

## Uso del Georradar en la evaluación de estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión. Caso de estudio: Malecón habanero, Cuba.

**Ernesto Alejandro Hernández Martín<sup>1</sup>, Javier Ballote Álvarez<sup>2</sup> y Orlando R. Carraz Hernández<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Ingeniero geofísico. Departamento de Geofísica Espacial. Instituto de Geofísica y Astronomía, Calle 212 # 2906 /29 y 31, Reparto La Coronela, La Lisa, La Habana, Cuba. Correo electrónico: ernestohm96@gmail.com.

<sup>2</sup> Ingeniero geofísico. Departamento de Geociencias. Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», Calle 114 # 11901 /ciclo vía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba. Correo electrónico: jballote@civil.cujae.edu.cu.

<sup>3</sup> Ingeniero geofísico. Doctor en Ciencias Técnicas. Departamento de Geociencias. Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», Calle 114 # 11901 /ciclo vía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba. Correo electrónico: orlando@civil.cujae.edu.cu.

### RESUMEN

El método geofísico del Georradar (*Ground Penetrating Radar* (GPR)), se aplica en el ámbito de la ingeniería civil de distintas formas; una de ellas es la evaluación del estado técnico de las estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión. En esta investigación se abordan las características esenciales que hacen útil la aplicación del GPR por encima de otros ensayos no destructivos (END) en este tipo de estructuras y se presenta las diferentes respuestas electromagnéticas que brinda el georradar ante diversas patologías, como oquedades, zonas de humedad y la propia corrosión. A su vez se pudieron conocer los parámetros de adquisición más utilizados en el georradar para identificar estas respuestas. Como objeto de estudio se tomó un sector del muro del malecón habanero que se encuentra afectado por la corrosión. A través del programa informático *GPR Simulation Software* (GPR-SIM) se elaboraron modelos sencillos para conocer la respuesta electromagnética de la señal del GPR ante la corrosión del hormigón armado en distintas situaciones. Se definieron las posibles patologías presentes en

la estructura, para apreciar si estas se distinguen en la señal resultante del radargrama con los parámetros de adquisición definidos. A partir de estos, se confeccionaron modelos más complejos que se asemejan a las condiciones actuales del sector del muro del malecón habanero, con el objetivo de diseñar el sistema de adquisición óptimo mediante GPR que permita evaluar de forma eficaz su estado técnico. Como resultado se propone una variante de adquisición que emplea una antena de 1.6 GHz, una ventana de tiempo de 20 ns, 500 *scan/m* y 512 muestras.

**Palabras claves:** Georradar, hormigón armado, corrosión, malecón habanero, GPR-SIM.

### ABSTRACT

The geophysical method of Georradar (*Ground Penetrating Radar* (GPR)) is applied in the field of civil engineering in different ways; one of them is the evaluation of the technical state of the reinforced concrete structures affected by corrosion. In this research, the essential characteristics that make the application

of the GPR useful over other non-destructive tests (NDT) in this type of structures are addressed and the different electromagnetic responses provided by the georadar are presented in the face of various pathologies, such as cavities, areas of moisture and corrosion itself. At the same time, it was possible to know the acquisition parameters most used in the georadar to identify these responses. As an object of study, a sector of the wall of the Havana seawall that is affected by corrosion was taken. Using the GPR Simulation Software (GPR-SIM) computer program, simple models were developed to determine the electromagnetic response of the GPR signal to the corrosion of reinforced concrete in different situations. The possible pathologies present in the structure were defined, to see if they are distinguished in the signal resulting from the radargram with the defined acquisition parameters. From these, more complex models that resemble the current conditions of the sector of the Havana seawall were made, with the aim of designing the optimal acquisition system through GPR that allows an efficient evaluation of its technical state. As a result, an acquisition variant is proposed that uses a 1.6 GHz antenna, a time window of 20 ns, 500 scan/m and 512 samples.

**Keywords:** Ground Penetrating Radar, reinforced concrete, corrosion, Havana seawall, GPR-SIM.

## RESUMO

O método geofísico de Georradar (*Ground Penetrating Radar*, (GPR)) é aplicado na área da engenharia civil de diferentes formas; uma delas é a avaliação do estado técnico das estruturas de concreto armado afetadas pela corrosão. Nesta pesquisa, são abordadas as características essenciais que tornam a aplicação do GPR útil sobre outros ensaios não destrutivos (END) neste tipo de estruturas e são apresentadas as diferentes respostas eletromagnéticas proporcionadas pelo georadar face a várias patologias, tais como como cavidades, áreas de umidade e a própria corrosão. Ao mesmo tempo, foi possível conhecer os parâmetros de aquisição mais utilizados no georadar para identificar essas respostas. Como objeto de estudo, foi tomado

um setor da parede do paredão de Havana que está afetado pela corrosão. Através do programa de computador GPR Simulation Software (GPR-SIM), modelos simples foram desenvolvidos para determinar a resposta eletromagnética do sinal GPR à corrosão do concreto armado em diferentes situações. Foram definidas as possíveis patologias presentes na estrutura, para verificar se estas se distinguem no sinal resultante do radargrama com os parâmetros de aquisição definidos. A partir destes, foram feitos modelos mais complexos que se assemelham às condições atuais do setor do muro de Havana Malecón, com o objetivo de desenhar o sistema de aquisição ideal através de GPR que permita uma avaliação eficiente de seu estado técnico. Como resultado, é proposta uma variante de aquisição que usa uma antena de 1,6 GHz, uma janela de tempo de 20 ns, 500 scan/m e 512 amostras.

**Palavras chaves:** Georadar, concreto reforçado, corrosão, paredão de Havana, GPR-SIM.

## INTRODUCCIÓN

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en el sector de la construcción a través de la historia por su versatilidad y bajo costo. El hormigón armado surge de la combinación de hormigón y de acero estructural; se utiliza en construcción de puentes, edificios, túneles, entre otras estructuras (Höla *et al.*, 2015). La combinación de la alta resistencia a la compresión que ofrece el hormigón y las excelentes propiedades mecánicas del acero hacen de este, el material compuesto ideal para aplicaciones estructurales. Una de las características más importantes del hormigón, además de sus propiedades mecánicas, es su durabilidad, la cual se asocia con la vida útil en servicio de una estructura, una vez expuesta a determinadas condiciones o ambientes.

Sin embargo, las estructuras de hormigón armado pueden estar expuestas durante su vida útil al ataque químico y físico de diversos agentes que producen daños y deterioros de las mismas, entre estas están el viento, la lluvia, los asentamientos, los sismos, incluso por el uso cotidiano. Debido a lo antes ex-

puesto, la durabilidad del hormigón variará de acuerdo con la condición de exposición y a los servicios a la que se verá sometida la estructura durante su vida útil. El hormigón se deteriora por varias razones y en muchas ocasiones los daños es el resultado de una combinación de factores, al comenzar con la formación de grietas que conducen a procesos que implican reacciones químicas perjudiciales y desajuste hidrostático.

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 (Höla *et al.*, 2015). Uno de los mayores problemas que afecta la vida útil del hormigón es la corrosión del acero de refuerzo. 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 (Aguirre y Mejía de Gutiérrez, 2013).

Es necesario realizar estudios de inspección y evaluación, para determinar la existencia de patologías o lesiones en las estructuras, para luego ejecutar medidas preventivas o de reparación (Barreto y Ganzhi, 2018). El hormigón armado es un material poroso, por lo que es permeable y penetrable. Su resistencia dependerá tanto de las propiedades del material, como de su aplicación y su exposición al medio ambiente. 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 (Porto, 2005). Ejemplos de ensayos no destructivos son: Ensayos Ultrasonicos, Corrosímetro, Resistividad Eléctrica, Termografía Infrarroja, Métodos Radioactivos y el Georradar.

Cuba es un archipiélago estrecho y alargado, presenta un clima tropical con una humedad relativa alta. Al estar rodeado en su totalidad de mar, es afectado por la acción constante de los aerosoles marinos por lo que las estructuras en el litoral costero como los malecones son las más afectadas por estos procesos. El malecón habanero, como parte del Plan del Estado cubano para el enfrentamiento al Cambio Climático (Tarea Vida), comenzará un proceso de rehabilitación del muro del malecón habanero para evitar las reiteradas inundaciones costeras. Para ello, es necesario identificar los tipos de daños causados por la corrosión y las zonas más afectadas de manera rápida y no destructiva, de forma tal que se racionalicen los recursos materiales y humanos de esta millonaria inversión. Este artículo propone como objetivo obtener un sistema de adquisición de datos mediante el GPR que permita realizar la evaluación estructural de un sector del muro del malecón habanero. La elaboración del mismo es con fines educativos.

Para la evaluación del estado técnico de las estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión, existe un conjunto de técnicas y procedimientos no destructivos que permiten determinar el grado de afectación. El Georradar o *Ground Penetrating Radar* (GPR, por sus siglas en idioma inglés), es un método no destructivo que se maneja con regularidad en los estudios de corrosión. La técnica del georradar se utiliza en función de determinar el espesor del hormigón (Kim *et al.*, 2003; Istiaque y Yazdani, 2014), identificar fracturas y oquedades (Morris *et al.*, 2019; Solla *et al.*, 2019), detectar los aceros (Beben *et al.*, 2013; Amran *et al.*, 2017), definir zonas de humedad (Istiaque y Yazdani, 2014) y determinar el espesor del hormigón (Kim *et al.*, 2003; Istiaque y Yazdani, 2014). 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 (Kim *et al.*, 2003; Dinh *et al.*, 2013). Otra forma es mediante el análisis de cada acero y observar los cambios en la amplitud de la señal del equipo a medida que se mide (Lai *et al.*, 2013; Krishnarajapete, 2015; Zaki *et al.*,

2018). Los cambios de amplitud en el acero aportan información sobre el cambio de las propiedades electromagnéticas del mismo, debido a la corrosión. Otra forma de medir la corrosión sobre la estructura, es apoyarse en otros métodos como el HCP; donde se calibra la amplitud de la señal del georradar con el nivel de corrosión sobre un acero dado por el HCP y luego se realizan las mediciones de georradar al resto de la estructura (Kabir y Zaki, 2011; Lai *et al.*, 2013).

Las antenas de mayor frecuencia (1.5-2.6 GHz) ofrecen una mejor resolución para detectar los aceros, determinar su radio y evaluar el grado de corrosión de las estructuras de hormigón armado (Lai *et al.*, 2013; Lakshmi y Rahamath, 2016; Solla *et al.*, 2019). Las antenas con frecuencia menor (400-900 MHz) ofrecen una resolución inferior, su utilidad se basa 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 (Xiang *et al.*, 2013; Saricicek y Seren, 2014; Prego *et al.*, 2016); su principal ventaja es 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 con antenas de alta frecuencia en los ensayos o pruebas de laboratorio de manera puntual (Lai *et al.*, 2013; Zaki *et al.*, 2018; Solla *et al.*, 2019; Sossa *et al.*, 2019). 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 (Kim *et al.*, 2003; Dinh *et al.*, 2013; Xiang *et al.*, 2013) al aplicarse sobre cualquier tipo de estructura y permite realizar un A-scan al tomar una traza del radargrama o simular un C-scan mediante perfiles paralelos y perpendiculares. El tipo C-scan es el idóneo para conocer la distribu-

ción 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 (Cassidy *et al.*, 2011; Kabir y Zaki, 2011).

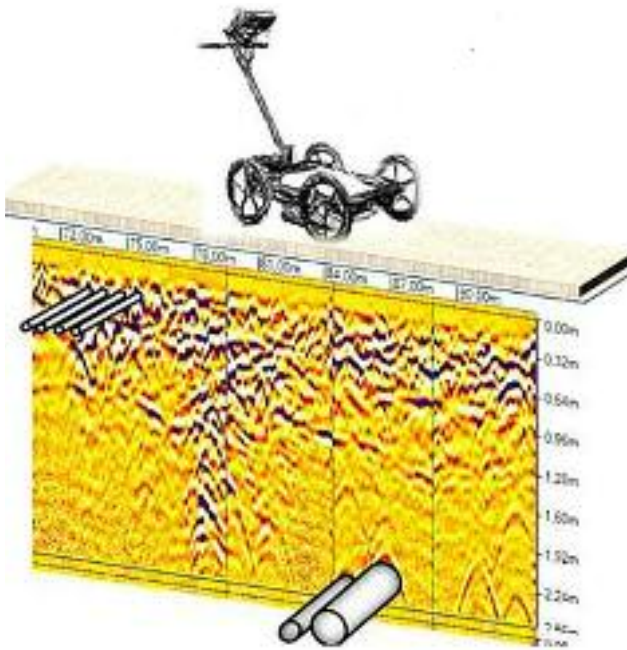
Los ensayos experimentales sobre muestras de hormigón han revelado dos tendencias por parte de los investigadores; una es, a interpretar la corrosión con el aumento de la amplitud (Kabir y Zaki, 2011; Lai *et al.*, 2013; Hong *et al.*, 2014; Lai *et al.*, 2017; Tosti y Ferrante 2019; Wong *et al.*, 2019) y otra es, con la disminución de la amplitud (Zaki *et al.*, 2018; Solla *et al.*, 2019; Sossa *et al.*, 2019). Como se mencionó anteriormente, aun cuando no se hayan definido los umbrales, en la actualidad se acepta el criterio de que la baja intensidad corresponde a la fase inicial de corrosión y la alta intensidad con la fase activa de corrosión.

Durante la adquisición en el terreno, se define el objetivo a cumplir y el nivel de precisión de cada trabajo, se toman distintos parámetros. La cantidad de muestras por scan que se utiliza son de 512 (Xiang *et al.*, 2013; Prego *et al.*, 2016). En cuanto a la ventana de tiempo varían según la profundidad de cada estudio y la frecuencia de la antena, para profundidades someras y con antenas de frecuencias mayores de 1 GHz la ventana de tiempo varía entre 10 ns y 20 ns (Kim *et al.*, 2003; Hugenschmidt y Kalogeropoulos, 2009; Solla *et al.*, 2019), mientras que si se plantea estudiar a mayor profundidad con frecuencias menores los valores de la ventana de tiempo es mayor, entre 20 ns y 40 ns (Hugenschmidt y Kalogeropoulos, 2009; Cassidy *et al.*, 2011; Prego *et al.*, 2016).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El Georradar es un método de investigación geofísica basado en la emisión de impulsos electromagnéticos de muy corta duración (entre 1 ns y 10 ns), en la banda de frecuencias de UHF-VHF (entre 8 MHz y 2.6 GHz). La técnica de georradar se basa en el principio de reflexión de ondas electromagnéticas que se propagan en un medio (Pellicer, 2014). La energía de los pulsos reflejados se mide sobre la superficie mediante dispositivos receptores (**Figura 1**) y como resultado

se obtiene una imagen del medio denominada radargrama (B-scan) (Bonomo y de la Vega, 2006).



**Figura 1.** Ejemplo de Georradar y radargrama resultante. Tomada de Esteve (2005).

La eficacia de esta técnica depende en gran medida de si las superficies de interés tienen suficiente contraste dieléctrico como para producir reflexiones.

Las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío a la velocidad de la luz ( $c=2.998 \times 10^8$  m/s), los componentes del campo eléctrico y del magnético están en fase, siempre perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación de la onda.

La velocidad de propagación de la onda ( $v$ ) se calcula de forma sencilla en los casos en los que es posible una aproximación de pequeñas pérdidas ya que el término asociado con la conductividad ( $\sigma$ ) tiende a cero, esto ocurre cuando los medios por los que se propaga la señal son dieléctricos casi perfectos. que son la mayoría de los materiales que se estudian habitualmente. A su vez, si el medio es no magnético, como también sucede en la mayoría de los casos, la permeabilidad magnética ( $\mu$ ) tiende a la unidad. Bajo estas condiciones, la velocidad se estima a través de la **Ecuación 1**, que depende de la velocidad de la luz en el

vacío ( $c=2.998 \times 10^8$  m/s) y de la constante dieléctrica relativa del medio ( $\epsilon_r$ ) (González, 2013) (**Ecuación 1**).

$$V_m = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{0.3}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ m/ns} \quad (1)$$

Durante la propagación de una onda electromagnética por un medio se producen pérdidas de energía 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 (Pellicer, 2014).

La disminución de energía es consecuencia de las pérdidas producidas en la reflexión y refracción en cada una de las interfaces electromagnéticas que atraviese la onda. Otra causa es la dispersión geométrica del frente de ondas, como la onda se propaga para cubrir un área cada vez mayor, el principio de conservación de la energía exige que la amplitud de la misma decrezca. El valor de la longitud de onda influye de forma drástica en la pérdida y dispersión de la energía.

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**:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2)$$

Donde:  $\lambda$  es la longitud de onda,  $V$  es la velocidad de la onda y  $f$  es la frecuencia.

A medida que mayor sea la frecuencia de emisión, la onda sufre una mayor atenuación en su propagación. Hay que tener en cuenta el fin con que se lleva a cabo cada investigación, para definir la frecuencia a utilizar. Así, mientras que se trabaje con antenas de baja frecuencia (<100 MHz) aumenta la capacidad de penetración (>9 metros), pero una escasa resolución. Por otra parte, para estudiar zonas de poca profundidad

se utilizan las antenas de alta frecuencia, estas permiten distinguir objetos de muy pequeño tamaño con alta resolución.

La profundidad de penetración (D), se estima a partir de la velocidad medio  $V_m$  (**Ecuación 1**) y el tiempo doble de propagación resultado del análisis de radargramas. Bajo estas premisas la profundidad resulta (**Ecuación 3**):

$$D = \frac{T * V_m}{2} \quad (3)$$

Por lo general, durante la adquisición de los datos, los parámetros se definen de forma correcta para obtener unos datos con calidad, siempre y cuando estar pendiente de la tarea técnica que se quiere resolver y la antena con que se trabaje. Los parámetros a considerar son: frecuencia, ventana de tiempo (TWT), cantidad de muestras (*samples*), *scan*/unidad y ganancia.

La ventana de tiempo es el intervalo temporal de medición en el que se suelta el tren de impulsos. Mientras se tome un menor tiempo, el equipo va a trabajar con los reflectores más someros; si se aumenta el rango de tiempo, se podrá trabajar con reflectores más profundos. El rango tiempo está en el orden de los nanosegundos (ns). Este parámetro está relacionado con el intervalo de muestreo; cuanto mayor sea la ventana temporal de registro, mayor debería ser el número de puntos por traza.

*Scan*/unidad de distancia (*scan*/m): Determina la cantidad de *scan* por unidad de distancia horizontal. Cuanto menor es el espaciado entre *scan*, lo que se traduce en mayores valores de *scan*/m, más alta será la resolución horizontal, pero mayor es el archivo informático generado y mayores son los tiempos de adquisición de los datos. Se mide tanto en *scan*/m como por distancia.

Ganancia: La aplicación de la ganancia consiste en amplificar la señal que se recibe y su objetivo es contrarrestar los efectos de atenuación que se producen. Se lleva a cabo durante la adquisición de datos o durante el procesamiento posterior.

El programa informático *Ground Penetrating Radar Simulation Software* GPR-SIM (Goodman, 1994),

fue donado bajo licencia al Departamento de Geociencias de la Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría» (CUJAE) por *Geophysical Archeometry Laboratory* con fines educativos. El mismo permite realizar los cálculos al utilizar la ondulada *damped sine* y el método de trazado de rayos. Según Goodman (2020), el método de trazado de rayos que utiliza el GPR-SIM, en términos de «error de modelado», presenta algunas deficiencias pues no analiza los rayos difractados ni la interferencia destructiva/constructiva de la onda reflejada. Consiste en enviar ondas a un modelo y buscar los rebotes producto de la reflexión, transmisión, refracción y atenuación a lo largo del trayecto de los rayos. A pesar de sus limitaciones el GPR-SIM es eficaz para determinar firmas generalizadas del georradar y no existe una discusión formal sobre los errores asociados con el simulador. Existen otros programas, como el GPRMAX que permiten realizar un modelado de ondas complejo.

### Corrosión en el hormigón armado

La corrosión del hormigón armado es una de las causas más comunes de deterioro en este material (Howland *et al.*, 2014; Alla, 2016). Se define que la corrosión es el deterioro de un material o de alguna de sus propiedades, causado por la reacción con el medio que lo rodea. Esta definición permite incluir a todos los materiales, cualquiera sea el mecanismo de degradación que los afecte (Avenidaño, 2006). La corrosión ocurre cuando se altera la protección de hormigón que le corresponde a cada estructura, al formarse una capa que pasiva la interfaz hormigón-acero.

El hormigón ofrece protección contra la corrosión al acero de refuerzo, debido a 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. El carácter básico y la resistividad eléctrica del hormigón que recubre el acero, evitan la penetración de agentes agresivos. La principal causa de la corrosión del acero de refuerzo es la disminución de la alcalinidad del hormigón que se encuentra expuesto a sustancias agresivas del medio ambiente, como son los cloruros y los ácidos (Aven-

daño, 2006). 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 agua-cemento ( $A/C$ ), 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.

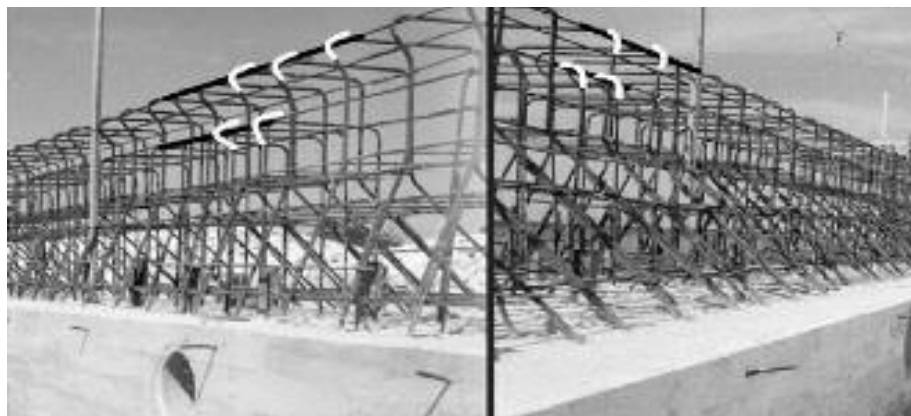
### El malecón habanero

Los malecones son estructuras que buscan resguardar un puerto o la costa de los embates de las olas. Se construyen como mecanismo defensivo ante el avance del agua y por lo general, es un rompeolas, un dique que se introduce en el mar. El malecón de La Habana, en Cuba, es la avenida marítima más famosa del país. Esta avenida que dispone de seis carriles y está protegida por un muro, con una longitud de ocho kilómetros, en la zona norte de la capital cubana. El malecón habanero empezó a erigirse en 1901, con los años se extendió hasta alcanzar su fisonomía actual; su construcción fue dividida en 6 sectores y tomó alrededor de 60 años (Bianchi, 2016). Esta estructura, por su ubicación, ha sido abatido por los constantes avatares me-

teorológicos; los aerosoles marinos y debido a la falta de constancia en su mantenimiento, provocaron el resquebrajamiento de algunas franjas del muro y aceras (Puga *et al.*, 2006).

De todo el malecón habanero se eligió la zona entre las calles B y C para ser estudiada por ser el sector que presenta mayor información documental y visual sobre la ubicación de los aceros. En conjunto, con las fotos de archivo brindadas por la Empresa de Servicios Ingenieros Hidráulicos Occidente (ESIHO) (Figura 2) y con la inspección visual llevada a cabo por los autores se obtuvo información sobre diferentes parámetros técnicos, como son el espaciamiento entre los aceros y la profundidad aproximada a la que están ubicados.

Según las fotografías y la inspección visual, existen tres niveles de aceros que se extienden longitudinalmente; un primer nivel, con tres aceros a 20 cm de profundidad; el segundo nivel, con dos aceros a 60 cm de profundidad y el tercer nivel, a alrededor de un metro de profundidad, ubicado al mismo de la acera. Por otra parte, por cada nivel horizontal, están ubicados otros aceros perpendiculares a estos, los cuales se encuentran espaciados entre ellos a 40 cm. Igual, en el segundo nivel horizontal, están ubicados aceros perpendiculares a 40 cm de espaciamiento entre ellos e intercalados con los primeros. Por último, en el tercer nivel horizontal existen aceros perpendiculares, pero se desconoce el distanciamiento entre cada uno (Figura 3).



**Figura 2.** Construcción del sector del muro del malecón habanero entre las calles B y C. Se distingue la ubicación de los aceros en sus tres niveles (Modificado de Empresa de Servicios Ingenieros Hidráulicos Occidente (ESIHO)).

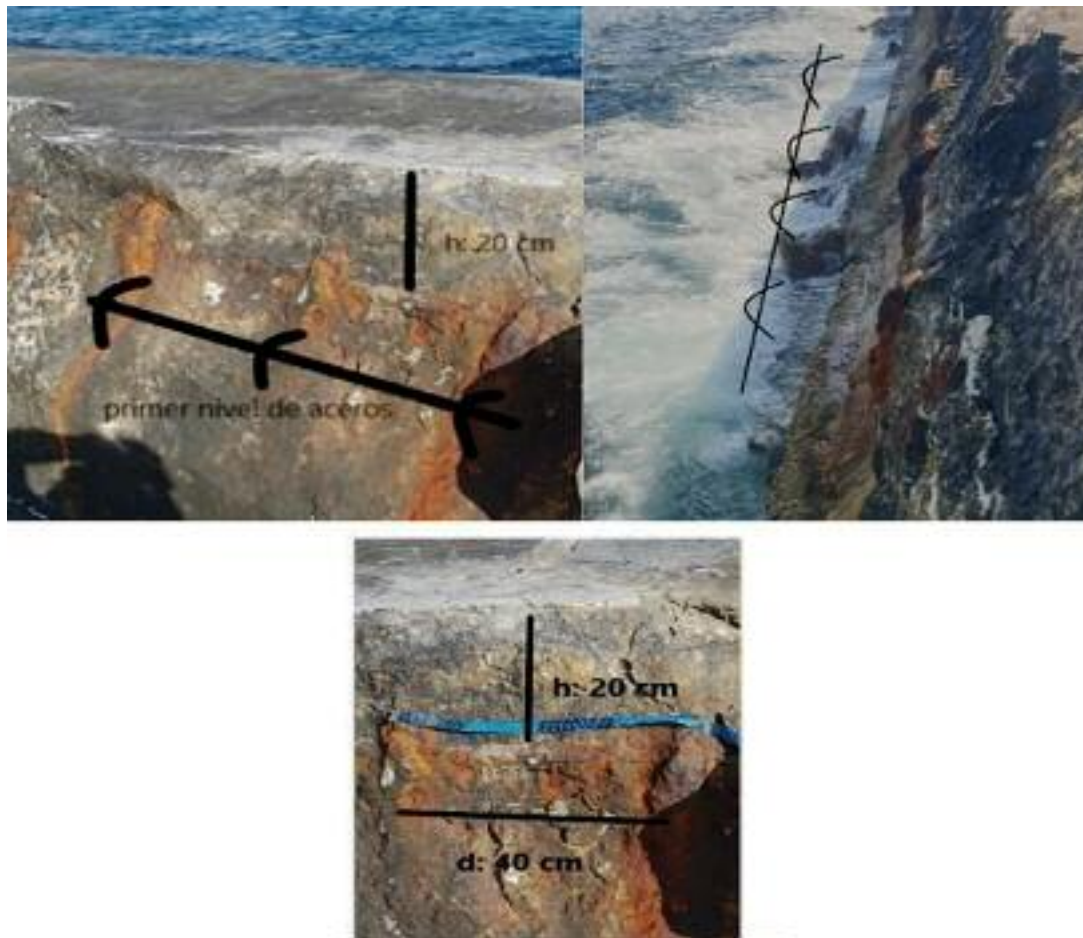


Figura 3. Aceros corroídos que se pueden detectar a simple vista en el sector de estudio (Tomada por el autor).

## RESULTADOS

Con el objetivo de determinar los parámetros de adquisición idóneos con el georradar, que permitan el estado técnico del caso de estudio, se realizó una serie de modelaciones en el programa informático GPR-SIM. Se trata de modelos sencillos, que usan los parámetros de adquisición más utilizados en investigaciones afines. Se desarrollaron un total de 6 modelos semejantes a las posibles situaciones que se puedan presentar durante la toma de datos; el objetivo es disminuir la ambigüedad que existe en torno a la tarea inversa de toda investigación geofísica y diseñar el sistema óptimo de adquisición.

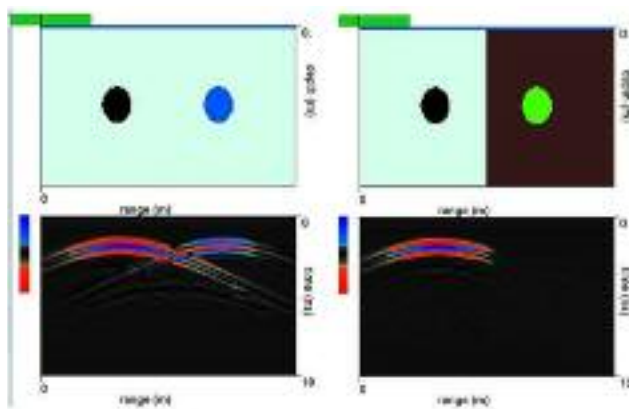
En el modelo 1 (**Figura 4A**) se empleó una antena de 1.6 GHz, 100 scan/m, una ventana de tiempo de 10 ns y 512 muestras, que son parámetros acordes a las características del modelo y a lo visto en la in-

vestigación bibliográfica en la losa de hormigón hay un acero sin corroer y una oquedad de igual radio y a la misma profundidad. Como resultado se observa que el contraste existente entre el hormigón y el acero (izquierda), presenta mayor amplitud que el hormigón-aire (derecha). En este caso, la diferencia en las amplitudes se basa en mayor medida a la conductividad eléctrica y a la permeabilidad magnética, pues presentan los mismos valores de permitividad dieléctrica ( $\epsilon_r = 1$ ). También se observa un cambio de polaridad entre las amplitudes, característico de las oquedades.

Como el caso de estudio se trata de un malecón, el cual está en constante contacto directo con el agua de mar y salpicaduras de las olas, se elaboró el modelo 2 (**Figura 4B**), el cual considera una mitad del hormigón seco y la otra mitad húmedo, para ver los cambios en la señal de georradar a partir de las varia-



ciones en las propiedades electromagnéticas del medio. Embebido en esta losa, en la zona seca, se encuentra un acero sin corroer y en la zona húmeda, un acero corroído. Como resultado se obtuvo la hipérbola resultante del contraste hormigón seco-acero sin corroer, pero en el caso del hormigón húmedo, no se pudo observar la hipérbola resultante del acero corroído. En zonas húmedas, ocurre una mayor atenuación de la señal, la onda pierde intensidad y aumenta su tiempo de viaje. Eso se detecta en el desglose de las ondas, donde se observa un retardo de la onda reflejada.

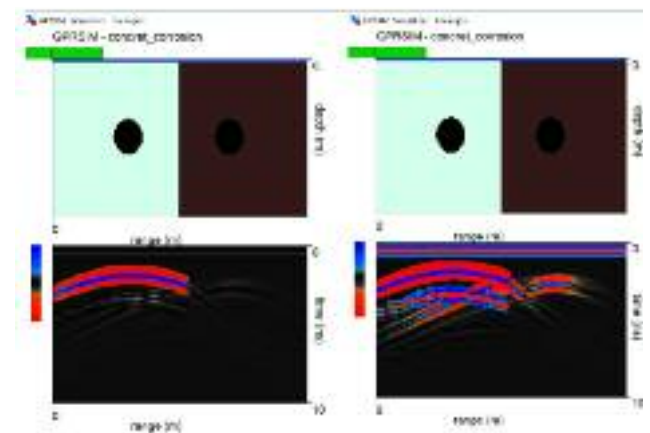


**Figura 4A** Modelo 1: Acero sin corroer (izquierda) y oquedad (derecha) en el hormigón. Tomada de GPR-SIM (2020). B Modelo 2: Hormigón seco con acero embestado sin corroer (izquierda) y hormigón húmedo con acero corroído (derecha). Tomada de GPR-SIM

Para el modelo 3 (**Figura 5**), se tomaron las mismas características del modelo 2, pero se sustituyó el acero corroído en el hormigón húmedo ( $\epsilon_r = 15$ ), por uno sin corroer, debido a que, en ocasiones, sin la acción del oxígeno y el dióxido de carbono, la capa pasivante del acero hace que no se produzca la corrosión, aun cuando esté bajo la acción del agua. Como resultado, en la **Figura 5A**, se observa una disminución considerable en la amplitud del acero sin corroer en el hormigón húmedo.

Al aumentar la ganancia para amplificar la relación señal/ruido (**Figura 5B**), se aprecia una ligera mejoría en el radargrama, lo que permite identificar una pequeña hipérbola sobre el acero, aunque también se resalte el contacto aire-hormigón de la superficie. No obstante, el acero sin corroer embestado en el hormigón

húmedo (**Figura 5A**) se logra distinguir mejor que el acero corroído en igual medio (**Figura 4B**) por los mayores contrastes de permitividad dieléctrica existentes entre el hormigón húmedo ( $\epsilon_r = 15$ ) y el acero sin corroer ( $\epsilon_r = 1$ ), mientras que el acero corroído presenta una permitividad dieléctrica de ( $\epsilon_r = 12$ ), que hace que su coeficiente de reflexión sea menor que en el primer caso. Para identificar aceros embestados en el hormigón húmedo, incluso aceros sin corroer, resulta de extrema complejidad obtenerlo en un análisis primario. Durante el procesamiento se mejoran las técnicas y filtros a aplicar, de manera tal que se pueda resaltar la señal útil.

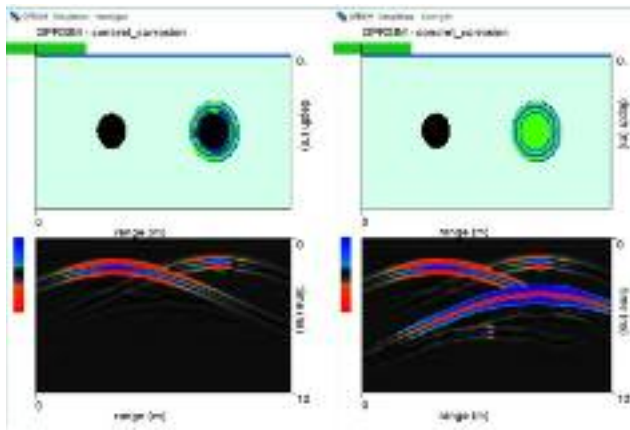


**Figure 5.** Modelo 3 A Hormigón seco con acero embestado sin corroer (izquierda) y hormigón húmedo con acero sin corroer (derecha). B Hormigón seco con acero embestado sin corroer (izquierda) y hormigón húmedo con acero sin corroer (derecha), la ganancia aumenta. Tomada de GPR-SIM (2020).

En el modelo 4 (**Figura 6**) se ubicaron dos aceros embestados en el hormigón ( $\epsilon_r = 6$ ), uno sin corroer ( $\epsilon_r = 1$ ) y otro en fase inicial de corrosión, que presenta escamas a su alrededor con pequeñas oquedades intercaladas con óxido de hierro ( $\epsilon_r = 12$ ), pero en su interior se mantuvo el valor original del acero.

En el radargrama del modelo 4 (**Figura 6A**) se observa la respuesta de los dos aceros, el contraste entre el acero sin corroer-hormigón es el de mayor amplitud. En el caso del acero corroído, se aprecia como en la fase inicial de corrosión hay una disminución de amplitud o «zona borrosa», como lo definen Zaki *et al.*, (2018); Solla *et al.*, (2019); Sossa *et al.* (2019) y

Aclarar que en todos los modelos se eliminó el efecto del *ringing*. En el modelo 5 (**Figura 6B**) se define de igual forma, una losa de hormigón y dos aceros embebidos, uno en perfectas condiciones y otro en un estado crítico de corrosión con zonas de fracturas y laminaciones y su centro se encuentra corroído en su totalidad ( $\epsilon_r = 12$ ). Llama la atención, la aparición de varias hipérbolas con mayor tiempo de viaje de la onda, como resultado del acero con el estado de corrosión. La hipérbola más profunda es la que mayor amplitud presenta. En este caso la aparición de varias hipérbolas con mayor tiempo de viaje de la onda ocurre como resultado del acero con el estado de corrosión. La hipérbola más profunda presenta una mayor amplitud y un cambio de polaridad de la onda.



**Figura 6.** A Modelo 4: Acero sin corroer (izquierda) y acero corroído (derecha) en una losa de hormigón. Tomada de GPR-SIM (2020). B Modelo 5: Acero sin corroer (izquierda) y acero corroído con óxido en el interior y láminas finas óxido intercaladas. Tomada de GPR-SIM (2020).

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

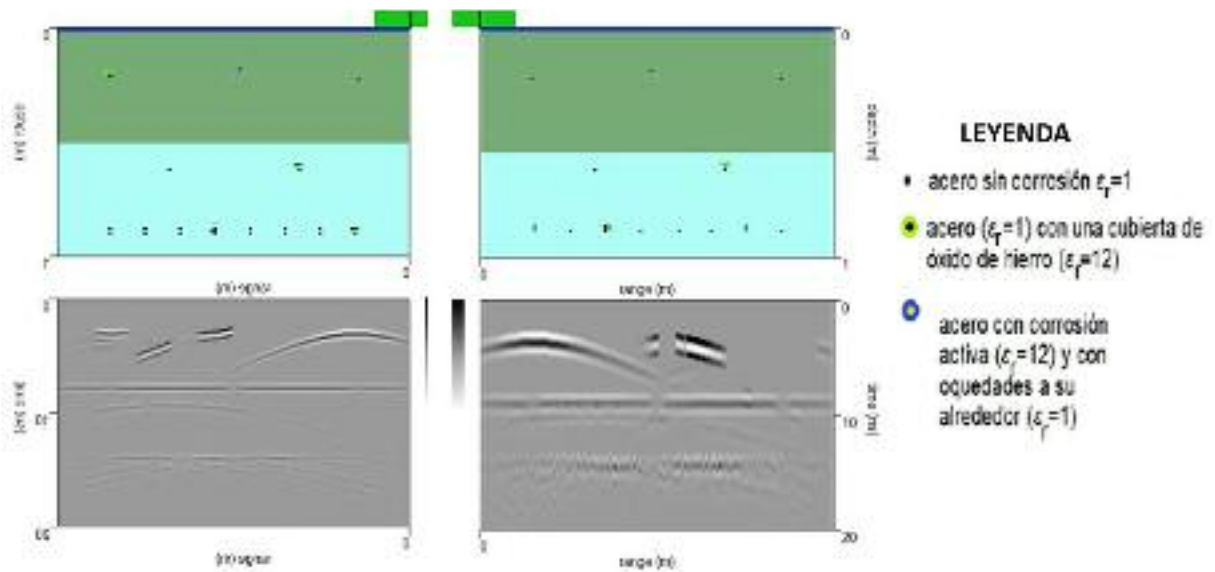
Para un análisis más realista del malecón habanero, se plantearon dos modelos que atienden mejor la distribución de los aceros en el sector de estudio. Se variaron las propiedades electromagnéticas del hormigón y de los aceros, en dependencia del grado de corrosión y de las condiciones ambientales. Se modificaron los valores de frecuencia entre 750 MHz y 1.6 GHz. También se modificó la ventana de tiempo (10-20 y 30 ns), la cantidad de scan/m (400, 500, 750 y 1001) y las

muestras (512 y 1024). A continuación, se detallan los resultados más importantes.

Para el área de estudio se trabajó otros dos posibles modelos, uno (modelo 5, **Figura 7**) con la presencia de un hormigón fracturado ( $\epsilon_r = 5$ ) hasta la mitad de la estructura y en su inferior un hormigón en buen estado ( $\epsilon_r = 6$ ). En el interior del hormigón se ubicaron los aceros, según la información visual y las fotografías obtenidas por el autor. En este modelo se trabajó con aceros con diferentes grados de corrosión; en un primer nivel a 20 cm de profundidad, en la zona del hormigón fracturado, están tres aceros, uno no corroído ( $\epsilon_r = 1$ ), otro acero con presencia de óxido a su alrededor ( $\epsilon_r = 1$  y 12) y en el centro, un acero en total corrosión ( $\epsilon_r = 12$ ) con presencia de oquedades a su alrededor ( $\epsilon_r = 1$ ). Luego, a 60 cm, inmersos en el hormigón en buen estado, un segundo nivel de aceros, uno sin corroer y otro presenta un poco de óxido. Por último, a un metro, se encuentra el tercer nivel de aceros, todos sin corrosión.

De forma general, se define que los aceros pueden ser detectados tanto con frecuencia de 750 MHz como con 1.6 GHz, se define que a medida que es mayor la frecuencia mejora la nitidez del radargrama resultante. En los distintos radargramas se definen como la hipérbola de mayor amplitud, el acero sin corroer, mientras que el acero con una capa de óxido presenta una hipérbola «borrosa», respuesta típica en aceros con una temprana corrosión; mientras que en la zona donde está ubicado el acero corroído, los reflectores se definen con claridad y se detecta un cambio en la polaridad de la amplitud, lo que demuestra la presencia de aire alrededor de este acero. En el centro del radargrama hay una línea horizontal que define el contraste existente entre los dos tipos de hormigones, la cual enmascara la señal de los aceros del segundo nivel. En cuanto a los aceros del tercer nivel, en ambas antenas se detectan, pero no con mucha calidad; se distingue un frente de onda debido al poco espaciamiento entre los aceros, que hacen que se vean en los radargramas como si se tratase de un horizonte.

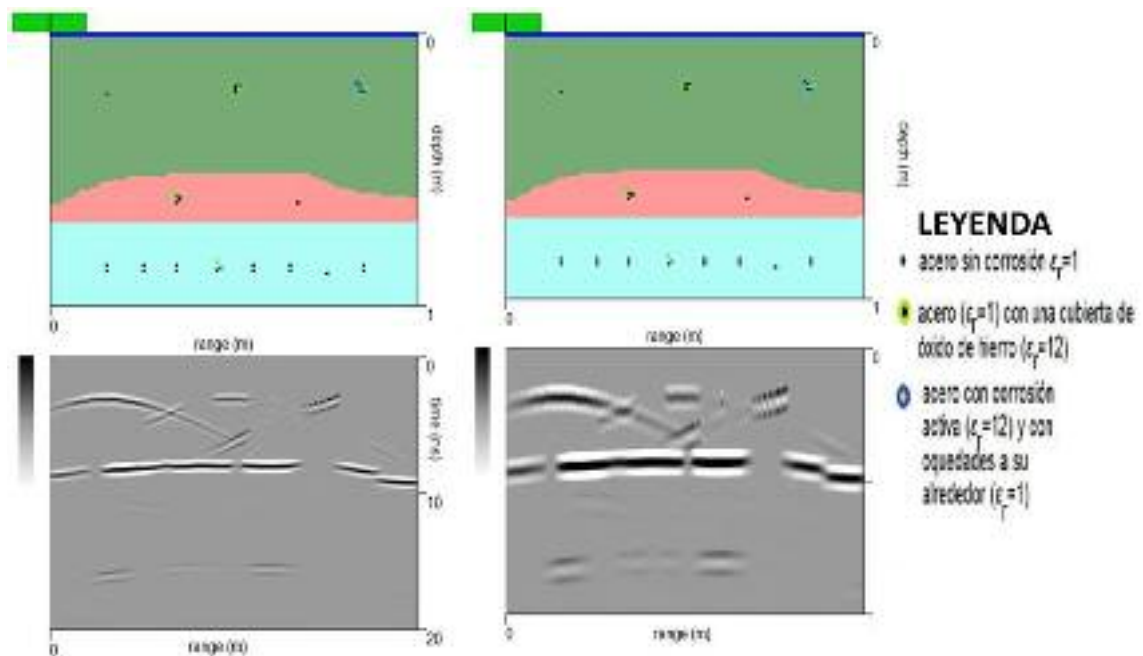
El otro modelo del sector a estudiar (modelo 6, **Figura 8**), se basa en una estructura con tres espe-



**Figura 7.** A Modelo 5 del sector de estudio. A. Realizado con una antena de 1.6 GHz, 500 scan/m y un total de 512 muestras. B. Realizado con una frecuencia de 750 MHz 500 scan/m y 512 muestras. Ambos con ganancia 10. Zona verde ( $\epsilon_r = 5$ ) y zona azul ( $\epsilon_r = 6$ ). Tomada de GPR-SIM (2020).

sores de hormigón con distintas características; una primera capa con hormigón fracturado ( $\epsilon_r = 5$ ), una segunda capa con hormigón húmedo ( $\epsilon_r = 15$ ) y por último, un hormigón en buen estado ( $\epsilon_r = 6$ ). Los aceros se ubican de igual forma que en el modelo anterior.

Al igual que en el modelo 5, en el modelo 6 se definen los tres aceros del primer nivel y se resalta el contacto entre los hormigones fracturado y húmedo, producto del contraste de propiedades electromagnéticas. En la zona del hormigón húmedo, como se vio en



**Figura 8.** Modelo 6 del sector de estudio. A Realizado con una antena de 1.6 GHz, 500 scan/m y un total de 1024 muestras. B Realizado con una antena de 750 MHz 500 scan/m y 512 muestras. Ambos con ganancia 10. Zona verde ( $\epsilon_r = 5$ ), zona rosa ( $\epsilon_r = 15$ ) y zona azul ( $\epsilon_r = 6$ ). Tomada de GPR-SIM (2020)

el modelo 5 (Figura 7), se dificulta la interpretación de las hipérbolas de reflexión de los aceros y no se logran detectar el tercer nivel de aceros.

Luego de llevarse a cabo la modelación de diferentes escenarios en el sector de estudio, se propone seleccionar la antena de 1.6 GHz para realizar la adquisición de datos. Esta decisión se basa en la necesidad de realizar un trabajo de detalle, algo que con la antena de 750 MHz no se logra. Según los resultados de las modelaciones, con 20 ns como ventana de tiempo, se logra alcanzar la profundidad deseada, mientras que con un mayor valor no cambian los resultados y se torna más engorroso. En cuanto a la cantidad de muestras por scan, los radargramas tienen mayor definición con 512 muestras. Al utilizar un menor número, los reflectores en algunas ocasiones se detectan con menor calidad. Otro parámetro a definir es la cantidad de scan por metro; en este aspecto no hubo cambios apreciables al variar los valores, entre 400 y 1000 *scan/m*, por lo que se trabajó con 500 *scan/m* porque si se aumenta mucho la cantidad se dificultan y ralentizan las mediciones. La adquisición será mediante *C-scan* para lo-

grar una mayor cobertura y poder cartografiar la corrosión de los aceros en la parte superior del muro.

La variante de adquisición a aplicar (Figura 9) incluye tres perfiles longitudinales (color rojo), uno en la cara interior del muro (lado de la acera), a 0.50 m de la acera (P1), otro encima del muro, a 0.25 m del borde interior (P2), un perfil (P3) a 0.50 m del borde exterior del muro (lado del mar) y perfil a 1.50 m desde el mismo borde exterior (P5), sobre la base del muro. Los perfiles transversales (color azul) se realizarán en la misma disposición que en la variante 1 (P4). La ventaja de esta variante es que presenta una mayor caracterización de los estribos en el lado exterior del muro y el estudio de la base del mismo, a la cual no llega la antena de 1.6 GHz desde encima del muro. Esta opción es la más completa de todas, asegura que cada estribo del primer y segundo nivel, puedan ser caracterizados por tres perfiles y un cuarto perfil caracterizaría la base del muro. Los perfiles transversales cortarían a todos los aceros longitudinales cada 40 cm, tanto los que se ubican en la cara interior y encima del muro, como en su cara exterior.



**Figura 9.** Variante de adquisición. Cuatro perfiles longitudinales (color rojo) y una serie de perfiles transversales (color azul). Tomada por el autor.

Tanto los perfiles longitudinales como transversales, se trazarán en zigzag, de manera que se ahorre tiempo. Para velar por la calidad de la adquisición de los datos, hay que llevar a cabo las mediciones en un período donde no hayan ocurrido fuertes mareja-

das, donde se asegura que el hormigón se encuentre lo más seco posible, para que el contenido de humedad sea menor y puedan ser identificados los aceros con distintos grados de corrosión.

## CONCLUSIONES

Mediante la investigación bibliográfica se pudo caracterizar la señal electromagnética de alta frecuencia asociada a las patologías presentes en estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión y se determinó que los aceros embebidos en el hormigón se caracterizan por una hipérbola de alta amplitud, los aceros corroídos, en su fase inicial, por una baja amplitud y a medida que aumenta el grado de corrosión, su amplitud también aumenta, pero sin superar a los aceros sin corroer; las oquedades presentan alta amplitud en sus hipérbolas y cambios de polaridad en la onda, mientras que los valores bajos de intensidad de la señal son característicos de las zonas con humedad.

A través del GPR-SIM se realizó una simulación de la respuesta electromagnética de alta frecuencia de un sector del muro del malecón habanero comprendido entre las calles B y C, afectado por la corrosión donde se corroboró los resultados de la investigación bibliográfica preliminar y se obtuvo que los aceros que se encuentran en hormigón seco se definen con claridad y gran intensidad de reflexión, contrario a cuando están embebidos en zonas húmedas donde disminuye su amplitud y debido a la disminución de la velocidad de la onda se ubican a mayor profundidad las hipérbolas y se delimita como zona de corrosión.

Para evaluar el estado técnico del sector del muro del malecón habanero, comprendido entre las calles B y C, afectado por la corrosión, se propone una variante para la adquisición con el empleo de una antena de 1.6 GHz, ventana de tiempo de 20 ns, 500 scan/m y 512 muestras. Perfiles en la cara exterior del muro, a 0.50 m de la acera, otro encima del muro, a 0.25 m del borde interior, un tercer perfil a 1.50 m desde el mismo borde interior, sobre la base del muro y perfiles transversales espaciados a 0.4 m.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecerle a Dean Goodman, ingeniero geofísico del Geophysical Archeometry Laboratory, por brindar la licencia del software GPR-SIM, la cual fue de vital importancia para el desarrollo de este trabajo y por sus aclaraciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre A. M.; Mejía De Gutiérrez R.**, 2013, Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas: *Materiales de Construcción*, 63, 7-38.
- Alla, A.**, 2016, Análisis comparativo de normativas: ACI 318-14 y EHE-08. Departamento de la tecnología de la construcción. Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, Trabajo de fin de grado.
- 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, 271.
- Avendaño Rodríguez, E.** «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, 2006, 19 p.
- Barreto Paredes, E. A.; Ganzhi Fajardo, R. D.**, 2018, Evaluación de columnas de hormigón armado mediante métodos no destructivos, Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Cuenca, trabajo de titulación como arquitecto.
- Beben, D.; Mordak, A.; Anigacz, W.**, 2013, Ground Penetrating Radar applications to testing of reinforced concrete beams: *Procedia Engineering*. 65, 242-247.
- Bonomo, N.; De La Vega, M.**, 2006, El método del Georradar. *Arqueogeofísica. Una metodología interdisciplinaria para explorar el pasado*, 73-103.
- Cassidy, N.J.; Eddies, R., Dods, S.**, 2011, Void detection beneath reinforced concrete sections: The practical application of ground-penetrating radar and ultrasonic techniques: *Journal of Applied Geophysics*, 74, 263-276.
- Dinh K.; Zayed, T.; Tarussov A.**, 2013, GPR image analysis for corrosion mapping in concrete slabs. En: CSCE General Conference Canada.
- Esteve Escrivá, J. C.**, 2005, Aplicación del GPR como técnica geofísica en la investigación arqueoló-

- gica en la capilla de San Francisco de Asís, Universidad de Alicante-Proyecto Habana, proyecto final de carrera.
- González Roura, N.**, 2013, Comparación de técnicas no destructivas en la inspección del hormigón armado: Georradar versus tomografía ultrasónica, Universidad politécnica de Valencia, proyecto fin de máster.
- Goodman, D.**, 1994, «Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology». *Geophysics*, 59 (2). 224-232.
- Goodman, D.** *GPR Simulation Software «GPR-SIM»*, (programa informático), versión 3.0, California, actualización: febrero 2020, revisión: agosto/2020.
- Höla, J.; Bien, J.; Sadowski, L.; Schabowicz, K.**, 2015, Non-destructive and semi-destructive diagnostic of concrete structures in assessment of their durability: Bulletin of the polish academy of sciences, 63, 87-96.
- 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*, 66, 671-684.
- 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*, 46, 1-8.
- Hugenschmidt J.; Kalogeropoulos A.**, «The inspection of retaining walls using GPR». *Journal of Applied Geophysics*, 2009, vol. 67, p. 335-344.
- Istiaque H.; Yazdani N.**, 2014, Ground penetrating radar utilization in exploring inadequate concrete covers in a new bridge deck: *Construction Materials*, 1,104-114.
- Kabir, S.; Zaki, A.**, 2011, Detection and quantification of corrosion damage using Ground. In: *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, Marrakesh, Morocco.
- 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.
- Krishnarajapete, Raju, R.**, 2015, Estimation of rebar corrosion in concrete using ground penetrating radar, Universidad de Texas y Arlington, Trabajo de maestría.
- Lai, W-L.; Dérobert, X.; Annan P.**, 2013, Measurement of accelerated steel corrosion in concrete using ground-penetrating radar and a modified half-cell potential method, *Journal of infrastructure systems*. ASCE.
- Lai, W-L.; Dérobert, X.; Annan P.**, 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*.
- Lakshmi, K. A.; Rahamath, A.**, 2016, Estimation of rebar radius using Ground Penetrating Radar: *International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics (IJETCSE)*, 22(2)
- 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)
- Pellicer Llopi, V.**, 2014, Ensayos no destructivos en hormigón. *Georradar y ultrasonidos*, Universidad de Valencia.
- Porto Quintián, J.**, 2005, *Manual de patologías en las estructuras de hormigón armado*. Universidad da Coruña,
- Prego, F. J.; Núñez-Nieto, X.; Arias, P.**, 2016, Assessing the applicability of Ground-Penetrating Radar to quality control in tunneling construction, ASCE.
- Saricicek, I.; Seren, A.**, 2014, Zigina, Torul with ground penetrating radar, *IEEE Xplore*. DOI: 10.1109/ICGPR.2014.6970452

- 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,
- 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*, 11(23), 2814.
- Tosti, F., 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.
- Wong, T. W.; Lai, W. W.; Sham, J. F.; Poon, C.,** 2019, Hybrid non-destructive evaluation methods for characterizing chlorideinduced corrosion in concrete: *NDT and E International*, 07 <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.05.008>
- 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*, 59, 68-76.
- 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*).
- Fecha de recepción: 22 de septiembre de 2020  
Fecha de arbitraje: 17 de diciembre de 2020  
Fecha de aprobación: 11 de marzo de 2021

