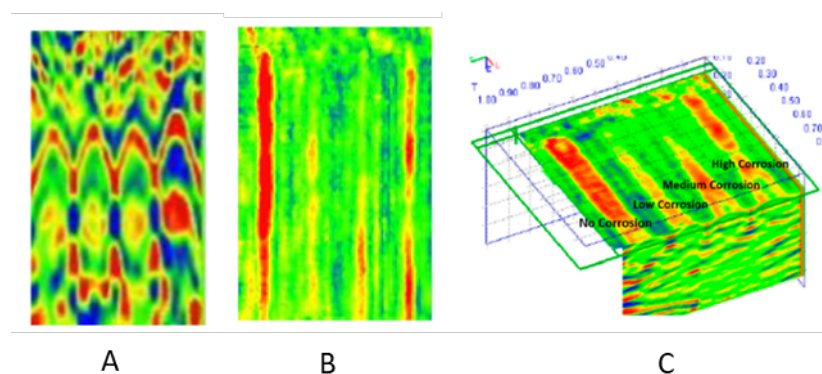


Figura 4

Resultado de las mediciones: (A) B-scan, (B) C-scan y (C) una imagen 3D. De izquierda a derecha: acero no corroído, acero con baja corrosión, acero con corrosión media y acero con alta corrosión. Kabir y Zaki [35]

Lai et al., [36], marcan una pauta en los estudios de corrosión mediante GPR y al igual que, Kabir y Zaki [35], comparan los resultados obtenidos con los de HCP. Los autores, se basaron en detectar la corrosión de las

barras de refuerzo, midiendo de forma puntual en tres fases diferentes: fase de contaminación con NaCl, fase de despasivación y fase de corrosión. Tuvieron en cuenta tres aspectos para explicar los cambios ocurridos: tiempo de viaje de la onda, amplitud de la señal recibida y el pico de la frecuencia espectral. Se detectó que la amplitud positiva máxima de la onda reflejada, cambia en las diferentes fases de corrosión. En la etapa de contaminación con NaCl, la amplitud fue alta. En la segunda fase disminuyó debido a la despasivación de las barras de refuerzo y la reducción del pH del hormigón, pero con el aumento de la corrosión, la amplitud comenzó a aumentar con el tiempo. El tiempo de viaje de la onda en cada una de las fases aumentaba, mientras que el pico de la frecuencia espectral siempre fue en aumento. Por otra parte, al analizar los resultados del potencial de media celda, se evidencia que las áreas de mayor corrosión se encuentran en las zonas de mayor potencial.

Hong et al., [32] prosiguieron con las investigaciones ejecutadas por Lai et al., [31], [36] y realizaron mediciones en perfiles, en lugar de hacerlo de manera puntual sobre una losa de hormigón armado, y se apoyaron en el método de potencial de media celda. Los autores dividieron las mediciones en dos experimentos, el primero con la acción directa de la humedad y la contaminación de cloruros y el otro sin la influencia de estos. Los análisis fueron realizados en el dominio del tiempo y de la frecuencia, y se tomó tanto la onda reflejada como la directa. Como resultado se obtuvo que, para el primer caso, el pico de frecuencia de la señal reflejada decrece y el tiempo de viaje de la onda va en aumento. Mientras que, en el segundo caso, el tiempo de viaje disminuye y la amplitud de la señal aumenta. Hong et al., [32] cartografían la penetración de cloruros mediante los cambios del pico de frecuencia de la onda directa, el cual disminuye al aumentar el contenido de cloruros y la humedad. En este último caso, los resultados fueron comparados con testigos extraídos de la muestra y analizados mediante Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) que corroboraron la penetración de cloruros en los sectores identificados mediante GPR.

Se han establecido relaciones estadísticas entre la permitividad dieléctrica y los diferentes parámetros, dígame amplitud resultante, grado de corrosión, porcentaje de pérdida de masa de las barras de acero y tiempo de viaje de la onda [33, 37]. Al aumentar el grado de corrosión, aumenta la permitividad dieléctrica, al igual que el porcentaje de masa perdida y el tiempo de viaje de la onda, sin embargo, la amplitud disminuye [37]. También se ha tenido en cuenta la profundidad a la que se encuentra el acero; mientras más profundo sea, mayor tiempo de viaje; y mientras mayor sea el diámetro y menor sea la profundidad a la que esté ubicado, mayor será la amplitud obtenida. Sin embargo, Krishnarajapete, [33] plantea qué en estas condiciones, la amplitud es mayor al aumentar el grado de corrosión.

Zaki et al., [34] y Sossa et al., [38], defienden el criterio de que a medida que aumenta el grado de corrosión, los valores de amplitud disminuyen junto con la intensidad de los reflectores, conformando zonas borrosas. Esto se debe a que a medida que se corroe más el acero, el hormigón se ve

afectado por el óxido de hierro, apareciendo pequeñas fisuras, afectando la porosidad y la densidad del medio [38]. Con este aumento de la heterogeneidad se disemina la señal del GPR.

En su trabajo, Lai et al., [39], describieron las diferentes aplicaciones que brinda el GPR para los estudios ingenieros civiles. Los autores plantean que la corrosión se divide en dos fases: la fase de iniciación de corrosión y la fase de propagación de corrosión activa. La iniciación se refiere a la intrusión del CO₂, seguido de agua y la contaminación de cloruros, dando inicio a la corrosión que es un proceso de naturaleza electroquímica. La fase de propagación de la corrosión se basa en la despasivación y desarrollo de un área de transición entre hormigón y acero, así como la posterior pérdida de tamaño y grosor. Ambas fases fueron estudiadas por diferentes autores, utilizando la técnica del GPR, y los criterios resultantes no son uniformes. En estas investigaciones existe una paradoja a la hora de analizar el proceso de umbral de intensidad, en una zona donde coexistan estas dos fases.

Ejemplos de aplicación del GPR para la ingeniería civil en Cuba

En Cuba, los reportes acerca del empleo del GPR en la ingeniería civil son muy escasos. La técnica se ha utilizado en estudios de diagnóstico de edificaciones con gran valor arquitectónico, en la localización de elementos estructurales dentro de paredes y molduras de yeso, para la localización de las armaduras de acero y el estado de corrosión de las mismas y en la localización de redes de servicios hidráulicos y de comunicación [40]. Recientemente, la Empresa Nacional de Ingeniería Aplicada (ENIA), adquirió un GPR del fabricante MALÅ con varias antenas: 80 MHz, 160 MHz, 450 MHz, 750 MHz y 1,6 GHz. Con la adquisición de este moderno equipamiento, esta empresa ha realizado estudios en la determinación de cimentaciones en edificios históricos y en la evaluación geotécnica a lo largo de todo el país. Anterior a este, tenían un GPR de la misma marca con el que se realizaron diversas investigaciones, cumpliendo distintas tareas técnicas relacionadas con la ingeniería civil.

Marco legal

Algunas organizaciones internacionales promueven algunas pautas, estándares o recomendaciones, utilizando específicamente la técnica del GPR. En Norteamérica se encuentra ASCE (CI/ASCE 38-02) [41], ASTM internacional (ASTM C876-91) [42], (ASTM D6432-99 (2005) [43], ASTM D6432-11 (2011) [44] y ASTM D6087-08e1 (2015) [45], en Europa rige la EuroGPR [46]. Actualmente, en Cuba no existe ninguna norma que regule los procedimientos necesarios para evaluar el estado técnico de las estructuras de hormigón armado, mediante el GPR.

La norma cubana vigente NC-1109:2015 [47] y la regulación RC-9002:2000 [48] recogen como ensayos no destructivos, a los

métodos esclerométrico y ultrasónico para determinar la resistencia a la compresión en estructuras de hormigón armado. Para la evaluación de la corrosión, la norma NC-695: 2009 [49] solo considera la determinación de la corrosión del acero de refuerzo por métodos electroquímicos galvanostáticos a probetas previamente elaboradas, no se realizan mediciones directamente sobre la estructura. Tampoco en el ámbito de la defectología y análisis patológico, se reconocen las bondades del GPR como ensayo no destructivo para el estudio de patologías del hormigón armado.

IV. Discusión de los resultados

A partir de la investigación bibliográfica se pudieron resumir las principales características de la respuesta electromagnética del GPR ante diferentes factores y lesiones que provocan daños en el hormigón armado. En este sentido, la humedad se caracteriza por una disminución en la velocidad de propagación de la onda, menor temperatura (mediante Termografía Infrarroja) [17], mayores valores de constante dieléctrica, y dispersión y atenuación de la señal. A su vez, la penetración de cloruros se determina por una severa atenuación, pequeños valores de amplitud de la señal y una disminución del pico de frecuencia de la onda directa [32], al igual que de la velocidad de propagación. La temperatura mediante Termografía Infrarroja [17] muestra valores más elevados. Los vacíos u oquedades en el hormigón se distinguen por presentar cambios de polaridad de la señal, gran reflectividad en los radargramas y valores de amplitud menor que los aceros de refuerzo [17, 25]. Por su parte, los aceros de refuerzo se identifican por presentar efecto de ringing (antes de que se le aplique la Deconvolución), tener altos valores de amplitud, y valores de potencial por HCP mayores que -200mV [31, 35]. En cambio, los aceros corroídos presentan una mayor atenuación de la señal, mayores valores de constante dieléctrica, aumento del tiempo de viaje de la onda con respecto a los aceros no corroídos y valores de potencial por HCP menores que -350 mV [31,35]. El comportamiento de la amplitud, se suele aceptar que disminuye en la fase de inicio de la corrosión y que aumenta durante la fase de corrosión activa

Las antenas de mayor frecuencia (1,5 - 2,6 GHz) ofrecen una mejor resolución para detectar los aceros, determinar pequeñas oquedades y evaluar el grado de corrosión de las estructuras de hormigón armado [17, 23, 30, 31, 34, 35, 36, 38]. Las antenas con frecuencia menor (400-900 MHz) ofrecen una resolución inferior, siendo útiles en la detección de los aceros, en dependencia del espesor y la separación de los mismos, en estudios de pavimentos, túneles y para determinar el espesor del hormigón [19, 20-22]; su principal ventaja es la profundidad de estudio y que suelen estar montadas sobre ruedas de mayor tamaño, lo que hace más rápido la adquisición de los datos. Ambas antenas permiten detectar oquedades, zonas de agrietamientos y humedad. La elección de un tipo u otro de antena dependerá de la estructura a investigar, del tipo de información que se desea obtener, así como de la profundidad

de la investigación. En cuanto al sistema de adquisición, el A-scan es el menos empleado y se usa mayormente con antenas de alta frecuencia en los ensayos o pruebas de laboratorio de manera puntual [17, 31, 34, 38]. El objetivo de su uso es determinar la variación en el tiempo de la amplitud y los picos de frecuencia de la onda directa y reflejada, que son indicadores de los cambios en las propiedades electromagnéticas del medio. El B-scan constituye la forma de adquisición más común, por su rapidez y versatilidad [16, 18-27]; puede aplicarse sobre cualquier tipo de estructura y permite realizar un A-scan tomando una traza del radargrama o simular un C-scan mediante perfiles paralelos. Este esquema de adquisición, para una mayor calidad en los resultados, se debe realizar de forma perpendicular a la posible ubicación de los aceros en el hormigón. En cuanto al C-scan, es el idóneo para conocer la distribución de los aceros, se suele aplicar en pequeñas áreas donde se desea obtener toda la información posible, el tiempo de adquisición de los datos con el C-scan es mayor, pero la calidad de la información aumenta [19, 35].

En la bibliografía consultada sobre la evaluación del estado técnico de las estructuras de hormigón armado utilizando la técnica del georradar, los expertos se concentran en la identificación de fracturas y oquedades [17, 25], en determinar el espesor del hormigón [23, 26], en la detección de los aceros [27, 50], y en las zonas de humedad [26]. La identificación de la corrosión se realiza a partir de la coincidencia de las zonas de humedad con la ubicación de los aceros y se definen estos sectores como los más probables para el desarrollo de la corrosión [16, 23]. Otra forma es mediante el análisis de cada acero y observar los cambios en la amplitud de la señal a medida que se mide sobre el acero [31, 33, 34]. Los cambios de amplitud en el acero aportan información sobre el cambio de las propiedades electromagnéticas del mismo, debido fundamentalmente a la corrosión. Otra forma de medir la corrosión directamente sobre la estructura, es apoyarse en otros métodos como el HCP; donde se calibra la amplitud de la señal del GPR con el nivel de corrosión sobre un acero dado por el HCP y luego se realizan las mediciones de GPR al resto de la estructura [31, 35].

Los ensayos experimentales sobre muestras de hormigón han revelado dos tendencias por parte de los investigadores; una es, a interpretar la corrosión con el aumento de la amplitud [4, 31, 32, 35, 36, 39, 51, 52] y otra es, con la disminución de la amplitud [34, 37, 38]. Aun cuando no se hayan definido los umbrales y no se haya llegado a un consenso, se acepta el criterio de que la baja intensidad corresponde a la fase inicial de corrosión y la alta intensidad a la fase activa de corrosión.

IV. Conclusiones

Dentro de las técnicas no destructivas en el ámbito de la defectología, el GPR es el que ofrece las mayores ventajas para evaluar el estado técnico de las estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión, pues permite realizar una caracterización integral de las patologías presentes con alta precisión y rapidez.

Las principales aplicaciones del GPR para evaluar el estado técnico de las estructuras de hormigón armado son: la localización de los aceros de refuerzo, su espaciamiento y en menor medida su radio; identificar zonas con humedades o con saturación de agua y la localización de zonas de fracturas, fallas y oquedades.

En los estudios de corrosión de los aceros de refuerzo, cuando la amplitud de la onda reflejada disminuye, corresponde a una zona de corrosión en fase de iniciación, mientras que, si presenta una mayor amplitud, se reconoce como una zona de corrosión en fase activa; a la vez que los cambios de polaridad de la onda con alta amplitud corresponden a oquedades y los bajos valores de intensidad de la señal son característicos de las zonas húmedas.

La utilización de la técnica del GPR para el estudio del estado técnico de las estructuras de hormigón armado en Cuba aún se considera incipiente. Para el desarrollo del método es necesario la adquisición de equipamiento por parte de las empresas del sector de la construcción y el desarrollo normativo del método para su correcta aplicación.

Referencias

- Holá, J.; Bien, J.; Sadowski, L.; Schabowicz, K. (2015) "Non-destructive and semi-destructive diagnostic of concrete structures in assessment of their durability". *Bulleting of the polish academy of sciences*, vol. 63, p87-96.
- Aguirre A. M.; R. Mejía de Gutiérrez. (2013) "Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas". *Materiales de Construcción*, vol. 63, p7-38.
- Porto Quintián, J. (2005) "Manual de patologías en las estructuras de hormigón armado" Universidade da Coruña. Escola Universitaria de Arquitectura Técnica.
- Tosti, F y Ferrante, C. (2019) "Using ground penetrating radar methods to investigate reinforced concrete structures". *Surveys in Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09565-5>. Springer.
- <https://www.pcte.com.au/lmx-100-utility-location-gpr>
- Martínez-Sala, R.; Mené-Aparicio, J.; Rodríguez-Abad, I. (2017) "Aplicación de la técnica del georradar en ingeniería civil: evaluación de la variación del contenido de agua en el hormigón" *Hormigón y Acero*; 68(283):251–262
- González Roura, N. (2013) "Comparación de técnicas no destructivas en la inspección del hormigón armado: Georradar versus tomografía ultrasónica". Proyecto fin de máster (inédita). Universidad politécnica de Valencia.
- Pellicer Llopi, V. (2014) "Ensayos no destructivos en hormigón. Georradar y ultrasonidos". Universidad Politécnica de Valencia.
- Gacitúa Lovera, G. F. (2006) "Estudio en estructuras de hormigón armado mediante el uso de un radar de penetración terrestre". Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero Electrónico (inédita), Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Howland-Albear, J.J.; Castañeda-Valdés, A.; Corvo-Pérez, F.; Martín Acosta, A. R. (2014) "Estudio del ambiente agresivo costero de la Habana y

- su impacto sobre las estructuras de hormigón armado”. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, vol. 46, p. 1-8.
- Alla, A. (2016) “Análisis comparativo de normativas: ACI 318-14 y EHE-08”. Trabajo de fin de grado (inédita). Departamento de la tecnología de la construcción. Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica.
- Avendaño Rodríguez, E. (2006) “Detección, tratamiento y prevención de patologías en sistemas de concreto estructural utilizados en estructura industrial”. Trabajo de grado (inédita). Facultad de ingeniería civil. Universidad de Costa Rica, 19p.
- Simoes Ventura, G.F. (2013) “Estudio experimental de los efectos de la corrosión de las armaduras en vigas continuas de hormigón armado”. Tesis de máster (inédita). Universidad Politécnica de Barcelona.
- Pérez-Gracia, V.; F. García García.; I. Rodríguez Abad. (2008) “GPR evaluation of the damage found in the reinforced concrete base of a block of flats: A case study”. *DT&E International*, vol. 41, p. 341-353.
- Hugenschmidt J. y A. Kalogeropoulos. (2009) “The inspection of retaining walls using GPR”. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 67, p. 335–344
- Dinh K.; T. Zayed; A. Tarussov. (2013) “GPR image analysis for corrosion mapping in concrete slabs”. En: CSCE 2013 *General Conference* Canada.
- Solla M.; Lagüela, S., Fernández, N.; Garrido, I. (2019) “Assessing rebar corrosion through the combination of nondestructive GPR and IRT methodologies”. *Remote Sensing*, vol. 11.
- Parkinson, G. y Ékes, C. (2008) “Ground Penetrating Radar evaluation of concrete tunnel linings”. En: 12th International Conference on Ground Penetrating Radar. England
- Cassidy, N.J.; R., Eddies; S., Dods. (2011) “Void detection beneath reinforced concrete sections: The practical application of ground-penetrating radar and ultrasonic techniques”. *Journal of Applied Geophysics*. Vol 74, p263-276.
- Xiang, L.; Zhou, H.; Shu, Z.; Tan, S.; Lian, G.; Zhu, J. (2013) “GPR evaluation of the Damaoshan highway tunnel: A case study”. *NDT&E International*, vol. 59, p. 68-76.
- Saricicek, I y Seren, A. (2014). “Zigina, Torul with ground penetrating radar”. IEEE Xplore. DOI: 10.1109/ICGPR.2014.6970452
- Prego, F. J.; Solla, M.; Núñez-Nieto, X.; Arias, P. (2016) “Assessing the applicability of Ground-Penetrating Radar to quality control in tunneling construction”. *ASCE*.
- Kim, W., Ismail, A.; Anderson, N. L; Atekwana, E. A.; Buccellato. (2003) A. *Non-destructive testing (NDT) for corrosion in bridge decks using GPR*. In Proceedings of the 3rd International Conference on the Application of Geophysical Methodologies and NDT to Transportation Facilities and Infrastructure, Geophysics 2003, Orlando, FL, USA.
- Ekes, C. (2011) “GPR: A New Tool for Structural Health Monitoring of Infrastructure”. En: 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. Canada.
- Morris, I.; Abdel-Jaber, H; Glisic, B. (2019) “Quantitative attribute analyses with Ground Penetrating Radar for infrastructure assessments and structural health monitoring”. *Sensors*. Vol 19 (7)

- Istiaque Hasan, Md.; N. Yazdani. (2014) "Ground penetrating radar utilization in exploring inadequate concrete covers in a new bridge deck". *Case Studies in Construction Materials*, vol. 1, p.104-114.
- Beben D.; A. Mordak; W. Anigacz. (2013) "Ground Penetrating Radar applications to testing of reinforced concrete beams". *Procedia Engineering*. Vol. 65, p. 242-247.
- Laurens, S., Balayssac, J. P.; Arliguie, G. (2005) "Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modeling". *Materials and Structures*, vol. 38, p. 827-832.
- Shihab, S.; W. Al-Nuaimy (2005). "Radius estimation for cylindrical objects detected by ground penetrating radar". *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, vol. 6, no.2 p151-166.
- Lakshmi, K. A.; Rahamath, A. (2016) "Estimation of rebar radius using Ground Penetrating Radar". *International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics (IJETCSE)*, vol. 22, no. 2
- Lai, W-L.; Kind, T; Stoppel; M.; Wiggenhauser, H. (2013) "Measurement of accelerated steel corrosion in concrete using ground-penetrating radar and a modified half-cell potential method". *Journal of infrastructure systems*. ASCE.
- Hong, S.; Lai, W. L, Wilsch G.; Helmerich, Rosemarie; Helmerich, Robert. Günther, T.; Wiggenhauser, H. (2014) "Periodic mapping of reinforcement corrosion in intrusive chloride contaminated concrete with GPR". *Construction and Building Materials*, vol. 66, p671-684.
- Krishnarajapete, Raju, R. (2015) "Estimation of rebar corrosion in concrete using ground penetrating radar" Trabajo de maestría (inédita). Universidad de Texas y Arlington.
- Zaki, A.; Megat Johari, M. A.; Wan Hussin, W. M. A.; Jusman, Y. (2018) "Experimental assessment of rebar corrosion in concrete slab using Ground Penetrating Radar (GPR)". *International Journal of Corrosion*.
- Kabir, S. Y Zaki, A. (2011) "Detection and quantification of corrosion damage using Ground". En: Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Marrakesh, Morocco.
- Lai, W. L.; Kind, T; Wiggenhauser, H. (2011) "Using ground penetrating radar and time-frequency analysis to characterize construction materials". *NDT&E International* 44, pp 111-120
- Istiaque Hasan, Md.; N. Yazdani. (2015) "An experimental study for quantitative estimation of rebar corrosion in concrete using Ground Penetrating Radar". *Hindawi Publishing Corporation*. Vol 2016, p8.
- Sossa, V.; Pérez-Gracia, V.; González-Drigo, R.; Rasol, M. (2019) "Lab Non Destructive Test to Analyze the Effect of Corrosion on Ground Penetrating Radar Scans". *Remote Sensing*. Vol 11(23):2814.
- Lai, W-L; X. Dérobert, P. Annan, (2017) "A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis". *NDT&E International*.
- Pavía Pérez, M. (2010) "Aplicaciones del georradar en ingeniería civil". Trabajo de Diploma en Ingeniería Civil (inédita). Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Tecnológica de La Habana.

- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS ASCE 38-02 *Estándar Guideline for the collection and depiction of existing subsurface utility data*. ASCE. USA.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM C 876-91). *Standard Test Method for Half- Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. USA, 1991.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM D6432-99) *Standard guide for using the surface ground penetrating radar method for subsurface investigation*. 2005
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (ASTM D6432-11) *Standard guide for using the surface ground penetrating radar method for subsurface investigation*. West Conshohocken, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM D6087-08e1). *Evaluating asphalt covered concrete bridge decks using ground penetrating radar*. West Conshohocken, 2015.
- Euro GPR. www.eurogpr.org. Fecha de consulta: 15 de julio del 2020.
- NC-1109:2015. Estimación de la resistencia a compresión de los hormigones en las estructuras. ICS: 91.080.40. Oficina Nacional de Normalización (NC). Sitio web: www.nc.cubaindustria.cu
- RC-9002:2000. “Especificaciones para la realización de los estudios complementarios para la estimación de la resistencia a compresión de los hormigones en las estructuras”. Regulaciones de la Construcción. Ministerio de la Construcción, Cuba.
- NC-695:2009. “Hormigón armado — determinación de la corrosión del acero de refuerzo por métodos electroquímicos galvanostáticos a probetas previamente elaboradas”. ICS: 91.100.30. Oficina Nacional de Normalización (NC). Sitio web: www.nc.cubaindustria.cu
- Amran, T.S.T.; Ismail, M. P.; Ismail, M A; Amin, M S M; Ahmad, M R; Basri, N S M. (2017) “GPR application on construction foundation study”. *IOP Publishing*, vol. 271.
- Hong, S. (2015) “GPR-Based Periodic Monitoring of Reinforcement Corrosion in Chloride Contaminated Concrete” Tesis de maestría. ProQuest Number :10695974. Berlin
- Wong, T. W.; Lai, W. W.; Sham, J. F.; Poon, C. “Hybrid non-destructive evaluation methods for characterizing chloride induced corrosion in concrete”. *NDT and E International* 107 (2019) 102123. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.05.008>