

Aplicación de la técnica del georradar en ingeniería civil: evaluación de la variación del contenido de agua en el hormigón

Use of the non-destructive ground-penetrating radar technique in civil engineering: Evaluation of the variation of water content in concrete

Rosa Martínez-Sala^a, Jesús Mené-Aparicio^b e Isabel Rodríguez-Abad^{c,*}

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Universitat Politècnica de València, Valencia, España

^b Dr. Arquitecto, Universitat Politècnica de València, Valencia, España

^c Dr. Ingeniero en Geodesia y Cartografía, Universitat Politècnica de València, Valencia, España

Recibido el 14 de noviembre de 2016; aceptado el 17 de mayo de 2017

Disponible en Internet el 14 de octubre de 2017

Resumen

La técnica no destructiva del georradar se basa en la propagación de las ondas electromagnéticas en el rango de las microondas. Actualmente esta técnica se aplica en un gran número de estudios en el ámbito de la ingeniería civil, tales como el análisis del estado de pavimentos, puentes, túneles, edificios, en la detección y localización de instalaciones, así como en la caracterización y diagnóstico de materiales de construcción. En este artículo se describe, a modo de ejemplo, un estudio completo en el que se demuestra la gran sensibilidad de la técnica no destructiva del georradar para evaluar la variación del contenido de agua en el hormigón endurecido. La evaluación se realiza mediante el análisis de los parámetros de onda electromagnética que fueron registrados con un equipo comercial de georradar.

© 2017 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Técnicas no destructivas; Georradar; Hormigón; Parámetros de onda; Penetración de agua

Abstract

The non-destructive ground-penetrating radar (GPR) technique is based on the pulsation of electromagnetic waves in the microwave range. This technique is currently used in a large number of studies in the field of civil engineering, such as the analysis of state of pavements, bridges, tunnels, buildings, in the detection and location of installations, as well as in the characterization of building materials. This article describes, as an example, a complete experimental study in which the sensitivity of the non-destructive technique of GPR to assess the variation of the water content is demonstrated. The evaluation is performed by analysing electromagnetic wave parameters recorded using commercial ground-penetrating radar equipment.

© 2017 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Keywords: Non-destructive techniques; Ground-penetrating radar; Concrete; Wave parameter; Water penetration

1. Situación actual de las aplicaciones del georradar en la ingeniería civil

Los primeros equipos de radar se desarrollaron con fines militares durante la Segunda Guerra Mundial para la detección de aviones y barcos. Posteriormente, esta misma técnica se aplicó

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: isrodab@upvnet.upv.es (I. Rodríguez-Abad).

en la localización de objetos en el subsuelo, y de ahí surgió el nombre en inglés *ground-penetrating radar* (georradar). A partir de los años cincuenta, gracias al desarrollo de la tecnología adecuada, el georradar comenzó a emplearse en otras áreas de conocimiento como la geología, la minería, la glaciología y la ingeniería.

Más recientemente, esta técnica se ha utilizado como herramienta de prospección no destructiva y de gran resolución en estudios hidrológicos, del medio ambiente y arqueológicos. También se ha usado en la prospección de recursos naturales y en el campo de la ingeniería civil y de la arquitectura, especialmente en aquellos trabajos cuyo valor patrimonial y artístico es relevante.

Actualmente, y en el ámbito de la ingeniería civil, el georradar se aplica en un gran número de estudios, como son el análisis del estado de pavimentos, puentes, túneles, edificios, en la detección y localización de instalaciones, así como en la caracterización y diagnóstico de materiales de construcción.

La aplicación del georradar como técnica de estudio de las infraestructuras de transporte no solo abarca el análisis de las infraestructuras cuando ya se encuentran en servicio, sino que también durante el periodo en el que se están construyendo. En este sentido, la técnica del georradar no suele usarse como un test definitivo sobre la condición en la que se encuentra la estructura, pero sí para la identificación de zonas débiles o dañadas como consecuencia de su uso o de una mala ejecución. Las mediciones con georradar se realizan en pavimentos flexibles como el asfalto, así como en los rígidos (hormigón). Las aplicaciones más comunes son la determinación del espesor de las capas del pavimento de asfalto y hormigón, la localización del refuerzo del hormigón y la detección de heterogeneidades del pavimento [1–3].

El georradar 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, su posible deterioro, etc. [4,5].

Las principales aplicaciones del georradar 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 los posibles huecos existentes entre el hormigón y la roca [6]. El georradar también se ha utilizado en la evaluación de daños en túneles [7], así como en comparaciones de modelos físicos con datos experimentales registrados en el revestimiento de túneles [8].

En el campo de la arquitectura y la edificación, el georradar se utiliza como técnica complementaria o de apoyo para determinar características que son necesarias para abordar estudios más completos. En ese caso, el georradar proporciona una serie de datos que pueden ayudar a la simulación del comportamiento del edificio o de parte de él. La inspección de edificios por medio de georradar se puede realizar por diferentes motivos. Por ejemplo, en muchas ciudades es obligado realizar la inspección de edificios antiguos, y en otras, realizar estudios detallados después de terremotos o desastres naturales con el objeto de definir zonas de riesgo. Asimismo, el carácter no destructivo del georradar hace

que sea de gran utilidad en la elaboración del estudio preliminar de restauración de edificios patrimoniales o de cierto valor artístico, ya que permite detectar daños ocultos, humedades en el subsuelo, determinar profundidades y espesores de zapatas de cimentación y/o encontrar estructuras o cavidades enterradas en el subsuelo, tales como criptas [9,10]. No obstante, aunque la mayoría de estudios se realizan en edificios históricos, también hay muchos ejemplos de trabajos realizados para evaluar el estado de edificios relativamente modernos que presentan daños en su estructura [11].

A menudo, las mejoras continuas en las infraestructuras de instalaciones básicas suponen que se tenga que realizar un cambio de posición de las mismas. Este proceso se debe realizar con la precisión adecuada, ya que en caso contrario puede dar lugar a la interrupción del suministro o el daño de la instalación. Por ello, es necesario disponer de forma previa de un cartografiado de esas instalaciones de suministro y así evitar pérdidas o accidentes [12]. El cartografiado de las instalaciones enterradas consiste en la identificación de la posición y tipo de servicio enterrado: líneas de comunicación, distribución de electricidad, gas natural, agua, evacuación de residuos, etc. En este contexto, la generación de imágenes 3D del subsuelo por medio del georradar es una de las técnicas no destructivas con mayor proyección, ya que ofrece nuevas oportunidades a la hora de cartografiar la estructura del subsuelo, a poca profundidad y en zonas altamente urbanizadas [13,14].

El georradar, cuyo funcionamiento se basa en la propagación y detección de ondas electromagnéticas, es capaz de registrar las variaciones de las propiedades electromagnéticas de los materiales. Las propiedades electromagnéticas de un medio están muy relacionadas con otras propiedades físicas (densidad, contenido de humedad, etc.), con su composición y su estructura a pequeña escala. Es por ello que el georradar se está empleando en la caracterización de materiales. En concreto, su aplicación en el estudio del hormigón está dando resultados muy prometedores e interesantes [15,16]. Algunas investigaciones estiman el contenido de agua libre en el hormigón por medio del estudio de distintos parámetros de la onda electromagnética [17–19]. Otros se centran en caracterizar el sistema poroso del hormigón endurecido [20], o bien en la determinación del contenido volumétrico de agua en el hormigón [21] y la estimación del grado de penetración del agua [22–24]. Incluso algunos analizan la relación entre los parámetros de onda registrados por medio de georradar con algunos indicadores relacionados con la durabilidad, en particular los contenidos de agua y cloruros en el hormigón [25].

Los libros *Proceedings of the First Action's General Meeting (Rome)* y *Proceedings of the 2014 Working Group Progress Meeting (Nantes)* resumen la situación actual de la aplicación del georradar en el campo de la ingeniería civil [26,27].

2. Fundamento de la técnica no destructiva del georradar

El fundamento de la técnica no destructiva del georradar está ampliamente descrito en libros como [28], y sus posibles

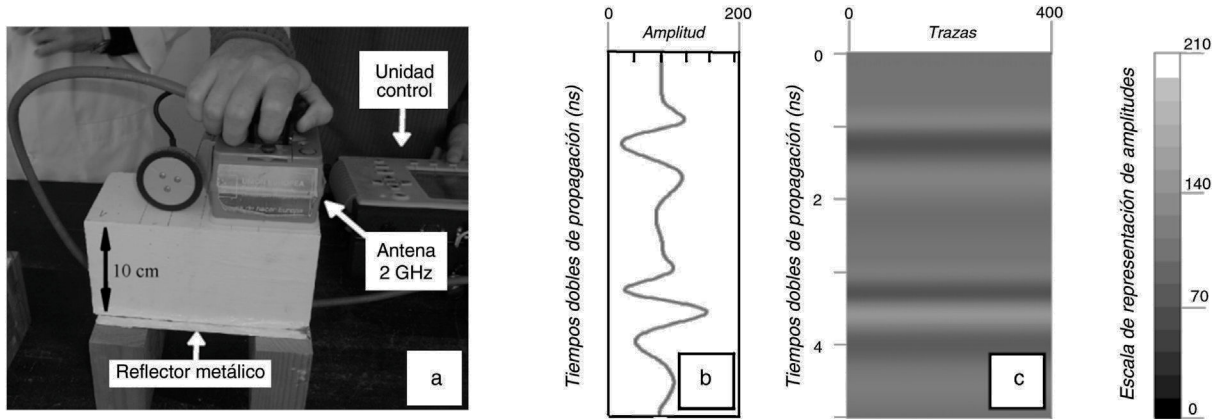


Figura 1. a) Equipo de georadar. b) Trazas características registradas por medio de una antena de georadar de 2 GHz. c) Radargrama característico obtenido por medio de georadar y la escala de colores de representación de amplitudes.

aplicaciones en el campo de la edificación y los materiales de construcción, en tesis doctorales como [29,30].

De una forma sencilla se puede decir que el georadar es un sistema que genera ondas electromagnéticas en el rango de las microondas (desde algunos MHz hasta algunos GHz). El equipo consta básicamente de las 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 (fig. 1a) son recogidas por la antena receptora, y el conjunto de todas ellas, que constituirá la respuesta del material, queda registrado en una traza (fig. 1b). El conjunto de trazas registradas a lo largo del tiempo en un material se denomina radargrama (fig. 1c). El radargrama es otra forma de visualizar la información registrada por la antena, y se asigna una escala de color a las amplitudes de energía recibida.

Como ejemplo, en la figura 2a se muestra de forma esquemática la trayectoria de las ondas electromagnéticas en su propagación por la superficie y el interior de una pieza de hormigón. En la figura 2b se muestra la traza típica obtenida en este caso donde se observan dos partes claramente diferenciadas. En

primer lugar, se registra lo que recibe el nombre de onda directa y que consiste en la suma de la energía propagada directamente entre el emisor y el receptor en el aire, y la que se propaga en la parte más superficial de la probeta. En segundo lugar, se registra la onda que se refleja en el reflector metálico situado en la parte inferior de la probeta. Esta segunda parte es lo que se denomina onda reflejada. Se observa que la polaridad de la onda directa y la de la reflejada son de signo contrario como consecuencia de la colocación del reflector metálico (fig. 2c). También se aprecia en esta figura que la energía reflejada en la base de la probeta es mucho mayor cuando se coloca el reflector metálico. De modo que en este caso se puede despreciar el posible efecto de borde, puesto que la energía de las ondas reflejadas en el contorno es insignificante frente al valor de la energía reflejada en la interfaz hormigón-metal.

En estas trazas es donde se pueden medir los parámetros de las ondas directas y reflejadas: tiempos de llegada y amplitudes de cada uno de los máximos y mínimos ($D1$, $D2$, $D3$, $R1$, $R2$ y $R3$) que las componen. Además, a partir de ellos se puede calcular la velocidad de propagación de las ondas por el interior del hormigón y el nivel de energía recibido por la antena tras la propagación de las ondas. Por medio de la diferencia en los tiempos de llegada entre la onda directa y la onda reflejada (Δt_D^R), medidas en el radargrama, se puede calcular la velocidad de

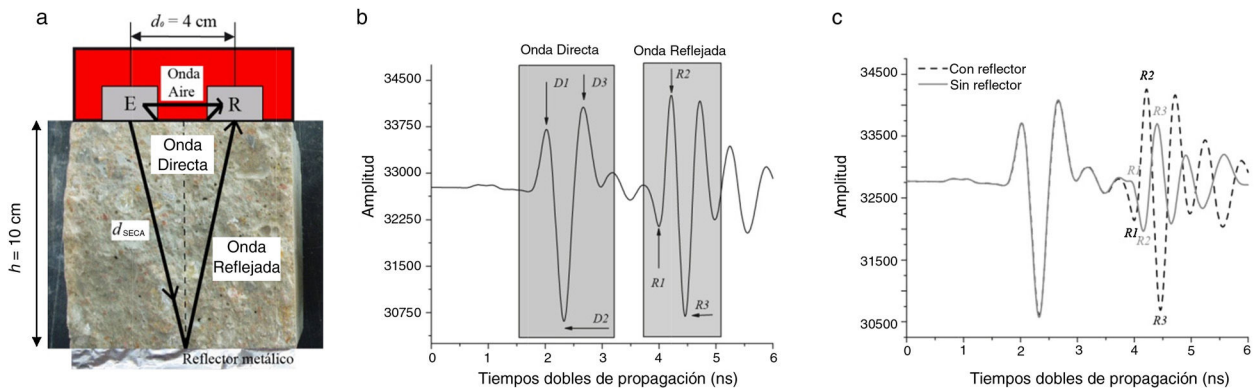


Figura 2. a) Esquema de la trayectoria de propagación de las ondas. b) Trazas características registradas con un equipo de georadar con una antena de 2 GHz en una pieza de hormigón. c) Cambio de polaridad de la onda reflejada debido a la colocación de un reflector metálico.

propagación (v) de las ondas electromagnéticas por el interior del medio a estudio, según la siguiente ecuación:

$$v = \frac{2 \cdot d}{\Delta t_D^R} = \frac{\left(2 \times \sqrt{h^2 + \left(\frac{d_0}{2}\right)^2}\right)}{\Delta t_D^R} \quad (1)$$

siendo d la semidistancia que recorre la onda reflejada, d_0 la distancia entre emisor y receptor y h el espesor del medio (fig. 2a).

A partir de la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas por el interior del medio se pueden determinar las propiedades dieléctricas del mismo. Un cambio en estas propiedades servirá como indicador de la variación que se produce en las propiedades físicas del material.

La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en un medio depende de la permeabilidad magnética, de la conductividad y de la permitividad dieléctrica de ese medio. Ahora bien, en el caso de un material no magnético, de baja conductividad eléctrica y de bajas pérdidas dieléctricas, como ocurre en el hormigón curado, la permitividad dieléctrica relativa efectiva del material (ε_r) se puede calcular según la ecuación 2.

$$\varepsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (2)$$

siendo c la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío ($3 \cdot 10^8$ m/s) y v la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el interior del medio, calculada a partir de los datos medidos en las trazas o radargramas.

Asimismo, a partir de las amplitudes registradas en las trazas del radargrama se puede calcular el nivel de energía (α) recibido de las ondas en dB por medio de la ecuación 3.

$$\alpha = 20 \times \log\left(\frac{A_i}{A_0}\right) \quad (3)$$

donde A_i es la amplitud registrada en la traza y A_0 es la amplitud del primer máximo positivo cuando se realiza una emisión al aire.

A partir de todos estos datos —tiempos de propagación y velocidades de propagación de las ondas electromagnéticas, permitividad dieléctrica relativa efectiva, amplitudes de los máximos de las ondas y niveles de energía recibidos y su variación— se puede caracterizar el medio a estudiar y sus posibles alteraciones o daños.

A continuación se desarrolla un estudio experimental que evalúa la aplicación de esta técnica al análisis de la durabilidad del hormigón endurecido.

3. Estudio experimental: evaluación de la variación del contenido de agua en el hormigón endurecido por medio de georradar

La durabilidad de las estructuras de hormigón armado depende principalmente de la facilidad con la que el agua y las sales disueltas en ella penetran en su interior. Por otro lado, las ondas electromagnéticas emitidas por un georradar son muy sensibles al contenido de agua del medio por el que se

propagan. Por todo ello, en este artículo se presenta la primera fase del trabajo realizado para analizar la sensibilidad de la técnica no destructiva del georradar para evaluar, a través de los parámetros de onda (velocidades de propagación y amplitudes de onda), el avance del frente del agua en el hormigón. En esta primera parte del estudio, que es el trabajo que aquí se presenta, los ensayos se realizaron en hormigón en masa. Una vez completada esta fase, se procederá a realizar los ensayos en hormigón armado, ya que este es el que podrá verse afectado por la corrosión.

Con el objetivo de estudiar el avance del agua en el hormigón endurecido, se fabricaron probetas de hormigón (con una relación A/C = 0,8) que después de su curado y secado en horno se sumergieron parcialmente en agua durante un tiempo determinado. Conforme iba transcurriendo el tiempo, a intervalos concretos, se sacaba una probeta del agua y se procedía al registro con georradar con una antena de 2,0 GHz de frecuencia central.

En primer lugar, los registros de georradar se realizaron colocando la antena sobre la cara de la probeta que había sido introducida en el agua, y posteriormente en la cara opuesta a esta. Estos dos procedimientos de adquisición de registros, situando la antena en dos caras opuestas, se realizaron para analizar qué parámetros de onda proporcionaban información más fiable sobre el avance del frente del agua en cada uno de los casos. Para ello se realizó un análisis exhaustivo de los parámetros de onda: tiempos de propagación y amplitudes de onda; también se calcularon a partir de estos las velocidades de propagación por el interior del material y la cantidad de energía recibida tras recorrer las ondas el interior del material.

3.1. Fabricación de las muestras

El experimento se llevó a cabo en probetas de hormigón fabricadas con una relación agua/cemento de 0,8. El cemento empleado en la fabricación de las probetas fue CEM I 42,5 R/SR. Para su fabricación se tuvo en cuenta el contenido de humedad que presentaban cada uno de sus componentes. La resistencia a compresión promedio a los 28 días obtenida fue de 36,4 MPa. La proporción y las características de los componentes empleados se recogen en la tabla 1.

Se fabricaron 10 probetas de hormigón de dimensiones $0,10 \times 0,10 \times 0,20$ m³ y sin armadura de refuerzo. Tras la fabricación de las probetas, los moldes hormigonados se cubrieron con un plástico para evitar la evaporación del agua y se mantuvieron así durante dos días. A continuación, las probetas se retiraron de sus moldes y se introdujeron en una cámara de curado húmedo durante un periodo de 28 días con el fin de estabilizar el fenómeno de hidratación y, por consiguiente, permitir la suficiente hidratación del cemento (en conformidad con la normativa que regula su fabricación [31]).

3.2. Adquisición de registros

Antes de iniciar el proceso de inmersión en el agua, las muestras fueron secadas en un horno a 105 °C durante 3 días para reducir el agua libre. Posteriormente, una vez se sacaron las

Tabla 1
Características del hormigón fabricado

Relación A/C	CEM I(kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Grava (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)	Resistencia compresión (MPa)
0,8	225	180	735	1302	36,4

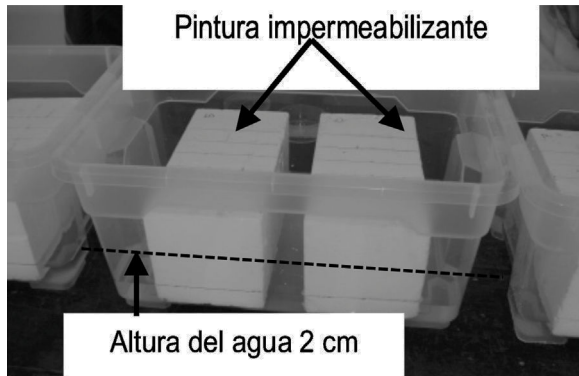


Figura 3. En esta figura faltan los textos. Se junta en un archivo la figura correcta.

probetas del horno, se aplicó una pintura impermeabilizante en todas las caras excepto en la que estaría en contacto con el agua y se sumergieron en 2 cm de agua (fig. 3). Transcurrido un tiempo en inmersión (tabla 2), se fueron sacando del agua las probetas a intervalos concretos, se secaba el agua superficial y se procedía a realizar la medición con georradar.

Las mediciones con el georradar se realizaron con una unidad central SIR-3000 y una antena de 2 GHz, ambos desarrollados por Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI).

Las mediciones con el georradar consistieron en el registro de 400 trazas por punto de medición. Se realizaron mediciones en 5 puntos en la cara que se había sumergido en el agua, y otros 5 en la cara opuesta ($P1, P2, \dots, P5$). La distancia entre los puntos analizados fue de 2,5 cm (fig. 4a). Para aumentar la energía de la onda reflejada se colocó en la cara opuesta de todas las probetas un reflector metálico (fig. 4b). No se aplicó ninguna función de ganancia, de manera que se pudiera trabajar directamente con los valores de amplitud de onda registrados.

En este trabajo se midieron las variaciones que tenían lugar en los parámetros de las ondas electromagnéticas: tiempos de llegada y amplitudes. Con ellos se calcularon las velocidades de

propagación y los niveles de energía recibida cuando las ondas se propagaban por las probetas de hormigón en dos situaciones diferentes definidas por el contenido de humedad: después del proceso de secado y después de la inmersión en agua durante determinados intervalos de tiempo.

La cantidad de agua libre absorbida se calculó por medio de la determinación del coeficiente de absorción (C_A), según la ecuación 4.

$$C_A (\%) = \frac{M_i - M_s}{M_s} \times 100 \quad (4)$$

donde M_s es la masa desecada en horno hasta masa constante y M_i es la masa de cada probeta tras la inmersión. Los valores del coeficiente de absorción para cada probeta se detallan en la tabla 2.

Con respecto a las mediciones de georradar, en primer lugar se tomaron los registros con el georradar antes de introducir las probetas en el agua (sesión de calibración). En segundo lugar se tomaron registros para diferentes intervalos de tiempo de inmersión. Cada 30 min se fueron extrayendo dos probetas del agua y se procedió a realizar la medición con el georradar; al terminar estos registros las muestras se rompían para, de este modo, medir la profundidad de avance del frente del agua por medio de la inspección visual (fig. 4c). También se pudo observar que la distribución consistía en una zona más húmeda y una zona seca. Sin embargo, como era complejo establecer el grado de saturación de la zona húmeda y el límite entre esta y la seca, se consideró más adecuado relacionar los parámetros registrados con georradar con el coeficiente de absorción. A modo informativo, en la tabla 2 se incluye la profundidad a la que se estima visualmente que ha llegado el frente del agua (P_f).

3.3. Análisis de los registros de georradar: efecto de la absorción de agua

A continuación se describe de forma cualitativa qué efecto producía sobre las señales el hecho de que las probetas estu-

Tabla 2
Tiempo de inmersión en agua, contenido de agua libre y profundidad media del frente del agua

Probeta	Tiempo inmersión (min)	M_s (g)	M_i (g)	C_A (%)	P_f (mm)
1	30	4.423,5	4.448,7	0,57	13,0
2	30	4.431,7	4.451,8	0,45	11,6
3	60	4.409,0	4.438,3	0,66	16,4
4	60	4.402,8	4.437,1	0,78	18,0
5	90	4.436,1	4.471,8	0,80	19,9
6	90	4.462,4	4.498,0	0,80	17,3
7	120	4.505,8	4.543,9	0,85	22,5
8	120	4.284,6	4.324,6	0,93	23,0
9	180	4.483,8	4.530,3	1,04	25,1
10	180	4.532,6	4.579,3	1,03	25,7

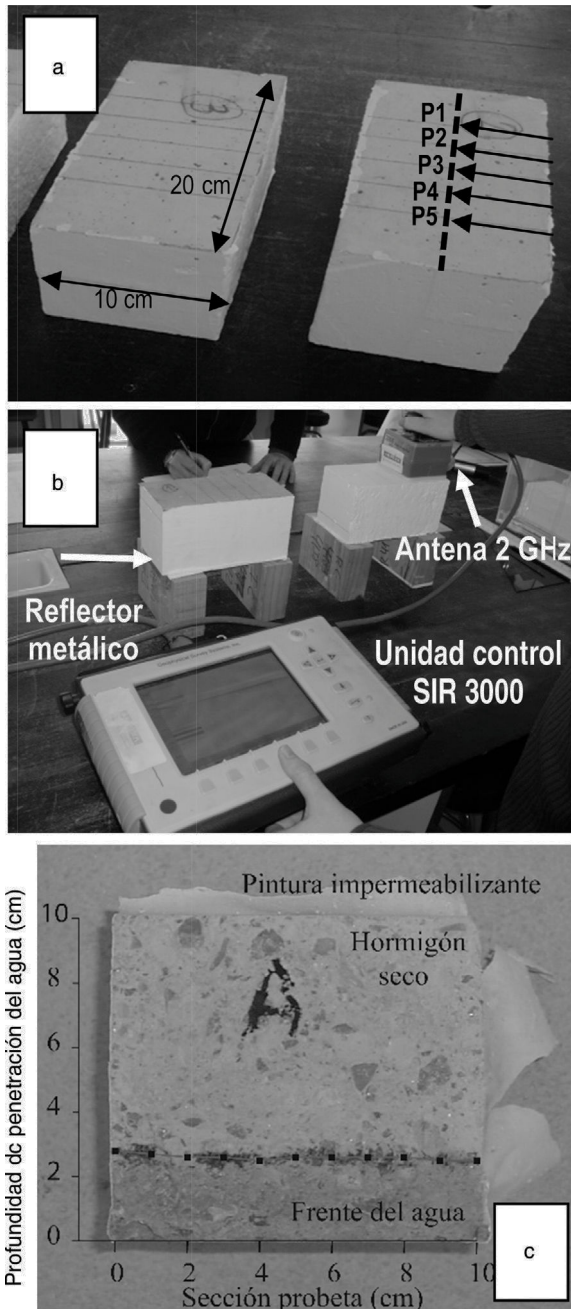


Figura 4. a) Posición de los puntos de registro con el georadar. Separación entre puntos de registro: 2,5 cm. b) Estudio estático con el georadar. c) Probeta de hormigón tras la inmersión y rotura a flexión en la que se ha marcado el frente de avance del agua.

vieran parcialmente inmersas en agua durante un intervalo de tiempo. Se observa que las ondas directas registradas cuando se colocaba la antena en la cara de la probeta que había permanecido sumergida durante un tiempo son claramente diferentes a las registradas en la misma cara antes de la inmersión (fig. 5a). Después de la inmersión los picos de la onda directa estaban más retrasados y su amplitud era menor. Además, hay que tener en cuenta que en las probetas que se extrajeron del agua durante las primeras horas el frente de agua alcanzaba profundidades muy pequeñas, y es por esto que la reflexión de la onda directa se

solapa con la reflexión debida a la interfaz hormigón húmedo-hormigón seco (fig. 6a). Conforme va avanzando el tiempo de inmersión y el frente del agua tiene mayor espesor, esta interferencia se va separando, tal y como se observa en la figura 5a (reflexión F).

No obstante, como era de esperar, al colocar la antena en la cara opuesta a la que estuvo en inmersión (fig. 5b), la onda directa no sufrió ninguna variación. Esto se debe a que la parte de la onda directa correspondiente a la energía que se propaga por los primeros centímetros de la probeta recorría una zona que no había sido alcanzada durante la inmersión por el frente de agua que avanzaba desde la cara opuesta y, por tanto, no se vio afectada.

En cuanto a las ondas reflejadas registradas después de la inmersión, vemos que las trazas medidas en las dos caras, tanto en la que había estado sumergida como en la que había permanecido seca, estaban sujetas a variación. En ambos casos los picos de las ondas reflejadas se retrasaban y las amplitudes eran menores.

Esta respuesta es lógica, dado que las ondas reflejadas han recorrido toda la probeta y por lo tanto se han propagado tanto por la zona seca como por la humedecida por el frente de agua. Un aumento en el contenido de humedad se traduce en un aumento de la permitividad dieléctrica relativa efectiva del hormigón y, en consecuencia, se ha de observar una disminución de la velocidad de propagación (ecuación 2). Asimismo, al aumentar la permitividad dieléctrica el medio se polariza más y aumenta la conductividad iónica, dando como resultado una disminución de la amplitud de la señal recibida.

3.4. Análisis de la variación de las velocidades de propagación

Las propiedades eléctricas del hormigón se ven muy alteradas cuando el contenido de agua libre aumenta. De hecho, un aumento del contenido de agua da lugar a un aumento de la capacidad de polarización, y por tanto se incrementa el valor de la constante dieléctrica ϵ_r (o disminuye la velocidad de propagación, v). Ahora bien, cada onda está compuesta por diferentes máximos (fig. 2b) y, tal como algunos autores describen, es muy complejo definir qué máximo es el representativo de la llegada de la onda [24,32,33]. Por lo tanto, al igual que en anteriores trabajos, se calculan las velocidades de propagación (v) con todos los intervalos de tiempos de llegada posibles de cada uno de los máximos que componen las ondas y se analiza cuál de ellos tiene un comportamiento más representativo de la absorción de agua que se produce.

Para ello se analizaron todas las combinaciones posibles de intervalos de diferencia de tiempos de llegada entre la onda directa ($D1$, $D2$ y $D3$) y la reflejada ($R1$, $R2$ y $R3$). Seguidamente, para cada intervalo entre máximos se promediaron los valores obtenidos en los 5 puntos de registro de georadar en la probeta. A partir de ellos y por medio de la ecuación 1 se calcularon las velocidades de propagación para cada intervalo considerado.

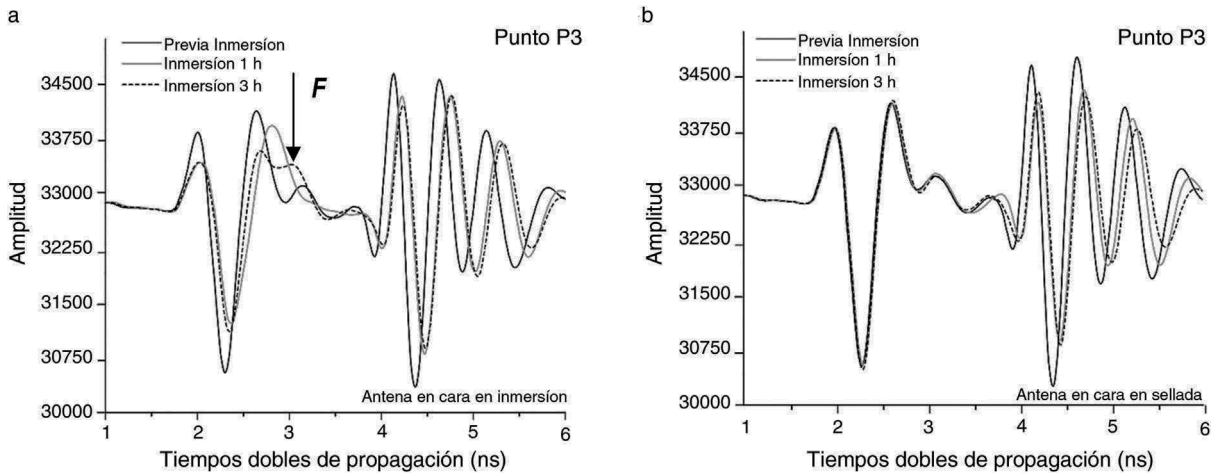


Figura 5. Trazas características en el punto de medición P3 cuando se encontraban secas y tras la inmersión, colocando la antena en la misma cara que se ha realizado la inmersión (a) y en la cara opuesta (b).

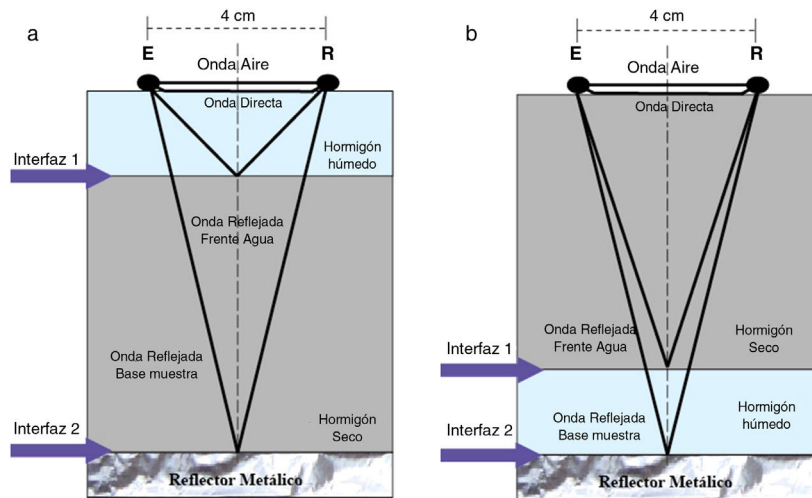


Figura 6. Trayectoria de rayos por el interior de la probeta al colocar la antena sobre la cara que estaba en inmersión (a) y en la cara opuesta (b).

Finalmente, se obtuvieron para cada probeta las diferencias de velocidad (Δv) que tuvieron lugar cuando estaban secas (v_s) y tras la inmersión (v_i), según la ecuación 5.

$$\Delta v = v_i - v_s \quad (5)$$

Los valores obtenidos de incrementos de velocidades cuando la antena se situó en la cara sellada con impermeabilizante y en la cara en la que se produjo la inmersión se detallan en la tabla 3.

De forma general, independientemente de los máximos empleados para calcular los incrementos de velocidad, estos presentaban un mismo patrón. Por un lado, los incrementos eran negativos puesto que, como se ha dicho, la velocidad de propagación de las ondas disminuía después de que las probetas hubieran estado inmersas en agua. Por otro lado, el incremento de la velocidad (en valor absoluto) iba aumentando a medida que el tiempo de inmersión era mayor, ya que al aumentar el contenido de agua en las probetas la velocidad disminuía.

Se puede apreciar que cuando se realizaron las medidas situando la antena sobre la cara que había estado inmersa en

el agua, el incremento de velocidad en algunos casos es positivo. Este resultado se explica por el hecho de que existe una interferencia entre la onda directa y la onda que se refleja en el frente del agua (fig. 6a), dando lugar a la alteración de la llegada de las ondas. El máximo $D2$ de la onda directa se ve afectado por estas reflexiones para profundidades de agua pequeñas; el $D3$, en cambio, se ve afectado para prácticamente todas las profundidades de agua. Es por esta razón que estos valores no se tuvieron en cuenta a la hora de realizar ajustes, es decir, solo se ajustaron aquellos en los que se consideró el primer máximo ($D1$) de la onda directa para calcular el intervalo de tiempos, que no se ve afectado por esta interferencia.

A continuación se obtuvieron las ecuaciones de las curvas que proporcionaban un mejor ajuste entre los incrementos de velocidad, calculados a partir de los diferentes máximos, y el coeficiente de absorción de agua (tabla 4).

Algunos de estos ajustes mostraban un buen acuerdo entre las variables, sobre todo cuando los datos utilizados eran los obtenidos a partir de las mediciones que se hicieron con la antena sobre la cara que permanecía siempre seca (fig. 7a).

Tabla 3
Incremento de velocidades (cm/ns) cuando la antena se colocó en la cara sellada y en la que se realizó la inmersión

		Cara sellada								
		Máximos considerados para el cálculo de los incrementos de tiempo								
Probeta	CA (%)	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
1	0,57	-0,16	-0,23	-0,22	-0,10	-0,13	-0,11	-0,08	-0,10	-0,08
2	0,45	-0,10	-0,15	-0,26	-0,12	-0,16	-0,25	-0,11	-0,14	-0,20
3	0,66	-0,29	-0,41	-0,60	-0,20	-0,28	-0,39	-0,18	-0,23	-0,31
4	0,78	-0,37	-0,49	-0,68	-0,27	-0,34	-0,46	-0,18	-0,21	-0,28
5	0,80	-0,28	-0,42	-0,50	-0,25	-0,36	-0,40	-0,17	-0,25	-0,26
6	0,80	-0,36	-0,55	-0,68	-0,24	-0,37	-0,45	-0,20	-0,29	-0,33
7	0,85	-0,29	-0,43	-0,51	-0,28	-0,41	-0,46	-0,19	-0,27	-0,28
8	0,93	-0,36	-0,49	-0,58	-0,27	-0,36	-0,40	-0,19	-0,25	-0,26
9	1,04	-0,35	-0,52	-0,62	-0,32	-0,46	-0,51	-0,20	-0,28	-0,30
10	1,03	-0,45	-0,63	-0,56	-0,40	-0,54	-0,44	-0,34	-0,44	-0,29

		Cara sellada								
		Máximos considerados para el cálculo de los incrementos de tiempo								
Probeta	C _A (%)	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
1	0,57	-0,12	0,30	0,86	-0,12	0,21	0,59	-0,08	0,18	0,46
2	0,45	-0,10	0,24	0,63	-0,13	0,12	0,36	-0,13	0,05	0,21
3	0,66	-0,23	-0,09	0,59	-0,19	-0,07	0,43	-0,18	-0,09	0,26
4	0,78	-0,29	-0,15	1,04	-0,29	-0,19	0,64	-0,26	-0,18	0,41
5	0,80	-0,33	-0,20	0,75	-0,30	-0,21	0,48	-0,25	-0,18	0,32
6	0,80	-0,32	-0,23	0,92	-0,29	-0,23	0,61	-0,25	-0,19	0,42
7	0,85	-0,31	-0,29	0,71	-0,27	-0,25	0,49	-0,22	-0,19	0,35
8	0,93	-0,25	-0,18	0,96	-0,20	-0,14	0,70	-0,20	-0,16	0,42
9	1,04	-0,39	-0,35	-0,41	-0,36	-0,32	-0,38	-0,33	-0,31	-0,35
10	1,03	-0,27	-0,27	-0,33	-0,31	-0,33	-0,42	-0,23	-0,24	-0,28

Tabla 4
Ecuaciones de ajuste de los incrementos de velocidad (cm/ns) con el coeficiente de absorción C_A (%)

Antena Intervalos tiempo para el cálculo de velocidades	Cara sellada $y(x) = a + bx + cx^2$								$\overline{R^2}$
	a		b		c				
	Valor	σ^*	Valor	σ^*	Valor	σ^*			
R1-D1	0,44	0,26	-1,48	0,69	0,66	0,45		0,77	
R1-D2	0,61	0,32	-2,10	0,88	0,93	0,58		0,81	
R1-D3	0,95	0,56	-3,43	1,52	1,88	0,99		0,54	
R2-D1	0,06	0,19	-0,34	0,5	-0,07	0,33		0,83	
R2-D2	0,16	0,25	-0,65	0,69	0,02	0,45		0,84	
R2-D3	0,37	0,42	-1,54	1,15	0,7	0,75		0,53	
R3-D1	-0,05	0,24	-0,01	0,66	-0,18	0,43		0,52	
R3-D2	-0,02	0,31	-0,16	0,83	-0,15	0,54		0,58	
R3-D3	0,18	0,32	-0,95	0,89	0,48	0,58		0,23	

Antena Intervalos tiempo para el cálculo de velocidades	Cara en inmersión $y(x) = a + bx + cx^2$								$\overline{R^2}$
	a		b		c				
	Valor	σ^*	Valor	σ^*	Valor	σ^*			
R1-D1	0,49	0,26	-1,61	0,71	0,8	0,46		0,69	
R2-D1	0,19	0,26	-0,79	0,71	0,28	0,47		0,60	
R3-D1	0,14	0,25	-0,63	0,69	0,23	0,45		0,51	

σ^* : desviación típica.

Concretamente, el mejor coeficiente de correlación ajustado ($\overline{R^2} = 0,84$) se obtiene cuando las velocidades son calculadas con el tiempo transcurrido entre la llegada de los máximos R2-D2. Probablemente esto se deba a que al ser los máximos de

mayor amplitud son los que mejor se identificaban. También se obtuvieron muy buenos resultados para las velocidades calculadas con R2-D1 y las calculadas con R1-D2. Por otro lado, los peores ajustes se producían al utilizar el último máximo de

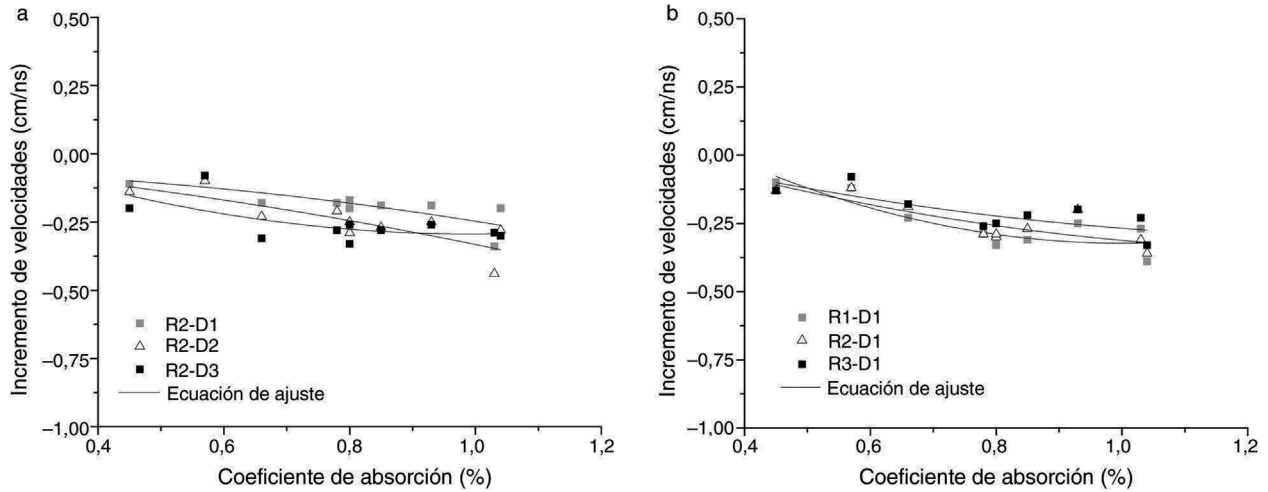


Figura 7. Ajustes entre incrementos de velocidades (cm/ns) y coeficientes de absorción cuando la antena estaba colocada en la cara sellada (a) y en la cara en inmersión (b).

la onda directa, es decir, *D3* y/o el último máximo de la onda reflejada (*R3*).

En el caso de los datos registrados con la antena sobre la cara que fue sumergida en el agua, se observa que, aunque el ajuste se hiciera solo con las combinaciones de máximos que daban lugar a incrementos de la velocidad negativos (fig. 7b), estos presentaban valores del coeficiente correlación menores que los anteriormente comentados.

3.5. Análisis de la variación del nivel de energía de las ondas

Un aumento del contenido de agua libre en las probetas de hormigón se acompaña de un aumento de las pérdidas dieléctricas y de la conductividad iónica. Esto último se traduce en una mayor absorción de la energía y, en consecuencia, en una disminución de la amplitud de las ondas registradas. En este apartado se detalla el análisis de la variación de estas amplitudes mediante el estudio de la variación del nivel de energía.

El primer paso consistió en registrar las amplitudes de los máximos de cada onda (*D1*, *D2*, *D3*, *R1*, *R2* y *R3*) para cada punto de medición y posteriormente se promediaron los valores

obtenidos para cada probeta. Seguidamente se calculó el nivel de energía (α) recibida de cada máximo por medio de la ecuación 3.

A continuación se estudió el incremento que se producía en el nivel de energía recibida entre la probeta seca (α_s) y tras la inmersión (α_i). El parámetro finalmente evaluado para cada máximo se calculó por medio de la ecuación 6 (tabla 5).

$$\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_s \tag{6}$$

En la tabla 5 podemos ver que el incremento del nivel de energía calculado para las tres primeras columnas es prácticamente nulo. Este resultado era de esperar, ya que estos incrementos del nivel se obtuvieron a partir de los máximos (*D1*, *D2* y *D3*) de la onda directa que se registraba con la antena sobre la cara opuesta a la que se sumergía en agua y que, por tanto, permanecía siempre seca. También se observa que los intervalos asociados a los máximos de la onda directa que se registraba cuando la antena se colocaba en las caras sujetas a inmersión proporcionaban valores un tanto erráticos. Esto puede deberse a la interferencia entre la onda directa y la reflexión en la interfaz hormigón húmedo y hormigón seco (fig. 6a).

Tabla 5
Incremento de energía recibida (dB) en los máximos cuando la antena se colocó en la cara sellada y en la cara inmersa en agua

Probeta	CA(%)	Máximos considerados de las ondas directas y reflejadas											
		Cara sellada						Cara en inmersión					
		D1	D2	D3	R1	R2	R3	D1	D2	D3	R1	R2	R3
1	0,57	0,07	-0,03	-0,77	-11,90	-5,62	-2,64	-9,68	-3,94	1,72	-2,12	-1,92	-3,66
2	0,45	-0,07	0,20	0,05	-11,05	-4,10	-1,57	-8,93	-2,99	2,33	-1,95	-1,40	-1,43
3	0,66	-0,23	-0,11	-0,07	-8,01	-5,16	-3,58	-8,82	-5,85	-1,58	-2,81	-2,92	-4,23
4	0,78	-0,26	-0,09	-0,49	-5,91	-6,47	-5,04	-10,68	-6,90	-2,97	-5,32	-3,91	-4,42
5	0,80	-0,09	0,08	-0,03	-3,42	-6,02	-6,17	-9,98	-6,46	-5,49	-3,76	-3,82	-5,20
6	0,80	0,21	0,53	0,31	-4,85	-5,91	-5,49	-10,17	-6,65	-4,41	-4,71	-4,98	-5,35
7	0,85	-0,11	0,13	-0,05	-2,97	-6,18	-6,17	-10,19	-5,41	-8,91	-5,50	-5,07	-6,02
8	0,93	-0,03	0,21	0,08	-2,42	-5,29	-6,94	-10,92	-5,07	-12,15	-5,38	-4,25	-6,53
9	1,04	0,00	0,00	0,29	-3,71	-6,42	-7,60	-10,82	-5,25	-9,88	-6,31	-6,31	-7,59
10	1,03	0,13	0,15	0,05	-3,92	-7,46	-7,83	-3,05	-1,47	-3,06	-	-	-

Tabla 6
Ecuaciones de ajuste entre el incremento de energía recibida (dB) y el coeficiente de absorción, cuando se colocó la antena en la cara sellada y en la inmersa en el agua

Antena Máximo	Cara sellada $y(x) = a + bx + cx^2$						$\overline{R^2}$
	a		b		c		
	Valor	σ^*	Valor	σ^*	Valor	σ^*	
R1	-32,16	8,00	54,76	21,66	-25,80	14,15	0,79
R2	-1,27	3,27	-8,36	8,86	3,07	5,80	0,51
R3	5,44	1,80	-16,77	4,87	3,83	3,19	0,97

Antena Máximo	Cara en inmersión $y(x) = a + bx + cx^2$						$\overline{R^2}$
	a		b		c		
	Valor	σ^*	Valor	σ^*	Valor	σ^*	
R1	2,37	3,60	-8,97	9,99	0,45	6,70	0,83
R2	2,71	3,29	-9,05	9,11	0,60	6,12	0,85
R3	3,49	2,40	-12,61	6,66	1,98	4,47	0,94

En lo que respecta a los incrementos del nivel de energía obtenidos a partir de la amplitud de los máximos de la onda reflejada vemos que, a excepción de los valores del máximo *R1* cuando la antena se colocaba en la cara sellada, el resto seguía un claro patrón de comportamiento. A medida que aumentaba el coeficiente de absorción, el incremento del nivel de energía se iba haciendo cada vez más negativo. Este resultado tiene una interpretación física lógica, ya que las amplitudes normalizadas con la amplitud del aire dan un valor menor que la unidad. Este valor, por otra parte, es cada vez más pequeño a medida que el coeficiente de absorción aumenta, y por tanto su logaritmo es un valor cada vez más negativo.

La excepción del comportamiento de los valores de la cuarta columna (máximo *R1*), anteriormente comentado, puede tener su explicación en lo siguiente. Durante las primeras horas de inmersión el frente del agua es muy pequeño y por tanto la

reflexión en la base de la muestra se solapa con la reflexión debida a la interfaz hormigón húmedo-hormigón seco (fig. 6b). Esto da lugar a que no se pueda considerar este máximo para evaluar la variación que se produce en la onda reflejada en la base de la muestra.

Con objeto de conocer mejor cómo se comportaban estos parámetros se realizaron ajustes con los coeficientes de absorción asociados. Los coeficientes de correlación ajustados de las ecuaciones que se obtuvieron para los mejores ajustes se recogen en la tabla 6.

En lo que respecta a los incrementos de energía hallados a partir de los máximos de la onda reflejada medida en los registros tomados colocando la antena en la cara que permanecía siempre seca, se obtuvo una buena correlación cuando el máximo analizado era el *R1* ($\overline{R^2} = 0,79$) y un excelente acuerdo cuando el analizado era *R3* ($\overline{R^2} = 0,97$). No obstante, a pesar

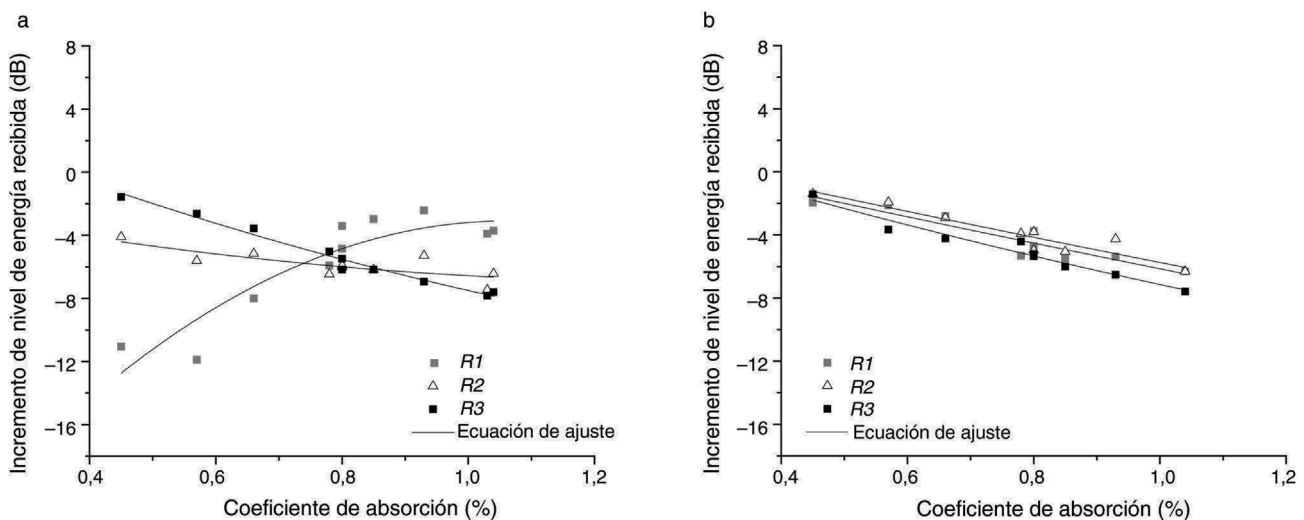


Figura 8. Ajustes entre incrementos de energía recibida (dB) en la onda reflejada y coeficientes de absorción cuando la antena estaba colocada en la cara sellada (a) y en la cara en inmersión (b).

de que el ajuste con el máximo $R1$ presenta un alto coeficiente de correlación ajustado, no se puede tomar como representativo del comportamiento de la reflexión en la base de la muestra, tal y como se ha comentado anteriormente. También observamos el gran acuerdo entre las variables cuando se ajustan los incrementos de energía de los tres máximos de la onda reflejada medida al colocar la antena en la cara que se sumergía en el agua. Es de especial interés la ecuación obtenida para el máximo $R3$, ya que se ajusta con gran fidelidad a la variación del coeficiente de absorción ($\overline{R^2} = 0,94$).

Los valores experimentales y las curvas de ajuste halladas se representan en la [figura 8](#). En esta figura se pone de manifiesto el comportamiento diferencial, antes mencionado, del incremento de la energía calculado con el máximo $R1$ medido al colocar la antena en la cara sellada ([fig. 8a](#)). Además, se aprecia que las ecuaciones que se obtuvieron describen con gran aproximación la relación entre las variables analizadas. Este resultado, así mismo, se corrobora con el valor de los coeficientes de correlación ajustados de estos ajustes ([tabla 6](#)).

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el estudio experimental presentado en este trabajo muestran que las señales registradas con georradar, utilizando una antena comercial de 2 GHz, en probetas de hormigón endurecido con diferentes contenidos de humedad, presentan variaciones en sus características. Además, estas variaciones exhiben un patrón que está relacionado con el contenido de agua de dichas probetas. Por tanto, este estudio revela el potencial del georradar para ser utilizado como herramienta no destructiva en el control del contenido de agua en el hormigón. La significancia de este resultado se pone de manifiesto si se tiene en cuenta que la mayoría de los procesos físicos o químicos que tienen lugar en el hormigón, sean beneficiosos o no, necesitan la presencia de agua.

De forma más concreta, además, se ha comprobado que los parámetros utilizados en este análisis —incremento de la velocidad e incremento del nivel de energía de las ondas— describían con gran aproximación la variación del coeficiente de absorción que experimentaban las probetas después de su inmersión en agua.

En cuanto al incremento de velocidad (velocidad de propagación en la probeta después de la inmersión menos velocidad de propagación cuando estaba seca), se observó que su comportamiento estaba de acuerdo con la hipótesis de que la velocidad de propagación en el hormigón había de ser menor a medida que el contenido de agua en las probetas aumentara. Esto queda reflejado en que su valor era negativo y que, además, a medida que el coeficiente de absorción aumentaba era cada vez más negativo. Asimismo, se ha demostrado que con los registros adquiridos con la antena en la cara que permanecía seca, el incremento de velocidad considerando los tiempos de llegada de los picos $D2$ (onda directa) y el $R2$ (onda reflejada) era el más adecuado para describir la variación del coeficiente de absorción.

En lo que se refiere a la relación entre la variación del incremento del nivel de energía (nivel de energía recibido de la

amplitud de la onda en la probeta después de la inmersión menos nivel de energía cuando estaba seca) y la variación del coeficiente de absorción, se ha mostrado que, cuando se consideran los picos de la onda reflejada, esta relación se ajustaba a la hipótesis de que la amplitud de las ondas tenía que disminuir a medida que el contenido de agua en las probetas aumentara. En este caso, los mejores resultados se obtuvieron cuando se analizó el pico de la onda reflejada $R3$, independientemente de en qué cara (húmeda o seca) se habían adquirido los registros.

No obstante, será necesario realizar investigaciones futuras con un mayor número de muestras, de mayores dimensiones y diferentes relaciones de agua/cemento, así como incorporando armaduras. Todo ello con el objeto de generalizar los resultados aquí obtenidos y extender su aplicación al hormigón armado.

El trabajo aquí presentado es uno de los múltiples ejemplos que podemos encontrar de la aplicación de la técnica del georradar en el ámbito de la ingeniería civil y la arquitectura, valorando especialmente el hecho de que es un procedimiento que permite la inspección rápida de grandes superficies y de forma no invasiva. Actualmente, como reflejo del interés que despierta esta metodología, se encuentra en vigor la acción promovida por la Unión Europea, COST Action TU 1208 Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar (www.gpradar.eu).

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen a todas aquellas personas que han colaborado directa o indirectamente en la elaboración del mismo. Es por ello justo agradecer la colaboración de los Técnicos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universitat Politècnica de València. Asimismo, los autores agradecen al Dr. Jean Paul Balayssac y al Dr. Gilles Klysz la colaboración prestada en el procesamiento de datos durante la estancia de investigación realizada (2013) en el Laboratorio Matériaux et Durabilité des Constructions de la Université Paul Sabatier de Toulouse (Francia), financiada por la COST Action TU 1208 Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar.

Bibliografía

- [1] A. Loizos, C. Plati, Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches, *NDT E Int.* 40 (2007) 147–157.
- [2] J. Stryk, R. Matula, K. Pospisil, Possibilities of ground penetrating radar usage within acceptance tests of rigid pavements, *J. Appl. Geophys.* 97 (2013) 11–26.
- [3] J. Nigel, N. Cassidy, R. Eddies, S. Dods, Void detection beneath reinforced concrete sections: The practical application of ground-penetrating radar and ultrasonic techniques, *J. Appl. Geophys.* 74 (4) (2011) 263–276.
- [4] J. Hugenschmidt, R. Mastrangelo, GPR inspection of concrete bridges, *Cement Concrete Comp.* 28 (4) (2006) 384–392.
- [5] A. Benedetto, G. Manacorda, A. Simi, F. Tosti, Novel perspectives in bridges inspection using GPR, *Nondestruct. Test. Eva.* 27 (3) (2012) 239–251.
- [6] A. Lalagüe, I. Hoff, Determination of space behind pre-cast concrete elements in tunnels using GPR, 13th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). (2010).
- [7] O. Abraham, X. Derobert, Non-destructive testing of fired tunnel walls: the Mont-Blanc Tunnel case study, *NDT E Int.* 36 (6) (2003) 411–418.

- [8] Z.L. Shu, B.X. Liu, B. Li, K. Zhang, W.T. Sun, Study on MATLAB-based data processing method for ground penetrating radar to detect tunnel lining, *Disaster Adv.* 6 (1) (2013) 398–405.
- [9] V. Pérez-Gracia, Innovative inspection procedure for effective GPR surveying of buildings Cost Action TU 1208, *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*. (2014).
- [10] M. Ramírez, F. García, I. Rodríguez-Abad, R. Martínez-Sala, J. Benlloch, Ground-penetrating radar survey for subfloor mapping and analysis of structural damage in the Sagrado Corazón de Jesús Church, Spain, *Archaeol. Prospect.* 15 (4) (2008) 285–292.
- [11] V. Pérez, F.G. García, I. Rodríguez-Abad, GPR evaluation of the damage found in the reinforced concrete base of a block of flats: A case study, *NDT E Int.* 41 (5) (2008) 341–353.
- [12] I. Nur Azwin, S. Rosli, M.M. Nordiana, Ali. Nisa, Predictive mapping of underground utilities using ground penetrating radar, *Caspian Journal of Applied Sciences Research.* 2 (AICCE'12 & GIZ' 12) (2013) 104–108.
- [13] J.E.N.G. Yih, C.H.E.N. Chih-Sung, Subsurface GPR imaging of a potential collapse area in urban environments, *Eng. Geol.* 147 (2012) 57–67.
- [14] ASTM Designation ASTM D6432-11 Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation.
- [15] R. Martínez-Sala, I. Rodríguez-Abad, I. del Val., Effect of penetration of water under pressure in hardened concrete on GPR signals, *International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*. (2013).
- [16] R. Martínez-Sala, I. Rodríguez-Abad, J. Mené, Concrete curing monitoring by means of the non-destructive GPR technique, *Jornadas Internacionales de Investigación en Construcción* (2013).
- [17] S. Laurens, J.P. Balayssac, J. Rhazi, G. Klysz, G. Arliguie, Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: Experimental study and direct modeling, *Mater. Struct.* 38 (283) (2005) 827–832.
- [18] Z.M. Sbartai, S. Laurens, J.P. Balayssac, G. Arliguie, G. Ballivy, Ability of the direct wave of radar ground-coupled antenna for NDT of concrete structures, *NDT E Int.* 39 (5) (2006) 400–407.
- [19] Z.M. Sbartai, S. Laurens, J.P. Balayssac, G. Ballivy, G. Arliguie, Effect of concrete moisture on radar signal amplitude, *ACI Mater. J* 103 (6) (2006) 419–426.
- [20] W.L. Lai., W.F. Tsang, Characterization of pore systems of air/water-cured concrete using ground penetrating radar (GPR) through continuous water injection, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 250–256.
- [21] Lai.F W.L., S.C. Kou, W.F. Tsang, C.S. Poon, Characterization of concrete properties from dielectric properties using ground penetrating radar, *Cement Concrete Res.* 39 (2009) 687–695.
- [22] I. Rodríguez-Abad, R. Martínez-Sala, J. Mené, G. Klysz, Water penetrability in hardened concrete by GPR, *15th International Conference on Ground Penetrating Radar* (2014).
- [23] R. Martínez-Sala, I. Rodríguez-Abad, J. Mené-Aparicio, A. Fernández-Castilla, A study of the waterfront advance in hardened concrete by means of energy level increment analysis, *8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*, 2015.
- [24] I. Rodríguez-Abad, G. Klysz, R. Martínez-Sala, J.P. Balayssac, J. Mené, Waterfront depth analysis in hardened concrete by means of the non-destructive ground penetrating radar, *IEEE J-STARS.* 9 (1) (2016) 91–99.
- [25] G. Villain, X. Derobert, M. Sbartai, J.P. Balayssac, Evaluation of concrete water content and other durability indicators by electromagnetic measurements, *13th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 2010.
- [26] L. Pajewski, A. Benedetto, *Proceedings of the First Action's General Meeting (Rome)*. COST Action TU1208 Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar, Publishing House, Aracne, 2013.
- [27] L. Pajewski, X. Derobert, *Proceedings of the 2014 Working Group Progress Meeting (Nantes)*., COST Action TU1208 Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar, Publishing House, Aracne, 2014.
- [28] D. Daniels, *Ground-Penetration Radar*, The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [29] V. Pérez, *Radar del subsuelo. Evaluación en arqueología y en patrimonio histórico-artístico [tesis doctoral]*, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2001.
- [30] I. Rodríguez-Abad, *Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera [tesis doctoral]*, Universitat Politècnica de València, Valencia, 2010.
- [31] UNE-EN 12390-2:2009, *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia*.
- [32] R. Yelf, D. Yelf, Where is the True Time Zero? *Electromagnetic Phenomena.* 7 (1) (2006) 158–163.
- [33] R. Martínez-Sala, I. Rodríguez-Abad, J. Tapia, Analysis of the reflected wave arrival position in timber specimens emitted by GPR with an antenna of 1.6 GHz., *2nd International Conference on Construction and Building Research*, 2012.