



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN

MÁSTER EN EDIFICIACIÓN

Modelización numérica de la propagación de las ondas electromagnéticas del georradar aplicada al estudio de la penetración del agua en el hormigón endurecido con *gprMax*.

Autora: Leticia Sabater Belmar

**Tutoras: Isabel Rodríguez Abad
Rosa Martínez Sala**

**Trabajo Final de Master
Septiembre 2019**

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que me han ayudado tanto en que la realización de este Trabajo Final de Máster haya sido posible, como a los que me han estado apoyando durante todos los años de universidad.

A mis Tutoras

Dña. Isabel Rodríguez Abad y Dña. Rosa Martínez Sala por los consejos dados, su paciencia y su motivación, por su tiempo prestado y por impulsar el desarrollo del trabajo.

A mis compañeros y amigos

Por formar equipo y amistad durante el desarrollo del Máster, especialmente a Youmana, Rubén, Nacho y Manon.

A mi familia

Por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica y de la vida y por su incondicional apoyo mantenido a través del tiempo.

RESUMEN

El georradar es una técnica geofísica basada en la propagación de ondas electromagnéticas que al ser recibidas por la antena del equipo proporcionan información sobre las propiedades dieléctricas del medio por el que viajan. A partir del análisis de los parámetros de las ondas registradas se pueden detectar las anomalías existentes en el medio o bien estimar sus propiedades y sus variaciones.

Algunas ventajas de la técnica de georradar, como son su carácter no destructivo, resolución y rapidez en la obtención y procesamiento de registros, han dado lugar a que se haya aplicado, y con éxito, en campos de estudio muy diversos. En los últimos años se ha venido utilizando en la inspección de estructuras de edificación y, más recientemente, en la caracterización de materiales de construcción, como es el hormigón.

La durabilidad de las estructuras de hormigón armado depende fundamentalmente de la estructura porosa, de la fisuración y del contenido de humedad del hormigón. En la actualidad uno de los procedimientos regulados por la Unión Europea para estimar la durabilidad del hormigón es comprobar el grado de penetración de agua bajo presión. Con este procedimiento, para medir la profundidad de penetración del frente de agua, es necesario extraer testigos o probetas de los elementos estructurales analizados. Por esta razón, en los últimos años se están realizando estudios con el fin de buscar metodologías alternativas que sean eminentemente no destructivas.

El contenido de agua determina las propiedades dieléctricas de un medio y, a su vez, estas propiedades influyen de forma decisiva en la propagación de las ondas electromagnéticas por ese medio. Es por ello, que la técnica del georradar se presenta como una técnica con gran potencial para evaluar la profundidad de las zonas afectadas por humedad en el hormigón endurecido.

No obstante, antes de realizar cualquier estudio experimental, es necesario conocer de forma previa la capacidad teórica de la técnica para una frecuencia de estudio dada. Con esto podremos comprender mejor cómo se propagan las ondas por el interior del hormigón y conocer cuál es su comportamiento en el caso de encontrar zonas con diferente contenido de humedad. En este trabajo se estudian qué variaciones se producen en la propagación de las ondas electromagnéticas al viajar por el interior del hormigón cuando existen zonas con diferentes contenidos de humedad. Para conseguir este objetivo la mejor opción es generar modelos numéricos que reproduzcan el comportamiento de las ondas electromagnéticas por el interior del hormigón en diferentes escenarios.

Por todo ello, el objetivo principal de este trabajo es realizar una modelización numérica de señales electromagnéticas que se propagan en hormigón cuyo frente de avance del agua sea de diferentes dimensiones y con la antena de registro colocada en distintas posiciones respecto al avance del frente del agua (en el lado seco y en el lado húmedo). Esto permitirá una mejor comprensión de la propagación, por el interior del hormigón, de las ondas electromagnéticas generadas con un equipo de georradar comercial y de las reflexiones que se produzcan como consecuencia del cambio de las propiedades dieléctricas del hormigón. Los modelos numéricos que se generan se basan en el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) y el software necesario para la generación de los modelos es el *gprMax*. La frecuencia de estudio elegida es la de 2 GHz de frecuencia central, ya que es la frecuencia de la antena comercial que la empresa GSSI, líder del sector, comercializa para usarla en los estudios del hormigón.

El presente Trabajo Final de Máster se enmarca en el proyecto aprobado en 30 de noviembre, por la Dirección General de Universidad, Investigación y Ciencia y que concede la subvención para la realización del proyecto de I+D+i desarrollados por grupos de investigación emergentes (GV/2017) de duración de 2 años y que lleva por título: “Caracterización de materiales de construcción por medio de las técnicas no destructivas del georradar y la termografía de infrarrojos”, perteneciente al Programa para la promoción de la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación en la *Comunitat Valenciana*, publicado el 25 de enero de 2017.

Además, es importante resaltar que parte de los resultados obtenidos en este Trabajo Final de Máster fueron presentados en la *International Conference on Construction Research / Eduardo Torroja*, que se celebró del 21 al 23 de noviembre del 2018 en Madrid. La investigación que se presentó lleva por título: “*Vertical resolution of ground-penetrating radar signals numerical modeling by gprMax on hardened concrete*” y que se adjunta al final del presente documento.

ABSTRACT

Ground-penetrating radar is a geophysical technique based on propagation of electromagnetic waves that, when being received by the antenna of the equipment, provides information of the dielectric properties of the media by which travels. From the analysis of the parameters of the waves registered, it can be detected the existent anomalies in the medium or estimated its properties and their variations.

Some advantages of the Ground-penetrating technique, as its nondestructive nature, resolution and quickness in obtaining and processing records, have given place to be applied successfully in very different fields of studio. In the last years, it has been applied to prospect building structures, and more recently, to characterize building materials, such as concrete.

The durability of building reinforced structures depends mainly on the porous structure, the cracking and the water content. Currently, one of the procedures regulated by the European Union to estimate the concrete durability is by means of the evaluation of the penetration degree of water under pressure. With this procedure, to measure the penetration depth of the waterfront, it is necessary to extract samples of the analyzed structural elements. For this reason, in the last years some studies are conducted with the aim of looking for alternative non destructive methodologies.

The water content is decisive in the dielectric properties of a material and these are directly related to how the electromagnetic waves propagate through the material. It is thus, that the Ground-penetrating technique presents great possibilities to evaluate the depth of the zones affected by humidity in hardened concrete.

Nevertheless, previously to carry out any experimental program, it is necessary to be aware of the theoretical capacity of the technique, for a given frequency of radiation. With this, it will be possible to better understand how the waves propagate inward concrete and their behavior in case of existence of areas with different water content. In this work, variations produced in the propagation of the electromagnetic waves when travelling inward concrete and occurrence of areas with different water content are studied. To achieve this aim, the best option is to generate numerical models that reproduce the behavior of the electromagnetic waves propagating inward concrete in different scenarios.

For all this, the main objective of this work is to generate numerical models of electromagnetic waves propagating in concrete, in which a waterfront is of different dimensions and the recording antenna is located at different positions. This will lead to a better understanding of the waves propagation inside concrete

generated with a commercial equipment and the reflections that might occur as a consequence of the change of the dielectric properties of concrete.

The numerical models generated are based on the finite differences in time domain method (FDTD) and the necessary software for the generation of the models is the *gprMax*. The chosen frequency for the study is 2 GHz of central frequency, since this frequency is the one that the leader manufacturer of Ground-penetrating radar equipment (GSSI) commercializes to be used to prospect concrete.

The current Master Final Project is part of the project approved on November 30, by the General Directorate of University, Research and Science and grants the grant for the realization of the R + D + i project by emerging research groups (GV / 2017) lasting 2 years and entitled: "Caracterización de materiales de construcción por medio de las técnicas no destructivas del georradar y la termografía de infrarrojos" belonging to the Program for the promotion of scientific research, the development of Technology e Innovation in the Comunitat Valenciana, published on January 25, 2017.

In addition, it is important to note that part of the results obtained in this work were presented at the International Conference "International Research Conference on Construction / Eduardo Torroja", to be held from 21 to 23 November, 2018 in Madrid. The research presented is titled: "Vertical resolution of ground-penetrating radar signals numerical modeling by *gprMax* on hardened concrete", and is attached at the end of the document.

RESUM

El georradar és una tècnica geofísica basada en la propagació d'ones electromagnètiques que al ser rebudes per l'antena de l'equip proporcionen informació de les propietats dielèctriques del mitjà pel que viatgen. Partint de l'anàlisi dels paràmetres de les ones registrades es pot detectar les anomalies existents en el mitjà o bé estimar les seves propietats i variacions.

Alguns avantatges de la tècnica del georradar, com és el seu caràcter no destructiu, resolució i rapidesa en l'obtenció i processament de registres, han donat lloc al fet que s'haja aplicat, i amb èxit, en camps d'estudi molt diversos. En els últims anys s'ha fet servir en l'inspecció d'estructures d'edificació i, més recentment, en la caracterització de materials de construcció, com és el cas del formigó.

La durabilitat de les estructures de formigó armat depèn fonamentalment de l'estructura porosa, de la fissuració i del contingut d'humitat de formigó. En l'actualitat un dels procediments regulats per la Unió Europea per estimar la durabilitat del formigó és comprovar el grau de penetració de l'aigua sota pressió. Amb aquest procediment, per a mesurar la profunditat de penetració del front de l'aigua, és necessari extraure provetes dels elements estructurals analitzats. Per aquesta raó, en els últims anys s'estan realitzant estudis amb la finalitat de cercar metodologies alternatives que siguin eminentment no destructives.

El contingut d'aigua determina les propietats dielèctriques d'un mitjà i, al seu torn aquestes propietats influeixen de forma decisiva en la propagació de les ones electromagnètiques per aquest mitjà. És per això, que la tècnica del georradar es presenta com una tècnica amb gran potencial per avaluar la profunditat de les zones afectades per humitat en el formigó endurit.

No obstant açò, abans de realitzar qualsevol estudi experimental, és necessari conèixer de forma prèvia la capacitat teòrica de la tècnica per una freqüència d'estudi donada. Amb tot això, podem comprendre millor com es propaguen les ones per l'interior del formigó i conèixer quin és el seu comportament en el cas de trobar-se zones amb diferent contingut d'humitat. En aquest treball s'estudien que variacions es produeixen en la propagació de les ones electromagnètiques al viatjar per l'interior del formigó quan existeixen zones amb diferents continguts d'humitat. Per aconseguir aquest objectiu la millor opció és generar models numèrics que reproduïsquen el comportament de les ones electromagnètiques per l'interior del formigó en diferents escenaris.

Per tot açò, l'objectiu principal d'aquest treball és realitzar una modelització numèrica de senyals electromagnètiques que es propaguen en formigó, en el que el front d'avanç de l'aigua siga de diferents dimensions i amb l'antena de registre

col·locada en diferents posicions respecte al mateix (en el costat sec i en l'humit). Això permet una millor comprensió de la propagació, per l'interior del formigó, de les ones electromagnètiques generades amb un equip de georradar comercial i de les reflexions que es produeixen com a conseqüència del canvi de les propietats dielèctriques del formigó. Els models numèrics que es generen es basen en el mètode de les diferències finites en el domini del temps (FDTD) i el software necessari per la generació dels models es el *gprMax*. La freqüència d'estudi escollida es de 2 GHz de freqüència central, ja que es la freqüència de l'antena comercial que la empresa GSSI, líder del sector, comercialitza per l'ús en estudis de formigó.

Aquest treball final de Màster s'emmarca en el projecte aprovat el 30 de novembre, per la Direcció General de Universitat, Investigació i Ciència, i que concedís la subvenció per la realització del projecte I+D+I desenvolupat per grups d'investigació emergents (GV/2017) de 2 anys de durabilitat, que porta per títol "*Caracterización de materiales de construcción por medio de las técnicas no destructivas del georradar y la termografía de infrarrojos*" pertanyent al Programa per a la promoció de la investigació científica, el desenvolupament tecnològic i la innovació en la Comunitat Valenciana, publicat el 25 de gener de 2017.

A més a més, és important ressaltar que part dels resultats obtinguts en aquest Treball Final de Màster van ser presentats en el Congrés Internacional "*International Conference on Construction Research / Eduardo Torroja*", que es va celebrar del 21 al 23 de novembre de 2018 a Madrid. La recerca que es va presentar porta per títol: "*Vertical resolution of ground-penetrating radar signals numerical modeling by gprMax on hardened concrete* " i s'adjunta al final d'aquest document.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	3
1.2. Análisis del problema	6
1.3. Objetivos del Trabajo Final de Máster	8
1.4. Contenidos del Trabajo Final de Máster	9
2. EL GEORRADAR	10
2.1 Fundamentos del georradar	12
2.2 El equipo de georradar	13
2.3 Métodos de adquisición de registro	17
2.4 Interpretación de registros	19
2.4.1. Parámetros de un registro	19
2.5 Registros de amplitudes	23
2.6 Resolución	25
2.7 Parámetros necesarios para la interpretación de radargramas	27
3. APLICACIÓN DEL GEORRADAR EN EDIFICACIÓN.....	28
3.1 Principales campos de aplicación del georradar en edificación	31
3.2 Caracterización de materiales de construcción por medio de georradar	34
4. MODELADO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	37
4.1 Ecuación de onda electromagnética	39
4.2 Parámetros electromagnéticos de un medio	41
4.2.1 Descripción de los parámetros que definen la propagación de una onda	41
4.2.2 Variación de las propiedades electromagnéticas del hormigón como consecuencia de la variación de sus propiedades físicas	42
4.3 Velocidad de propagación y atenuación de las ondas electromagnéticas	45
4.4 Algoritmo de generación de modelos numéricos: <i>grpMax</i>	47
4.5 Comandos básicos para programar con <i>gprMax</i>	52
4.6 Obtención de los modelos numéricos por medio de <i>gprMax</i>	56
4.7 Obtención de datos en formato ASCII desde el <i>gprMax</i>	61
5. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	64
5.1 Estudios de calibración antena 2 GHz	66
5.1.1 Calibración de la emisión al aire	67
5.1.2 Calibración de la propagación por el interior del hormigón	68
5.1.3. Calibración del tamaño mínimo de muestra del hormigón	72
5.2. Efecto del avance del frente del agua en probetas de hormigón en las señales de georradar con una antena de 2 GHz	75
5.2.1. Caso: Cuando la antena se coloca en la cara opuesta que se introduce en agua	76

5.2.2. Caso: Cuando la antena se coloca en la misma cara a la que se introduce en agua.....	78
5.2.3. Comparación con una experiencia real: descripción del estudio experimental.....	80
6. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.....	90
6.1 Principales parámetros electromagnéticos a estudio en las ondas modeladas.	91
6.2 Estudios de calibración de la antena 2 GHz.....	95
6.2.1 Calibración de emisión al aire.....	95
6.2.2. Calibración de la propagación por el interior del hormigón	98
6.2.3.- Calibración del tamaño mínimo de muestra del hormigón	102
6.3.- Efecto del avance del frente del agua en probetas de hormigón en las señales de georradar con una antena de 2 GHz.....	107
6.3.1.- Caso: Cuando la antena se coloca en la cara opuesta a la que se introduce en agua	107
6.3.2.- Caso: Cuando la antena se coloca en la misma cara que se introduce en agua.....	117
6.3.3.- Comparación con una experiencia real: determinación del frente de avance del agua.....	127
7. CONCLUSIONES	137
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
ANEXOS	145
ANEXO 1 Tablas.....	146
ANEXO 2 Índice de Figuras.....	153
ANEXO 3 Índice de Tablas.....	157
ANEXO 4 Calibración de la antena.....	159
ANEXO 5 Efecto del avance del frente del agua en probetas de hormigón.	160
ANEXO 6 Determinación del frente de avance del agua	161
ANEXO 7 Extracto del artículo: <i>A review of Ground-penetrating radar application in civil engineering</i>	162
ANEXO 8 Artículo del <i>International Conference on Construction Research/ Eduardo Torroja</i> , con título: <i>Vertical resolution of ground-penetrating radar signals numerical modeling by gprMax on hardened concrete</i>	163

1. INTRODUCCIÓN

En el primer apartado de este capítulo introductorio del Trabajo Final de Máster se realiza una breve revisión sobre qué es la técnica del georradar y cuál es la aplicación práctica que se le da en este estudio. A continuación, en el siguiente apartado se analiza el problema a estudio y se describe cuál es la normativa actualmente vigente para resolverlo y cuál es la propuesta que se presenta. Con todo ello, en el tercer apartado se detallan los objetivos a conseguir con el desarrollo del estudio y, por último, para una mejor comprensión del presente documento se describen cómo se organizan los contenidos del mismo.

1.1. Introducción

La tecnología del georradar, es un método de sondeo no destructivo para el estudio de diferentes tipos de superficies, funciona mediante la radiación electromagnética en el espectro de las microondas y su uso está en auge en la inspección y diagnóstico de las diferentes estructuras de edificación y materiales de construcción.

Las bases teóricas de la técnica del georradar se encuentran expuestas extensamente en varias tesis doctorales españolas como Rodríguez-Abad (2010a). Se fundamenta en la propagación de impulsos electromagnéticos. Mediante una antena situada sobre la superficie de un material se emiten ondas electromagnéticas que se propagan por el interior del material. Estas van sufriendo reflexiones cuando aparece un contraste dieléctrico. Estas reflexiones son registradas de nuevo por la antena y una vez procesadas y analizadas proporcionan información sobre el medio en el cual se han propagado.

Esta técnica no destructiva es muy útil para la inspección de edificios. Hoy en día se utiliza para detectar humedades en el subsuelo, determinar profundidades y espesores de zapatas de cimentación, también para encontrar estructuras o cavidades enterradas en el subsuelo, tales como criptas, enterramientos, etc., como por ejemplo se detalla en García et al. (2007), Ramírez et al. (2008), Pérez et al. (2008) y Capuz-Lafarga et al. (2011).

También se aplica, en los últimos años en el estudio y caracterización de materiales de construcción (hormigón, obra de fábrica, etc.); en la inspección, diagnosis y estudio de las manifestaciones patológicas de los mismos. Existen también numerosos estudios realizados con georradar cuyo objeto es analizar la variación del contenido de humedad de diferentes medios como suelos (Laurens et al., 2005), de materiales como el hormigón (Huisman et al., 2003) y (Zagoskin et al., 2006) y de muros de obra de fábrica (Maierhofer et al., 1998b). Incluso algunos autores como Sabartaï et al. (2006a-2006b), Klysz y Balayssac (2007) y Viriyametantont et al. (2008) han desarrollado algunos protocolos para el estudio de la variación del contenido de humedad en muestras de hormigón a lo largo de su proceso de curado.

Gran cantidad de estructuras de hormigón del siglo XX presentan signos de deterioro prematuro. La durabilidad de las mismas es un parámetro que define la habilidad de las estructuras para mantenerse en servicio sin presentar un deterioro significativo (Schiessel, 1988). En los últimos años los estudios de durabilidad del hormigón han sufrido un auge significativo (Mehta, 1997)(Neville, 2001).

Tradicionalmente la durabilidad del hormigón se ha estudiado relacionándolo con la resistencia a compresión (relaciones A/C, contenidos mínimos de cemento, etc.), y con las buenas prácticas que generan fraguados y acabados correctos. Sin embargo, se ha demostrado que una alta resistencia a compresión no siempre implica un hormigón durable, ya que la durabilidad también está en función de la transportabilidad de agentes agresivos en el interior del hormigón. Así pues, en la actualidad, se tiende a evaluar la durabilidad del hormigón mediante la utilización de modelos cuantitativos predictivos (General Guidelines for Durability Design and Redesign, 2000), que relacionan la degradación como consecuencia de la exposición ambiental y las características del material. Esto implica el desarrollo de modelos probabilísticos de degradación fiables (FIB Model Code for Service Life Design, 2006), que empleen indicadores de durabilidad adecuados como *input* del sistema y que permitan estimar la vida en servicio del material o estructura.

En el estudio de la durabilidad del hormigón cabe destacar que la puesta en práctica de métodos o técnicas no destructivas nos permiten ver cómo está la estructura o el material y así podemos evaluar a tiempo real la necesidad de mantenimiento, incrementando el tiempo de vida de las mismas y reduciendo los costes a largo plazo.

Algunos mecanismos de deterioro que provocan problemas en la durabilidad de las estructuras de hormigón son la corrosión de las armaduras, la reacción álcali de los áridos, los ataques sulfáticos y la acción de hielo-deshielo. De todos los nombrados anteriormente, la corrosión de las armaduras es el que origina más daños y pérdidas de integridad estructural (General Guidelines for Durability Design and Redesign, 2000). Dada la importancia de la corrosión como parámetro que afecta de forma determinante la durabilidad del hormigón, existen numerosos estudios sobre los mecanismos de transporte que facilitan la corrosión. Esto ha dado lugar al desarrollo de los llamados indicadores de durabilidad con el objetivo de predecir y monitorizar el inicio de la corrosión (Alexander, et al., 1999)(Schiessel, 2005).

Estudiar la penetrabilidad de fluidos en el hormigón es de máxima importancia cuando se realizan estudios sobre la durabilidad, ya que el inicio y propagación de la corrosión están directamente relacionados con la facilidad con la que los fluidos y los iones se mueven por la matriz de hormigón (Otieno, et al., 2010).

El ensayo de penetración de agua a presión, entre todos los demás, se utiliza para estudiar la durabilidad del hormigón y está regulado por la norma UNE-EN 12390-8. Para poder realizarlo, hay que producir una invasión y deterioro del elemento a estudio, ya que es necesario extraer una muestra. Teniendo en cuenta

la gran sensibilidad de los parámetros electromagnéticos con respecto al contenido de humedad del hormigón, como muestran los trabajos de Villain et al. (2009), la técnica del georradar presenta un gran potencial para evaluar el frente de avance del agua en el hormigón endurecido.

Por tanto, el georradar que trabaja con ondas electromagnéticas y no es invasivo es una buena alternativa a otros procesos costosos y destructivos, ya que las propiedades dieléctricas varían dependiendo del contenido de agua, del contenido de cloruros y de la porosidad. Las técnicas electromagnéticas se pueden utilizar tanto en laboratorio como *in situ*, siendo la obtención de los resultados rápida y sencilla.

Es por ello que en este Trabajo Final de Máster se realiza un estudio que nos permita corroborar ese potencial que presenta la técnica del georradar por medio de la modelización numérica de una serie de casos de estudio.

1.2. Análisis del problema

Actualmente, la normativa vigente habla de la durabilidad especificando diversas estrategias para proteger al hormigón y a las armaduras mediante recubrimientos mínimos, contenidos mínimos de cemento y relaciones agua/cemento, determinadas en función de las condiciones a las que será expuesto el hormigón.

La durabilidad de una estructura de hormigón es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural.

En el capítulo 37.3.3 Impermeabilidad del hormigón de la norma EHE-08, se presenta cómo debe realizarse una comprobación experimental del comportamiento de la estructura porosa del hormigón, respecto a la impermeabilización dependiendo del ambiente en el que va a estar ubicado. Puede realizarse comprobando la impermeabilidad del hormigón al agua, mediante el método de determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión, según la UNE EN 12390-8.

Esta comprobación se deberá realizar cuando las clases generales de exposición sean III o IV, o cuando el ambiente presente cualquier clase específica de exposición. A su vez, nos dice que un hormigón se considera suficientemente impermeable al agua si los resultados del ensayo de penetración de agua cumplen simultáneamente los límites establecidos en la Tabla 1.1

Tabla 1.1 Profundidad máxima del agua según la clase de exposición ambiental especificado en la EHE-08

Clases de exposición ambiental	Especificación para la profundidad máxima	Especificación para la profundidad media
IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F, Qb (en el caso de elementos en masa o armados)	50 mm	30 mm
IIIc, Qc, Qb (solo en el caso de elementos pretensados)	30 mm	20 mm

El método para medir la profundidad de penetración del agua bajo presión en hormigón endurecido consiste en, una vez desmoldada la probeta, se desbasta con un cepillo de púas metálicas la superficie de la cara de la probeta que va a estar

expuesta a la presión del agua. Dichas probetas podrán ser: cúbicas, cilíndricas o prismáticas de longitud de lado, o diámetro, no menor de 150 mm. Se les aplica agua a presión de 500 ± 50 kPa durante 72 ± 2 horas y se van realizando observaciones periódicas del estado de las superficies de la probeta de ensayo no expuestas al agua a presión para observar la posible presencia de agua. En el caso de que se observasen filtraciones, se tendría que reconsiderar la validez de los resultados.

Después de aplicar la presión durante el tiempo especificado, se retira la probeta del dispositivo de ensayo, se limpia para retirar el exceso de agua y se rompe la probeta en dos mitades perpendicularmente a la cara en la que se aplica la presión del agua. Tan pronto como la cara partida se ha secado, de tal forma que se pueda ver claramente la extensión del frente de penetración de agua, se marca en la probeta dicho frente de penetración. Se mide la profundidad máxima de penetración bajo la superficie de ensayo y se redondea al milímetro más próximo. La profundidad media se obtiene del área de la huella de penetración de agua.

Esta forma de obtener la profundidad de avance del frente del agua es un método con un grado de subjetividad y error muy alto. Es por ello que por medio de estudios como el realizado en este Trabajo Final de Máster, se profundiza en el conocimiento de la aplicación de la técnica del georradar por medio de un procedimiento numérico, permitiendo avanzar en el desarrollo de una metodología cuyas principales ventajas son su carácter no destructivo, su rapidez y su mayor objetividad.

1.3. Objetivos del Trabajo Final de Máster

Como consecuencia de lo expuesto hasta ahora, el objetivo principal de este trabajo es realizar una modelización numérica de señales electromagnéticas para el caso de propagación de ondas electromagnéticas en hormigón, cuyo frente de avance del agua sea de diferentes dimensiones y la antena de registro se haya colocado en distintas posiciones respecto al mismo. Esto permitirá una mejor comprensión de la propagación, por el interior del hormigón, de las ondas electromagnéticas generadas con un equipo de georradar comercial y las reflexiones que se produzcan como consecuencia del cambio de las propiedades dieléctricas del hormigón. Los modelos numéricos que se generan se basan en el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) y el software que se ha utilizado para la generación de los modelos es el *gprMax*. La frecuencia de estudio elegida es la de 2 GHz de frecuencia central, ya que esta frecuencia es la de la antena comercial que la empresa GSSI, líder del sector, comercializa para usarla en los estudios del hormigón.

Por todo ello, el objetivo principal de este estudio se concreta a partir de los siguientes objetivos particulares:

- Profundizar en el conocimiento de la técnica no destructiva del georradar, su fundamento teórico y métodos de medición.
- Estudiar la situación actual en la que se encuentra la aplicación de la técnica del georradar al estudio y caracterización de materiales de construcción, en concreto en el hormigón.
- Conocer los métodos matemáticos actuales para generar modelos numéricos realistas de la propagación de ondas electromagnéticas.
- Profundizar en el desarrollo de modelos numéricos de propagación de ondas electromagnéticas por medio de softwares libres, disponibles actualmente en la comunidad científica.
- Mejorar las habilidades de procesamiento de imágenes de georradar y análisis de datos.
- Evaluar el comportamiento del hormigón en el que el frente de avance del agua va variando de tamaño, por medio de una antena comercial de georradar por medio de la modelación numérica a la propagación de ondas electromagnéticas por el interior del hormigón en diferentes escenarios.

1.4. Contenidos del Trabajo Final de Máster

Los contenidos del presente documento se organizan en torno a 8 capítulos y una serie de anexos. En el primer capítulo se introduce el Trabajo Final de Máster, así como sus objetivos y se contextualiza sobre cuál es la situación de la aplicación de la técnica no destructiva del georradar en ingeniería civil, arquitectura y arquitectura técnica. En el segundo capítulo, para una mejor comprensión del trabajo desarrollado, se detalla el fundamento de la técnica del georradar, tanto sus principios teóricos como la composición del equipo y la adquisición de registros.

A continuación, en el tercer capítulo se presenta el análisis del estado del arte de la aplicación de la técnica del georradar en el campo de la ingeniería de edificación y se detalla con especial interés el área de aplicación a la caracterización de materiales de construcción, ya que es el área en la que se encuentra enmarcado este trabajo.

Seguidamente, en el capítulo cuarto se presentan los fundamentos de la propagación de las ondas electromagnéticas y cuáles son sus parámetros característicos, para posteriormente describir cómo se pueden generar modelos numéricos por medio del software libre *gprMax* así como su instalación.

Posteriormente en el capítulo cinco se ha realizado la programación experimental donde se han aplicado los conocimientos explicados en el capítulo anterior. En el capítulo 6 se han estudiado los resultados de la anterior programación, interpretándolos y comparándolos con datos reales. En el capítulo 7 se ha llegado a unas conclusiones finales tras todo el estudio anterior y se han enumerado y propuesto las futuras líneas de investigación.

Finalmente, en el capítulo 8 se han expuesto las referencias bibliográficas que se han necesitado para llevar a cabo todo el estudio.

2. EL GEORRADAR

El radar de penetración terrestre (*Ground-penetrating Radar*, GPR) es una técnica no destructiva basada en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas en el rango de las microondas y es muy utilizada en aplicaciones geofísicas, siendo cada vez más frecuente su aplicación en la inspección y diagnóstico de estructuras de edificación y materiales constructivos. El principio general de la prospección con georradar se basa en la propagación de impulsos electromagnéticos. Una antena situada sobre la superficie de un material transmite una onda que se propaga por el interior de este. Las ondas sufren una reflexión en las interfases donde existe un contraste dieléctrico y estas reflexiones son registradas, procesadas y analizadas con el objeto de caracterizar y/o estudiar el medio por el que se propagan.

El carácter no invasivo de esta técnica hace que sea adecuada para la inspección de edificios. De hecho, en la actualidad, se está comenzando a utilizar para detectar humedades en el subsuelo, determinar profundidades y espesores de zapatas de cimentación, encontrar estructuras o cavidades enterradas en el subsuelo, tales como criptas, enterramientos, etc., como por ejemplo se detalla en García et al. (2007), Ramírez et al. (2008), Pérez et al. (2008).

En este capítulo se describe brevemente los principales conceptos del georradar, definiendo los aspectos fundamentales de las ondas electromagnéticas que emplea esta técnica, el equipo que utiliza y de qué se compone, así como los métodos de adquisición de registros, su interpretación y la resolución de la técnica.

2.1 Fundamentos del georradar

La base teórica del georradar se sustenta en la teoría de campos electromagnéticos y en la óptica geométrica. Las ecuaciones básicas del electromagnetismo fueron formuladas por Maxwell en 1867 relacionando el campo eléctrico y magnético con sus fuentes. A partir de estas ecuaciones se puede determinar el comportamiento de una onda electromagnética durante su propagación por un medio determinado.

La onda electromagnética es la perturbación simultánea de los campos eléctricos (E) y campos magnéticos (B) existentes en una región (Figura 2.1)

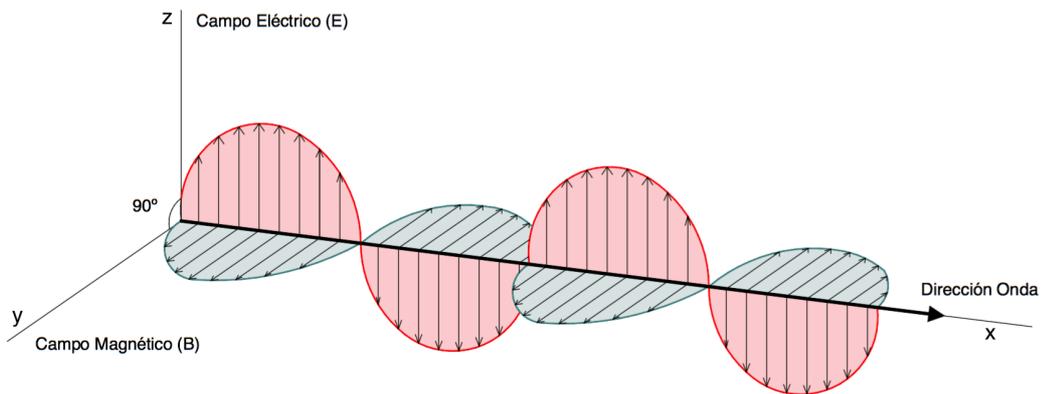


Figura 2.1 Esquema de propagación de las ondas electromagnéticas.

Las ondas radiadas están compuestas por los campos eléctrico y magnético, los cuales forman ángulos rectos entre sí y también ángulos rectos con la dirección de la propagación de la onda. Los parámetros que influyen en la velocidad de la onda son la permitividad dieléctrica relativa del medio, la conductividad, la permeabilidad magnética y la frecuencia de la emisión. Los tres primeros son característicos del medio y más adelante se explicarán en detalle, mientras que el cuarto depende del equipo empleado.

2.2 El equipo de georradar

Un equipo de georradar básico consta de una unidad de control central, una o varias antenas conectadas a ella y un sistema de grabación o de impresión de datos. La unidad de control funciona gracias a un programa informático implementado que controla la emisión, la recepción y el registro de la energía. Opcionalmente, pueden añadirse al equipo básico algunos accesorios tales como: teclados, odómetros o GPS.

Esquemáticamente, las mediciones se efectúan mediante la generación, por la antena emisora, de una onda electromagnética con una frecuencia característica. Esta se va propagando por el medio, hasta que alcanza una zona u objeto cuyas propiedades eléctricas son diferentes respecto a las circundantes o adyacentes, entonces, parte de la energía electromagnética se refleja hacia la superficie, mientras que el resto de energía continúa propagándose (Figura 2.2). La onda electromagnética reflejada se recibe a través de la antena receptora y se registra para su posterior tratamiento e interpretación.

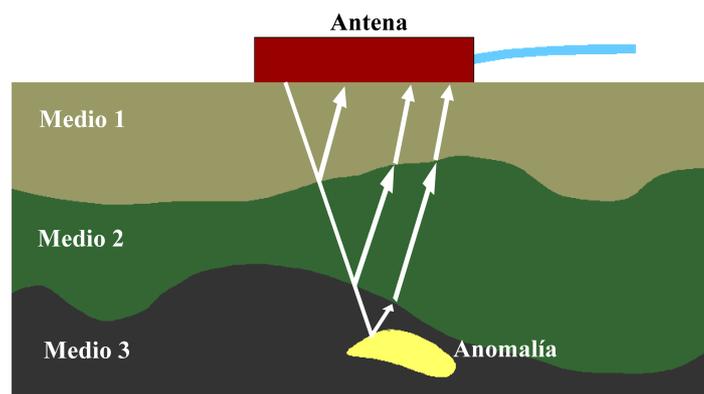


Figura 2.2 Fundamento de la técnica de georradar.

Unidad de Control

Controla los tiempos de envío de señales eléctricas que son convertidas en electromagnéticas por la antena emisora y recibe las señales reflejadas en forma de registros de radargramas: imagen generada por el equipo que contiene todas las reflexiones en un tiempo dado de propagación. Asimismo, realiza la coordinación y control de las antenas, de los diversos accesorios que se pueden añadir al equipo básico y de la señal emitida. También coordina el almacenamiento de la señal en algún tipo de soporte (magnético, fotográfico, en papel) y, en algunos casos, permite realizar el tratamiento básico de las señales durante la adquisición de datos.

La unidad lleva implementado un programa informático que realiza el procesado básico de la señal e incorpora utilidades que permiten actuar sobre la

señal emitida y sobre los registros que se adquieren: filtrados y modificación de la ganancia del registro, entre otros procesados. La unidad de control suele ir conectada a un monitor para visualizar la señal que se está adquiriendo. Se puede seleccionar la forma de visualización del registro en campo, optando por un registro de trazas de amplitud o bien por una serie de escalas de colores o de distintos tonos de grises, donde cada tono engloba un intervalo de amplitudes de la onda registrada y que más adelante se explica en detalle.

Antenas

Las antenas son una parte fundamental del equipo básico ya que son los elementos encargados tanto de emitir el pulso electromagnético al medio como de recibir la energía que regresa a la superficie tras haber sufrido una reflexión.

Las antenas se conectan con la unidad de control mediante un cableado que puede ser metálico u óptico. Este último es el más adecuado para el caso de frecuencias bajas (por debajo de los 100 MHz), ya que los metálicos generan corrientes parásitas que quedan registradas en la señal como ruido electrónico de fondo. Este efecto es más notable cuando se trabaja con bajas frecuencias, necesarias para rangos mayores de tiempo doble de propagación.

Las antenas se utilizan para realizar dos funciones básicas en la prospección con georradar: deben radiar la energía que se les suministra con la direccionalidad y las características adecuadas a la aplicación pensada, y deben recibir la parte de la energía que se refleja en las discontinuidades electromagnéticas del medio y regresa hacia la superficie sobre la que se coloca la antena receptora. Cuando utilizamos las antenas en estudios de prospección es importante que la mayor parte de la energía radiada lo haga en una única dirección. Esto permite mejorar la relación señal/ruido, permitiendo obtener registros nítidos con un rango más elevado (mayor profundidad de estudio). La disminución del ruido se produce porque al emitir la energía únicamente hacia el interior del medio de estudio se evitan las reflexiones en objetos externos. Por este motivo es habitual el empleo de antenas direccionales y apantalladas.

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 la onda en el medio a través de la conocida expresión:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (\text{ec. 2.1})$$

Siendo v la velocidad de propagación de la onda electromagnética en el medio donde se produce la propagación (si la onda se propaga en el aire, esta velocidad puede tomarse como la velocidad de propagación de una onda electromagnética en

el vacío, $c = 30 \text{ cm/ns}$), λ es la longitud onda en dicho medio y f la frecuencia del pulso emitido.

De este modo, las antenas que se utilizan en prospección con radar de subsuelo quedan determinadas totalmente por la frecuencia del pulso que emiten al radiar, ya que la longitud de onda de la energía radiada dependerá de las características del medio por el que se propaga. Se puede definir una antena dando únicamente la frecuencia central a la que está emitiendo y su ancho de banda. Normalmente, en los radares de subsuelo esta banda tiene una anchura frecuencial aproximadamente del mismo orden que su frecuencia central.

Las antenas se pueden clasificar de varias maneras diferentes, la primera de ellas se realiza en función de las características del campo radiado. Se diferencia de este modo entre antenas isotrópicas y antenas direccionales. Las primeras radian la energía en todas las direcciones del espacio por igual y no tienen direcciones privilegiadas. Si se considera que el medio en el que la antena radia la energía es homogéneo e infinito (sin discontinuidades), el frente de ondas que se propaga es esférico. Estas antenas son llamadas ideales, ya que en la práctica es imposible conseguir una perfecta isotropía en la emisión. Las antenas direccionales son aquellas que tienen una dirección privilegiada de radiación y la emisión que produce no es homogénea para todas las direcciones.

Una segunda clasificación de las antenas es en función de la frecuencia central de su emisión. La frecuencia está en función de la velocidad de propagación de la onda y su longitud de onda (ec. 2.1).

Cada tipo de antena se escoge debidamente de acuerdo con las necesidades de su utilización. En la Tabla 2.1 se presenta la división general por bandas de frecuencia según Cardama et al. (1993). Junto a la frecuencia se añade la longitud de onda en el vacío.

Tabla 2.1 División general por bandas de frecuencia

Frecuencia	Longitud de Onda	Denominación
< 3 kHz	> 100 km	Frecuencia extremadamente baja
3-30 kHz	100 - 10 km	Muy baja frecuencia
30-300 kHz	10 - 1 km	Baja frecuencia
0.3-3 MHz	1000 - 100 m	Frecuencia media
3-30 MHz	100 - 10 m	Alta frecuencia
30-300 MHz	10 - 1 m	Muy alta frecuencia
0.3-3 GHz	100 - 10 cm	Ultra alta frecuencia
3-30 GHz	10 - 1 cm	Super-alta frecuencia
30-300 GHz	10 - 1 mm	Extremadamente alta frecuencia

Accesorios y equipos complementarios

A estos elementos básicos del equipo se les pueden añadir algunos accesorios que simplifican el trabajo y que permiten mayor precisión en la interpretación final de los datos. Estos equipos no se conectan a la unidad central, pero son útiles tanto durante los trabajos de campo como durante el procesado posterior de los registros.

Estos equipos con los que puede complementarse el equipo básico son diversos, pudiendo separarse en dos grupos:

- **Los complementos para la visualización y almacenamiento de los registros:** las impresoras, las pantallas de visualización, los programas informáticos y las unidades de registro de datos en soporte magnético (cinta o disco) u óptico.
- **Los accesorios para situar los perfiles.** Por una parte, están los marcadores, que permiten introducir una marca en el registro cada vez que se presiona un pulsador. Esto permite introducir marcas para indicar el inicio y el final del perfil y para advertir sobre algún elemento especial dentro del perfil. Por otra parte, están los odómetros. En ocasiones están implementados en un soporte con ruedas sobre el que se sitúa la antena. Este sistema permite determinar la posición de los distintos puntos del perfil con mayor precisión que en el caso de los marcadores. Los equipos de georradar de última generación llevan integrados sistemas GPS para la determinación de las coordenadas de los perfiles.

2.3 Métodos de adquisición de registro

Existen diferentes métodos para la adquisición de datos sobre la superficie de un medio. Pueden ser mediante perfiles o puntuales y se ha de seleccionar en función del problema que se debe estudiar y los resultados que se desean obtener (Figura 2.3).

Para la obtención de un perfil, se realiza un barrido sistemático de la superficie a lo largo de una línea, con una antena (monoestática) o dos antenas (biestáticas) sin variar la separación entre ellas, a lo largo de una línea. Durante el desplazamiento se emiten gran cantidad de pulsos por segundo (entre 1 y 100 pulsos), obteniendo así el perfil, que se puede considerar continuo por la cantidad de trazas que se obtienen. Es conveniente utilizar un odómetro en la adquisición de datos.

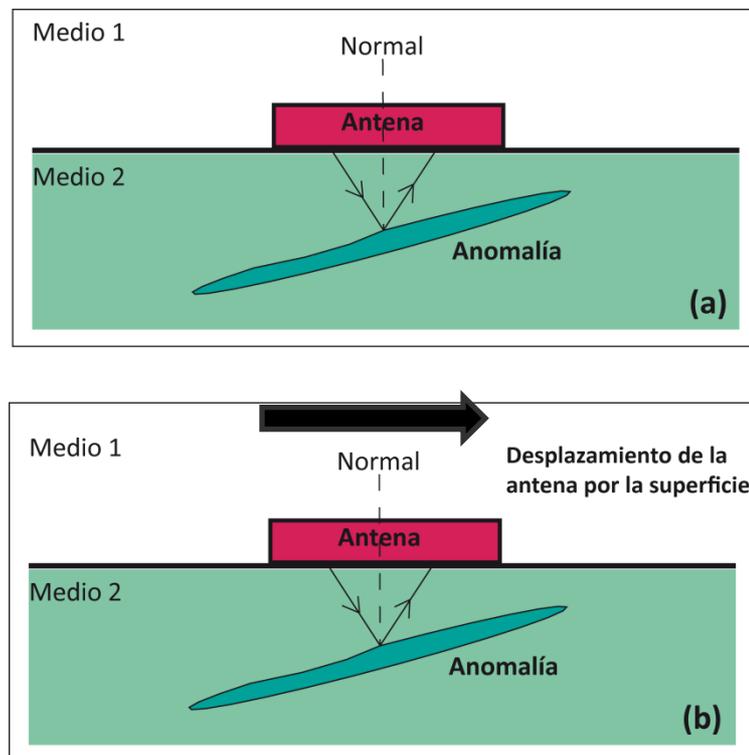


Figura 2.3 Adquisición puntual (a) y de perfiles (b).

La adquisición de datos de forma puntual se realiza situando la antena (monoestática) o dos antenas (biestáticas) sin variar la separación entre ellas, en un punto dado del área de estudio. En este punto, se realiza la emisión de energía y la adquisición de datos sin realizar ningún desplazamiento. Obteniendo así la información del interior del medio situado en la vertical del punto donde se ubica la antena. En el caso de dos antenas biestáticas la información que se recibe es la correspondiente a la reflexión que se produce en la zona central entre ambas. Esta

forma de adquisición de datos se suele realizar cuando el medio impida el desplazamiento de las antenas.

Con las antenas monoestáticas pueden efectuarse tres tipos de adquisición de datos, dos de ellas sobre superficies y la tercera en pozos de sondeo. Con las antenas biestáticas, además de los métodos anteriores, pueden aplicarse técnicas de *Common Mid Point* (CMP), la transiluminación, la tomografía, la reflexión y refracción de gran ángulo (WARR) y los sondeos, que consisten en aprovechar la colocación de la antena en diferentes posiciones para obtener diferentes trayectorias de rayos, con el objeto de mejorar la identificación de los parámetros de propagación de las ondas en el medio de estudio.

Por ejemplo, el *Common Mid Point* se realiza con antenas biestáticas desplazando la emisora y la receptora en direcciones opuestas, respecto a un punto central entre ambas. Las dos antenas deben quedar siempre equidistantes a dicho punto central, y al realizarse la adquisición de datos se obtiene un registro que, representado en una gráfica distancia-tiempo, tiene la forma de una hipérbola si únicamente tenemos un reflector bajo las antenas (Figura 2.4). Los registros que resultan contienen información de diferentes ondas electromagnéticas, de manera que se puede analizar la onda directa que se ha propagado por el aire, la onda que se propaga por el primer medio y las diferentes reflexiones que quedan registradas con forma de hipérbolas.

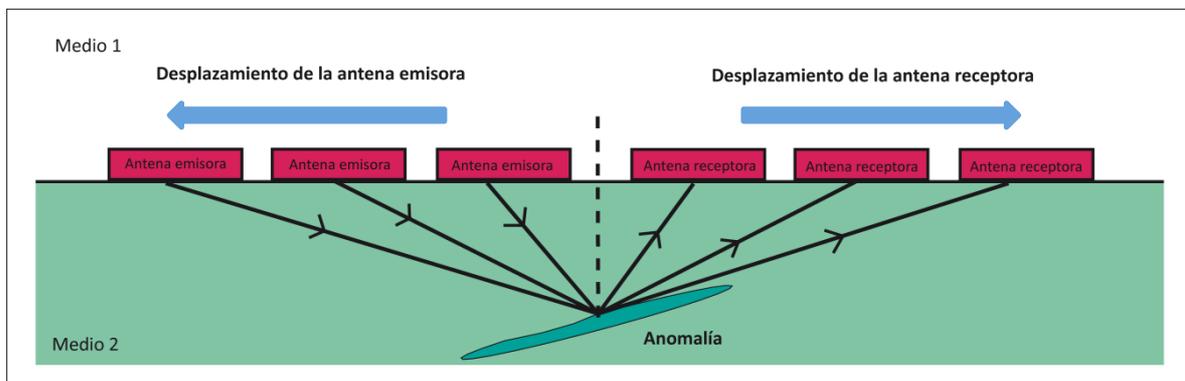


Figura 2.4 Esquema de adquisición de datos mediante Common Mid Point.

2.4 Interpretación de registros

El registro que proporciona el georradar se denomina comúnmente radargrama. En ocasiones es posible dar una interpretación directa de estos. Sin embargo, antes de llegar a una conclusión final, en muchas ocasiones, se requiere un largo proceso de interpretación. Para ello es necesario conocer los principales parámetros de un registro (radargrama) y calcular los parámetros que son necesarios para efectuar una correcta interpretación de los registros.

2.4.1. Parámetros de un registro

Los parámetros que definen al radargrama se recogen en la cabecera del archivo de registro (Figura 2.5). Todos los registros contienen una cabecera de texto con información sobre cómo se realiza la adquisición. Esta información incluye entre otras informaciones el nombre del fichero, la fecha de registro y las fechas de posteriores modificaciones, el rango, la posición del inicio, el número de pulsos emitidos por segundo durante la adquisición de datos, el factor de superposición de trazas, la función de ganancia y los filtros que se han aplicado sobre el radargrama durante la adquisición o en posteriores tratamientos.

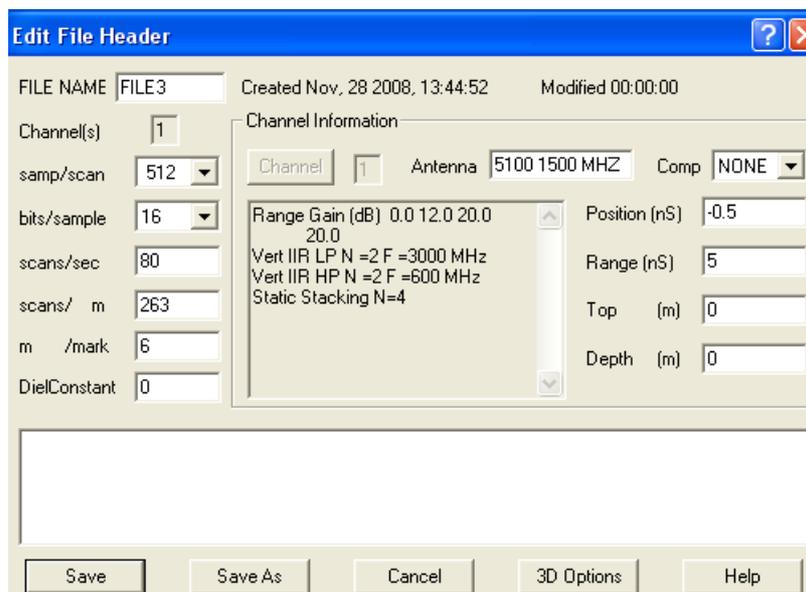


Figura 2.5 Cabecera de un registro obtenido con el georradar, con los principales parámetros del registro: modelo de la antena (5100), frecuencia central de emisión según GSSI (1500 MHz), rango del registro (Range R = 5 ns), posición de inicio de la señal (Position P =-0,5 ns), puntos por traza (sample/scan = 512)

Rango de un registro

El rango de un registro (R) define su longitud temporal, es decir, la máxima coordenada vertical que se alcanza en el radargrama (Figura 2.6). Las reflexiones alcanzadas por la antena en tiempos dobles de propagación superiores al rango no quedan registradas. El tiempo límite de la ventana se selecciona de tal forma que el registro de la anomalía que se busca quede incluido. Conviene, sin embargo, que este parámetro sea lo suficientemente grande para que una velocidad más baja de la esperada para el medio no impida detectar los elementos anómalos que se desean localizar. El ajuste de R requiere, por lo tanto, un conocimiento preliminar acerca de la posible profundidad máxima de estudio y acerca de la velocidad aproximada a la que se propaga la onda electromagnética por el medio.

Posición de la señal

Este parámetro (P) permite seleccionar el tiempo de inicio de la ventana temporal. El tiempo final de la mencionada ventana viene determinado por la suma del tiempo de inicio y del rango del registro. Se trata de un parámetro que debe ajustarse antes de empezar la adquisición de datos. Conviene hacerlo situando la antena sobre el medio para asegurar que la primera reflexión recibida queda dentro de la ventana temporal. Esta primera señal suele ser la onda directa entre el emisor y el receptor o la superposición entre la onda directa y la reflexión en la superficie del medio. La posición de esta ventana puede modificarse variando la posición de inicio del registro.

Puntos por traza

Este parámetro determina el muestreo de cada traza (señal recibida), es decir, los puntos utilizados para su representación y cuyo término en inglés es *sample/scan*. Es posible seleccionar cualquier muestreo, pero usualmente se utilizan los valores de 128, 256, 512, 1024 o 2048 puntos por traza. Si se considera un muestreo de 512 puntos por traza (el valor más utilizado), y se tiene un rango de 256 ns, quiere decir que, para reconstruir la traza, se tienen dos puntos por cada ns de tiempo doble de propagación. Normalmente, para obtener una buena representación de la traza, cuanto mayor sea la ventana temporal de registro (R), más elevado tiene que ser el número de puntos de muestreo. Aunque siempre debe considerarse la resolución que se desea obtener y el tamaño de los registros que se graban. Además, conviene asegurar que el muestreo permite detectar aquellos eventos de interés, registrando los puntos necesarios para poder dibujar correctamente la traza.

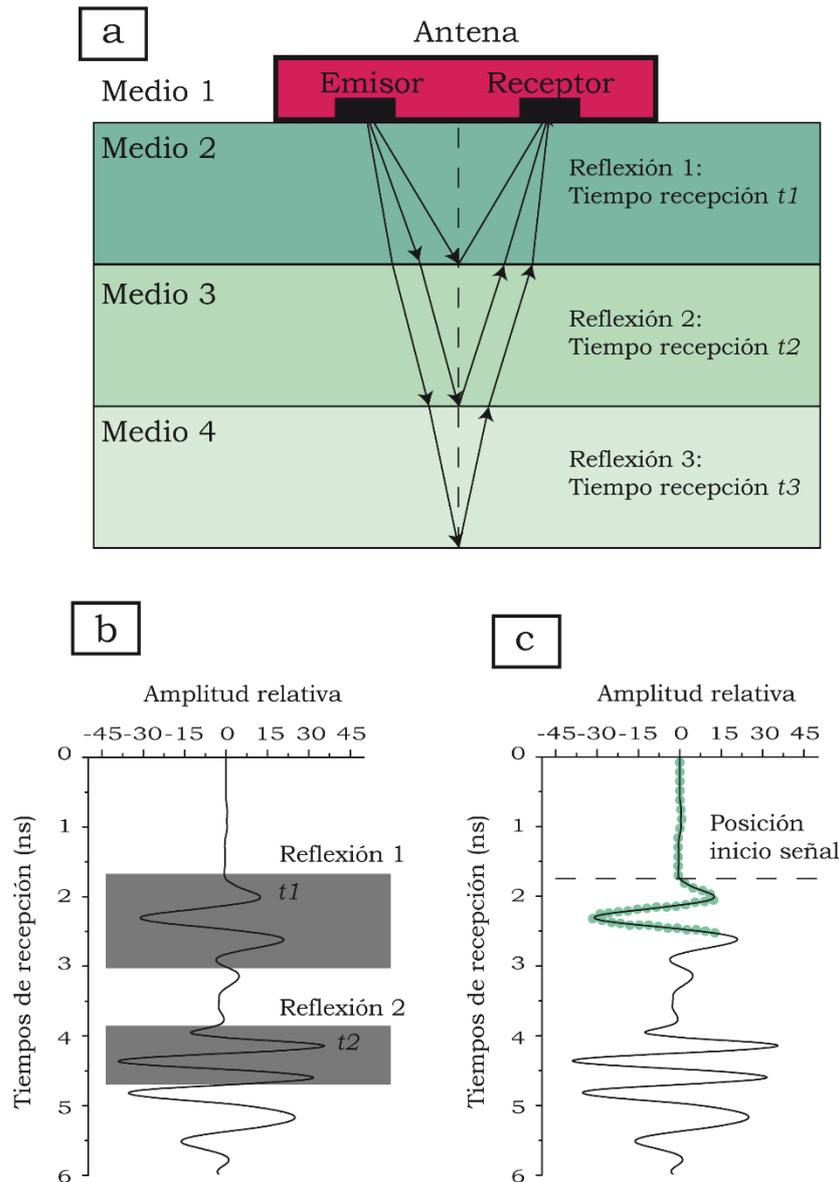


Figura 2.6 Ejemplo de trayectoria de propagación de las ondas (a), traza registrada para un rango de 6 ns (b), posición de la señal a 1,75 ns y puntos por traza que componen la traza (c).

Superposición de trazas

Durante o posteriormente a la adquisición de datos se puede realizar una suma (o superposición) de trazas adyacentes. El número de trazas superpuestas es un parámetro a determinar en función del estudio. La superposición de varias trazas hace que los efectos debidos a fenómenos aleatorios se reduzcan, mientras que los efectos ocasionados por fenómenos deterministas (eventos observados en varias trazas adyacentes para un mismo tiempo de propagación) quedan realzados y, por lo tanto, definidos con mayor claridad en el radargrama. Una superposición de trazas excesiva, sobre todo en una zona donde se producen eventos

hiperbólicos puede disminuir sus amplitudes hasta un nivel en que no se puedan distinguir, obteniendo un radargrama característico de un medio continuo y por lo tanto dando lugar a interpretaciones erróneas

Ganancia

La ganancia (*Range gain*) consiste en amplificar la señal que se recibe. Este procesado puede realizarse durante la adquisición de datos o durante el procesado posterior. El objetivo que se busca al aplicarla es el de disminuir los efectos de atenuación que se producen. Para ello, se aumenta la amplitud de las reflexiones procedentes de tiempos de propagación mayores. Cuando se aplican ganancias, hay que tener en cuenta que se amplifica toda la señal recibida, aunque se trate de ruido.

Una ganancia excesiva, para tiempos de propagación grandes en los que la señal tiene una amplitud similar a la del ruido, puede amplificar el ruido electrónico del aparato y del cableado o emisiones de las mismas frecuencias que se estén registrando, dando lugar a registros confusos. En general, cuando se efectúa la adquisición de datos, la ganancia se selecciona mediante el modo automático o bien se escoge la amplificación más conveniente observando una traza visualizada en el monitor del georradar. Al analizar los registros que se han obtenido aplicando algún tipo de ganancia, hay que tener en cuenta que las amplitudes quedan modificadas.

2.5 Registros de amplitudes

Un radargrama está formado por un elevado número de trazas de amplitud. En el eje horizontal se representan distancias sobre la superficie del medio por el que se desliza la antena y en el eje vertical quedan representados los tiempos dobles de propagación de las ondas reflejadas en las anomalías internas a dicho medio. El número de trazas de un radargrama depende de la longitud del registro, de la velocidad a la que se haya deslizado la antena a lo largo del perfil, del número de pulsos por segundo emitidos por la antena, del muestreo seleccionado y de la velocidad de registro del georradar.

Cada una de las trazas que forman parte del radargrama es un registro de amplitudes debidas a las reflexiones producidas en el interior del medio (Figura 2.7). El conjunto de trazas permite el seguimiento de estas amplitudes a lo largo del desplazamiento, representando a los reflectores que las han producido.

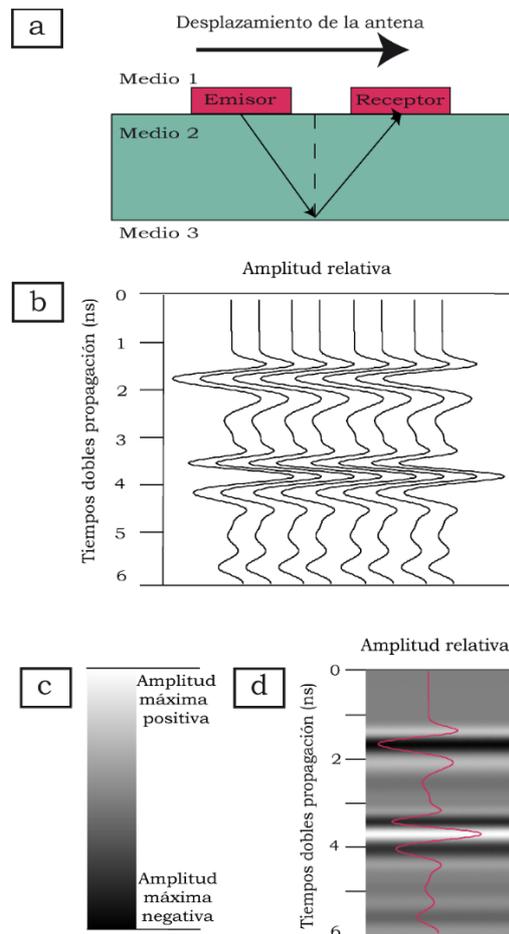


Figura 2.7 Descripción de un radargrama: (a) Trayectoria de propagación de las ondas, (b) trazas que componen un radargrama, (c) escala de color para la representación de amplitudes y (d) trazas que componen el radargrama por medio de escala de color.

Los incrementos de amplitud que se producen en las trazas son debidos al aporte de energía proveniente de las reflexiones ocasionadas durante la propagación de la señal por el medio. Los registros son, por lo tanto, de amplitudes y de tiempos de propagación.

La representación de las trazas registradas se puede presentar como un registro de amplitudes, similar a los registros de sísmica de reflexión o mediante una representación con escala de colores. Con este tipo de representación se consiguen efectos visuales que pueden clarificar los resultados. Para poder realizarla se selecciona una escala que relaciona intervalos de amplitudes con una escala de colores que pueden seleccionarse.

2.6 Resolución

Se define como resolución la capacidad de las antenas de georradar para distinguir elementos diferentes en el medio, ya sea en profundidad (resolución vertical) o elementos cercanos en un mismo plano paralelo a la superficie (resolución horizontal).

Resolución vertical

Una de las principales características de los datos registrados con georradar es la resolución, que esta está principalmente relacionada con las características de la antena y las propiedades electromagnéticas del medio. En definitiva, la resolución establece la capacidad del georradar para distinguir señales de reflectores por separado. De hecho, conocer la resolución vertical es un factor clave cuando se registran señales con el georradar, ya que se define como la capacidad del georradar para detectar, como anomalías individuales, dos objetos separados a lo largo del eje vertical, es decir, en el tiempo.

Según Perez-Gracia et al. (2009) la resolución vertical (Rv_1) normalmente se calcula como:

$$Rv_1 = \frac{\lambda}{4} \quad (\text{ec. 2.2})$$

donde λ es la longitud de onda en el medio a estudio. A esta forma de calcular la resolución le denominaremos de ahora en adelante criterio 1.

No obstante, se debe tener en cuenta que la longitud de onda variará dependiendo de la frecuencia de emisión de las ondas (f) y de la velocidad de propagación (v) siguiendo la ecuación 2.1.

Asimismo, la velocidad de propagación dependerá de las propiedades dieléctricas del medio, que para el caso de un medio de bajas pérdidas, como es el caso del hormigón se considera que dependerá fundamentalmente de la permitividad dieléctrica relativa del material (ϵ) de acuerdo a:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (\text{ec. 2.3})$$

donde c es la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío ($c = 30 \text{ cm/ns}$).

Pero, además, según indica Perez-Gracia et al. (2009) en las mediciones de campo, es habitual considerar que la resolución vertical se puede calcular por medio de lo que denominamos a partir de ahora criterio 2:

$$Rv^2 = \frac{\lambda}{2} \quad (\text{ec. 2.4})$$

Resolución horizontal

Se define como resolución horizontal la capacidad del georradar para diferenciar dos elementos adyacentes en la dirección de desplazamiento de la antena. Esta resolución dependerá de una serie de factores como son la velocidad de desplazamiento de la antena sobre la superficie, el número de pulsos que se emiten por unidad de longitud, la geometría del haz emitido, la sección eficaz del reflector y de la profundidad a la que se localiza.

El georradar emite impulsos cortos con una frecuencia fija. Estos impulsos se agrupan en ondas de barrido dando lugar a un número de trazas registradas por segundo. En función de la velocidad de la antena, el número de trazas por metro (densidad) será mayor o menor.

Para detectar un reflector se necesita un número de trazas que si es muy elevado (baja velocidad de desplazamiento de la antena) puede producir registros en los que los reflectores se alargan excesivamente, pudiendo llegar a dificultar la interpretación de los mismos. La velocidad de la antena y el número de trazas por segundo son dos factores que se pueden controlar, mientras que los otros factores nombrados anteriormente no.

2.7 Parámetros necesarios para la interpretación de radargramas.

Para hallar la equivalencia entre el tiempo doble de propagación (medidos en los radargramas) y la profundidad de un evento o de penetración (h) es fundamental conocer la permitividad dieléctrica relativa del material o la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. De esta forma, se puede localizar la profundidad a la que se produce una reflexión como consecuencia de un contraste de propiedades dieléctricas por medio de la siguiente ecuación:

$$h = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon}} \Delta t \quad (\text{ec. 2.5})$$

donde h es la distancia al reflector o espesor del medio que se desea obtener (profundidad), v la velocidad a la que se propaga la onda, c la velocidad de propagación en el vacío/aire (30 cm/ns) y ε la permitividad dieléctrica relativa del material y Δt es la diferencia de tiempo registrada en el radargrama entre la onda directa entre el emisor y receptor (t_1) y la reflejada (t_2) en el reflector o la base del medio estudiado.

3. APLICACIÓN DEL GEORRADAR EN EDIFICACIÓN

Recientemente se ha publicado un artículo muy interesante (Lai et al., 2017) en el que se revisa la evolución de la aplicación del georradar en el campo de la ingeniería de edificación y la construcción.

Estos autores clasifican los principales campos de aplicación del georradar en edificación en 4 grandes grupos: estudios en edificios de patrimonio histórico y cultural, estudios en edificios modernos de hormigón, estudio de cimentaciones y diagnóstico por cambios mecánicos.

No obstante, las tutoras de este Trabajo Final de Máster y su equipo de trabajo llevan tiempo investigando sobre la aplicación de la técnica del georradar para caracterizar materiales de construcción con resultados muy exitosos y siendo un área en continua expansión. Es por ello, que además de los campos anteriormente expuestos por (Lai et al., 2017), se considera necesario estudiar un quinto campo de aplicación que es la caracterización de materiales.

La popularidad del *GPR (Ground-penetration Radar)* se debe a que la variabilidad interna de una estructura se puede discernir de manera eficiente con la adquisición rápida de datos y la retroalimentación inmediata en el mismo lugar donde se realiza el reconocimiento. La resolución de la imagen puede estar en la escala de centímetros dependiendo del ancho de frecuencia del sistema georradar. Esta escala de resolución es adecuada a la escala de mapeo necesaria en la evaluación de infraestructuras. No cabe duda de que las aplicaciones del georradar están progresando desde la localización tradicional, las pruebas y la evaluación de objetos en pequeña escala hasta las imágenes y el diagnóstico en la actualidad.

Durante las últimas décadas, el georradar ha sido ampliamente estudiado y mejorado para ser aplicado en el ámbito de la geofísica y en los últimos años también en el campo de la ingeniería de la construcción.

Hay tres áreas principales de enfoque de aplicación de la técnica del georradar:

- El primero es ubicar objetos y estructuras invisibles por el bien de la conservación del patrimonio y la verificación del cumplimiento de la construcción.
- El segundo es el mapeo del deterioro que sirve como una herramienta de toma de decisiones para el mantenimiento preventivo.
- El tercero es la evaluación del daño estructural después de desastres naturales como inundaciones, terremotos y deslizamientos de tierra.

El georradar es mínimamente intrusivo y se puede utilizar sin mayor impacto en los ocupantes de los edificios. El mantenimiento y la reparación de los edificios son costosos y, en muchos casos, los propietarios tienden a actuar solo cuando el daño o la falla se vuelven visibles. Identificar los problemas al principio usando métodos no destructivos y enfocados en áreas de preocupación menor, a largo plazo, es un mejor planteamiento.

Existe una guía completa de la inspección de edificios de técnicas no destructivas en (Binda et al. 2000 y McCann y Forde 2001), que incluyen impacto-eco, emisión acústica, ultrasonidos, análisis de frecuencia natural y modal, resistividad, termografía infrarroja y georradar. Este último es uno de los métodos más populares debido a su alta resolución, efectividad y disponibilidad de imágenes en tiempo real.

Para más información sobre lo expuesto, en el Anexo 7 se ha incluido la Tabla original que presentan (Lai et al., 2017), sobre ejemplos de aplicación del georradar en edificación indicando el objeto del estudio y los principales resultados obtenidos.

3.1 Principales campos de aplicación del georradar en edificación

Como se ha comentado anteriormente los principales campos de aplicación del georradar en edificación son: estudios en edificios de patrimonio histórico y cultural, estudios en edificios modernos de hormigón, estudio de cimentaciones y diagnóstico por cambios mecánicos.

Estudios en edificios de patrimonio histórico y cultural

El georradar se utiliza con mucha frecuencia para evaluar los estados de los edificios del patrimonio cultural principalmente en Europa, ejemplos representativos se encuentran en (Ranalli et al. 2004, Leucci et al. 2007,2012, Gonzalez-Drigo et al. 2008, Hemeda 2012, Perez-Gracia et al. 2013, Masini et al. 2010, Kanli et al. 2015), donde se inspeccionan estructuras patrimoniales inestimables como las preciosas basílicas y catedrales, fábricas del siglo XIX, palacios, casas medievales altamente modificadas, etc. En los casos de rehabilitación en edificios patrimoniales, los elementos estructurales relativamente modernos se construyen sobre antiguos edificios de mampostería. El georradar es extremadamente útil para ayudar a estudiar la interfaz entre las partes antigua y moderna de las estructuras construidas en diferentes períodos de tiempo. Además, el georradar puede ser de gran ayuda para identificar construcciones más antiguas incrustadas en las paredes o enterradas debajo de las estructuras de los edificios. También se ha utilizado para evaluar la eficacia del enlchado de cemento en edificios históricos, así como para controlar el relleno de grietas y huecos.

Estudios en edificios modernos y de hormigón

Muchos edificios modernos están hechos de hormigón armado. En ese caso, la mayoría de los usos del georradar están relacionados con la detección y el mapeo de las barras de refuerzo. Las aplicaciones en edificios modernos (losas, vigas de paredes y sótanos) no son diferentes de las estructuras de hormigón en puentes y carreteras. El análisis se suele enfocar en varias direcciones:

- Existencia de objetos como barras de acero, tuberías y soportes estructurales y variación de materiales de construcción;
- Geometría del objeto, como el radio de las barras de acero incrustadas en el hormigón;
- Humedad, vacío y defectos del hormigón.
- Grietas y detección de vacío en el hormigón.

En América del Norte, el uso del georradar se ha centrado principalmente en la optimización del corte de hormigón. Ya que existe una renovación continua y readaptación de edificios de gran altura. Principalmente los construidos de hormigón armado y que contienen cables de post tensión ya que pueden degradarse si los elementos de refuerzo y tensión se dañan.

La utilización generalizada del georradar minimiza el daño en estos elementos estructurales. Las guías de mejores prácticas de la aplicación del georradar son promulgadas por la *Concrete Sawing and Drilling Association (CSDA)*.

En las ciudades compactas de Asia, donde la mayoría de la gente vive en viejos rascacielos, se requieren inspecciones regulares, especialmente de una manera no destructiva. Esto hace que el *GPR* sea una técnica de análisis idónea para estos edificios. En Hong Kong existe el *MBIS (the mandatory building inspection scheme)* que exige la realización de una inspección cada diez años de cada edificio. Utilizando la técnica de georradar como una de las técnicas enumeradas en *HOKLAS's Supplementary Criteria no. 19* donde se regula una serie de requisitos, como la cualificación de las personas, para llevar a cabo la inspección del georradar en edificios de hormigón. HKCI: TM 2009 que informa de los procedimientos de cómo se deben realizar en los edificios.

Estudio de cimentaciones

Además de los estudios descritos anteriormente sobre estructuras, también hay una gran cantidad de estudios realizados con georradar sobre la subestructura en la interacción entre el suelo y los cimientos de los edificios. Algunos ejemplos son los estudios realizados para:

- La detección de estructuras geológicas bajo los edificios,
- La ubicación de las estructuras hechas por el hombre que afectan a la seguridad estructural especialmente en un sótano y la base de la pared de catedrales y museos.
- Identificación de áreas de suelo húmedo que podrían causar asentamientos.

Kannan (1999) propone hacer uso del georradar en la investigación del terreno durante la etapa del proyecto de construcción, con el fin de identificar las áreas problemáticas y facilitar el cálculo estructural. El número de tales aplicaciones todavía es escaso debido a la dificultad de acceso con la antena. La mayoría de las aplicaciones han sido para túneles y evaluaciones geológicas.

Diagnóstico por cambios mecánicos

Los desastres naturales como los terremotos y los deslizamientos de tierra dañan los edificios. Después de estos desastres, se ha mostrado que el georradar es una herramienta útil, como parte de la solución, para apoyar el diagnóstico en la rehabilitación y buscar las posibles causas del daño visible. Sin embargo, dicho uso es aún muy limitado. Los trabajos de adaptación basados en el diagnóstico de técnicas no destructivas raramente se llevan a cabo y la mayoría de estas estructuras suelen acabar demolidas o reparadas sin la realización de estas técnicas, incluso en áreas de terremotos activos como California, Nueva Zelanda y Japón.

3.2 Caracterización de materiales de construcción por medio de georradar

En los últimos años hay numerosos estudios realizados con georradar que nos muestran la importancia de su uso en la aplicación de materiales de construcción (hormigón, obra de fábrica, etc.); en la inspección, diagnosis y estudio de las manifestaciones patológicas de los mismos. Existen también un gran número de estudios cuyo objeto es analizar la variación del contenido de humedad de diferentes medios como suelos (Laurens et al., 2005), de materiales como el hormigón (Huisman et al., 2003) y (Zagoskin et al., 2006) y de muros de obra de fábrica (Maierhofer et al., 1998b). Incluso algunos autores como Sabartaï et al. (2006a-2006b), Klysz y Balayssac (2007) y Viriyametanont et al. (2008) han desarrollado algunos protocolos para el estudio de la variación del contenido de humedad en muestras de hormigón a lo largo de su proceso de curado.

Teniendo en cuenta las diferentes investigaciones del equipo de investigación de las tutoras con las que realizo este Trabajo Final de Master hemos creído interesante resumir los trabajos que han servido como fundamento para la realización del presente trabajo desarrollados sobre la aplicación del georradar en la caracterización del hormigón y de la presencia de agua en el mismo.

Effect of penetration of water under pressure in hardened concrete on GPR signals (Martínez-Sala et al. 2013)

Este artículo describe los experimentos de laboratorio llevados a cabo para analizar el efecto sobre las señales de georradar de la penetración del agua a presión en muestras de hormigón endurecido de diferente relación Agua/Cemento. La investigación se realizó midiendo las velocidades y las amplitudes de las señales, registradas cuando las muestras de hormigón se saturaron por primera vez, luego se secaron parcialmente y finalmente se inyectaron con agua a presión.

Las mediciones se basaron en el acoplamiento de antenas de 1,6 GHz y 2,6 GHz en las superficies de las probetas de hormigón. Los resultados mostraron que todos los parámetros de onda estudiados se vieron influenciados por la presencia de agua en las muestras y se observó un comportamiento de patrón similar independientemente de la relación A/C.

Esta fuerte relación entre los parámetros de onda y la huella del agua se observó por medio del análisis de mapas de contorno, ya que la distribución espacial de los parámetros de onda estudiados reprodujo la forma del agua inyectada en las muestras. Es interesante señalar que, al medir con ambas antenas después de que las probetas fueron inyectadas con agua a presión, se observó que el nivel de energía de la onda directa podría ser un parámetro muy adecuado para estudiar la profundidad del frente de agua.

Water penetrability in hardened concrete by GPR (Rodríguez et al., 2014)

Este artículo describe los experimentos de laboratorio llevados a cabo para analizar la penetrabilidad del agua en el hormigón endurecido por medio del georradar. Para este propósito se fabricaron muestras de hormigón ($A/C = 0,8$) y tras permanecer 28 días en una cámara húmeda, se secaron en un horno ($105\text{ }^{\circ}\text{C}$).

A continuación, se introdujeron parcialmente en agua y en todas las caras se aplicó pintura de sellado, excepto la que estaba en contacto con el agua. Las mediciones del georradar se adquirieron en diferentes intervalos de tiempo y se realizaron colocando la antena de 2,0 GHz (GSSI) en la superficie opuesta a la sumergida en el agua.

En primer lugar, el estudio se realizó midiendo los retrasos entre las llegadas de onda directa y la reflejada, antes de introducir las muestras en el agua (sesión de calibración). En segundo lugar, las mediciones del georradar se registraron en diferentes intervalos de tiempo. Todos los parámetros de onda estudiados estuvieron influenciados por la presencia de agua y se demostró la sensibilidad de la técnica para evaluar la variación de la profundidad del agua.

Además, se desarrolló un procesamiento específico de los datos adquiridos cuando la antena se colocaba en la superficie de contacto con el agua. Este proceso consistió en el aislamiento de la reflexión debida al frente húmedo, producido justo antes de la reflexión en la cara opuesta de las muestras y como resultado se pudo obtener el tamaño del frente del agua (milímetros) a partir de mediciones de georradar.

Waterfront depth analysis in hardened concrete by means of the nondestructive ground penetrating radar (Rodríguez et al., 2016a)

La durabilidad de las estructuras de hormigón depende principalmente de la facilidad con la que el agua y cualquier agente químico agresivo disuelto en ellas pueda penetrar. Por lo tanto, la medición de la capacidad de penetración del agua en estructuras de hormigón es crucial sobre todo cuando las estructuras están en servicio. En este contexto, las técnicas no destructivas juegan un papel importante. En particular, las ondas electromagnéticas emitidas por el georradar son muy sensibles al contenido de agua del medio a través del cual se propagan. Este hecho proporciona una oportunidad interesante para analizar si la técnica del georradar permite la evaluación de la penetrabilidad del agua en el hormigón con suficiente precisión. De acuerdo con esto, este artículo describe los experimentos de laboratorio y el análisis llevado a cabo para estudiar la capacidad del georradar para evaluar la penetrabilidad del agua en el hormigón endurecido.

Para este propósito, se fabricaron muestras de hormigón que fueron secadas en un horno después de 90 días de curado. Luego se sumergieron parcialmente en agua y se tomaron mediciones del georradar a diferentes intervalos, basadas en el acoplamiento de una antena de 2,0 GHz. Los resultados mostraron que la concordancia entre los incrementos de velocidad y el avance del frente al agua fue excelente. Además, se desarrolló un procesamiento específico de los datos adquiridos. Este proceso incluyó el aislamiento del reflejo debido al frente de agua, producido justo antes del reflejo en la cara opuesta de las muestras. Como resultado de este procesamiento, se determinó la profundidad del frente del agua en diferentes momentos con alta resolución.

Application of ground-penetrating radar technique to evaluate the waterfront location in hardened concrete (Rodríguez-Abad et al., 2016b)

El rendimiento a largo plazo de las estructuras de hormigón está directamente relacionado con dos factores: durabilidad y resistencia del hormigón. Al evaluar la durabilidad de las estructuras de hormigón, el estudio de la penetración del agua es primordial, porque casi todas las reacciones como la corrosión, el álcali-sílice, el sulfato, etc., que producen su deterioro, requieren la presencia de agua. El georradar ha demostrado ser muy sensible a las variaciones de agua. Sobre esta base, el objetivo de este estudio experimental fue, en primer lugar, analizar la correlación entre la profundidad de penetración del agua en muestras de hormigón y los parámetros de la onda. Para hacer esto, las muestras se sumergieron en agua para diferentes intervalos de tiempo y los parámetros de onda se obtuvieron de las señales registradas cuando la antena se colocó en la superficie sumergida de las muestras.

En segundo lugar, se ha desarrollado un procedimiento para poder determinar, a partir de esas señales, la fiabilidad en la detección y ubicación de las profundidades del frente del agua. Los resultados revelaron que el georradar puede tener un enorme potencial en este campo, porque se encontraron excelentes acuerdos entre las variables correlacionadas. Además, al comparar las profundidades del frente de agua calculadas a partir de las mediciones del georradar y las registradas visualmente después de romper las muestras, se observó que estaban totalmente de acuerdo cuando el frente del agua tenía más de 4 cm de profundidad.

4. MODELADO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

En el presente capítulo se describen los conceptos necesarios para entender la propagación de las ondas electromagnéticas y sus condicionantes, para con ello poder posteriormente generar los modelos numéricos de las mismas. Es por ello que en este capítulo también se explicará el software empleado, así como las herramientas necesarias para crear los códigos que producirán modelos numéricos de propagación de ondas electromagnéticas en diferentes escenarios.

4.1 Ecuación de onda electromagnética

La teoría de Maxwell propone que luz, magnetismo y electricidad son parte de un mismo campo, llamado electromagnético, se dio cuenta de que los campos magnéticos podían ser producidos por campos eléctricos variables y no solo por corrientes eléctricas. Las ondas electromagnéticas son generadas por cargas eléctricas oscilantes. La onda electromagnética es la perturbación simultánea de los campos eléctricos (E) y campos magnéticos (B) existentes en una región dando lugar a una onda radiada que forman ángulos rectos entre sí y también ángulos rectos con la dirección en la que se propagan.

A partir de las ecuaciones de Maxwell se deduce que tanto el campo eléctrico como el magnético siguen la ecuación de una onda sinusoidal. La ecuación que describe a una onda electromagnética plana sinusoidal que se propaga a lo largo del eje X en un tiempo dado es:

$$y = A \operatorname{sen}[kx - \omega t] \quad (\text{ec. 4.1})$$

donde A es la amplitud de la onda (valor que toma sobre el eje X), k es el número de onda angular y ω la frecuencia angular, que se definen a partir de las siguientes ecuaciones:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{ec. 4.2})$$

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{ec. 4.3})$$

donde λ es la longitud de onda, definida como la distancia que recorre una perturbación en un tiempo determinado llamado periodo y f es la frecuencia de la onda, entendida como la magnitud que mide el número de repeticiones en el tiempo de un suceso periódico. Además, la velocidad a la que se propaga la onda (v) dependerá de estos dos parámetros que se relacionan por medio de la siguiente ecuación:

$$v = \lambda \cdot f \quad (\text{ec. 4.4})$$

En nuestro caso de estudio las ondas que se generan y registran por medio de un equipo de georradar no son monofrecuenciales, sino que se trata de señales complejas compuestas por la superposición de varias ondas cada una de ellas de frecuencias diferentes y es por ello que la ecuación de las ondas electromagnéticas, en este caso, son ecuaciones multifrecuencia.

Sin embargo, estas ondas complejas se pueden ir separando en las distintas componentes frecuenciales que las conforman por medio del cálculo de la

Transformada de Fourier (FFT) basado en el análisis de las series de Fourier. El resultado de este cálculo se denomina espectro y lo que representa es la intensidad (energía) de cada una de las frecuencias que componen la onda multifrecuencial compleja, es decir, la ecuación de onda en el dominio de las frecuencias. El análisis espectral puede aportar información complementaria de cómo se propaga la onda electromagnética.

Cuando se registran ondas electromagnéticas de forma experimental generadas por un equipo de georradar los parámetros que se pueden medir al analizar las ondas registradas en el dominio del tiempo serán las amplitudes de las ondas A registradas y sus tiempos de llegada t . Cuando el análisis se realiza en el dominio de la frecuencia, por medio del cálculo del espectro, se podrán obtener las energías por frecuencias y las variaciones de las mismas que componen las ondas registradas.

A partir de las variaciones que se produzcan en estos parámetros, medidos en las ondas electromagnéticas registradas, se podrán estimar las variaciones de las propiedades electromagnéticas que se producen en el medio a estudio y, por ende, proporcionar información sobre las propiedades físicas del medio que se esté estudiando.

4.2 Parámetros electromagnéticos de un medio

4.2.1 Descripción de los parámetros que definen la propagación de una onda

Los parámetros que definen la propagación de una onda electromagnética en un medio son: la conductividad, la permitividad dieléctrica y la permeabilidad magnética del medio.

La conductividad (σ) de un medio es la capacidad de un material de dejar pasar la corriente eléctrica a través de él, es decir, es la inversa de la resistividad. Dependiendo del medio, el transporte de electrones o de los iones cargados positiva y negativamente son los que originan la corriente, y la cantidad conducida dependerá del número de cargas presentes y de su movilidad. La conductividad de un material (σ) se expresa en $(\Omega\text{m})^{-1}$ o siemens por metro (S/m).

Aquellos materiales que permiten la circulación de la corriente eléctrica con facilidad, se denominan conductores y tienen una $\sigma > 10^5$ S/m. Los materiales que dificultan la circulación de la corriente eléctrica se denominan aislantes y presentan $\sigma < 10^{-8}$ S/m, mientras que los semiconductores son aquellos cuya conductividad se encuentra entre estos dos valores.

En general, la conductividad eléctrica es un valor complejo:

$$\sigma = \sigma' - i\sigma'' \quad (\text{ec. 4.5})$$

donde la parte real determina la amplitud de la corriente en fase con la intensidad del campo eléctrico externo y la imaginaria la amplitud de la corriente desfasada respecto al campo eléctrico externo y considera el retardo en la respuesta de la conducción del material en presencia de un campo eléctrico variable con el tiempo (Sutinen, 1992).

La permitividad dieléctrica absoluta es una constante de proporcionalidad entre la intensidad del campo eléctrico externo aplicado y el vector desplazamiento eléctrico. Asimismo, la permitividad absoluta (ε), cuyas unidades son F/m, se define como el producto entre una permitividad relativa del material (ε_r), que es una constante adimensional y la permitividad dieléctrica del vacío ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m).

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad (\text{ec. 4.6})$$

La permitividad dieléctrica relativa del material (ε_r) es una constante que da una medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Para la mayoría de los materiales que se pueden encontrar al

realizar una prospección electromagnética, los valores de ϵ_r se encuentran entre 1 (la del aire) y 81, siendo esta última la ϵ_r del agua a 20°C.

La permitividad dieléctrica relativa del material también es una magnitud compleja (Marshall et al., 1982), (Turner y Siggins, 1994) en la que la componente real corresponde a la corriente en fase respecto al campo eléctrico externo, y la componente imaginaria la corriente en desfase respecto a dicho campo eléctrico y es denominado factor de pérdidas.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - i\epsilon_r'' \quad (\text{ec. 4.7})$$

La permitividad dieléctrica relativa y la conductividad están relacionados entre sí. La parte real de la ϵ_r y la imaginaria de la σ generan una corriente que varía en fase con el campo eléctrico aplicado. La parte imaginaria de ϵ_r y la real de la σ generan una corriente desfasada respecto al campo eléctrico.

Es importante resaltar que la ϵ_r varía en función de la frecuencia. Hay diferentes mecanismos que caracterizan esta dependencia (Robert, 1996). Para altas frecuencias (entre 10 MHz y 1 GHz), en la mayor parte de los materiales del subsuelo, los fenómenos de desplazamiento (o polarización eléctrica) dominan sobre los fenómenos de conductividad. De esta forma, los medios suelen caracterizarse generalmente a partir de la parte real de ϵ_r a esta frecuencia de estudio.

La permeabilidad magnética (μ) es la que relaciona la inducción magnética con la intensidad de campo magnético. Se mide en Henri/metro y se puede escribir como el producto entre la permeabilidad magnética del vacío ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$) y la permeabilidad relativa del material (μ_r). No obstante, en la mayor parte de los materiales que se encuentran en los estudios con georradar (excepto en aquellos que contengan materiales ferromagnéticos) se cumple que la permeabilidad magnética es próxima a la unidad, no dependiendo de la frecuencia del campo magnético.

4.2.2 Variación de las propiedades electromagnéticas del hormigón como consecuencia de la variación de sus propiedades físicas

Las ondas electromagnéticas producidas por un equipo de georradar cuando viajan por el interior del hormigón dependen de las propiedades electromagnéticas del mismo: conductividad eléctrica, permitividad dieléctrica relativa y permeabilidad magnética. Ahora bien, la permeabilidad magnética del hormigón se considera igual que la del aire o vacío, ya que el hormigón es un material no magnético ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$).

La permitividad dieléctrica del hormigón varia aproximadamente desde 4, para hormigón seco hasta 8-9 cuando el hormigón tiene cierto contenido de humedad/agua (Laurens et al. 2002). Por lo que la permitividad variará dependiendo de diversos factores como son la frecuencia de emisión, del proceso de hidratación, de los componentes, del contenido de agua y de la presencia de cloruros.

Dado la influencia que ejerce la presencia de agua en el hormigón, algunos autores como Soutsos et al. (2001) estudiaron cómo las propiedades dieléctricas variaban dependiendo del contenido de agua. Las frecuencias de estudio empleadas variaban de 10 MHz hasta 1 GHz y las probetas se fabricaron con relaciones de A/C desde 0,82 hasta 0,58. En este estudio se comprobó que el contenido de agua es uno de los factores dominantes que hacían variar la permitividad. Conforme aumentaba el contenido de agua, la permitividad aumentaba significativamente, lo que implica que el material clave que afecta a la permitividad es la matriz del hormigón y no los áridos empleados. Por ejemplo, para valores de contenido de agua del 0,2 %, la permitividad se encontraba en el entorno de 5, mientras que para un contenido de agua del 2,8 % en el entorno de 6,5 y así sucesivamente conforme aumentaba el contenido de agua.

Ahora bien, para las frecuencias de estudio entre los 500 MHz y 1 GHz la permitividad prácticamente no variaba en todo el rango, mientras el contenido de agua no fuera superior al 5,5 %. No obstante, para un alto contenido de agua como es el 12 % la permitividad descendía desde 14 para frecuencias de estudio de 50 MHz hasta 8 para frecuencias de 1 GHz.

Las propiedades eléctricas del hormigón están detalladamente descritas en Neville (1997). En este trabajo se describe como el hormigón fresco (antes del curado) se comporta esencialmente como un electrolito, llegando a alcanzar una resistividad de $100 \Omega \cdot m$. Para ese rango de resistividades, se puede considerar que el hormigón en ese estado es un semiconductor. No obstante, una vez se ha curado el hormigón al aire la resistividad aumenta muy significativamente, alcanzado valores en el entorno de $10^4 \Omega \cdot m$ y si el secado se ha realizado al horno puede alcanzar valores de $10^9 \Omega \cdot m$, considerándose por tanto que se trata de un buen aislante.

La consecuencia más clara de este aumento en la resistividad una vez curado el hormigón es que la corriente eléctrica se conduce en el hormigón fresco por medio de los iones del agua evaporable. Es importante añadir que la resistividad de los áridos convencionales es infinitamente más grande. Una vez se ha evaporado el agua la corriente eléctrica se conduce por el agua combinada. Es por ello que, además, con respecto a la relación agua/cemento (A/C), la resistividad disminuirá significativamente conforme aumenta la relación A/C.

En concreto, en el estudio presentado por Klysz et al. (2008), al analizar la variación de la conductividad establecen que para una frecuencia de estudio de 1,5 GHz, esta varía de 10^{-4} S/m en el hormigón seco hasta 10^{-1} S/m en el hormigón saturado.

4.3 Velocidad de propagación y atenuación de las ondas electromagnéticas

La velocidad de propagación de una onda electromagnética depende de la conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética del medio por el que se propaga y de la frecuencia de la onda. La velocidad de propagación de una onda (v) por un medio material viene dada por la expresión siguiente:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu \cdot \epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon} \right)^2} + 1 \right)}} \quad (\text{ec. 4.9})$$

En medios no magnéticos la expresión se simplifica ya que $\mu_r=1$. Además, cuando los medios son dieléctricos o poco conductores el término asociado con la conductividad es pequeño. Si además se tiene en cuenta que las frecuencias habituales de trabajo están situadas entre 10 MHz y 1 GHz se puede considerar que $\epsilon_r'' \ll \epsilon_r'$. Esto es debido a que el término asociado con la relajación de la molécula de agua y, por lo tanto, con la parte imaginaria de la permitividad es muy pequeño. Por todo ello la velocidad de propagación se puede calcular como:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (\text{ec. 4.10})$$

La velocidad más elevada se obtiene para el aire (30 cm/ns), mientras que la menor la presenta el agua (3,3 cm/ns). El resto de materiales están situados entre estos dos valores.

La onda generada por un equipo de georradar viaja por el medio a estudio con velocidad uniforme y cuando es registrada podemos medir el tiempo transcurrido durante la propagación. Conociendo la trayectoria que recorren estas señales y sabiendo que la velocidad es la relación entre el espacio recorrido y el tiempo se puede determinar la velocidad de propagación de forma experimental. Finalmente, una vez determinada la velocidad, por medio de la ec. 4.10 se podrá determinar la permitividad dieléctrica del medio. En el caso de que se produzcan variaciones en los valores de las velocidades de propagación se podrá determinar las variaciones en la permitividad dieléctrica del medio.

El factor denominado atenuación de la propagación caracteriza el grado de disminución de la amplitud de la onda conforme aumenta la distancia al punto en el cual se ha generado y sus unidades son m^{-1} .

La atenuación de una onda electromagnética debido a las características del material por el que se propaga es un tema que ha sido planteado en diversas ocasiones tanto teóricamente por autores como Carcione (1996a), Zonghou y

Tripp (1997), como a partir de simulaciones numéricas realizadas por Carcione (1996b) y Xu y McMechan (1997),

El grado de atenuación de una onda electromagnética se define como el cociente entre las amplitudes de las oscilaciones de la onda en dos puntos separados una distancia r . Si se toman logaritmos decimales, se puede obtener un valor del nivel de decaimiento de la energía (α) por medio del decaimiento de la amplitud (A) de la onda conforme esta se propaga por el medio material en decibelios.

$$\alpha = 20 \cdot \log\left(\frac{A_i}{A_0}\right) \quad (\text{ec. 4.11})$$

donde A_i es la amplitud registrada en un momento de la propagación y A_0 es la amplitud registrada que se toma como referencia.

En definitiva, las señales de georradar son ondas electromagnéticas generadas por un emisor que se propaga por un medio, cuya velocidad de propagación está relacionada con la permitividad dieléctrica relativa del material y cuya atenuación dependerá principalmente de la conductividad.

4.4 Algoritmo de generación de modelos numéricos: *grpMax*

grpMax es un software de código abierto que simula la propagación de ondas electromagnéticas generadas por el georradar. Este software utiliza el algoritmo desarrollado por Kane Yee para resolver las ecuaciones de Maxwell en 3D mediante el método de las Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (*Finite Difference Time Domain*, FDTD).

Está diseñado para simular la propagación de ondas electromagnéticas como las que genera un equipo de georradar, pero también se puede usar para modelar la propagación de ondas electromagnéticas para muchas otras aplicaciones.

Se trata de un software libre diseñado principalmente por *Dr. Antonis Giannopoulos, University of Edinburgh* y *Dr. Craig Warren, Northumbria University*, en cuya web (www.gprmax.com) se cuenta con gran cantidad de información (Figura 4.1).

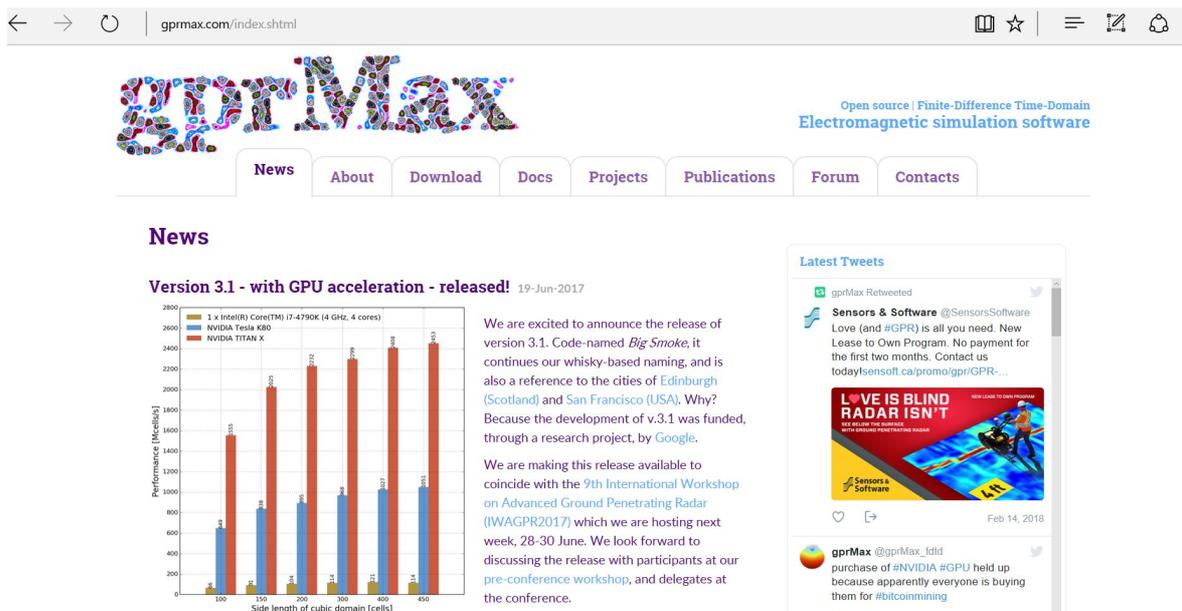


Figura 4.1 Captura de pantalla de la web de inicio del software *grpMax* (www.gprmax.com)

grpMax es un software impulsado por línea de comandos escrito en el lenguaje *Python*, con partes críticas para el rendimiento escritas en *Cython*. No cuenta con una interfaz gráfica de usuario (GUI), lo cual le permite ser un software muy flexible y programable que se puede ejecutar en entornos de computación de alto rendimiento (HPC), es decir, en supercomputadoras.

grpMax actualmente está bajo la Licencia pública general GNU v3 o superior.

Para llevar a cabo la instalación del programa *gprMax*, lo primero de todo es entrar en la página web del software (www.gprmax.com) y le damos a *Download* para descargar los archivos necesarios para su instalación y donde está muy bien explicado los tres pasos para la instalación. Los pasos a seguir para realizar una correcta instalación son:

El primer paso de la instalación es instalar *Python*, un lenguaje de programación, el cual es interpretado por un programa ejecutable. Para ello necesitamos instalar *Miniconda*. En la página web del *gprMax* se nos proporciona un enlace que nos redirecciona a otra página para poder descargar e instalar *Miniconda*. Dependiendo del sistema operativo que tenga nuestro ordenador elegiremos una opción u otra, en este caso Windows y la versión Python 3.6.

Conda

Miniconda

	Windows	Mac OS X	Linux
Python 3.6	64-bit (exe installer) 32-bit (exe installer)	64-bit (bash installer)	64-bit (bash installer) 32-bit (bash installer)
Python 2.7	64-bit (exe installer) 32-bit (exe installer)	64-bit (bash installer)	64-bit (bash installer) 32-bit (bash installer)

Other resources:

- [Miniconda with Python 3.6 for Power8](#)
- [Miniconda with Python 2.7 for Power8](#)
- [Miniconda Docker images](#)
- [Installation instructions](#)
- [MD5 sums for the installers](#)
- [conda change log](#)

These Miniconda installers contain the conda package manager and Python. Once Miniconda is installed, you can use the conda command to install any other packages and create environments, etc. For example:

```
$ conda install numpy
...
$ conda create -n py3k anaconda python=3
...
```

Figura 4.2 Archivos necesarios para la descarga de Miniconda.

Miniconda es una versión básica, que únicamente incluye a *Conda*, *Python* y otros paquetes básicos. *Anaconda* es la versión completa e incluye más de que 150 paquetes. Una vez descargado el ejecutable de *Miniconda*, la instalación resulta muy sencilla, consiste en ir siguiendo los pasos que te va indicando (Figura 4.3).

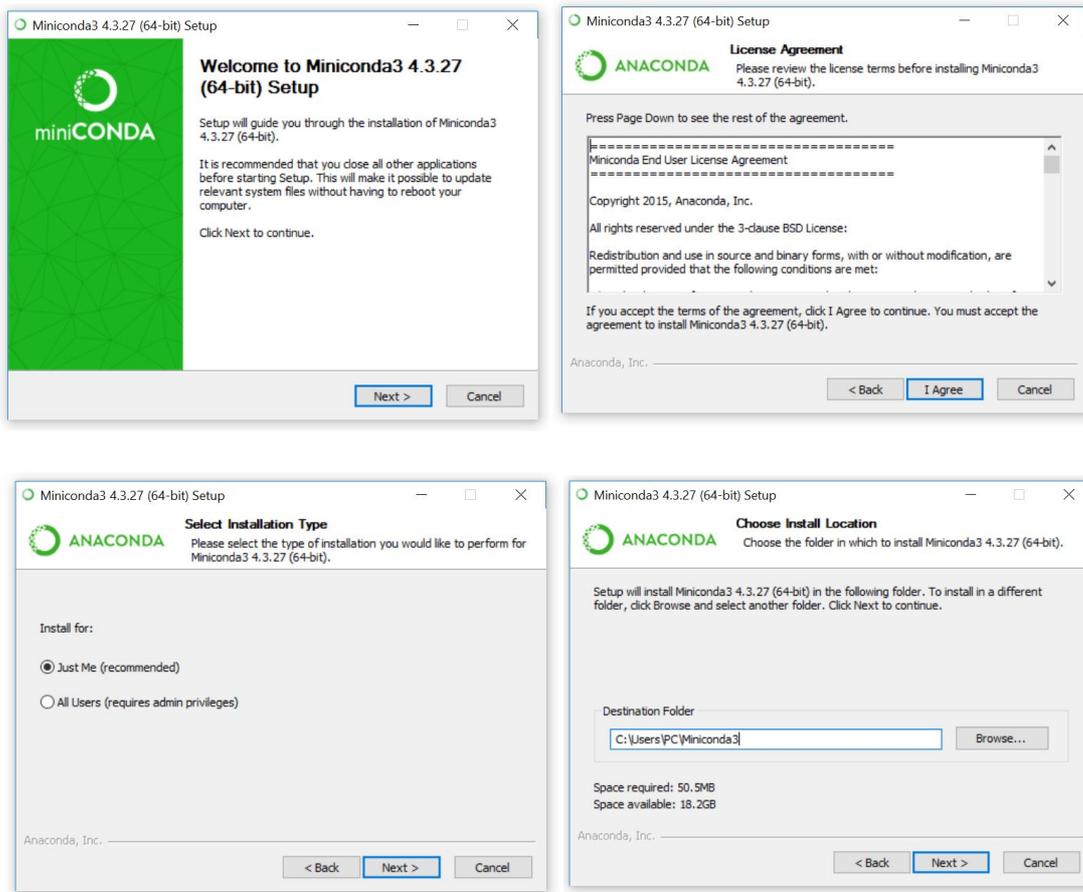


Figura 4.3 Proceso de instalación de Miniconda.

Una vez finalizada la instalación de *Miniconda*, el segundo paso es comprobar que la instalación se ha realizado correctamente. Para ello abrimos *Command Prompt*, que es la pantalla negra que sirve para introducir los comandos de *Miniconda*. En este caso, en primer lugar, se emplea para comprobar que se ha realizado una correcta instalación. Para ello se introduce el comando: “*conda update conda*” y se ejecuta.

Tras la ejecución, como se muestra en la Figura 4.4 se comprueba que no da ningún error de instalación y podemos proceder al siguiente paso.

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
(C:\Users\PC\Miniconda3) C:\Users\PC\Documents>conda update conda
Fetching package metadata .....
Solving package specifications: .

Package plan for installation in environment C:\Users\PC\Miniconda3:

The following packages will be UPDATED:

 conda: 4.3.30-py36h7e176b0_0 --> 4.4.10-py36_0
 openssl: 1.0.2l-vc9h02d068b_2 --> 1.0.2n-h74b6da3_0
 pycosat: 0.6.2-py36_0 --> 0.6.3-py36h413d8a4_0
 vc: 9-h7299396_1 --> 14-h0510ff6_3
 yaml: 0.1.7-vc9heb3852e_1 --> 0.1.7-hc54c509_2

Proceed ([y]/n)?

vc-14-h0510ff6 100% |#####| Time: 0:00:00 250.83 kB/s
openssl-1.0.2n 100% |#####| Time: 0:00:35 157.43 kB/s
yaml-0.1.7-hc5 100% |#####| Time: 0:00:00 267.36 kB/s
pycosat-0.6.3- 100% |#####| Time: 0:00:00 285.43 kB/s
conda-4.4.10-p 100% |#####| Time: 0:00:04 206.72 kB/s

(C:\Users\PC\Miniconda3) C:\Users\PC\Documents>
(C:\Users\PC\Miniconda3) C:\Users\PC\Documents>
    
```

Figura 4.4 Comprobación de la correcta instalación de Miniconda.

El siguiente paso consiste en instalar el “git” que nos permita descargar todos los archivos que necesita el software *gprMax*. Para ello se deberá ejecutar el comando: “*conda install git*” Como se observa en la Figura 4.5, todos los paquetes se han instalados correctamente y es el momento de comprobar si los archivos necesarios para trabajar con el *gprMax* también se han instalado. Para ello entramos en la carpeta “*gprMax*” por medio del comando “*cd gprMax*”.

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
(C:\Users\PC\Miniconda3) C:\Users\PC\Documents>conda install git
Solving environment: done

# All requested packages already installed.

(C:\Users\PC\Miniconda3) C:\Users\PC\Documents>cd gprMax
(C:\Users\PC\Miniconda3) C:\Users\PC\Documents\gprMax>conda env create -f conda_env.yml
    
```

Figura 4.5 Comprobación de la correcta instalación de los archivos de *gprMax*.

El siguiente paso es instalar *C Compiler*. Para ello, en la descripción de la instalación en la web del *gprMax* nos facilitan un link de Microsoft Windows, ya que es el sistema operativo con el que vamos a trabajar y nos mandan a otra página. Le damos a *Download Visual C++ Build Tools 2015* y nos sale otra ventanita para su instalación y tras aceptar varias pestañas ya tendremos el compilador instalado.

El último paso para acabar la instalación del programa es activar el *gprMax*. Para ello abrimos la pantalla negra del *Miniconda* y ejecutamos el comando “*activate gprMax*” (Figura 4.6). A partir de ese momento, estaremos en condiciones de cargar los archivos que hayamos programado para generar la propagación de las ondas electromagnéticas por el medio que hayamos definido, ya que la instalación se ha completado.

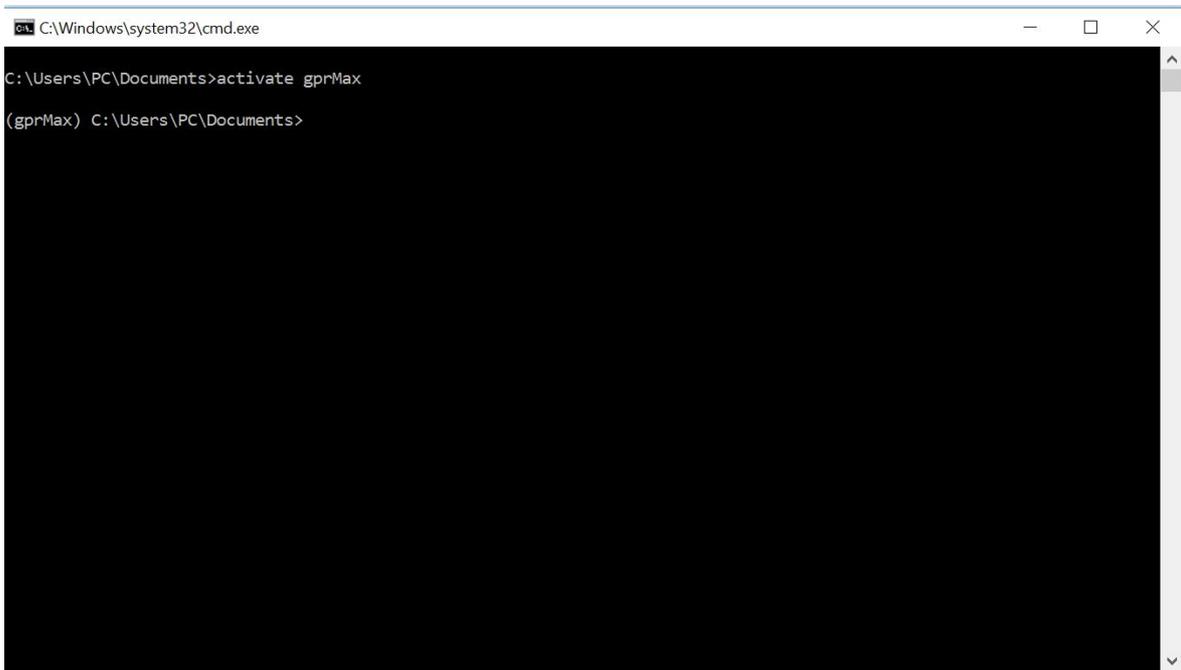


Figura 4.6 Pantalla de activación del *gprMax*.

4.5 Comandos básicos para programar con *gprMax*

Para poder ejecutar el *gprMax*, se tiene que realizar un archivo de entrada (*input file*) y para ello es muy importante tener claro los comandos necesarios para obtener el resultado de lo que se quiere calcular. En este archivo se listarán todas las órdenes que son necesarias indicar para poder modelar numéricamente la propagación de las ondas electromagnéticas en el escenario que se haya diseñado.

El archivo de entrada *input* es un archivo de texto ASCII que se puede preparar con cualquier editor de texto o programa de procesamiento de textos. En este caso se ha trabajado con el Bloc de notas de Windows.

En primer lugar, para indicar un nuevo comienzo de un comando se debe de empezar la línea con #, ya que es así como lo reconoce el software *gprMax*. Sino se empieza así, el programa dará un error porque no es capaz de reconocer lo que se quiere ejecutar.

Los tipos de comandos a incluir se clasifican en los siguientes tipos:

- Esenciales: se requieren siempre para ejecutar cualquier modelo.
- Generales: dan mayor control sobre el modelo.
- Materiales: permiten introducir las características de los materiales.
- Construcción de objetos: permiten construir las formas geométricas necesarias con diferentes parámetros constitutivos.
- Fuente y salida: permiten introducir la antena y la señal de onda.
- PML: proporciona personalización avanzada y optimización de las condiciones de contorno absorbentes.

De todos ellos, a continuación, se van a describir aquellos que han sido necesario emplear para crear los códigos de los distintos escenarios de modelización creados:

Título. Está dentro de los comandos generales, permitiendo al modelo tener un título que lo diferencie del resto. Su sintaxis sería:

```
#title= str1
```

Donde *str1* será el título correspondiente escrito.

Dominio. Está dentro de los comandos esenciales. Permite especificar el tamaño total del modelo. Su sintaxis es:

#domain:f1 f2 f3

Donde $f1$, $f2$ y $f3$ son las dimensiones en el eje X , Y , Z respectivamente.

Discretización. También es uno de los comandos esenciales y define el tamaño mínimo de resolución de cálculo. Su sintaxis es:

#dx_dy_dz: f1 f2 f3

Donde $f1$, $f2$ y $f3$ son los pasos de discretización en las direcciones X , Y , Z respectivamente.

Tiempo de propagación. Es el último de los comandos esenciales. Permite especificar el tiempo total de simulación requerido. Su sintaxis es:

#time_window:f1

Donde $f1$ es el tiempo en segundos de registro de las reflexiones, es decir, el tamaño de la ventana.

Caja (box). Pertenece a los comandos de construcción de objetos. Introduce en el modelo un paralelepípedo ortogonal con unas propiedades específicas. Su sintaxis es:

#box:f1 f2 f3 f4 f5 f6 [c1]

Donde $f1$, $f2$ y $f3$ son las coordenadas inferiores izquierdas (X , Y , Z) del cubo y $f4$, $f5$ y $f6$ las coordenadas superiores derechas (X , Y , Z) del mismo. $Str1$ es el nombre del material el cual corresponde a esa "box".

Geometría. También corresponde a los comandos de construcción de objetos. Permite al fichero *output* (de salida) tener la información necesaria sobre la geometría del modelo. Este comando crea un archivo que se podrá abrir en el software *Paraview*. Su sintaxis es:

#geometry_view: f1 f2 f3 f4 f5 f6 f7 f8 f9 file1 c1

Donde $f1$, $f2$ y $f3$ son las coordenadas inferiores izquierdas (X, Y, Z) de la geometría, $f4$, $f5$ y $f6$ las coordenadas superiores derechas (X, Y, Z) de la misma y $f7$, $f8$ y $f9$ la discretización espacial. *File1* será el nombre del archivo "view" que crea. Por último, *c1* será n (normal) o f (fina) dependiendo de las celdas de la geometría.

Estos son los comandos que se utilizarán en todos los modelos que se van a ejecutar para el estudio que se está llevando a cabo. Sin embargo, hay un último comando que también se utilizará mucho:

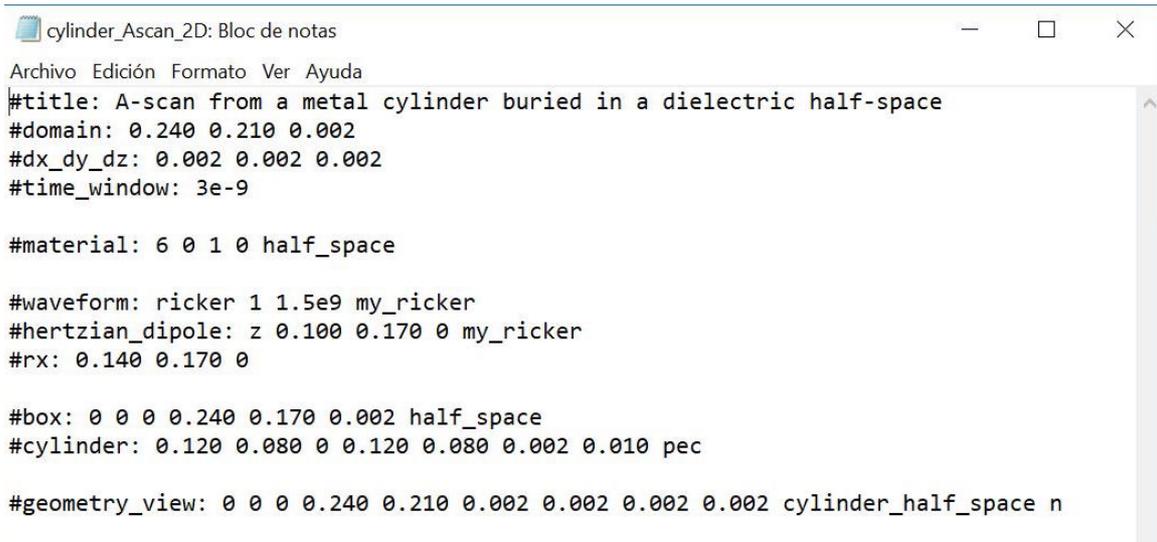
Material. Pertenece a los comandos de materiales. Permite introducir el material que sea necesario, introduciendo sus propiedades dieléctricas. Su sintaxis es:

#material: f1 f2 f3 f4 str1

Donde $f1$ es la permitividad dieléctrica, $f2$ la conductividad, $f3$ la permeabilidad magnética y $f4$ la pérdida magnética. *Str1* es el identificativo de dicho material.

Además, el propio software cuenta con una serie de materiales cuyas propiedades ya están incorporadas. Se trata del aire y de los conductores metálicos. Para ellos, no es necesario incluir sus propiedades, sino simplemente hacer referencia a su nombre (Figura 4.7):

- *Free_space*: correspondiente al aire.
- *Pec*: correspondiente a metal.



```
cylinder_Ascan_2D: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
#title: A-scan from a metal cylinder buried in a dielectric half-space
#domain: 0.240 0.210 0.002
#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 3e-9

#material: 6 0 1 0 half_space

#waveform: ricker 1 1.5e9 my_ricker
#hertzian_dipole: z 0.100 0.170 0 my_ricker
#rx: 0.140 0.170 0

#box: 0 0 0 0.240 0.170 0.002 half_space
#cylinder: 0.120 0.080 0 0.120 0.080 0.002 0.010 pec

#geometry_view: 0 0 0 0.240 0.210 0.002 0.002 0.002 0.002 cylinder_half_space n
```

Figura 4.7 Archivo input, con los comandos esenciales

4.6 Obtención de los modelos numéricos por medio de *gprMax*

Una vez se han creado los *input file* en el Bloc de notas de Windows con las órdenes que queremos ejecutar y en el que se han indicado los condicionantes de la medición es el momento de introducirlo en el software *gprMax* y generar los modelos numéricos.

Para ello el primer paso necesario es cambiar la extensión del archivo generado por el Bloc de Notas al formato requerido por el *gprMax*. Hay que pasar de formato “.txt” a “.in” por medio de la línea de comandos del *Miniconda*.

Una vez tengamos el archivo en formato “.in” se puede realizar su ejecución. Para ello, lo primero será abrir el programa *Anaconda Prompt* y activar el software, con el comando *activate gprMax*. (Figura 4.8)

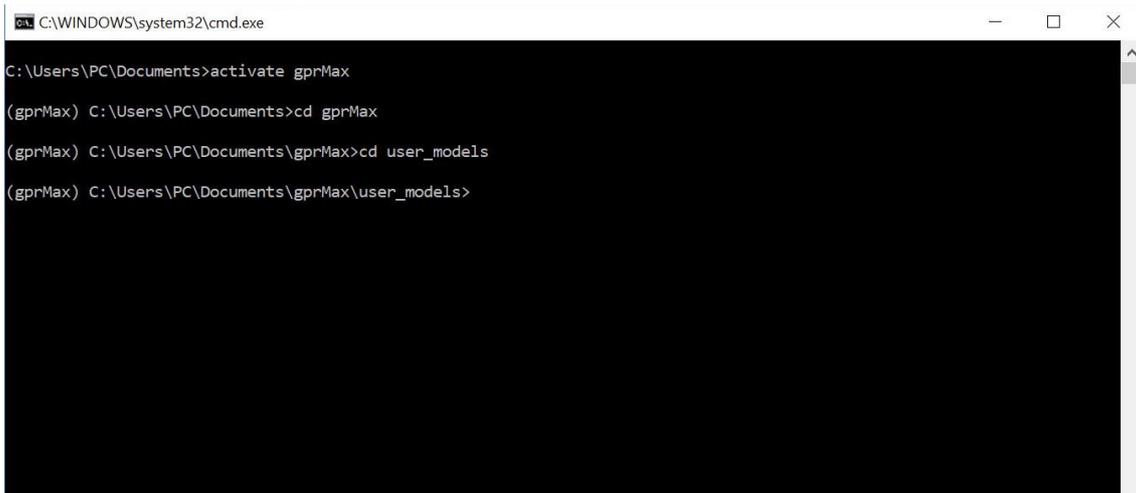


Figura 4.8 Activación del software *gprMax*

Después habrá que buscar la carpeta donde se encuentra el *input file* que se ha creado previamente, ya que el programa se abre de forma predeterminada en la carpeta de documentos. En este caso, al tratarse del ejemplo que te facilita la página web del software, la carpeta se llamaba *gprMax* y se encontraba en la carpeta de documentos, dentro de la carpeta *user_models*, por lo tanto, se han usado los siguientes comandos para llegar hasta el lugar de destino (Figura 4.9)

```
(gprMax) $ cd gprMax
```

```
(gprMax) $ cd user_models
```

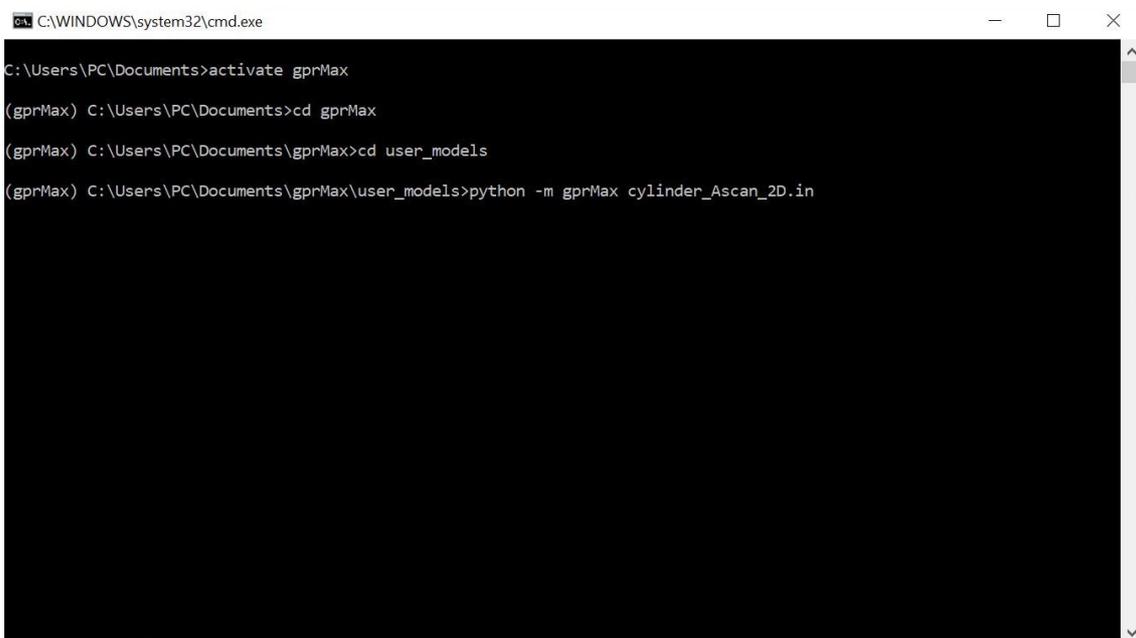


```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\Users\PC\Documents>activate gprMax
(gprMax) C:\Users\PC\Documents>cd gprMax
(gprMax) C:\Users\PC\Documents\gprMax>cd user_models
(gprMax) C:\Users\PC\Documents\gprMax\user_models>
```

Figura 4.9 Visualización de la pantalla del programa Anaconda donde se encuentran los input files

Una vez hemos llegado a la carpeta donde está guardado el archivo con formato “.in”, se ejecutará en *Python* el programa *gprMax* y se realizarán las órdenes indicadas en el *input file* del ejemplo (Figura 4.10). Para ello se deberá introducir el comando:

(gprMax) \$ python -m gprMax name_of_input_file



```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\Users\PC\Documents>activate gprMax
(gprMax) C:\Users\PC\Documents>cd gprMax
(gprMax) C:\Users\PC\Documents\gprMax>cd user_models
(gprMax) C:\Users\PC\Documents\gprMax\user_models>python -m gprMax cylinder_Ascan_2D.in
```

Figura 4.10 Programa Anaconda ejecutando un archivo con formato “.in”

Con todo esto, le damos a *enter* y el programa hará los cálculos necesarios por medio del método matemático FDTD. Al terminar la simulación el software crea automáticamente un archivo de salida con formato “.out”, (marcado en rojo en la figura 4.11). Cuando los cálculos han finalizado se podrá ver que en la carpeta

donde estaba el *input file* aparece un archivo nuevo, llamado del mismo modo que el que se acaba de ejecutar, pero con la extensión “.out”.

A continuación, la obtención de las imágenes de las gráficas es muy sencillo. Se parte del archivo *output que genera el software y se trata de un archivo de salida* diseñado para almacenar y organizar grandes cantidades de datos numéricos, con un formato HDF5 ampliamente compatible.

Para ejecutarlo en *gprMax* no hay que realizar los pasos anteriores ya que si no nos hemos salido seguimos dentro de la carpeta *gprMax*. Para poder visualizar el archivo de salida que ha generado el programa habrá que ejecutar en *Python* por medio del comando *tools.plot* el archivo “.out” con el comando (Figura 4.11):

(gprMax) \$ python -m tolos.plot_Ascaname_of_output_file

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Materials:
ID | Name | Type | eps_r | sigma | mu_r | sigma* | Dielectric
---|---|---|---|---|---|---|---
0 | pec | builtin | 1 | inf | 1 | 0 | False
1 | free_space | builtin | 1 | 0 | 1 | 0 | True
2 | half_space | builtin | 6 | 0 | 1 | 0 | True
3 | free_space+free_space+half_space+half_space | dielectric-smoothed | 3.5 | 0 | 1 | 0 | True

Numerical dispersion analysis: estimated largest physical phase-velocity error is -0.22% in material 'half_space' whose wavelength sampled by 19 cells. Maximum significant frequency estimated as 3.17978e+09Hz

Writing geometry view file 1/1, cylinder_half_space.vti: 100%|#####| 75.6K/75.6K [00:00<00:00, 795Kbyte/s]
Output file: C:\Users\PC\Documents\gprMax\user_models\cylinder_Ascan_2D.out
Running simulation, model 1/1: 100%|#####| 637/637 [00:00<00:00, 1109.02it/s]
Memory (RAM) used: ~41.7MB
Solving time [HH:MM:SS]: 0:00:00.576301

=== Simulation completed in [HH:MM:SS]: 0:00:01.281043 ===

(gprMax) C:\Users\PC\Documents\gprMax\user_models>python -m tools.plot_Ascan cylinder_Ascan_2D.out
  
```

Figura 4.11 Programa Anaconda ejecutando un archivo output para visualizar los resultados

Tras ejecutar este archivo, automáticamente aparece otra pantalla con los modelos numéricos resultantes, las cuales se pueden ver en la (Figura 4.12). A la izquierda de la imagen, dibujadas en rojo, aparecen las gráficas en los ejes X, Y, Z del campo eléctrico, mientras que, a la derecha, en verde, las gráficas del campo magnético.

Para el estudio que se va a realizar, las gráficas importantes son las del campo eléctrico, dado que se va a trabajar con materiales no magnéticos.

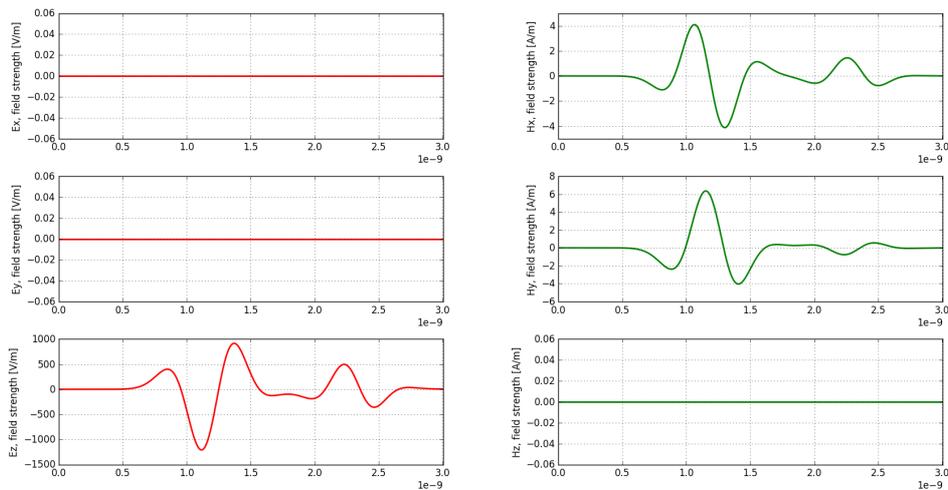


Figura 4.12 Resultado del modelado numérico de la propagación de las ondas electromagnéticas por medio del procedimiento matemático FDTD, a través del software gprMax.

gprMax permite visualizar la geometría física del modelos generado. Pero para ello se debe trabajar con otro software libre llamado *Paraview*, que es una aplicación dedicada a la visualización y análisis de datos.

El comando de *gprMax* `#geometry_view`: crea un archivo `.vti`, es decir un archivo de datos de imagen (*Visualization Toolkit Image Data*), dando forma a los comandos que se han programado, por eso es importante incluir los comandos que ponemos en el archivo de entrada.

El programa *Paraview* permite ver estos archivos como una imagen tridimensional ya que tiene una herramienta externa para poder abrirlos. Para ello hay que realizar varios pasos.

En primer lugar, habrá que instalar el *script* descargado con el paquete de *gprMax* llamado *gprMax_info.py*, lo que quedará como un macro en *Paraview*. Este *script* permite a *Paraview* reconocer fácil y rápido los diferentes comandos del archivo. Para su instalación habrá que ir a la barra Macros \rightarrow *Add new macro*. Una vez hecho esto, aparecerá un botón de acceso directo en la barra de herramientas llamado *gprMax_info*. Este paso sólo hay que realizarlo la primera vez, ya que se mantiene para futuras pruebas.

A continuación se abrirá el archivo `.vti` que se desea desde el menú "Abrir archivo". Se podrá ver el archivo abierto, pero no saldrá nada hasta que se le dé al botón "*apply*" (aplicar), situado en el panel de propiedades. Entonces aparecerá un esquema del volumen de la geometría.

Por ultimo, habrá que dar al botón del acceso directo *gprMax_info*, que se ha explicado en el paso 1 como instalar. Así aparecerá todos los elementos que componen la geometría física del modelo que se ha diseñado (Figura 4.13).

La imagen que genera el *Paraview*, nos permite visualizar la geometría física del modelo que estamos estudiando, por lo que resulta muy interesante y útil y nos previene en caso de que a la hora de haber realizado la programación alguno de los componentes del modelo no estén bien definidos.

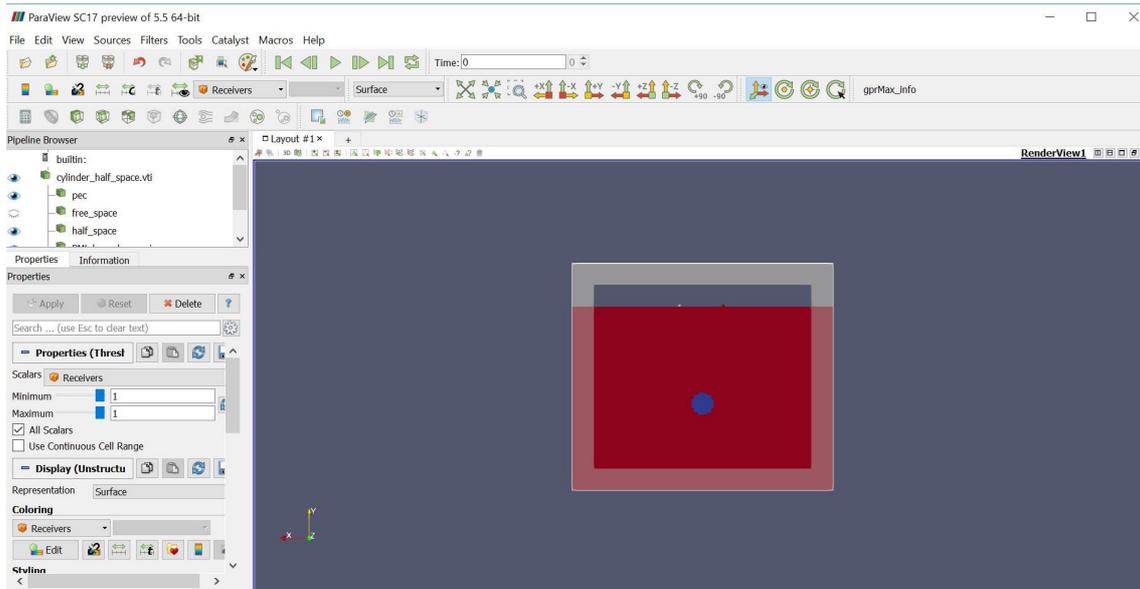


Figura 4.13 Visualización del software Paraview.

4.7 Obtención de datos en formato ASCII desde el *gprMax*

Para realizar el análisis de los resultados que estamos buscando, el software *gprMax* sólo nos proporciona información de la propagación de las ondas electromagnéticas de forma gráfica. Pero, tras una serie de transformaciones de ficheros, una vez obtenidas los modelos numéricos por medio de *gprMax*, se pueden convertir a Excel y así realizar el estudio que nos interesa.

Para ello se va a hacer uso de un nuevo programa libre compatible con los resultados que se obtienen con el *gprMax*, llamado *HDFView*. Esta es una herramienta visual para poder explorar y editar archivos con formato HDF4 y HDF5. Lo primero que se debe hacer es descargarlo e instalarlo. En este caso se ha descargado el *HDFView* 2.14, que ha funcionado perfectamente con los archivos con los que se está trabajando.

Después de su instalación, dándole a la pestaña superior izquierda, llamada “*open*” se abre el archivo con formato “.out”. Es importante que en el desplegable llamado “tipos de archivo” se cambie la opción a “Todos los archivos”, ya que de otro modo no aparecerá el archivo de salida deseado.

Una vez realizado esto, se abrirá dentro del programa dicho archivo con una pestaña desplegable a la izquierda. Para coger los datos necesarios, se despliegan los siguientes archivos y se selecciona el que nos interese (Figura 4.14).

Las seis últimas pestañas, llamadas *Ex*, *Ey*, *Ez*, *Hx*, *Hy* y *Hz* corresponden a la descomposición en las 3 coordenadas (*X*, *Y* y *Z*) del campo eléctrico y del magnético que se han obtenido en el punto anterior. Estos serán los valores que se van a trasladar a Excel para poder dibujarlas y compararlas. En nuestro caso, los archivos con los que hemos trabajado es la componente *Y* del campo eléctrico (*Ey*).

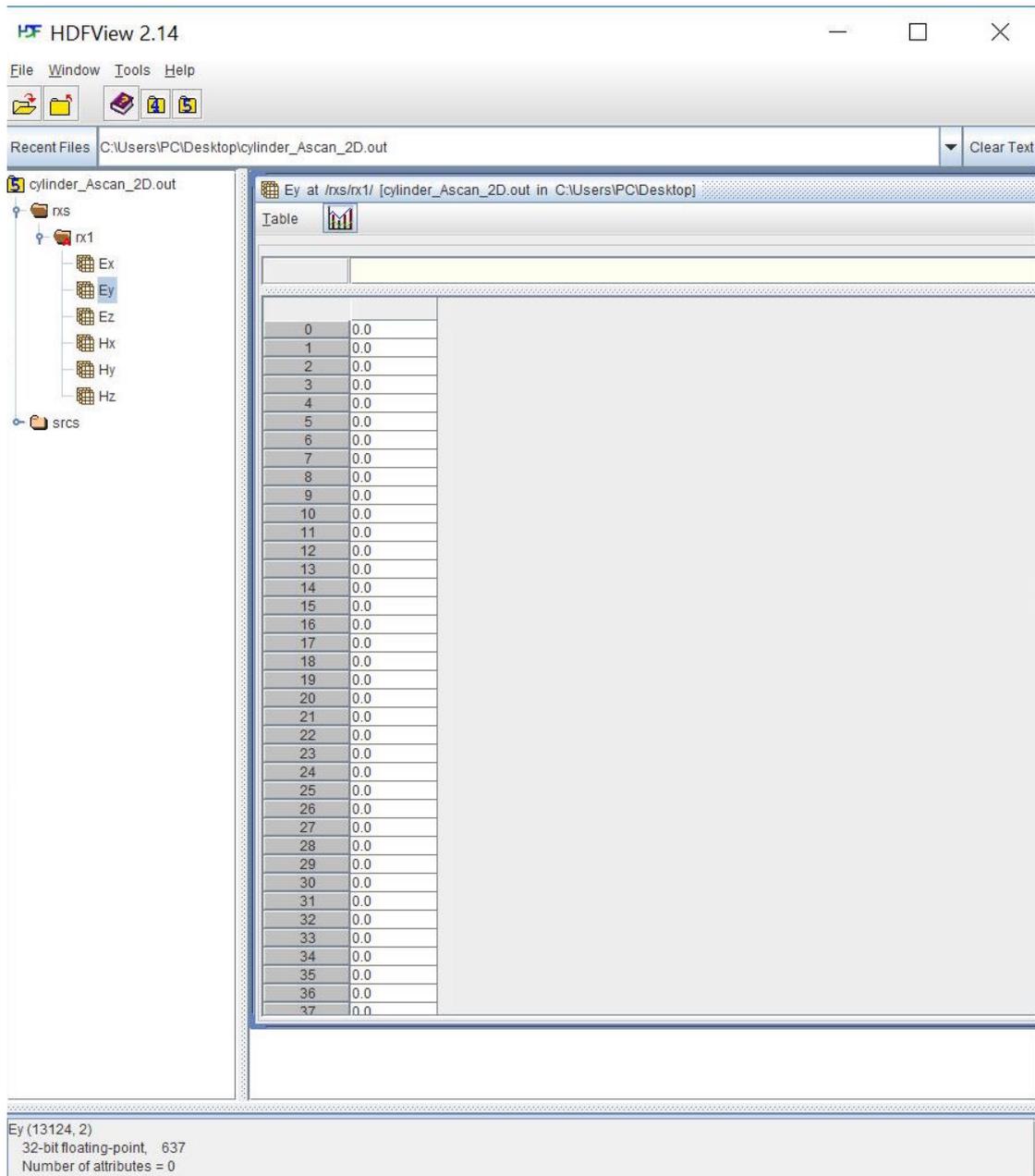


Figura 4.14. Visualización programa HDFView para la transformación de formatos.

Una vez que se han cargado en el programa las tres componentes del campo eléctrico y el magnético del modelo numérico creado, estos se pueden transformar a formato ASCII para poder trabajar con ellos en Excel. Para ello, en la pestaña superior que pone “Table” se escoge la opción de “Export Data to Text File”, lo que permite guardar los datos directamente en un archivo con formato “.txt”, es decir, un formato que se puede trabajar con el software Bloc de Notas.

Una vez se disponga del archivo “.txt”, habrá que reemplazar los ‘.’ (puntos) por ‘,’ (comas), ya que sino Excel no lo reconocerá como números y no se podrá representar los valores adecuadamente.

Con todo esto realizado, ya se podrá abrir esta columna de datos de cada una de las componentes del campo en Excel y procesar y representar todos los modelos numéricos generados y por último y muy importante comparar los resultados de todos los modelos numéricos creados, facilitando el trabajo de análisis de las señales modeladas.

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

El primer paso en el desarrollo experimental consistió en comprobar que la emisión y recepción de las señales generadas con la modelación numérica eran correctas. A este primer paso se le denominó calibración. Se trata en definitiva de realizar una serie de comprobaciones de los resultados obtenidos mediante el *gprMax*. Para ello se generaron una serie de modelos numéricos emitiendo al aire, al aire con reflector metálico y a un bloque de hormigón para comprobar el comportamiento y la forma de las señales emitidas con una antena de frecuencia central de 2 GHz

Posteriormente, tal y como se menciona en el apartado 3.2, el avance del frente del agua hacia el interior del hormigón es un problema muy crítico. Es por ello, que se diseñó un programa experimental que permitiera comprobar, por medio de la generación de modelos teóricos numéricos, la capacidad del georradar para detectar el frente de avance del agua, colocando la antena en posiciones diferentes respecto al frente de avance.

Por último, se pudo validar el método de trabajo desarrollado a lo largo de este estudio gracias a los resultados obtenidos en trabajos previos del grupo de investigación en el que se enmarca este Trabajo Final de Máster. El desarrollo de un programa experimental llevado a cabo con anterioridad permitió determinar cuáles eran las propiedades electromagnéticas a partir de unos registros reales de georradar que han sido comparados con los resultados obtenidos en este trabajo.

5.1 Estudios de calibración antena 2 GHz

El software *gprMax* contiene una serie de módulos programados, como son los correspondientes a algunas antenas de GSSI, como es la de 1,5 GHz, o bien las características de algunos materiales como el aire y el metal. No obstante, la antena con la que se trabajó en este estudio fue la de 2 GHz de la empresa GSSI y las características de esta antena no están programadas en ningún módulo de *gprMax*.

Es por ello que fue necesario realizar este primer paso de calibración de la antena de 2 GHz. Ya que tras realizar una búsqueda, la web de GSSI te facilita (<https://www.geophysical.com/antennas>) cierta información, pero no la suficiente como para programar cómo realiza la propagación de las ondas electromagnéticas y cuál es la distancia de separación entre emisor y receptor.

La información de la que se dispone de esta antena es la detallada en la Tabla 5.1.

*Tabla 5.1 Principales características de la antena de 2 GHz de GSSI.
(<https://www.geophysical.com/antennas>)*

Frecuencia Central	2000 MHz
Rango de Profundidad	0 - 40 cm
Medidas de la antena y el cable	3 m de cable y 1,3 Kg 7 m de cable y 1,8 Kg
Dimensiones de la antena	10,4 x 9,2 x 15,5 cm
Modelo 62000-003	3 m de cable

Además, en la web de GSSI se describe la antena de la siguiente forma y en la Figura 5.1 vemos sus dimensiones respecto a la unidad de control.

“La Antena de Palm ofrece a los usuarios la posibilidad de llegar a áreas estrechamente espaciadas que antes eran inaccesibles, como esquinas, paredes y alrededor de obstrucciones. La antena incluye una rueda de reconocimiento dedicada, una placa de deslizamiento reemplazable y un mango extraíble para reducir la altura de la antena, si es necesario. La Palm Antena es compatible con las unidades de control SIR 4000 y SIR 30.”



Figura 5.1 Antena Palm 2 GHz de la marca GSSI (<https://www.geophysical.com/antennas>).

Sin embargo, entre las características falta un dato necesario que nos pedirá el software cuando le demos el comando con las características de la antena, este dato es la distancia entre la antena emisora y la receptora, imprescindible para obtener la señal electromagnética que se desea. Vamos a fijar 5 cm de separación entre emisor y receptor, ya que un estudio anterior con el software *gprMax* y esta antena así lo mostraba (Botella, 2018).

5.1.1 Calibración de la emisión al aire

El primer paso de la calibración consistió en generar un modelo numérico que emitiera al aire. Para ello fue necesario programar el siguiente código que sirviera para introducirlo en el software *gprMax* (Figura 5.2). El dominio de estudio era de 40 cm x 40 cm x 40 cm y la antena se colocó en el centro geométrico de la figura, teniendo por debajo de ella una *box* de aire de 12 cm.

```

Aire.txt
#title: A-scan for air
#domain: 0.400 0.400 0.400
#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 7e-9

#waveform: ricker 1 2e9 mi_ricker
#hertzian_dipole: z 0.175 0.120 0.200 mi_ricker
#rx: 0.225 0.120 0.200

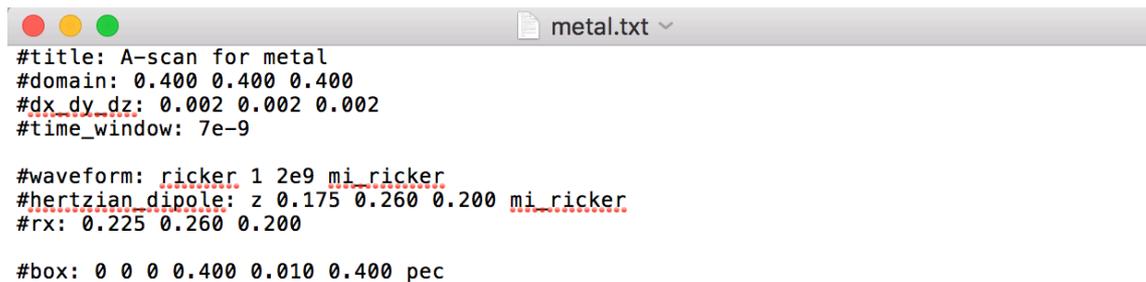
#box: 0 0 0 0.400 0.120 0.400 free_space

#geometry_view: 0 0 0 0.400 0.400 0.400 0.002 0.002 0.002 air n
    
```

Figura 5.2 Código para la generación del modelo numérico de la emisión al aire con una antena de 2 GHz

Como se observa en la Figura 5.2, se empleó una *box* en la que el material es aire (*free_space*), cuyas características ya están pre-programadas en el software *gprMax*. Como las ondas no se van a reflejar en ningún lado, sino que van a actuar en un espacio semi-infinito, las dimensiones de la *box* en este caso no son determinantes, pero si necesarias pues es necesario establecer unos límites físicos que el programa reconozca. Dado que de esta forma no se producen reflexiones, fue necesario colocar un reflector metálico en la base del dominio para así obtenerlas. Con el tiempo de llegada de esta reflexión y conocida la longitud de la trayectoria de esta onda reflejada, se calcula la velocidad que ha de ser aproximadamente 30 cm/ns. Todo ello nos permitiría comprobar que los modelos numéricos estaban correctamente generados.

Para poder realizar dicha prueba, se colocó un reflector metálico de 1 cm de grosor generando otra *box*, en este caso con las características de un reflector metálico pre-programadas en el software como *pec* (Figura 5.3). Hay que tener en cuenta que si no se indica nada el software entiende que el medio por el que viajan las ondas es el aire y por tanto no fue necesario añadir una *box* de aire.



```
#title: A-scan for metal
#domain: 0.400 0.400 0.400
#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 7e-9

#waveform: ricker 1 2e9 mi_ricker
#hertzian dipole: z 0.175 0.260 0.200 mi_ricker
#rx: 0.225 0.260 0.200

#box: 0 0 0 0.400 0.010 0.400 pec
```

Figura 5.3 Código para la generación del modelo numérico de la emisión al aire con una antena de 2 GHz en la que se colocó un reflector metálico bajo la muestra

En el caso de la medición experimental, la ventana de medición tenía un rango de 7 ns y estaba representada por 512 samples, mientras que en nuestra modelización numérica lo estaba por medio de 1818 samples. La antena estaba situada en el centro geométrico de la figura. Estas dos características serán igual para el resto de las mediciones.

5.1.2 Calibración de la propagación por el interior del hormigón

Dado que el material a estudio era el hormigón, en este apartado se estudió la propagación de las ondas sobre un bloque de hormigón de 40 cm x 20 cm x 40 cm, cuyas características dieléctricas eran: una permitividad dieléctrica relativa de valor 5 y conductividad 0. Estos valores genéricos son los normalmente encontrados en el hormigón endurecido seco (véase apartado 4.2.2) y que nos

sirven de control para poder comprender inicialmente cómo van a ser los registros que se generaron.

Para poder programar este escenario, con un material que cumpliera estas condiciones fue necesario añadir en el archivo ejecutable en el software el comando:

```
#material: 5 0 1 0 concrete
```

Con ello se definieron las características del material introducido y con el comando

```
#box: 0 0.010 0 0.400 0.210 0.400 concrete
```

se indicaba la posición en la que se ubicaba el bloque de hormigón. Debajo de este se colocó un reflector metálico por medio del comando:

```
#box 0 00 0.40 0.01 0.40 pec
```

de igual forma que en el estudio anterior, para poder comprobar la reflexión sobre este material.

Ahora bien, el estudio se realizó en dos pasos, el primero de ellos fue diseñar el código necesario para que todas aquellas reflexiones que se fueran a producir estuvieran por separado. Para ello, fue necesario separar la antena 15 cm del bloque de hormigón (Figura 5.4). El objetivo era obtener en primer lugar la onda directa como consecuencia de la emisión entre el emisor y el receptor. En segundo lugar, deberíamos obtener la reflexión como consecuencia del cambio de propiedades dieléctricas que se produciría en la interfaz aire-hormigón. Por último, se debía recibir correctamente la reflexión producida en la interfaz hormigón-metal debido de nuevo al cambio de propiedades dieléctricas. Dado que se conocían de antemano las propiedades de todos los materiales, esto nos permitiría comprobar que el modelo numérico se había generado correctamente.

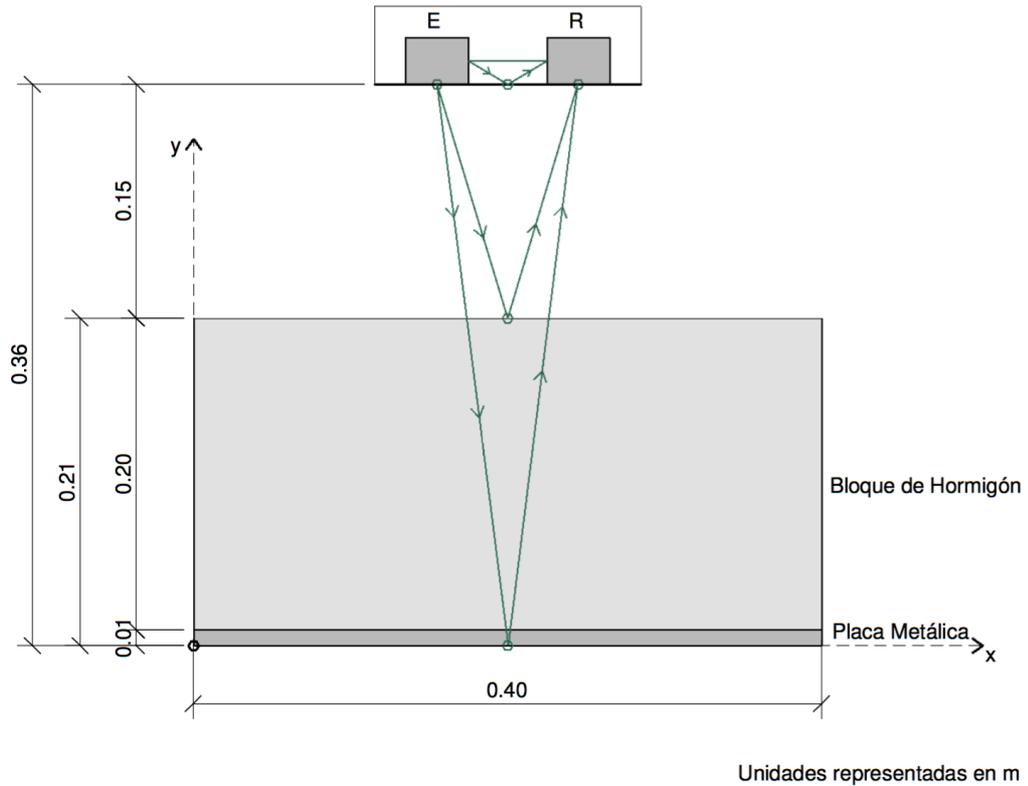


Figura 5.4 Esquema de propagación de ondas al emitir a 15 cm del bloque de hormigón.

Como la antena estaba separada del bloque de hormigón 15 cm, en el código que había que introducir al software, había que asignar un valor Y igual a 36 cm (marcados en rojo en la Figura 5.5), ya que había que contar con el centímetro de la placa metálica para la reflexión y los 20 del bloque de hormigón más los 15 cm de separación. Finalmente el código desarrollado se presenta en la Figura 5.5.

```

3Horm_Sep.txt
#title: A-scan for concrete
#domain: 0.400 0.400 0.400
#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 7e-9

#material: 5 1e-4 1 0 concrete_dry

#waveform: ricker 1 2e9 mi_ricker
#hertzian_dipole: z 0.175 0.360 0.200 mi_ricker
#rx: 0.225 0.360 0.200

#box: 0 0.010 0 0.400 0.210 0.400 concrete
#box: 0 0 0 0.400 0.010 0.400 pec

#geometry_view: 0 0 0 0.400 0.400 0.400 0.002 0.002 0.002 air n
    
```

Figura 5.5 Código para la generación del modelo numérico de al propagarse por el interior del hormigón, colocando la antena a una distancia de 15 cm.

Una vez identificadas las reflexiones y los máximos que componían estas señales, el siguiente paso era simular un caso más real, es decir, colocando la antena sobre el bloque de hormigón (Figura 5.6) y comprobar cuáles de los máximos del caso anterior se podían identificar y eran más representativos para registrar las velocidades de propagación.

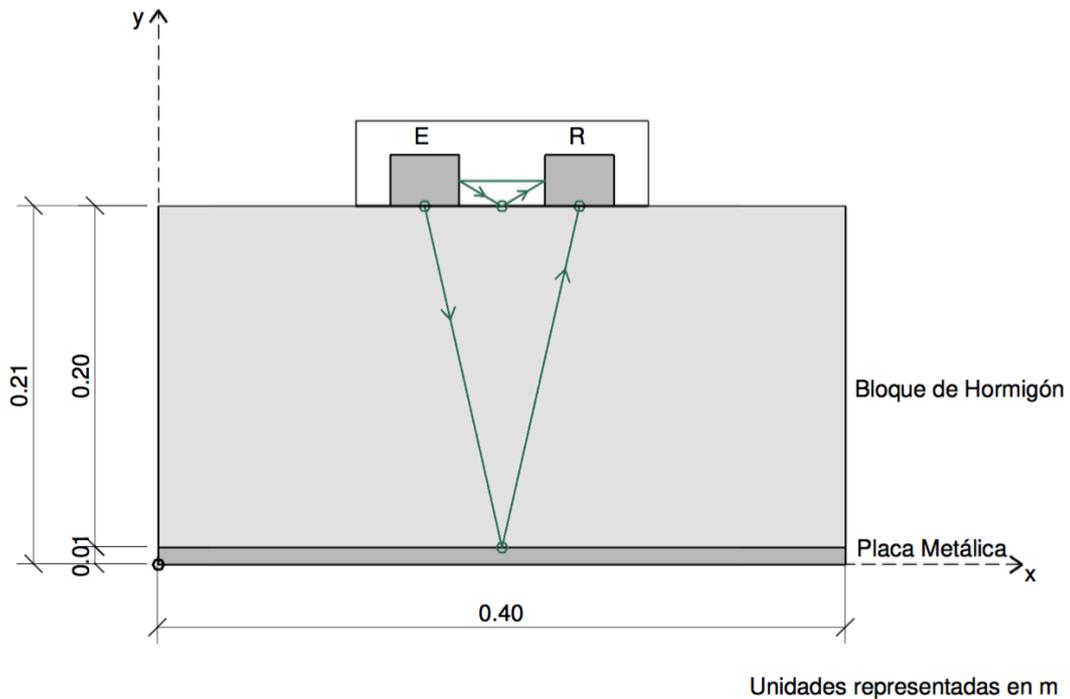
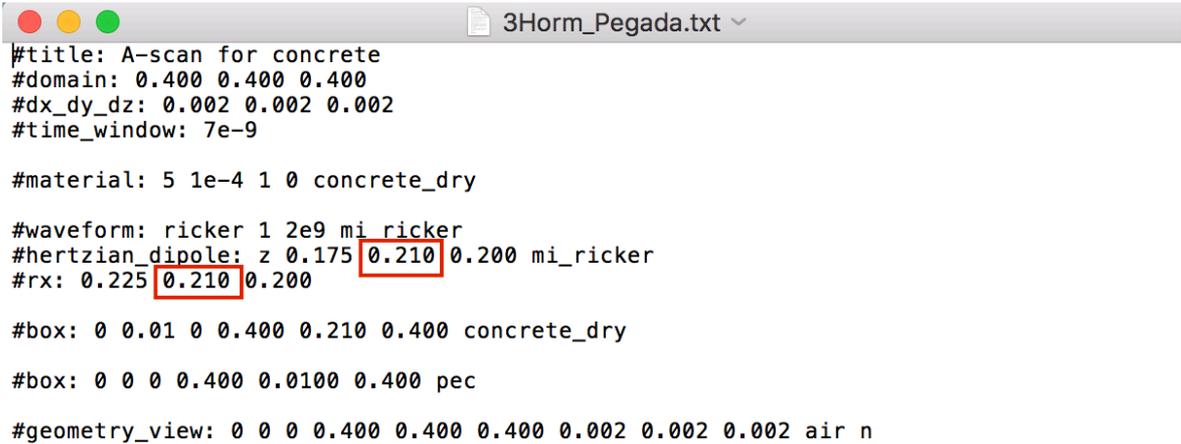


Figura 5.6 Esquema de propagación de ondas al emitir con la antena pegada al bloque de hormigón

En este caso el código necesario para generar el modelo numérico de la propagación se presenta en la Figura 5.7. La antena se colocó a una distancia de 21 cm en el eje Y porque está pegada al bloque de hormigón, valores marcados en rojo en la Figura 5.7.



```

#title: A-scan for concrete
#domain: 0.400 0.400 0.400
#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 7e-9

#material: 5 1e-4 1 0 concrete_dry

#waveform: ricker 1 2e9 mi ricker
#hertzian_dipole: z 0.175 0.210 0.200 mi_ricker
#rx: 0.225 0.210 0.200

#box: 0 0.01 0 0.400 0.210 0.400 concrete_dry

#box: 0 0 0 0.400 0.0100 0.400 pec

#geometry_view: 0 0 0 0.400 0.400 0.400 0.002 0.002 0.002 air n

```

Figura 5.7 Código para la generación del modelo numérico de al propagarse por el interior del hormigón, colocando la sobre el bloque de hormigón

5.1.3. Calibración del tamaño mínimo de muestra del hormigón

Tal y como se ha visto en el apartado 2.6 la resolución vertical es la distancia mínima que debe haber entre dos medios de propiedades dieléctricas diferentes para que se identifiquen por separado. En el apartado 2.6, se indican varios criterios que actualmente están establecidos para calcular la resolución vertical. Es por ello que, dado que en este estudio se trabajó con un material concreto, se consideró necesario conocer de forma experimental por medio de la generación de modelos numéricos, cuál de los criterios se ajustaba más a las condiciones del caso de estudio de este trabajo.

Para ello se diseñó un código que permitiera evaluar cuál era el tamaño mínimo del bloque de hormigón que diera lugar a la identificación de las reflexiones por separado. De hecho, al ir disminuyendo la altura del bloque llegará un momento en el que no se puedan identificar bien y esto nos establecería el límite de la resolución vertical (Figura 5.8)

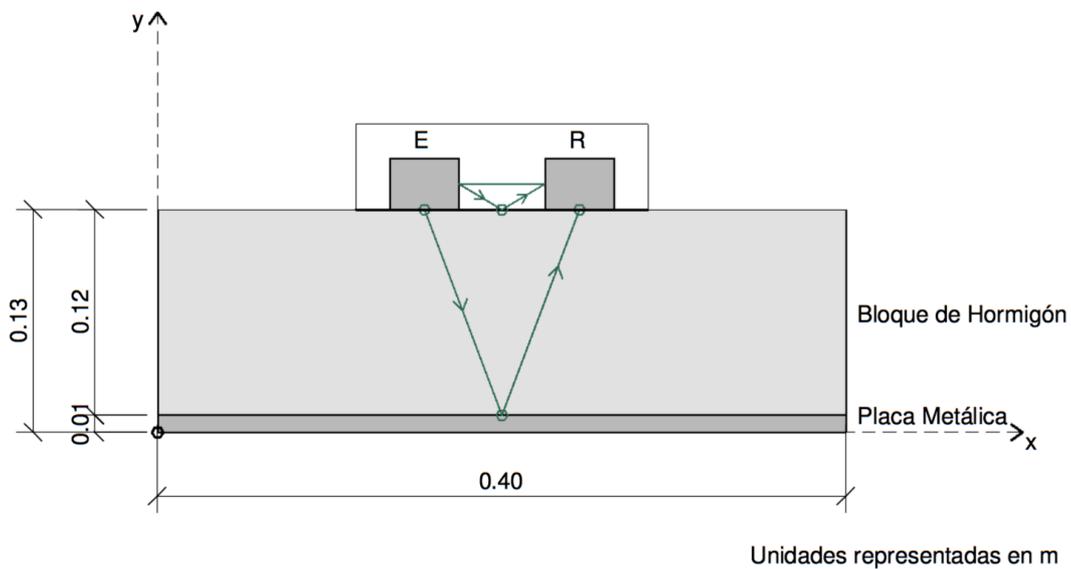
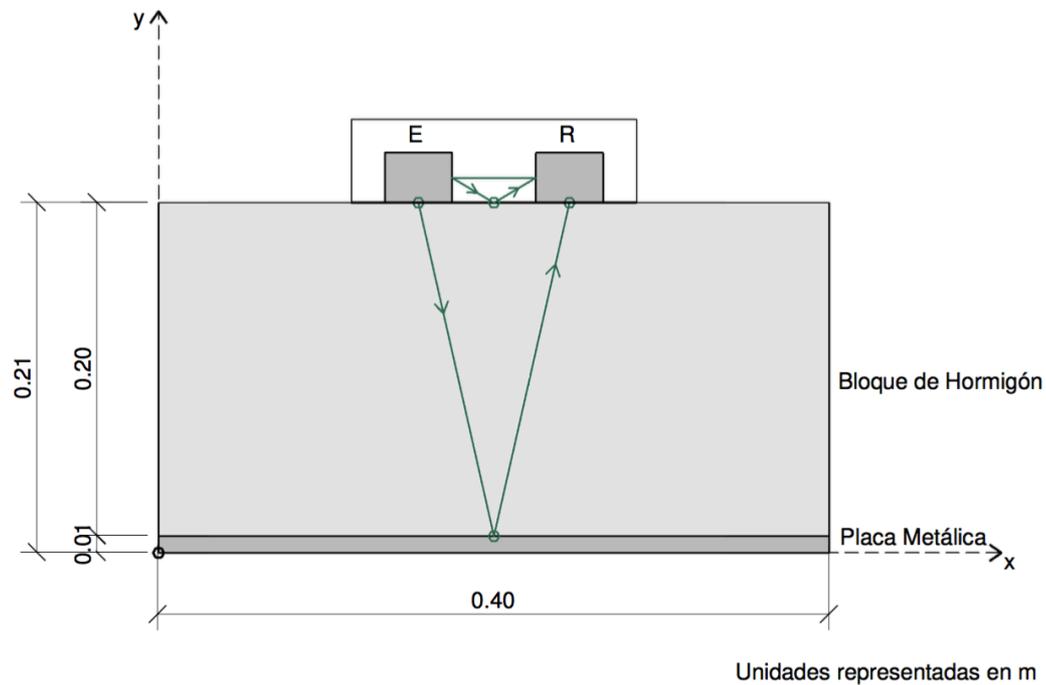
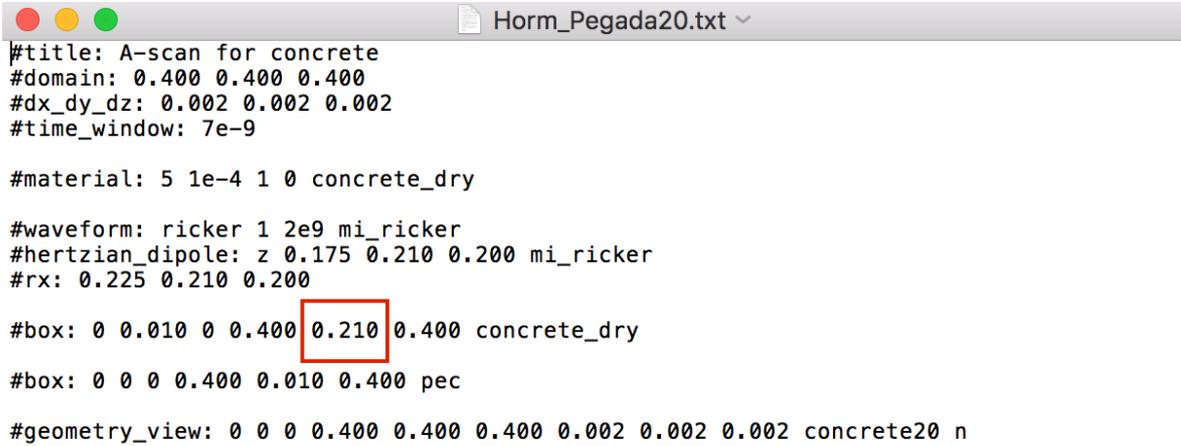


Figura 5.8 Geometría física del modelo generado para estudio de la resolución vertical en un bloque de hormigón

Partíamos de un bloque de hormigón seco, cuyas características dieléctricas eran permitividad dieléctrica 5 y conductividad 0 y un tamaño de bloque de 20 cm de altura, la cual fuimos disminuyendo hasta que ya no podíamos identificar bien las señales. Por lo tanto, en este caso lo que se iba variando era el valor Y del bloque de hormigón marcado en rojo en la Figura 5.9. Para el caso de una altura de

20 cm el valor Y que se debe de poner es 21 cm, ya que se debe de contar con el reflector metálico de 1 cm.



```
#title: A-scan for concrete
#domain: 0.400 0.400 0.400
#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 7e-9

#material: 5 1e-4 1 0 concrete_dry

#waveform: ricker 1 2e9 mi_ricker
#hertzian_dipole: z 0.175 0.210 0.200 mi_ricker
#rx: 0.225 0.210 0.200

#box: 0 0.010 0 0.400 0.210 0.400 concrete_dry
#box: 0 0 0 0.400 0.010 0.400 pec

#geometry_view: 0 0 0 0.400 0.400 0.400 0.002 0.002 0.002 concrete20 n
```

Figura 5.9 Código para la generación del modelo numérico del estudio de la resolución vertical en un bloque de hormigón

5.2. Efecto del avance del frente del agua en probetas de hormigón en las señales de georradar con una antena de 2 GHz

Una vez realizada la calibración de la antena e identificadas las señales que se generaran con este tipo de antena el siguiente paso consistió en realizar un estudio en probetas de hormigón para ver el efecto del avance del agua sobre el hormigón. Para ello se realizaron dos análisis, el primero de ellos, se colocaba la antena en la misma cara donde se producía la inmersión en el agua, y el otro caso, cuando la antena se colocaba en la cara opuesta a la que se producía la inmersión (Figura 5.10).

En ambos casos la antena se colocó en el centro geométrico del bloque de hormigón y, debido a la inmersión parcial del bloque de hormigón en agua, teníamos dos tipos diferentes de hormigón, uno seco y el otro húmedo con sus propiedades dieléctricas correspondientes.

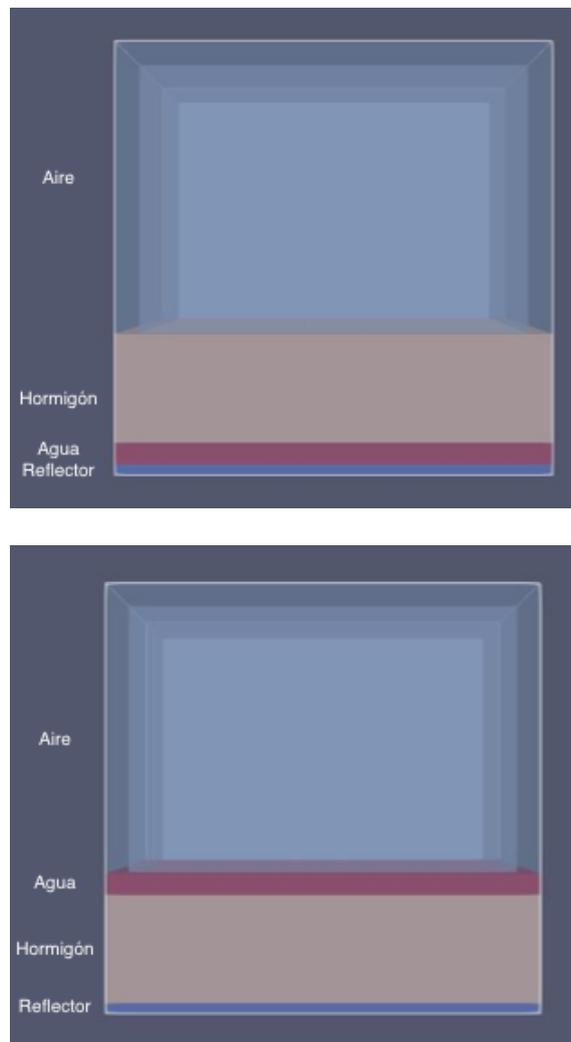


Figura 5.10 Esquema de los bloques de hormigón a estudio cuando se introducen parcialmente en agua

5.2.1. Caso: Cuando la antena se coloca en la cara opuesta que se introduce en agua

En este apartado se estudió el efecto del avance del frente del agua en el hormigón al sumergir las probetas de hormigón parcialmente en agua colocando la antena en la cara opuesta en la que se produce la inmersión. De esta forma el agua iba ascendiendo por capilaridad. El objetivo final era poder conocer cuál era el tamaño mínimo del bloque de hormigón húmedo para poder identificarlo con el georradar.

Por todo ello, en este caso debíamos partir de dos tipos diferentes de hormigón: hormigón seco y hormigón húmedo, y con ello dos box de propiedades dieléctricas diferentes debido al contenido de agua:

```
#box: 0 0.03 0 0.400 0.130 0.400 concrete_dry
```

```
#box: 0 0.010 0 0.400 0.03 0.400 concrete_wet
```

Además de la box del reflector metálico (*pec*) para poder comprobar la reflexión sobre el material (Figura 5.11).

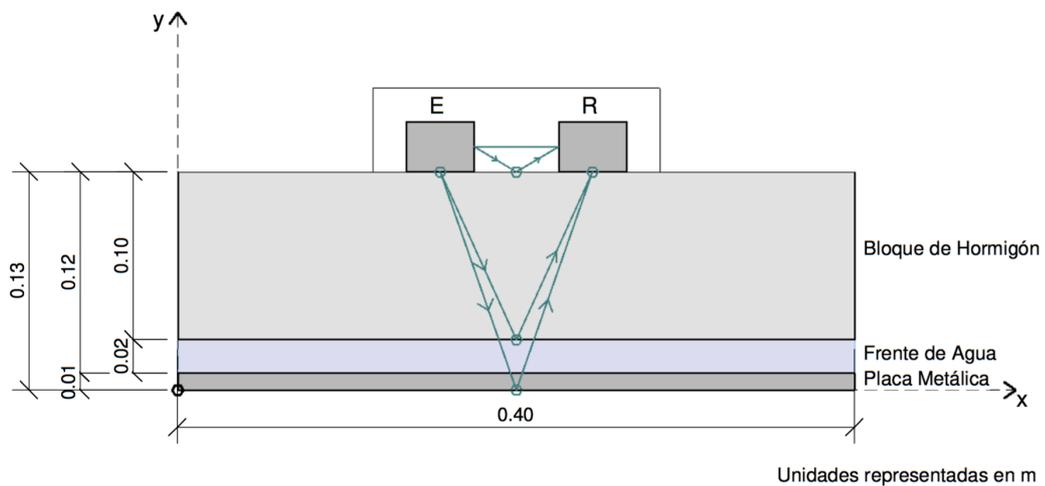


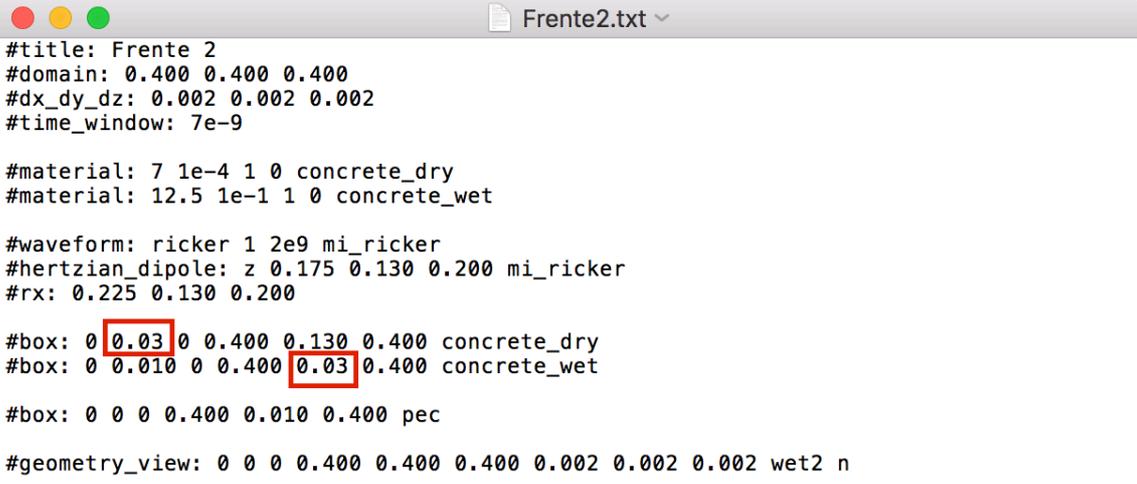
Figura 5.11 Geometría física del modelo generado para estudio del avance del agua sumergido parcialmente

Partimos de un bloque de hormigón seco de 12 cm de altura, y cuyas propiedades dieléctricas eran permitividad dieléctrica 7 y conductividad 10^{-4} S/m, al que había que ir restándole tamaño como consecuencia del avance del frente del

agua. Esto se realizó por medio de la introducción en el código de la *box concrete wet*, cuya permitividad dieléctrica era igual a 12,5 y de conductividad de 10^{-1} S/m

La elección de estas propiedades dieléctricas del hormigón, se realizó para poder posteriormente compararlas con un caso real, cuyas características eran similares a las del hormigón modelado en este apartado

Para ello en el código creado fue necesario ir variando la altura del bloque de hormigón seco, su valor Y , y en el hormigón húmedo se va cambiando el valor Y de su localización, ambos valores marcados en rojo en la Figura 5.12.



```
#title: Frente 2
#domain: 0.400 0.400 0.400
#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 7e-9

#material: 7 1e-4 1 0 concrete_dry
#material: 12.5 1e-1 1 0 concrete_wet

#waveform: ricker 1 2e9 mi_ricker
#hertzian_dipole: z 0.175 0.130 0.200 mi_ricker
#rx: 0,225 0.130 0.200

#box: 0 0.03 0 0.400 0.130 0.400 concrete_dry
#box: 0 0.010 0 0.400 0.03 0.400 concrete_wet

#box: 0 0 0 0.400 0.010 0.400 pec

#geometry_view: 0 0 0 0.400 0.400 0.400 0.002 0.002 0.002 wet2 n
```

Figura 5.12 Código para la generación del modelo numérico del estudio del avance del agua al sumergir la probeta de hormigón, para un frente de agua de 2 cm.

5.2.2. Caso: Cuando la antena se coloca en la misma cara a la que se introduce en agua

En este caso, partimos del mismo escenario que en el caso anterior, ahora bien la diferencia radicó en que la antena se colocó sobre el hormigón húmedo y no sobre el hormigón seco. Seguimos teniendo dos tipos diferentes de hormigón, hormigón seco y el hormigón húmedo cada uno con sus propiedades dieléctricas correspondientes, para el hormigón seco una permitividad dieléctrica de 7 y para el húmedo 12,5 y una conductividad de 10^{-4} S/m para el hormigón seco y de 10^{-1} S/m para el húmedo.

Partimos de un bloque de hormigón seco de 12 cm de altura y se analizó la evolución del frente del agua conforme iba ascendiendo. Se comenzó con un frente de agua de un espesor de 0,5 cm y que finalmente llegó a alcanzar los 11 cm (Figura 5.13).

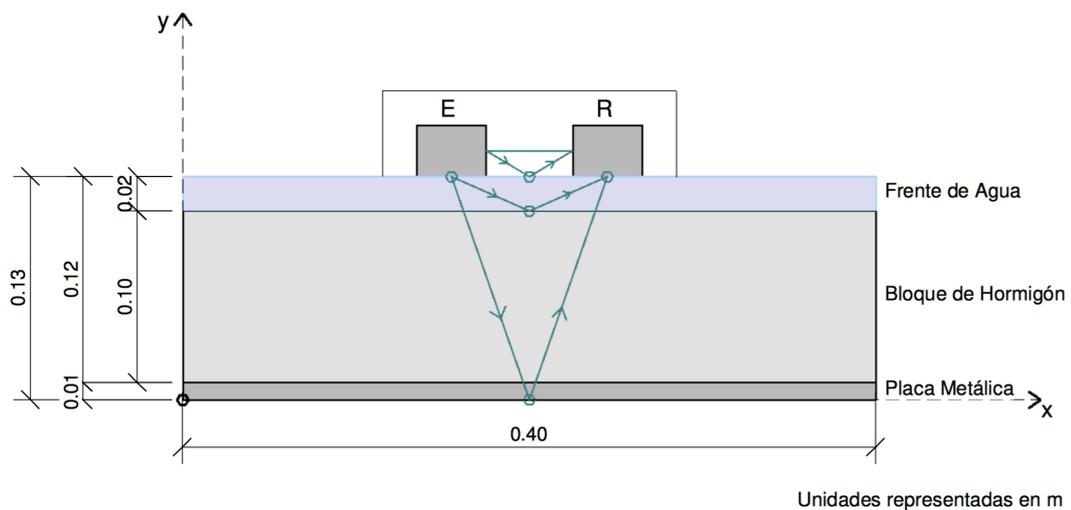


Figura 5.13 Geometría física del modelo generado para estudio del avance del agua sumergido parcialmente cuando la antena se colocó en la misma zona de la probeta que se produce la inmersión.

Por tanto, lo que se iba variando en este caso era el valor Y del bloque húmedo de hormigón (la altura de dicho bloque), ya que el frente del agua empezaba con un espesor de 0,5 cm, e iba aumentando hasta los 11 cm (marcados en rojo en la Figura 5.14).

```
Frente2.txt
#title: Frente 2
#domain: 0.400 0.400 0.400
#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 7e-9

#material: 7 1e-4 1 0 concrete_dry
#material: 12.5 1e-1 1 0 concrete_wet

#waveform: ricker 1 2e9 mi_ricker
#hertzian_dipole: z 0.175 0.130 0.200 mi_ricker
#rx: 0.225 0.130 0.200

#box: 0 0.01 0 0.400 0.110 0.400 concrete_dry
#box: 0 0.110 0 0.400 0.13 0.400 concrete_wet

#box: 0 0 0 0.400 0.010 0.400 pec

#geometry_view: 0 0 0 0.400 0.400 0.400 0.002 0.002 0.002 wet2 n
```

Figura 5.14 Código para la generación del modelo numérico del estudio del avance del agua al sumergir la probeta de hormigón, para un frente de agua de 2 cm al colocar la antena en el lado de la inmersión.

5.2.3. Comparación con una experiencia real: descripción del estudio experimental

Una vez conocidas las limitaciones para determinar el avance del frente de agua en el hormigón, el siguiente paso lógico es la validación del método. Para ello fue necesario, por medio del empleo de señales adquiridas en un experimento anterior, comprobar que el algoritmo de análisis desarrollado era correcto y determinar las propiedades dieléctricas de un bloque de hormigón en el que por medio de la capilaridad había absorbido agua y presentaba un frente de agua.

Este apartado en consecuencia se desarrolla en tres partes. En primer lugar, se describe cómo se fabricaron las probetas de hormigón y cómo se tomaron los registros en el estudio anterior. En segundo lugar, se describe el diseño experimental generado en este Trabajo Final de Máster para obtener las propiedades dieléctricas de la fase preliminar cuando el hormigón estaba seco. Y en tercero, y último, se detalla el procedimiento diseñado en este Trabajo Final de Máster para obtener las propiedades dieléctricas cuando el hormigón tenía un frente de agua.

Fabricación de probetas de hormigón y toma de registros con georradar

Para llevar a cabo el estudio experimental se fabricaron probetas de hormigón en masa con un tamaño de 20 cm x 20 cm x 12 cm (ancho, largo, alto) y se empleó un cemento CEM I 42,5 R/SR y una relación de agua-cemento de 0,65.

El tamaño de la probeta, fue elegido para tratar de evitar el efecto de borde (las ondas que se reflejan en el contorno de la probeta) durante el proceso de adquisición de datos con el georradar y tener suficiente resolución vertical para poder identificar las reflexiones en las interfaces por separado. La antena empleada era de 2 GHz con un tamaño físico de 90 mm x 90 mm, colocada en el centro de la probeta. Para la fabricación de estas probetas fue necesario fabricar unos moldes específicos con paneles de madera unidos mediante tornillería (Figura 5.15a), con acabado interior de melanina, por lo que 5 de las 6 caras de la probeta tenían un acabado liso. Además, para la fabricación de las probetas se siguieron las indicaciones de preparación y llenado de moldes, compactado del hormigón, nivelación y curado del hormigón de la norma UNE-EN 12390-2 (2009).



Figura 5.15 (a) Moldes para la fabricación de las probetas y (b) curado del hormigón

Después, las probetas se cubrieron con un film de plástico durante 2 días para evitar la evaporación de agua (Figura 5.16). A continuación, se desmoldaron y se introdujeron en una cámara de curado húmedo durante 28 días con el fin de estabilizar el fenómeno de hidratación según la normativa vigente que regula la fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia UNE-EN 12390-2 (2009).



Figura 5.16 Cubrición de las probetas con film plástico durante 2 días y desmoldado de probetas de hormigón

Después de sacar las probetas de la cámara de curado húmedo se dibuja en ambas caras de la probeta la cuadrícula con los 9 puntos de medición (Figura 5.17a), que se emplearán para la adquisición de datos con el georradar (cuadrícula de 50 mm x 50 mm), siendo los vértices del cuadrado (los puntos 1, 3, 7 y 9) los márgenes donde se colocará la antena y el punto 5 el centro geométrico de la cara de la probeta (Figura 5.17b).

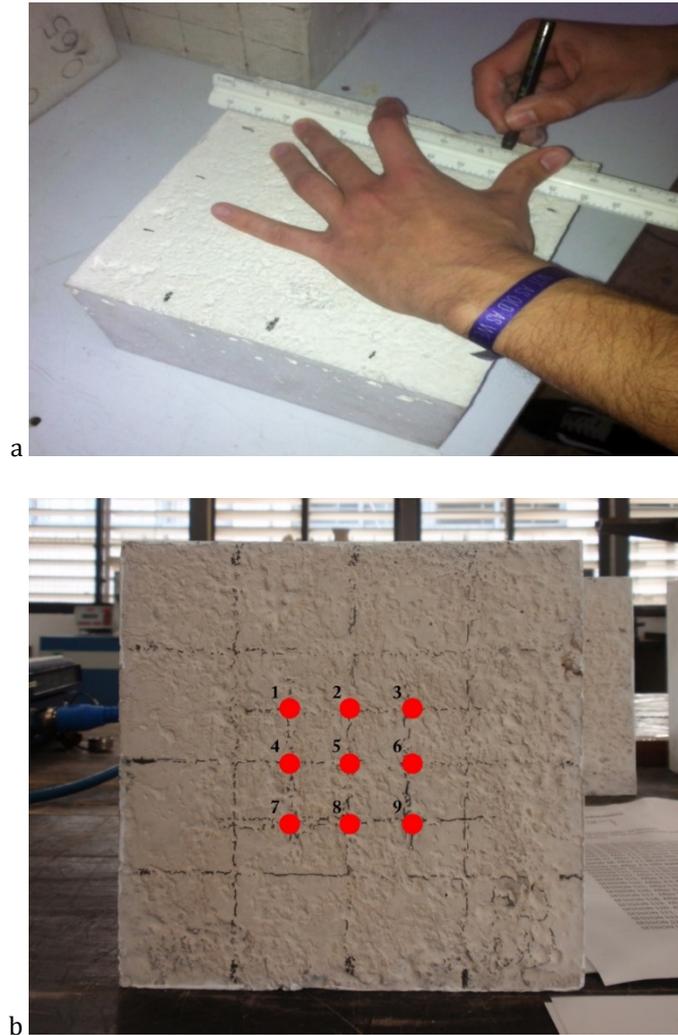


Figura 5.17 (a) Dibujo de cuadrícula de referencia para mediciones con georradar y (b) cuadrícula de 50 x 50 mm de referencia

Unas semanas antes de la adquisición de datos mediante el georradar se inicia el proceso de secado de las probetas (Figura 5.18a). Introduciéndolas en un horno a 105°C para secarlas (Figura 5.18a). Se comprueba la masa regularmente hasta que la pérdida de masa sea menor al 0,1% y por tanto se consideran completamente secas. Una vez secas se envuelven en film plástico para evitar la absorción de humedad del ambiente, hasta el momento en el que se realizan la adquisición de registros con georradar



Figura 5.18 (a) Horno de secado de las probetas y (b) tanda de secado de 8 probetas

Adquisición de registros con georradar

El equipo utilizado para la adquisición de registros en este estudio fue el modelo SIR-3000 (Figura 5.19a) de la marca Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI). Este equipo dispone de una memoria interna de 256 Mb para almacenamiento de información, con opción de usar una tarjeta CF de hasta 1 GB, procesador de 32 bits Intel Strong Arm RISC a 206 MHz, pantalla de 8,4 pulgadas y TFT de resolución 800 x 600 a color con 64000 colores. La antena que se empleó para realizar la adquisición de registros fue una antena de 2 GHz de frecuencia central.

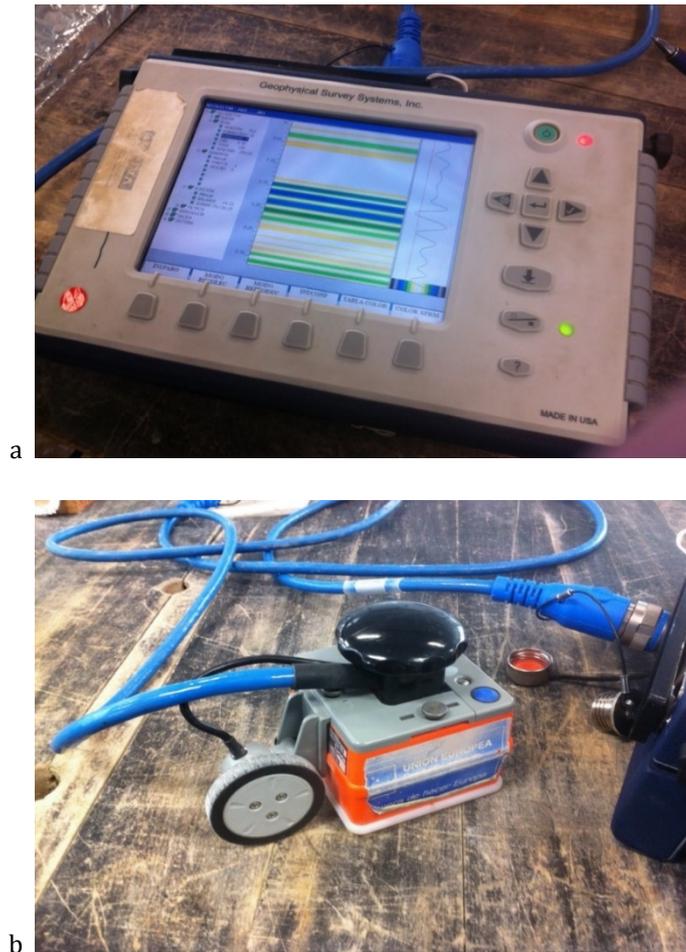


Figura 5.19 (a) Equipo de georradar modelo SIR-3000 y (b) antena de 2GHz montada con odómetro de GSSI

El primer paso en la toma de registros de georradar es el montaje del equipo de georradar, y para ello se situó la antena emitiendo al aire, ya que era necesario este registro para normalizar las amplitudes durante el procesado posterior de registros.

El siguiente paso fue la preparación del dispositivo para realizar las mediciones con el georradar. Para ello se preparó una base plana y estable, con una capa de material altamente reflectante. Se utiliza un tablero de madera con acabado de melamina sobre la mesa de trabajo, colocando encima de este una capa de papel de aluminio para obtener una clara reflexión (Figura 5.20). Se continúa con la medición de la masa de todas las probetas en seco.



Figura 5.20 Colocación de la probeta sobre papel de aluminio para la medición con georradar

Se tomaron registros de todas las probetas en seco, tanto colocando la antena en la cara sometida a inmersión, como en la cara opuesta. Posteriormente, todas las probetas se introdujeron en 2 cm de agua y se tomaron registros con georradar a intervalos de 20 minutos en cada una de las probetas, con las dos posiciones opuestas de las antenas.

Para más información sobre el programa experimental desarrollado y los resultados experimentales obtenidos se puede consultar Fernández-Castilla (2015).

Fase 1: diseño experimental para la determinación de las propiedades dieléctricas de los registros experimentales

El primer paso era determinar las propiedades dieléctricas de las probetas del estudio experimental. Para ello se debían tomar lectura de los tiempos de llegada de cada uno de los máximos de las señales experimentales. A partir de ellas se debía calcular cuál era la permitividad dieléctrica cuando las probetas estaban secas y cuando las probetas habían estado en inmersión y el frente de agua había avanzado unos milímetros.

Los valores de las propiedades dieléctricas obtenidas sirven como fundamento para modelar la propagación de las ondas electromagnéticas en las mismas condiciones que las del diseño experimental, con la misma geometría y propiedades. De esta forma, al generar los modelos numéricos se podía comprobar si estos estaban correctamente desarrollados y representaban de forma fiable la realidad física.

En el programa experimental de Fernández-Castilla (2015) se trabajó con 11 probetas. Por una parte, se contaba con los registros de georradar cuando las probetas estaban secas y por otra cuando las probetas habían estado un

determinado tiempo en inmersión. En estos intervalos de tiempo determinados las probetas eran extraídas del agua y se realizaban las mediciones de la masa y las mediciones con georradar.

Las características de las probetas que se emplearon para posteriormente modelar sus propiedades electromagnéticas y compararlas con los registros experimentales se detallan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Características de las probetas para modelar sus propiedades electromagnéticas

Probeta	Tiempo inmersión (min)	Dimensión del frente del agua (cm)	Coefficiente absorción (%)
12	240	3,11	1,12
13	260	3,58	1,33
14	305	3,56	1,42
15	325	3,65	1,51
16	345	3,94	1,64
17	365	4,09	1,64
18	385	4,60	1,79
19	405	4,22	1,77
20	425	4,17	1,80
21	445	4,42	1,80
22	465	4,66	1,90

Fase 2: diseño experimental para la generación de los modelos numéricos para la determinación de las propiedades dieléctricas de las señales experimentales

Una vez conocidas las propiedades dieléctricas a partir de las lecturas de tiempo de los máximos de las ondas, con esas mismas propiedades se generaron los modelos numéricos. Para ello el primer paso era generar el modelo numérico con la misma geometría que el estudio experimental, es decir, partíamos de un bloque de hormigón seco de 12 cm de altura (Figura 5.21), y queríamos determinar las propiedades dieléctricas (la permitividad) del bloque seco. En el caso del hormigón seco, tal y como comprobó Botella (2018), la conductividad es de 10^{-4} S/m. Además, en el código desarrollado la antena se colocó sobre el hormigón seco, tal y como se realizaron los registros de forma experimental.

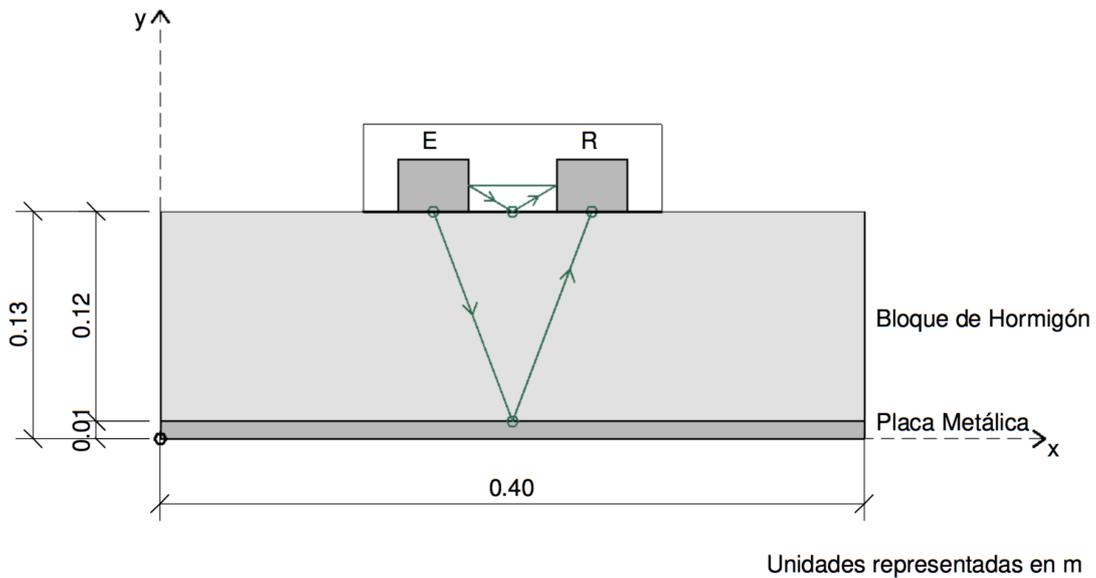


Figura 5.21 Geometría física del modelo generado para la determinación de las propiedades dieléctricas cuando las probetas estaban secas.

Fue necesario calcular la permitividad dieléctrica de los registros experimentales de cada una de las probetas ya que presentaban ligeras variaciones. Es por ello que en el código creado fue necesario ir variando la permitividad del bloque de seco de hormigón, valor marcado en rojo en la Figura 5.22.

```

FrenteA.txt — Modificado v
#title: Frente Aseco
#domain: 0.400 0.400 0.400
#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 7e-9

#material: 6.91 1e-4 1 0 concrete_dry

#waveform: ricker 1 2e9 mi_ricker
#hertzian_dipole: z 0.175 0.130 0.200 mi_ricker
#rx: 0.225 0.130 0.200

#box: 0 0.010 0 0.400 0.1300 0.400 concrete_dry

#box: 0 0 0.400 0.010 0.400 pec

#geometry_view: 0 0 0 0.400 0.400 0.400 0.002 0.002 0.002 wetAs n|
    
```

Figura 5.22 Código para la generación del modelo numérico del estudio para la determinación de las propiedades dieléctricas cuando las probetas estaban secas.

A continuación, una vez generados los modelos numéricos de las probetas secas, el siguiente paso era la generación de los modelos cuando avanzaba el frente del agua. Como se aprecia en la tabla 5.2, cuanto más tiempo se encontraban en inmersión las probetas mayores eran las dimensiones del frente de avance del agua y, por tanto, mayor la cantidad de agua absorbida. Es por ello que en estos modelos numéricos debíamos partir de dos *box*, una que representara el hormigón

seco y otro el húmedo, cuyas propiedades dieléctricas se habían determinado por medio de los registros experimentales. Y, además, la antena estaba colocada sobre el hormigón seco, siguiendo el dispositivo de registro experimental (Figura 5.23)

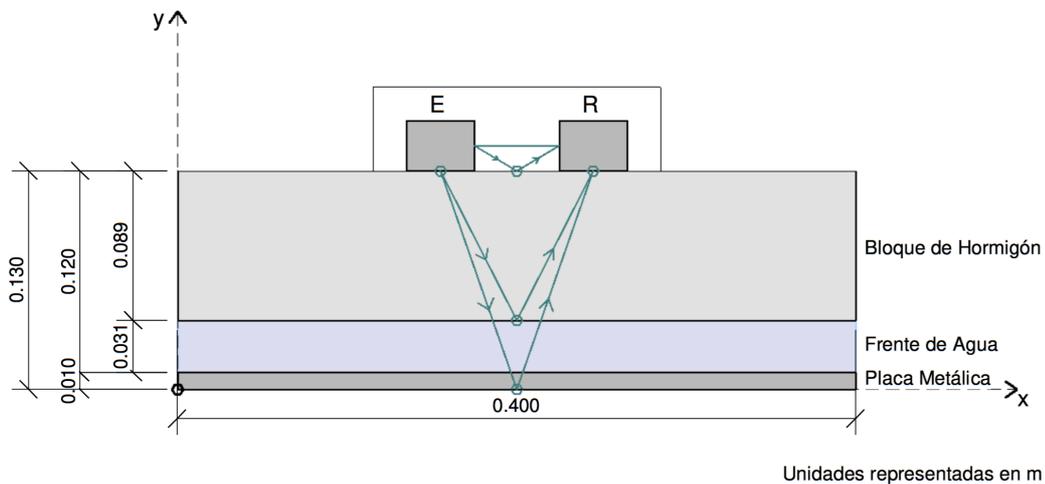


Figura 5.23 Geometría física del modelo generado para la determinación de las propiedades dieléctricas cuando las probetas estaban en inmersión.

Ahora bien, para desarrollar este programa experimental fue necesario ir variando la permitividad de ambos bloques de hormigón, de acuerdo a los valores obtenidos en cada probeta y además de los valores en el eje Y de los dos bloques, ya que la posición del frente de agua variaba dependiendo del tiempo de inmersión en agua, valores marcados en rojo en la Figura 5.24

```

#title: Frente A
#domain: 0.400 0.400 0.400
#dx dy dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 7e-9

#material: 6.91 1e-4 1 0 concrete_dry
#material: 13.15 1e-1 1 0 concrete_wet

#waveform: ricker 1 2e9 mi_ricker
#hertzian dipole: z 0.175 0.130 0.200 mi_ricker
#rx: 0.225 0.130 0.200

#box: 0 0.0411 0 0.400 0.1300 0.400 concrete_dry
#box: 0 0.0100 0 0.400 0.0411 0.400 concrete_wet

#box: 0 0 0 0.400 0.010 0.400 pec

#geometry_view: 0 0 0 0.400 0.400 0.400 0.002 0.002 0.002 wetA n|
    
```

Figura 5.24 Código para la generación del modelo numérico del estudio para la determinación de las propiedades dieléctricas cuando las probetas estaban en inmersión.

6. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

6.1 Principales parámetros electromagnéticos a estudio en las ondas modeladas.

La ecuación de onda sinusoidal monofrecuencial se ha definido en el apartado 4.1. Cabe destacar que las ondas generadas son señales complejas, y que las ecuaciones de ondas electromagnéticas son ecuaciones multifrecuencia compuestas por la superposición de varias ondas. Como ya se ha comentado anteriormente (véase apartado 4.1), a partir del análisis de las series de Fourier se pueden separar las distintas componentes frecuenciales que forman la onda recibida mediante el cálculo de la Transformada de Fourier (FFT). El resultado de este cálculo se denomina espectro, que representa la intensidad de cada una de las frecuencias. Este análisis aporta información complementaria de cómo se ve modificada la onda electromagnética cuando se propaga por un medio.

Por tanto, cuando registramos ondas electromagnéticas generadas por un georradar, de forma experimental o por modelaciones numéricas, los parámetros que se pueden medir al analizar las ondas registradas en el dominio del tiempo serán las amplitudes de ondas, A , registradas y sus tiempos de llegada, t . Cuando analizamos el dominio de la frecuencia podremos obtener las frecuencias que componen la señal y las variaciones que se producen por medio del cálculo del espectro.

A continuación, en la Figura 6.1 se presenta la traza típica modelada cuando se realiza la simulación de una medición con la antena de 2 GHz situada sobre la probeta de hormigón seca.

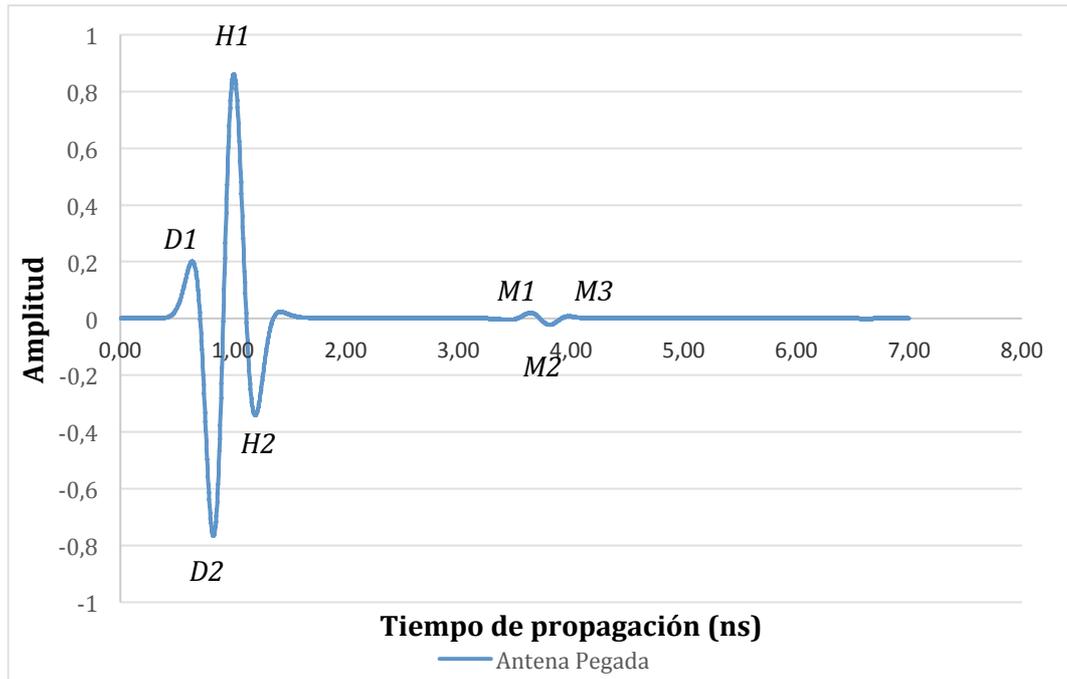


Figura 6.1 Traza modelada considerando que la antena está pegada sobre un bloque de hormigón seco

Todos los modelos numéricos creados seguían un mismo patrón de comportamiento, en el que se pueden identificar las siguientes señales: Onda directa, la onda reflejada por el cambio de propiedades dieléctricas entre el aire y el hormigón, llamada a partir de ahora onda hormigón y la onda reflejada en la interfaz hormigón-metal, que a partir de ahora denominaremos onda metal.

La onda directa, es la onda que viaja directamente entre emisor y receptor. La onda hormigón es la onda emitida por la antena que se refleja directamente sobre la superficie de la probeta. Esta es la primera reflexión que se registra y que debido al corto trayecto que recorre se recibe junto con la onda que se propaga por el aire entre el emisor y el receptor (Figura 6.2). La onda metal corresponde a la onda que se refleja tras atravesar toda la probeta. Se puede apreciar la diferencia de recorrido que efectúa cada onda en la Figura 6.2.

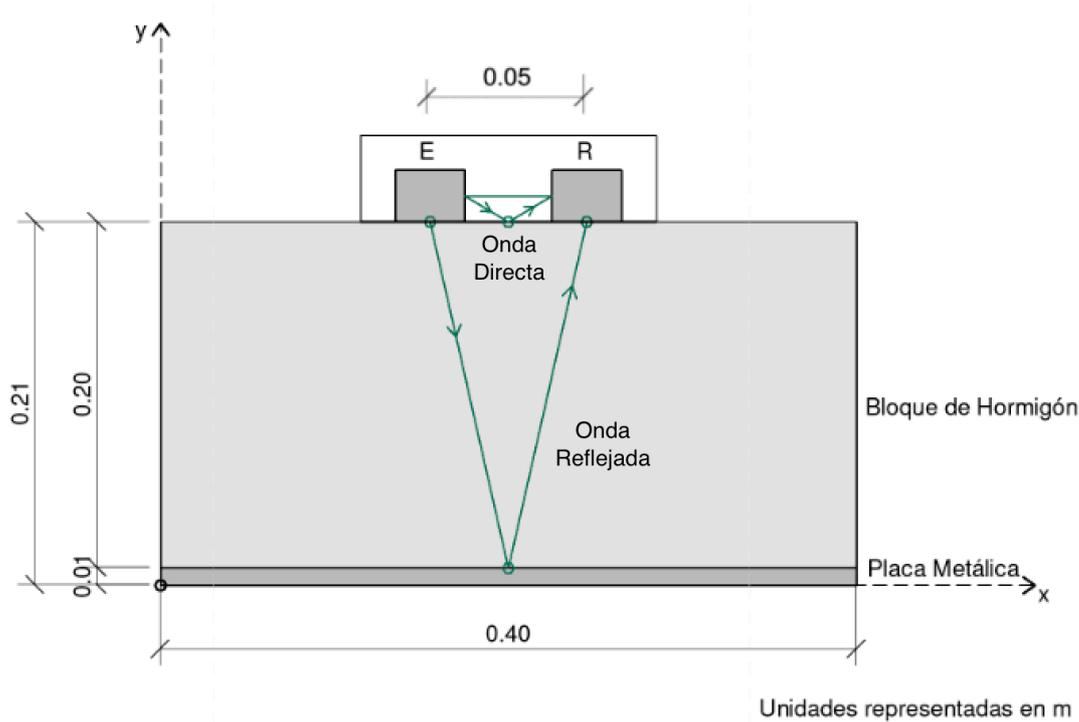


Figura 6.2 Esquema de la trayectoria de propagación de ondas en un bloque de hormigón, bajo el cual se coloca un reflector metálico

Una vez identificadas en las trazas la onda directa y las reflejadas se puede observar que cada uno de ellas estaba compuesta por una serie de picos positivos y negativos (Figura 6.1).

Según apuntan algunos autores Yelf y Yelf (2006) y Martínez-Sala et al. (2012a) es complicado establecer cuál de los picos que componen una onda es el que se debe elegir como representativo del tiempo de llegada inicial de la onda.

En el caso de la onda del hormigón, puesto que se trata de una superposición de la onda en el aire y la onda reflejada en la interfaz aire-hormigón, es muy complicado establecer cuál es el pico que indica la llegada de la segunda e incluso cuántos picos la componen. En cuanto a la onda del metal, al ser la onda que viaja por el interior del medio, sufre atenuación y variaciones por efecto del medio, es por ello, también, muy complicado estimar cuál es el pico representativo de su llegada. Por esta razón en este trabajo se consideró más apropiado calcular todas las velocidades con todos los intervalos posibles de tiempos de llegada de las ondas. Para esto, en primer lugar, se deberán analizar todas las combinaciones posibles de intervalos de diferencia de tiempos de llegada entre la onda directa y la reflejada.

Como se indica en la Figura 6.1 en la onda directa se identifican 2 picos ($D1$, $D2$), en la onda del hormigón también se identifican 2 picos ($H1$ y $H2$) y en la onda del metal 3 ($M1$, $M2$ y $M3$).

De esta forma, una vez localizados todos los picos que componen cada una de las ondas y sus tiempos de llegada se pueden calcular todos los intervalos de tiempo posibles entre estos. A partir de estos intervalos se puede calcular la velocidad de propagación de las ondas para cada uno de ellos mediante la siguiente expresión:

$$v = \frac{2 \cdot d}{\Delta t_D^R} = \frac{2 \cdot \sqrt{h^2 + \left(\frac{d_0}{2}\right)^2}}{\Delta t_D^R} \quad (\text{ec. 6.1})$$

siendo d la semidistancia que recorre la onda reflejada, d_0 la distancia entre emisor y receptor y h el espesor del medio (altura de la probeta).

De esta forma, para el estudio de los resultados obtenidos de las señales modeladas se analizarán las velocidades de propagación para cada una de las combinaciones de picos posibles, así como las amplitudes de energía de cada uno de los picos registrados.

A partir de las variaciones que se produzcan en estos parámetros, medidos en las ondas electromagnéticas registradas, se podrán estimar las variaciones de las propiedades electromagnéticas que se producen en el medio a estudio y, por ende, proporcionar información sobre las propiedades físicas del medio que se esté estudiando.

6.2 Estudios de calibración de la antena 2 GHz.

6.2.1 Calibración de emisión al aire

Resultados

El primer paso en el proceso de calibración, es la comparativa entre la señal del aire real (señal experimental) con la señal del aire generada por medio de la modelación numérica con el software *gprMax*. En la Figura 6.3 se presentan ambas señales. En ellas se puede identificar que la emisión al aire está compuesta por tres picos (*D1*, *D2* y *D3*). Estos tres picos corresponden con la onda directa, es decir, la onda que recorre la distancia más corta entre receptor y emisor, que transcurre por el interior de la antena.

Al realizar el estudio de la emisión al aire, registrada experimentalmente y modelada, a pesar de que las dos señales tienen el mismo tiempo de propagación 7 ns, el número de puntos (*samples*) que componen las señales, son diferentes. La ventana de medición de 7 ns en el caso del registro experimental son 512 *samples*, mientras que, en el caso del modelado numérico, el rango de la ventana está representada por 1818 *samples*, es por ello que antes de nada se tuvo que normalizar para poder comparar ambas señales.

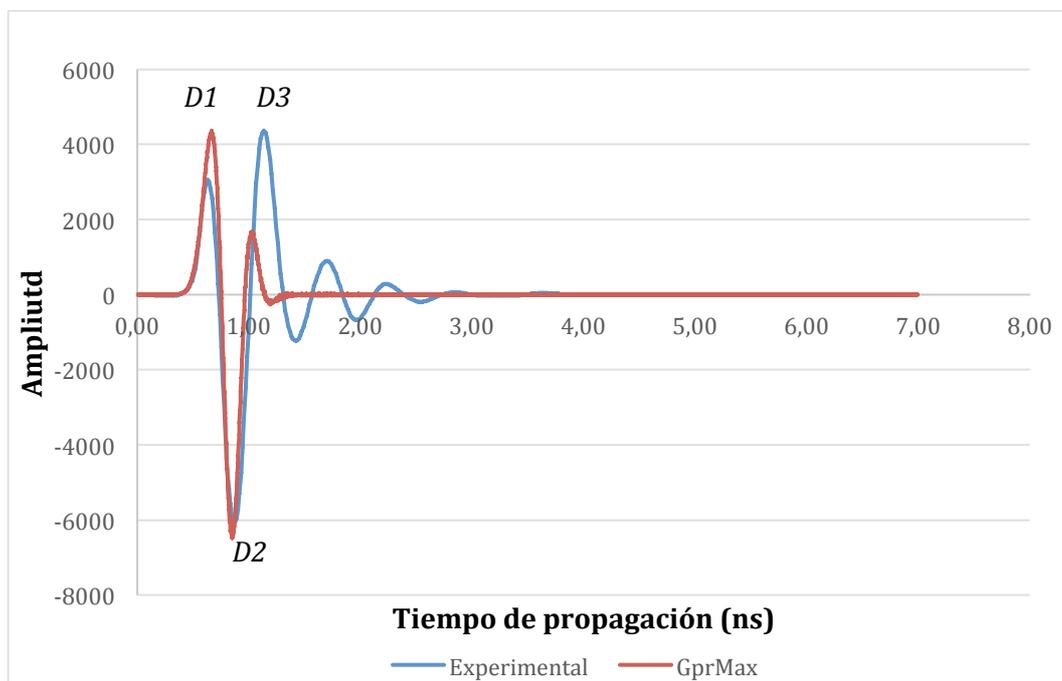


Figura 6.3 Comparación entre la señal registrada experimentalmente al emitir al aire y el modelo numérico generado para una antena de 2 GHz

Una forma de comprobar que el modelo numérico genérico estaba correctamente generado era por medio de la colocación de un reflector metálico a

una cierta distancia de la antena y entonces evaluar los tiempos de propagación de cada uno de los picos. En ese caso, el modelo numérico obtenido se presenta en la Figura 6.4.

En esta figura se puede observar como aparece una primera onda directa, con los tres picos igual que en el caso anterior ($D1$, $D2$ y $D3$), pero además aprecia una segunda onda, la onda reflejada ($R1$, $R2$ y $R3$), que se produce cuando la onda viaja por el interior de un medio, en este caso el aire, y se encuentra con un material con propiedades dieléctricas diferentes, la placa metálica de 1 cm.

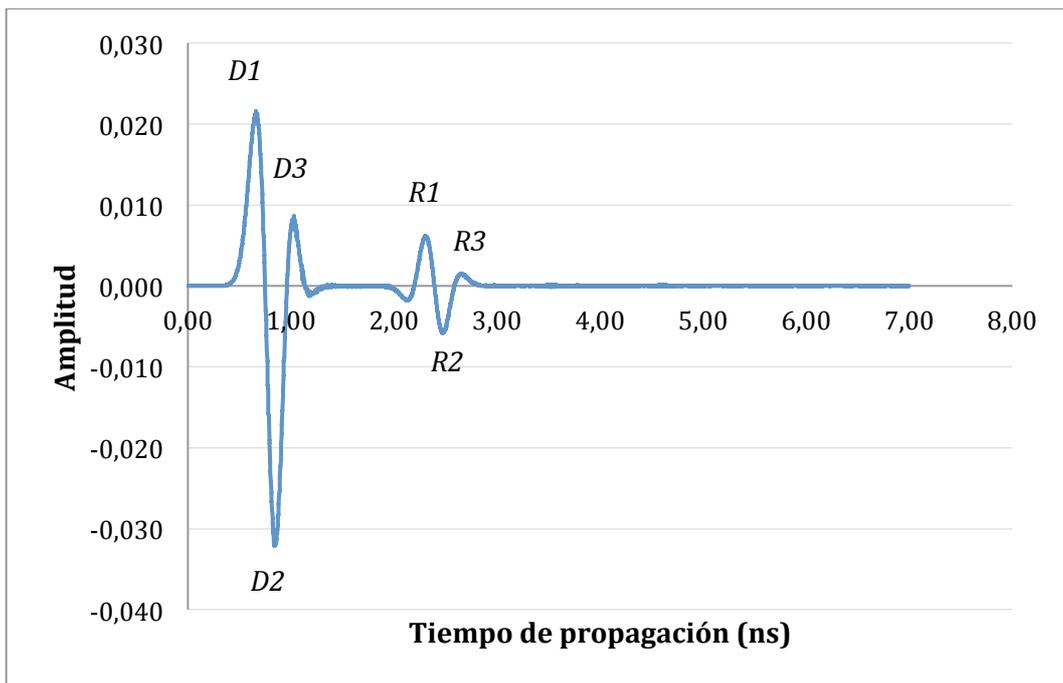


Figura 6.4 Modelo numérico generado al emitir al aire y colocar un reflector metálico de 1 cm de grosor a 25 cm de distancia

Con objeto de poder interpretar los resultados obtenidos se midieron en los modelos numéricos generados la amplitud y el *sample* (los tiempos de llegada) para cada uno de los picos que componían cada señal (Tabla 6.1).

Tabla 6.1 Samples, amplitudes y tiempos de llegada de los picos que componen las señales al emitir al aire y al colocar un reflector metálico a 25 cm

Máximo	Sample	Amplitud	Tiempo (ns)
D1	174	0,022	0,67
D2	222	-0,032	0,85
D3	269	0,009	1,04
R1	601	0,006	2,31
R2	644	-0,006	2,48
R3	693	0,002	2,67

Interpretación de resultados

Una vez obtenidos los parámetros de todos los picos, se comprobó qué combinaciones de picos aportaba valores más realistas en comparación con la teoría. Teniendo en cuenta que el incremento de tiempo de llegada entre la onda reflejada y la directa (Δt) debía ser:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot d}{v} \quad (\text{ec. 6.2})$$

donde d se corresponde con la semidistancia que recorre la onda y v la velocidad de propagación por el medio.

Sabiendo que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el aire es $v = c = 30 \text{ cm/ns}$ y que el espacio que viaja la onda en cada uno de los casos es la distancia 25 cm, se podía saber de forma teórica el tiempo que debería tardar cada una de las ondas en recorrer dicho espacio, es decir, el incremento de tiempo teórico entre la llegada de la onda directa y la reflejada.

$$\Delta t_{\text{teórico}} = \frac{2 \cdot 25}{30} = 1,67 \text{ ns} \quad (\text{ec. 6.3})$$

Posteriormente, se analizó cuáles de las combinaciones de picos entre la onda directa y la reflejada presentaban mayor aproximación a este valor teórico. En la Tabla 6.2 se presentan los resultados obtenidos.

Como se observa en la Tabla 6.2, las combinaciones de picos que presentan valores más próximos al valor teórico esperado son: *R1-D1*, *R2-D2*, *R3-D3*. En ese caso, es importante resaltar que a partir de ahora para obtener valores de incremento de tiempos representativos deberemos emplear cualquiera de estas tres combinaciones.

Tabla 6.2 Cálculo del incremento de tiempos de llegada entre la onda directa y la reflejada en un reflector metálico al viajar por el aire en el modelo numérico

Combinación de máximos	Δt (ns)
R1-D1	1,64
R1-D2	1,46
R1-D3	1,29
R2-D1	1,81
R2-D2	1,62
R2-D3	1,45
R3-D1	2,00
R3-D2	1,81
R3-D3	1,64

6.2.2. Calibración de la propagación por el interior del hormigón

En este apartado, se analizó el comportamiento de la propagación de las ondas por el interior de un bloque de hormigón de 20 cm de espesor. Para ello, se colocó una placa metálica de 1 cm en la base y se registraron una serie de reflexiones en los distintos modelos numéricos generados.

Resultados

El primer modelo numérico generado se realizó colocando la antena a cierta distancia del bloque de hormigón, para poder comprender mejor las reflexiones que ocurrían y los picos que las componían. La distancia de separación era de 15 cm y las propiedades del hormigón empleado eran una permitividad dieléctrica de 5 y una conductividad de 10^{-4} S/m.

En la Figura 6.5a se presenta el modelo numérico creado cuando la antena estaba a 15 cm, mientras que en la Figura 6.5b cuando la antena estaba pegada al bloque de hormigón.

Se observó que cuando la antena estaba a 15 cm se diferenciaban tres ondas, cada una de ellas con una serie de picos. La primera es la onda directa, correspondiente al aire, ($D1$, $D2$ y $D3$). La que le sigue es la reflexión como consecuencia de la de la superficie del hormigón, al producirse un cambio en las propiedades dieléctricas aire-hormigón. A estos tres picos los denominamos $H1$, $H2$ y $H3$. La última reflexión que se registró fue la de la interfaz hormigón-metal. A los picos de esta señal los llamamos $M1$, $M2$ y $M3$.

Sin embargo, al observar las señales generadas cuando la antena estaba colocada sobre el bloque de hormigón se detectaron una serie de variaciones. En este caso la onda aire y la onda hormigón se solapaban por estar muy cerca en el

tiempo, entonces solo podíamos identificar los dos picos de cada una de ellas, ($D1$, $D2$, $H1$ y $H2$). Además de los tres picos de la onda reflejada en el metal ($M1$, $M2$ y $M3$).

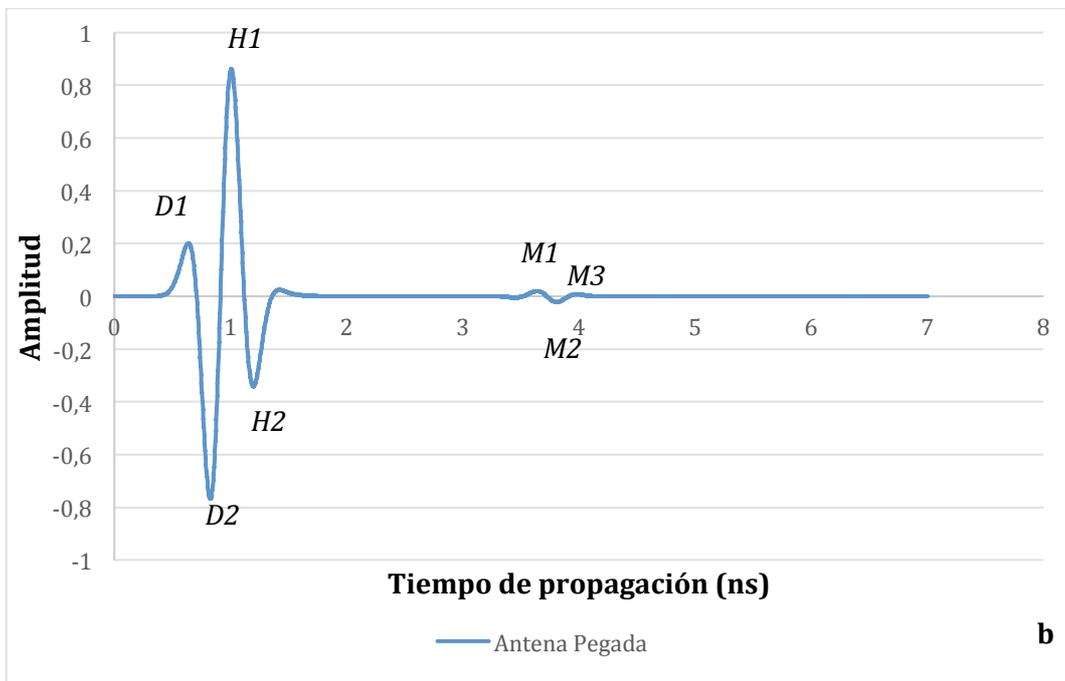
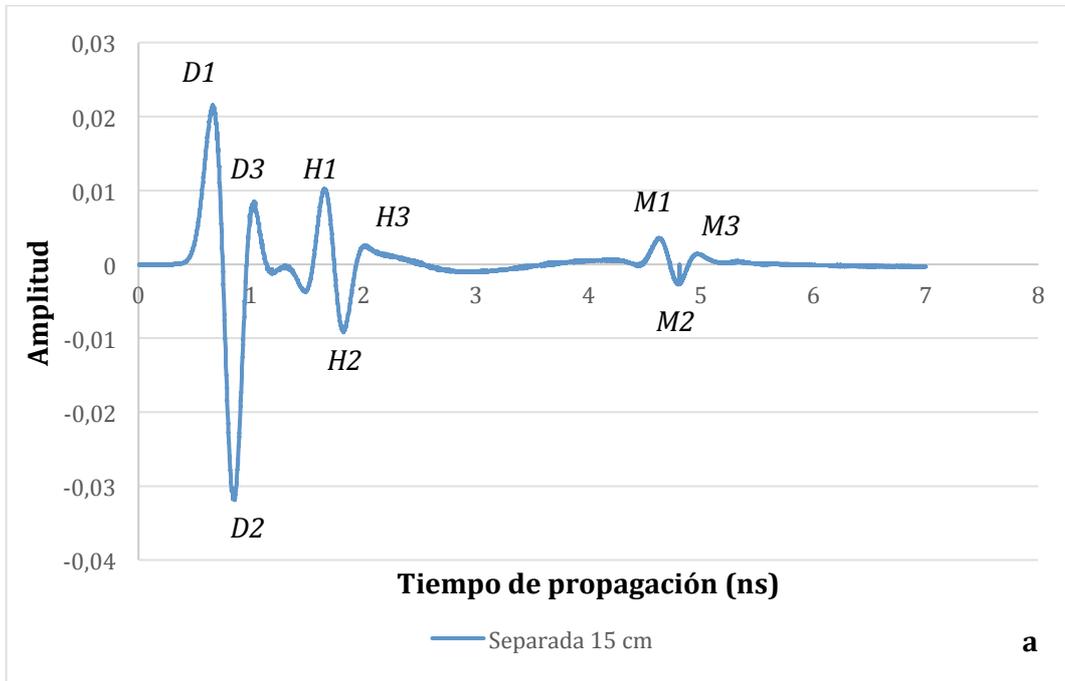


Figura 6.5 (a) Modelo numérico generado cuando la antena estaba situada a 15 cm de separación del bloque de hormigón y (b) cuando estaba colocada sobre el hormigón

Es muy importante tener en cuenta este resultado, puesto que la situación más típica a la hora de registrar de forma experimental las señales al viajar por el interior del hormigón será por medio de este dispositivo, es decir, colocando la antena sobre el hormigón y por tanto es muy importante conocer la variación que se produce en ese caso.

En la Tabla 6.3 se muestran los valores de la amplitud, el *sample* y el tiempo de llegada de cada uno de los picos de las diferentes ondas explicadas con anterioridad.

Tabla 6.3 Samples, amplitud y tiempos de llegada de los picos de las señales cuando la antena se colocó a cierta distancia del bloque de hormigón y cuando estaba sobre el bloque

Pico	Antena a 15 cm			Antena Pegada		
	Sample	Amplitud	Tiempo (ns)	Sample	Amplitud	Tiempo (ns)
D1	174	0,022	0,67	168	0,202	0,65
D2	220	-0,032	0,85	217	-0,767	0,84
D3	267	0,008	1,03	-	-	-
H1	433	0,010	1,67	263	0,861	1,01
H2	475	-0,009	1,83	313	-0,342	1,21
H3	525	0,003	2,02	-	-	-
M1	1203	0,004	4,63	947	0,020	3,65
M2	1251	-0,003	4,82	991	-0,022	3,82
M3	1293	0,001	4,98	1036	0,007	3,99

Interpretación de resultados

De igual forma que en la calibración anterior era importante conocer qué picos eran los más adecuados para poder calcular los incrementos de tiempo de las llegadas entre las dos reflexiones que se producían y así conocer la velocidad de propagación por el interior del hormigón.

Para ello, en primer lugar, se calcularon cuáles eran los tiempos de llegada teóricos entre la onda directa y la reflejada en la base del hormigón cuando la antena estaba pegada al bloque de hormigón.

Teniendo en cuenta que el incremento de tiempo de llegada entre la onda reflejada y la directa (Δt) es:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot d}{v} \quad (\text{ec. 6.4})$$

donde d se corresponde con la semidistancia que recorre la onda y v la velocidad de propagación por el medio. Considerando que la constante dieléctrica para el hormigón seco es 5, se obtiene la velocidad de propagación en el hormigón aplicando la ecuación siguiente:

$$v = \frac{30}{\sqrt{5}} = 13,41ns \quad (\text{ec. 6.5})$$

Conociendo el valor de v de la velocidad, se podía saber de forma teórica el tiempo que debería tardar cada una de las ondas en recorrer dicho espacio, es decir, el incremento de tiempo teórico entre la llegada de la onda directa y la reflejada.

$$\Delta t_{\text{teórico}} = \frac{2 \cdot 20}{13,41} = 2,98ns \quad (\text{ec. 6.6})$$

Posteriormente, se calculan estos incrementos de tiempo de llegada a partir de los modelos numéricos generados con todas las combinaciones posibles. Los resultados de estos cálculos se presentan en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Combinaciones de picos para el cálculo de incrementos de tiempo cuando la antena se encuentra pegada sobre el bloque de hormigón

Combinación de máximos	Δt (ns)
<i>D1-M1</i>	3,00
<i>D2-M2</i>	3,17
<i>D1-M3</i>	3,34
<i>D2-M1</i>	2,81
<i>D2-M2</i>	2,98
<i>D2-M3</i>	3,15
<i>H1-M1</i>	2,63
<i>H1-M2</i>	2,80
<i>H1-M3</i>	2,98
<i>H2-M1</i>	2,44
<i>H2-M2</i>	2,61
<i>H2-M3</i>	2,78

En este caso al tener la antena pegada al bloque de hormigón sólo se produce un viaje por el interior del hormigón. Se remarcan en azul en la Tabla 6.4 los intervalos de tiempo entre las llegadas de los picos que proporcionan valores más próximos al teórico y se comprueba que son los mismos que en el caso anterior (véase Tabla 6.2).

6.2.3.- Calibración del tamaño mínimo de muestra del hormigón

La última calibración realizada en este apartado tenía por objeto conocer cómo de pequeño puede ser el bloque de hormigón para poder registrar las reflexiones correctamente, es decir, se estudió la resolución vertical.

Según (Laurens et al. 2005), el hormigón endurecido secado al horno presenta una permitividad dieléctrica característica que varía de 3 a 5 dependiendo de su composición mineral. Además, Klysz et al. (2008) consideran que la variación de la conductividad para una frecuencia de estudio de 1,5 GHz, varía de 10^{-4} S/m en el hormigón seco, hasta 10^{-1} S/m en el hormigón saturado. Es por ello que el modelo numérico generado en este caso se creó a partir de un bloque de hormigón de permitividad dieléctrica de 5 y considerando que estaba seco, con una conductividad de 10^{-4} S/m.

Tal y como se ha visto en el apartado 2.6, existen distintos criterios teóricos para calcular la resolución vertical. En este apartado se presentan los cálculos según los criterios teóricos y a continuación se valoraron de acuerdo a los resultados que se obtuvieron en los modelos numéricos generados. En la Tabla 6.5 se presenta cuál era la resolución vertical teórica para cada caso.

Tabla 6.5 Resolución vertical en hormigón endurecido según los diferentes criterios para una antena de 2 GHz

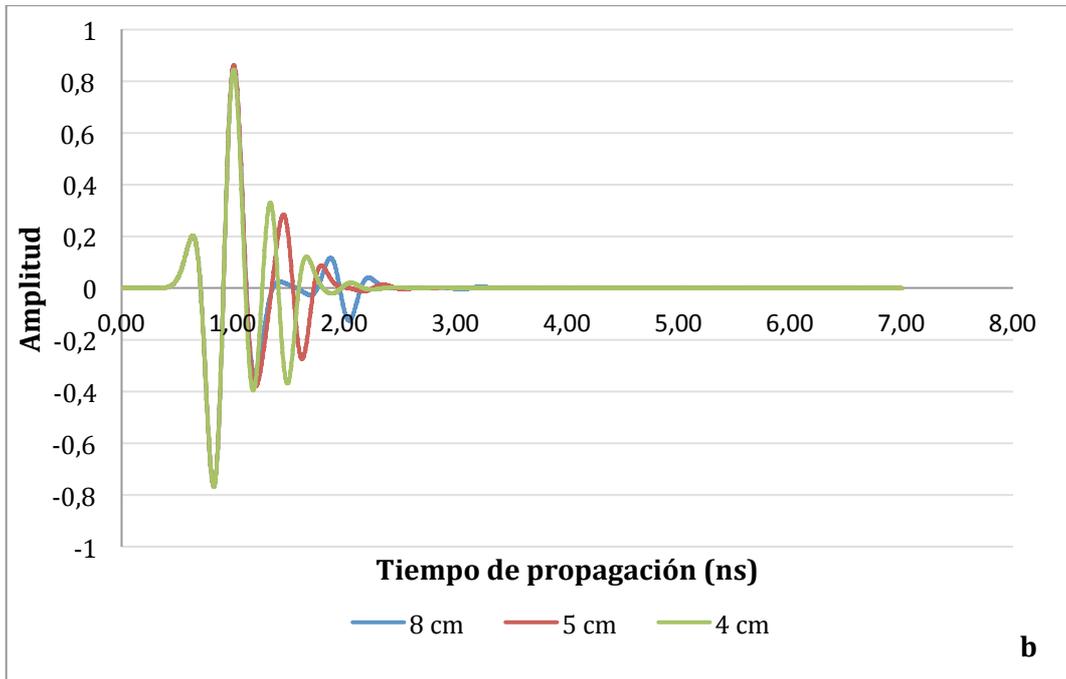
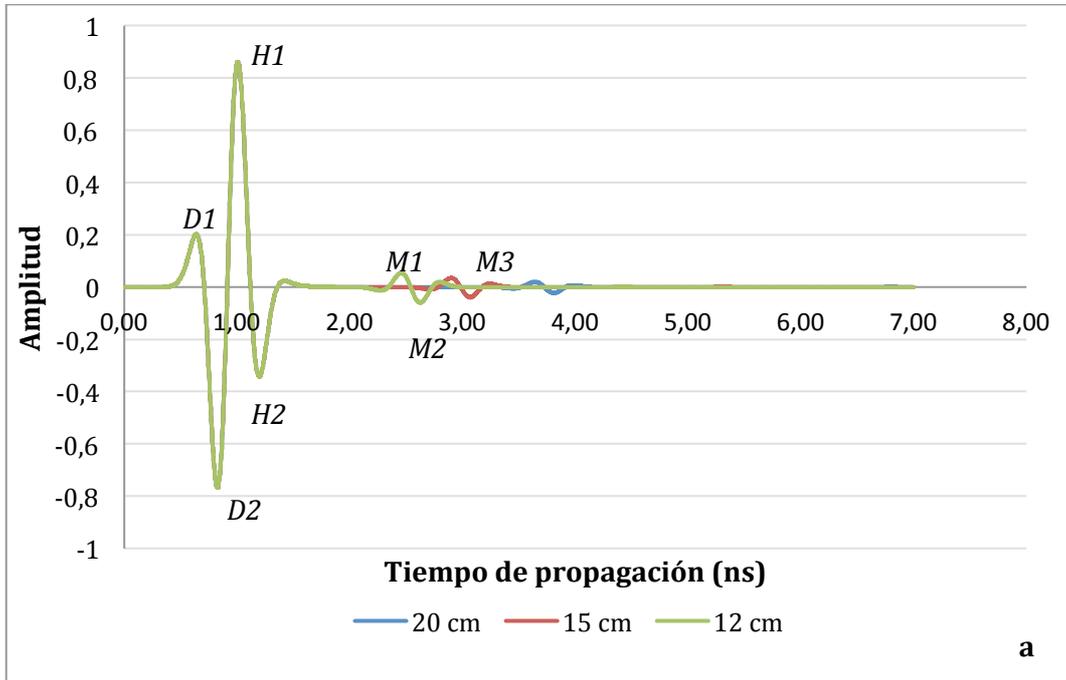
Criterio	Permitividad dieléctrica	Velocidad (cm/ns)	Longitud de onda (cm)	Rv(cm)
1	5	13,42	6,71	3,35
2				1,68

A continuación se comprobó cuál de estos criterios se ajustaba mejor a las características de las señales modeladas numéricamente en hormigón endurecido completamente seco.

Resultados

Los modelos numéricos generados para este caso partían de un bloque de hormigón de 20 cm de altura (la calibración anterior) y progresivamente, se fueron generando nuevos modelos disminuyendo la altura de la probeta, hasta que no se

podieran identificar bien las diferentes ondas. Como se observa en la Figura 6.6 se identificaron los mismos picos que en el caso anterior, *D1*, *D2*, *H1*, *H2*, *M1*, *M2* y *M3*.



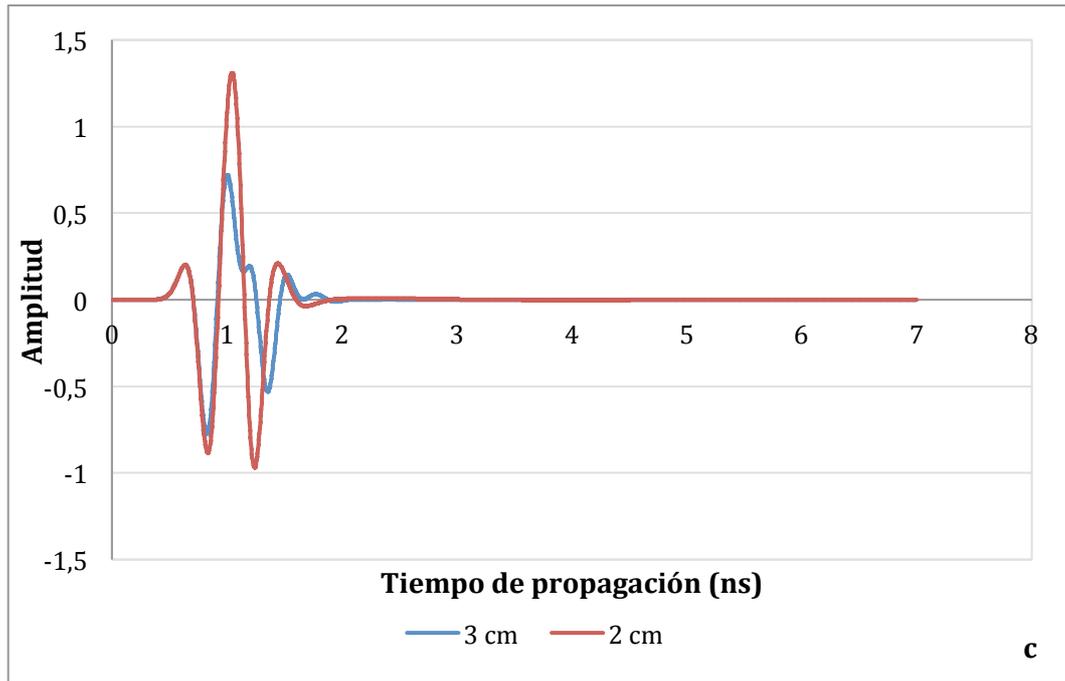


Figura 6.6 (a) Modelo numérico para un bloque de hormigón de tamaño 20 cm, 15 cm y 12 cm (b) para tamaños de 8 cm, 5 cm y 4 cm y (c) para 3 cm y 2 cm.

Se observaba en estas figuras que a medida que el espesor del bloque disminuía la onda de la reflexión en el metal se iba aproximando a las ondas directa y del hormigón llegando finalmente a interferir.

Los valores de la amplitud de los picos de la onda metal se presentan en la Tabla 6.6. Como conclusión tras observar la tabla podemos decir que cuanto más pequeña es la probeta (espesor del bloque de hormigón) la amplitud de todos los picos aumenta porque al ser el recorrido de las ondas menor la energía que se absorbe en el medio es también menor.

Tabla 6.6 Amplitudes de las reflexiones en el metal para los diferentes tamaños de la probeta

AMPLITUD			
Tamaño Probeta (cm)	M1	M2	M3
20	0,020	-0,022	0,007
15	0,035	-0,039	0,012
12	0,054	-0,060	0,019
8	0,116	-0,126	0,040
5	0,284	-0,275	0,086
4	0,329	-0,369	0,120
3	-	-	-
2	-	-	-
1	-	-	-

Con respecto al tiempo de llegada se observó que cuanto más pequeña era la probeta, lógicamente, menor era el tiempo de llegada, tal y como se comprueba en la Tabla 6.7

Tabla 6.7 Tiempos de llegada de los picos de la onda reflejada en el metal para los diferentes tamaños del bloque de hormigón

TIEMPO (ns)			
Tamaño Probeta (cm)	M1	M2	M3
20	3,65	3,82	3,99
15	2,91	3,07	3,25
12	2,46	2,63	2,80
8	1,88	2,05	2,22
5	1,46	1,63	1,80
4	1,34	1,49	1,67
3	-	-	-
2	-	-	-
1	-	-	-

Tras realizar el estudio podemos deducir que la reflexión del metal se va produciendo cada vez un poco antes, puesto que el bloque va disminuyendo en espesor y, por tanto, la onda hace un recorrido menor. Pudiendo concluir que con una probeta de 3 cm ya es muy difícil identificar con claridad las ondas.

Interpretación de resultados

Para comprobar que los picos identificados en las probetas de menor tamaño correspondían efectivamente a la onda metal o bien estaban de alguna forma afectadas por la onda del hormigón, se desarrolló el siguiente algoritmo.

En primer lugar se calcularon los tiempos de llegada teóricos entre la onda directa y la reflejada en la base del hormigón para cada uno de los diferentes tamaños de muestras de hormigón cuando la antena estaba pegada al bloque de hormigón mediante la ecuación 6.2. Conociendo la permitividad del hormigón y, por tanto, el valor de la velocidad (ec. 6.5) podíamos saber el tiempo que debería tardar cada una de las ondas en recorrer los diferentes espesores.

Posteriormente se calculaban los incrementos de tiempos de llegada a partir de los modelos numéricos generados con todas las combinaciones posibles de picos y para cada uno de los diferentes tamaños de muestras de hormigón (Tabla 6.8).

Tabla 6.8 Intervalos de tiempo (ns) entre las llegadas de las diferentes combinaciones de picos para los diferentes tamaños del bloque del hormigón (cm) y el intervalo teórico(ns)

Bloque	Δt (ns)				Δt teórico (ns)
20 cm	D1	D2	H1	H2	2,98
M1	3,00	2,81	2,63	2,44	
M2	3,17	2,98	2,80	2,61	
M3	3,34	3,15	2,98	2,78	
15 cm	D1	D2	H1	H2	2,24
M1	2,26	2,07	1,89	1,70	
M2	2,43	2,24	2,06	1,87	
M3	2,60	2,41	2,23	2,04	
12 cm	D1	D2	H1	H2	1,79
M1	1,82	1,63	1,45	1,26	
M2	1,99	1,80	1,62	1,43	
M3	2,16	1,97	1,79	1,60	
8 cm	D1	D2	H1	H2	1,19
M1	1,24	1,05	0,87	0,68	
M2	1,40	1,21	1,04	0,84	
M3	1,57	1,39	1,21	1,02	
5 cm	D1	D2	H1	H2	0,75
M1	0,81	0,62	0,45	0,25	
M2	0,98	0,79	0,62	0,42	
M3	1,15	0,96	0,79	0,59	
4 cm	D1	D2	H1	H2	0,60
M1	0,69	0,50	0,33	0,15	
M2	0,85	0,66	0,48	0,30	
M3	1,02	0,83	0,65	0,48	

Como se observa en la tabla 6.8, las combinaciones de picos cuyo incremento de tiempo coincide con el teórico esperado son las mismas que en los casos anteriores.

En el caso de la probeta de 3 cm de espesor se comprobó que, a pesar de identificar los picos de la onda metal, el tiempo de llegada teórico no se correspondía con ninguna de las combinaciones anteriores. Esto indica que se producía interferencia con la onda hormigón y, por tanto, no podía emplearse como representativa de la llegada de la onda del metal. De este modo se comprobó con los modelos simulados que, en efecto, el criterio más adecuado para el cálculo de la Rv es el criterio 1.

6.3.- Efecto del avance del frente del agua en probetas de hormigón en las señales de georradar con una antena de 2 GHz

Se partió de un ensayo experimental en el que se utilizó un bloque de hormigón seco de 12 cm de altura que se iba sumergiendo parcialmente en agua durante intervalos de tiempo determinados. Periódicamente se extraía el bloque del agua y se tomaban registros con la antena colocada en el centro geométrico de la cara que había estado sumergida y en la cara opuesta.

Esta situación se simuló generando modelos en los que el espesor del frente de agua en el bloque de hormigón se iba variando y la antena de 2 GHz estaba situada en la cara que está en contacto con el agua y en la opuesta.

6.3.1.- Caso: Cuando la antena se coloca en la cara opuesta a la que se introduce en agua

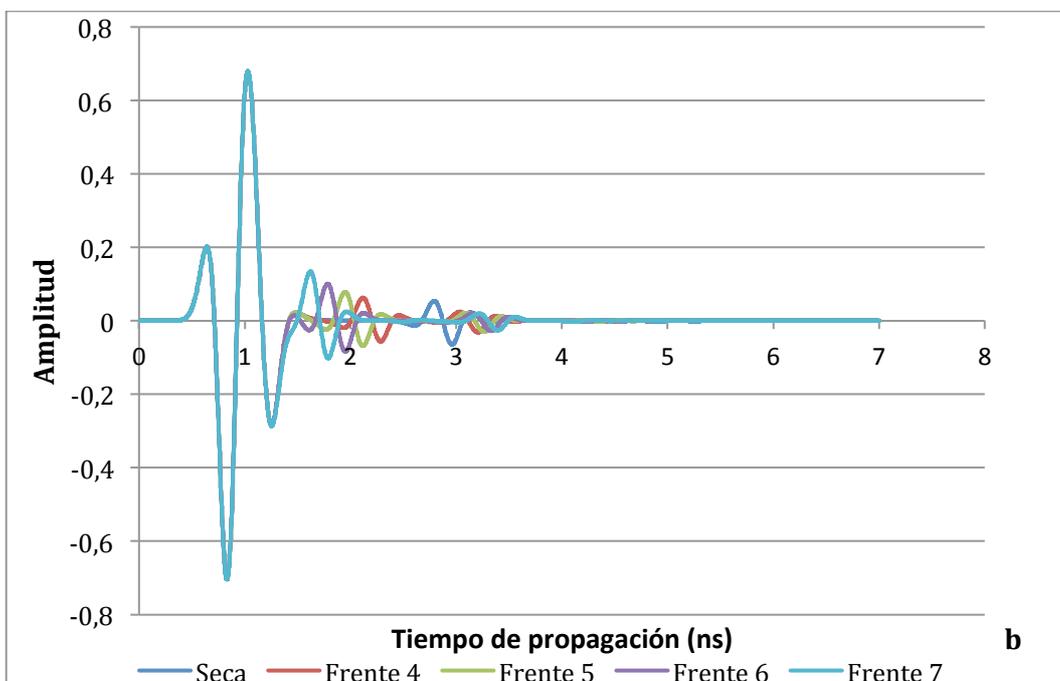
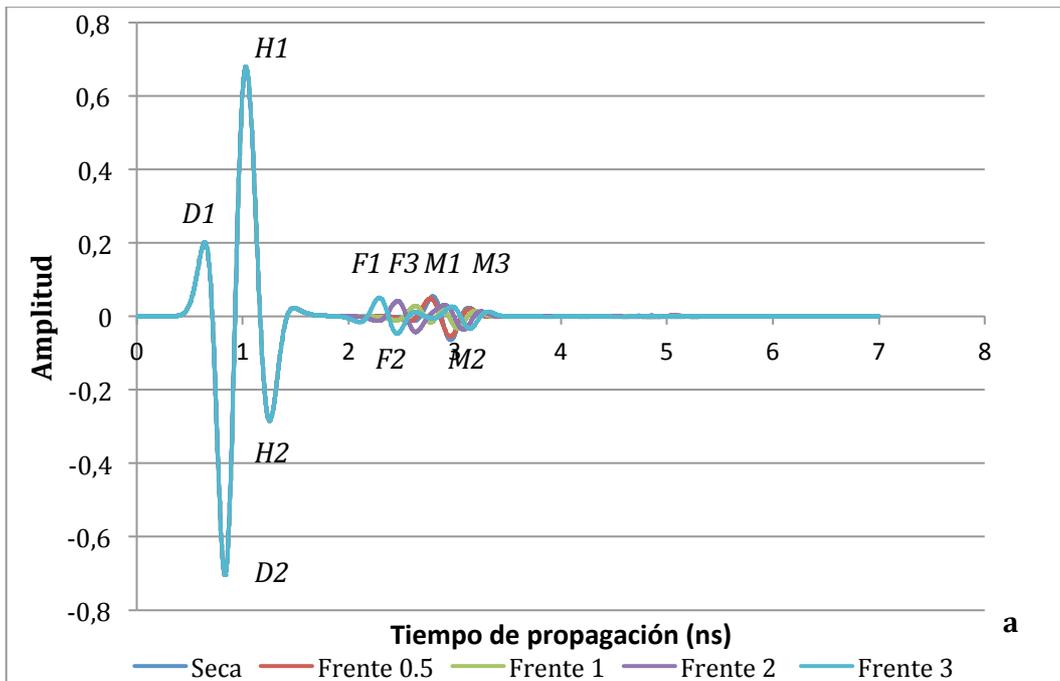
Resultados

En la figura 6.7 se representan las trazas simuladas para el bloque de hormigón con distintos espesores del frente del agua. Como se puede observar en estas trazas se identifican los siguientes picos: dos de la onda directa ($D1$ y $D2$) dos en la onda del hormigón ($H1$ y $H2$), tres en la onda del frente del agua ($F1$, $F2$ y $F3$) y tres en la onda del metal ($M1$, $M2$ y $M3$). Se han marcado estos picos en la señal correspondiente a un frente de 3 cm (traza F-3), por ser donde más claro se aprecia. En las señales generadas se podía ver como la onda del frente del agua al principio se solapaba con la onda metal y a medida que iba avanzando llega un momento en el que se solapaba con la que hemos llamado onda hormigón de modo que no se podía identificar correctamente.

Para interpretar los modelos numéricos generados se han medido los tiempos de llegada (ns) (tabla 6.9) de cada uno de los picos de las ondas registradas y las amplitudes (tabla 6.10) para cada una de las profundidades del frente de agua.

En la tabla 6.9 se observa, tal y como era de esperar, que los valores de los tiempos de llegada de los picos de las ondas directas, D , y las ondas del hormigón, H , eran constantes, pues viajaban por hormigón seco y sus propiedades no variaban aunque avanzara el tamaño del frente de agua. Con respecto a los tiempos de llegada de la reflexión del frente del agua, hasta que el frente no tenía una dimensión superior a 1 cm (traza F-1) no era posible identificarla por separado con respecto a la reflexión del metal. Así mismo, a partir de la traza F-10 (frente de

10 cm de espesor) tampoco era posible identificarla por separado, puesto que se solapaba con la onda del hormigón. Por último, los tiempos de llegada del metal se veían muy retrasados conforme avanzaba el frente del agua. Esto es debido a que, aunque el tamaño de la probeta no variara, había un frente húmedo cada vez más grande con una mayor permitividad y, por tanto, una velocidad de propagación menor.



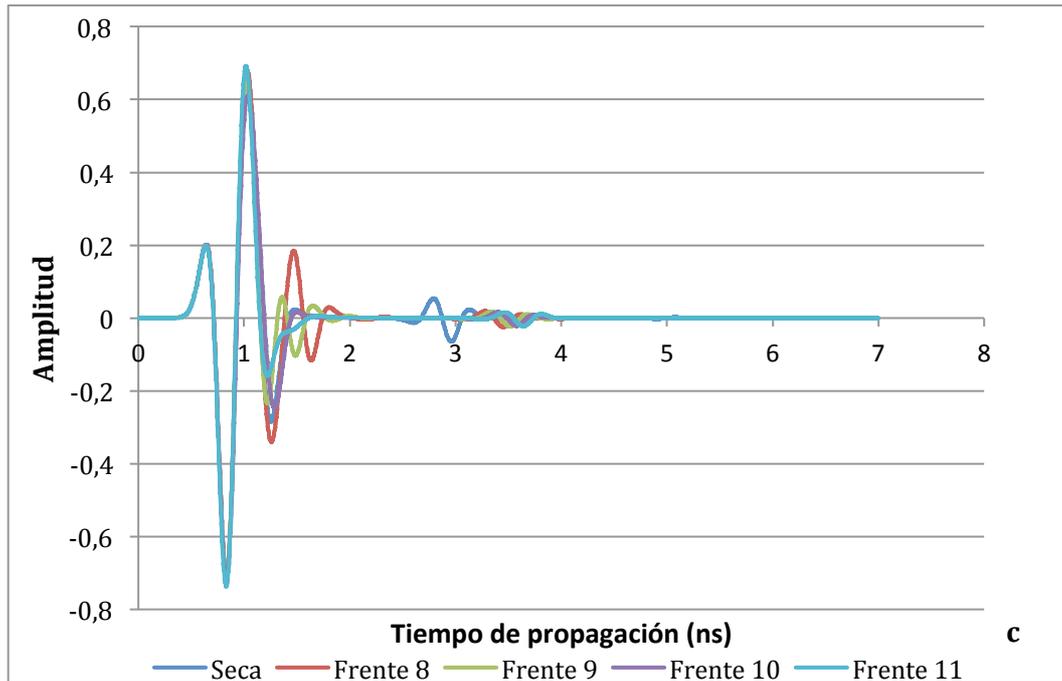


Figura 6.7 (a) Modelo numérico para el bloque seco y con un frente de 0,5 cm, 1 cm, 2 cm y 3 cm (b) para tamaños de frente de 4 cm, 5 cm, 6 cm y 7 cm y (c) para 8 cm, 9 cm, 10 cm y 11 cm. Antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua.

Tabla 6.9 Tiempos de llegadas (ns) de los picos en las trazas simuladas para diferentes profundidades del frente del agua con la antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua.

	TIEMPO (ns)												
	Seca	F-0.5	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11
D1	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
D2	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
H1	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,03	1,04	1,02
H2	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,27	1,23	1,29	1,23
F	-	-	2,63	2,47	2,29	2,13	1,96	1,79	1,63	1,47	1,37	-	-
M1	2,80	2,78	2,90	2,91	2,98	3,04	3,10	3,17	3,22	3,29	3,35	3,41	3,47
M2	2,97	2,96	3,03	3,09	3,15	3,21	3,27	3,33	3,40	3,46	3,52	3,58	3,65
M3	3,13	3,15	3,20	3,26	3,32	3,38	3,44	3,50	3,56	3,63	3,69	3,75	3,82

Es importante resaltar que el primer pico positivo de la onda *F* es claramente indicador de cómo avanzaba el frente. A medida que el frente estaba más alto el recorrido por la zona seca era menor y, por tanto, también era menor el tiempo de llegada de este pico. También lo corrobora el hecho de que al realizar el ajuste entre el tiempo de llegada y la profundidad del frente, como se observa en la figura 6.8, nos daba una ecuación lineal con pendiente negativa y con un alto grado de ajuste. Este resultado era esperable, pero lo que es importante es que nos

indicaba que las lecturas de los picos de la reflexión en el frente de agua (onda *F*) se hicieron correctamente.

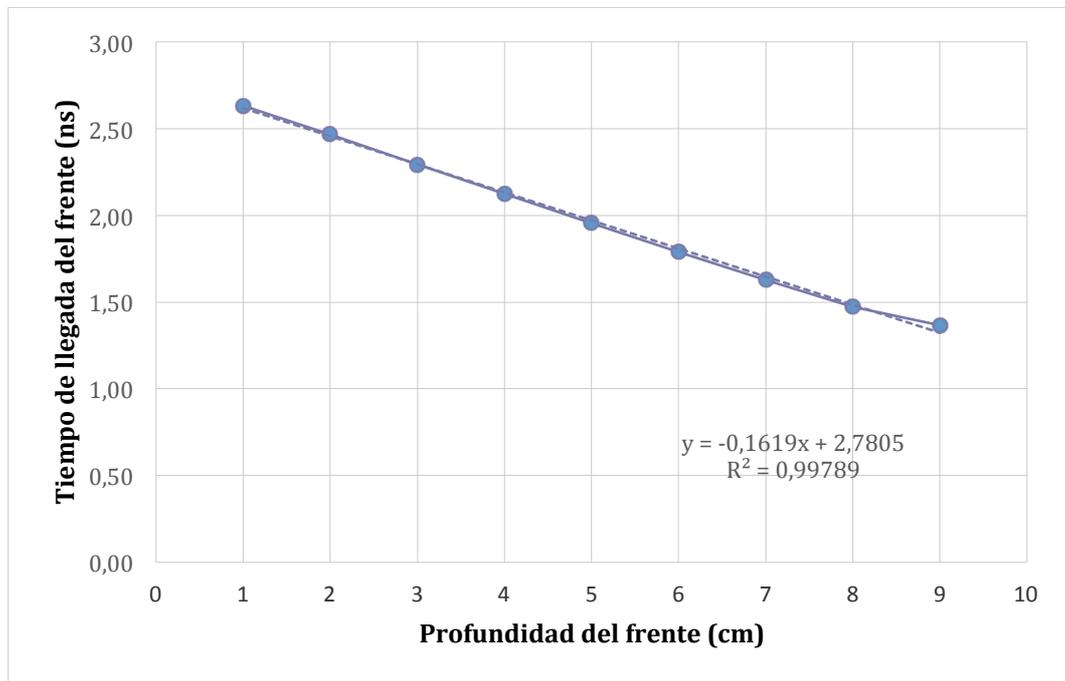


Figura 6.8 Tiempo de llegada del primer pico de la onda reflejada en el frente de agua (ns) en función del espesor del frente (cm). Antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua.

En la Tabla 6.10 se muestra el resumen de las amplitudes de los diferentes picos obtenidos. Tras observar la tabla se puede decir que las amplitudes de los picos *D1* se mantenían constantes. Las amplitudes de los picos *D2* se veían afectadas por la interferencia con las reflexiones en el frente cuando el espesor del mismo era 10 cm y 11 cm (F-10 y F-11), permaneciendo constantes en el resto. Las ondas del hormigón (*H1* y *H2*) presentaban valores erráticos cuando se producía interferencia con el frente del agua (frentes a partir de 8 cm en adelante). Las amplitudes del pico *F*, aumentaban a medida que aumentaba el espesor del frente, salvo cuando se producía interferencia. Un ejemplo de esta interferencia es el caso de la traza F-9 (frente 9 cm). En este caso aunque se realizaron medidas, no se tuvieron en cuenta más tarde ya que no era lógico que la energía de la onda disminuyera, lo que sin duda era debido a una interferencia. Y por último, los valores de las amplitudes de la reflexión en el metal (*M1*, *M2* y *M3*) iban disminuyendo conforme aumentaba el frente dado que había una mayor proporción de hormigón húmedo (la atenuación en el hormigón húmedo es mayor que en el hormigón seco).

Tabla 6.10 Amplitudes de los picos de las trazas obtenidas para el bloque seco y con diferentes espesores del frente (de 0,5 cm hasta 11 cm). Antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua.

	AMPLITUD						
	Seca	F-0.5	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5
D1	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202
D2	-0,704	-0,704	-0,704	-0,704	-0,704	-0,704	-0,704
H1	0,679	0,679	0,679	0,679	0,679	0,679	0,679
H2	-0,284	-0,284	-0,284	-0,284	-0,284	-0,284	-0,284
F	-	-	0,029	0,042	0,051	0,063	0,078
M1	0,054	0,049	0,017	0,031	0,026	0,025	0,022
M2	-0,065	-0,055	-0,032	-0,036	-0,034	-0,031	-0,029
M3	0,023	0,020	0,014	0,014	0,013	0,013	0,012
	AMPLITUD						
	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11	
D1	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,199	
D2	-0,704	-0,704	-0,704	-0,704	-0,714	-0,737	
H1	0,679	0,679	0,679	0,652	0,611	0,692	
H2	-0,284	-0,287	-0,340	-0,235	-0,247	-0,159	
F	0,100	0,134	0,184	0,058	-	-	
M1	0,021	0,020	0,018	0,017	0,016	0,016	
M2	-0,028	-0,026	-0,024	-0,023	-0,021	-0,022	
M3	0,011	0,011	0,010	0,010	0,008	0,011	

Interpretación de resultados

Una vez se comprobó que la identificación del máximo del frente del agua era correcta el siguiente paso era comprobar que el procedimiento de lectura de tiempos de llegada de los picos nos permitía determinar la permitividad dieléctrica del hormigón seco y del húmedo. Para ello el procedimiento establecido fue el siguiente.

Paso 1: Cálculo de las propiedades dieléctricas de la probeta seca. A partir de las lecturas de los tiempos de llegada en los modelos numéricos generados cuando las probetas de hormigón estaban completamente secas se calcularon los intervalos de tiempo entre las distintas combinaciones de picos de la onda directa y del hormigón con la onda de la reflexión en el metal (tabla A del anexo 1. Tablas). Con el tiempo de propagación y el recorrido se calculó la velocidad de propagación (ec. 6.2) y con ello se determinó la permitividad dieléctrica (ec. 2.3) de la parte seca. Este resultado se muestra en la tabla 6.11.

Tabla 6.11 Velocidades de propagación y permitividad dieléctrica para la probeta seca para distintas combinaciones de picos. Antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua.

PROBETA SECA			
	VELOCIDAD (cm/ns)		
	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>
<i>D1</i>	11,15	10,34	9,65
<i>D2</i>	12,25	11,27	10,46
<i>H1</i>	13,61	12,42	11,44
<i>H2</i>	15,58	14,04	12,80
	PERMITIVIDAD		
	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>
<i>D1</i>	7,24	8,42	9,67
<i>D2</i>	6,00	7,08	8,23
<i>H1</i>	4,86	5,84	6,88
<i>H2</i>	3,71	4,57	5,49

Como se observa en la tabla 6.11 siempre que la combinación de máximos empleada fuera *D1-M1*, *D2-M2* y *H1-M3*, se obtenían unos valores de la velocidad que eran muy próximos (alrededor de 11 cm/ns), indicando que esta velocidad y esas combinaciones de picos eran las correctas. También se observa que la permitividad dieléctrica hallada con estas velocidades se ajustaba con la que se introdujo en la simulación de los modelos (permitividad dieléctrica 7). Este resultado es muy interesante puesto que hemos podido definir un procedimiento de cálculo de la permitividad dieléctrica cuando las probetas se encontraban completamente secas.

Paso 2: Cálculo de las propiedades dieléctricas de la parte de la probeta que estaba seca (hormigón seco). A partir de las lecturas de los tiempos de llegada en los modelos numéricos generados cuando las probetas de hormigón estaban parcialmente húmedas y con la antena situada en la cara seca se calcularon los intervalos de tiempo entre las distintas combinaciones de los picos de la onda directa y del hormigón con los picos de la onda de la reflexión en el frente (tabla A del anexo 1. Tablas). Con el tiempo de propagación y el recorrido en la parte seca se calculó la velocidad de propagación (ec. 6.2) y con ello se determinó la permitividad dieléctrica (ec. 2.3) de la parte seca. Este resultado se muestra en la tabla 6.12.

Tabla 6.12 Velocidad de propagación y permitividad dieléctrica para la parte seca de las probetas parcialmente húmedas (distintas profundidades del frente) para distintas combinaciones de picos. Antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua.

VELOCIDAD (cm/ns)												
	F-0,5	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11
	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
D1	-	11,36	11,32	11,34	11,34	11,36	11,37	11,39	11,40	8,33	-	-
D2	-	12,57	12,66	12,84	13,03	13,31	13,67	14,16	14,85	14,81	-	-
H1	-	13,77	13,96	14,30	14,68	15,21	15,90	16,86	18,23	17,91	-	-
H2	-	16,00	16,54	17,38	18,47	20,09	22,58	27,34	38,48	43,29	-	-
PERMITIVIDAD												
	F-0,5	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11
	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
D1	-	6,98	7,02	7,00	7,00	6,98	6,96	6,94	6,93	12,96	-	-
D2	-	5,69	5,62	5,46	5,30	5,08	4,82	4,49	4,08	4,11	-	-
H1	-	4,75	4,62	4,40	4,17	3,89	3,56	3,16	2,71	2,81	-	-
H2	-	3,51	3,29	2,98	2,64	2,23	1,76	1,20	0,61	0,48	-	-

En este caso la velocidad y la permitividad presentaban valores aproximados entre si para la combinación de picos *F* y *D1* cuando el frente tenía un espesor entre 1 cm y 8 cm (las celdas correspondientes de la tabla 6.12 están marcadas). La velocidad promedio que se obtenía para estos casos es 11,36 cm/ns con una desviación típica de 0,03 cm/ns. En cuanto a la permitividad se obtenía un valor promedio de 6,98 con una desviación típica de 0,03, es decir, prácticamente igual a la introducida en el modelo de simulación (7,00). Sólo cuando el frente tenía un espesor mayor o igual que 9 cm (F-9) los valores no se ajustan a los valores esperados, esto es porque ya existía solape con la onda del hormigón.

Paso 3: Cálculo de las propiedades dieléctricas de la parte de la probeta con frente de agua (hormigón húmedo). Por último, a partir de las lecturas de los tiempos de llegada en los modelos numéricos generados cuando las probetas de hormigón estaban parcialmente húmedas y con la antena situada en la cara seca se calcularon los intervalos de tiempo entre las distintas combinaciones del pico de la onda de la reflexión en el frente y los picos de la onda de la reflexión metal (tabla A del anexo 1. Tablas). Con el tiempo de propagación y el recorrido en la parte húmeda se calculó la velocidad de propagación (ec. 6.2) y con ello se determinó la permitividad dieléctrica (ec. 2.3) de la parte húmeda. Este resultado se muestra en la tabla 6.13.

Tabla 6.13 Velocidad de propagación y permitividad dieléctrica para la parte húmeda de las probetas parcialmente húmedas para distintas combinaciones de picos. Antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua.

VELOCIDAD (cm/ns)												
	F-0,5	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11
	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
M1	-	7,64	9,03	8,75	8,73	8,74	8,73	8,78	8,82	9,08	-	-
M2	-	4,99	6,45	7,02	7,37	7,59	7,77	7,90	8,05	8,35	-	-
M3	-	3,53	5,07	5,86	6,39	6,75	7,00	7,24	7,43	7,75	-	-
PERMITIVIDAD												
	F-0,5	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11
	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
M1	-	15,42	11,03	11,74	11,81	11,77	11,81	11,67	11,56	10,92	-	-
M2	-	36,08	21,62	18,27	16,58	15,61	14,90	14,40	13,88	12,91	-	-
M3	-	72,08	35,05	26,22	22,02	19,78	18,35	17,16	16,29	14,97	-	-

Como se observa en la tabla, la velocidad y la permitividad presentaban valores muy aproximados entre si para la combinación de picos *F* y *M1* cuando el frente tenía un espesor entre 2 cm y 9 cm (las celdas correspondientes están marcadas en la tabla 6.18). La velocidad promedio que se obtenía para estos casos es 8,83 cm/ns con una desviación típica de 0,14 cm/ns. En cuanto a la permitividad se obtenía un valor promedio de 11,54 con una desviación típica de 0,28, es decir, un poco inferior a la introducida en el modelo de simulación (12,50). Vemos que no se ajustaba con tanta precisión como en el caso de evaluar el lado seco. Es de señalar que, de nuevo como en el caso anterior, el intervalo de 2 cm a 9 cm de espesor del frente, que es en el que se obtienen resultados adecuados, se encuentra próximo al criterio 1 de resolución vertical.

Además, en los casos extremos de frentes con espesores inferiores a 3 cm o superiores a 9 cm, aunque hemos registrado las lecturas de tiempos, realmente esas mediciones no deberían tenerse en cuenta porque los cálculos de la resolución nos indicaban que las señales deben de estar de alguna forma afectadas por el solape, como ocurre con los frentes F-1, F-2, F-10 y F-11.

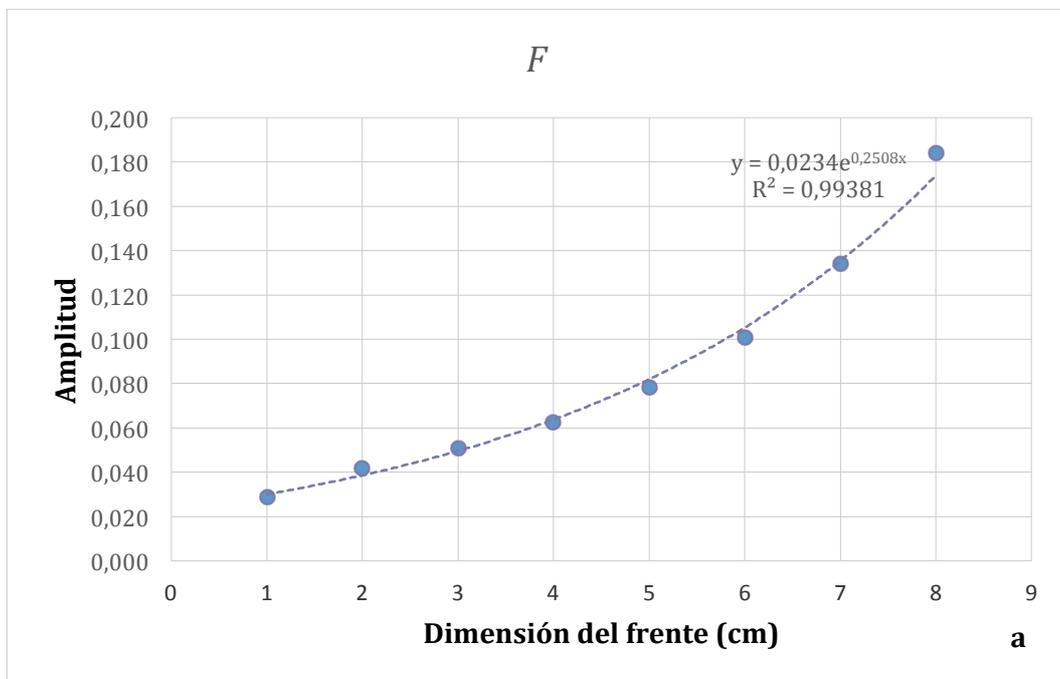
Por último, con respecto a la interpretación de los registros de este caso, es decir, cuando la antena se colocaba en la cara opuesta a la que se producía la inmersión se analizaron las variaciones que se producían en las amplitudes.

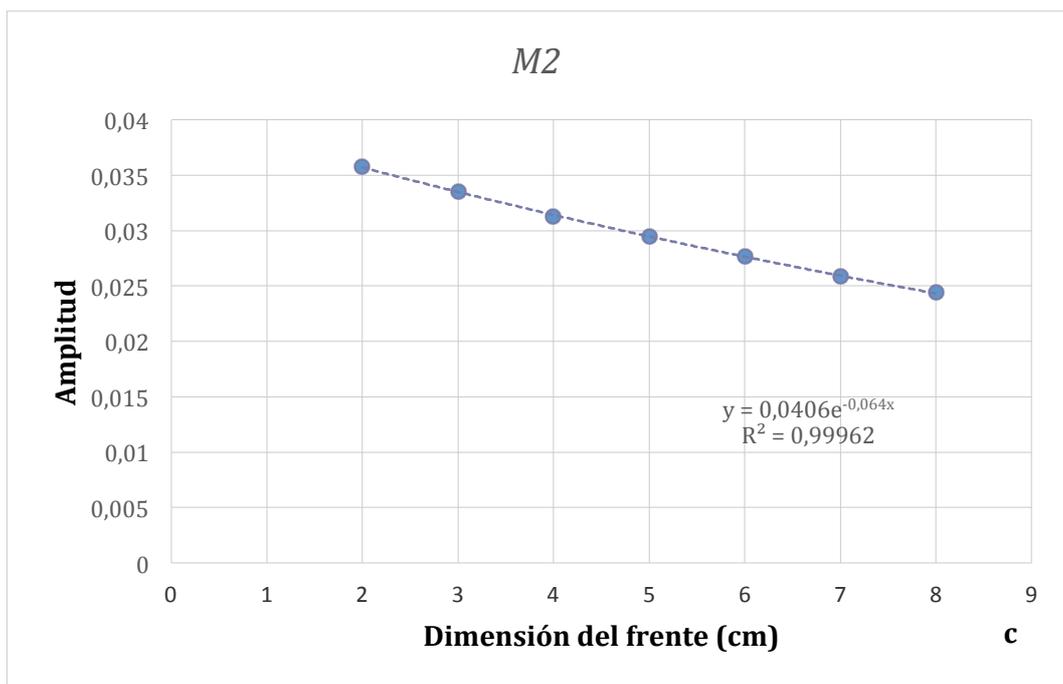
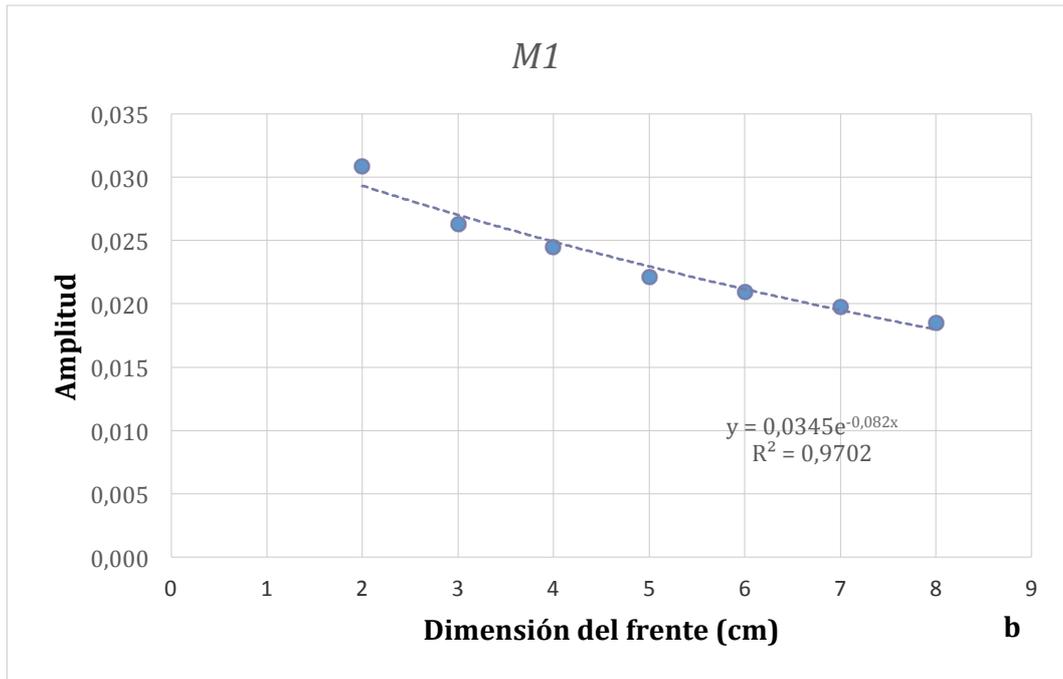
Tal y como se ha expuesto anteriormente, los picos de la onda directa, *D*, y las ondas del hormigón, *H*, no variaban cuando no había solape con el frente. No obstante, la onda del frente y del metal sí que presentaban variaciones conforme iba aumentando las dimensiones del frente (Tabla 6.14).

Tabla 6.14 Amplitudes de picos F, M1, M2 y M3 de las trazas obtenidas para el bloque seco y con diferentes espesores del frente (de 0,5 cm hasta 11 cm). Antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua.

	AMPLITUD			
	F	M1	M2	M3
Seca	-	0,054	0,065	0,023
F-0.5	-	0,049	0,055	0,020
F-1	0,029	0,017	0,032	0,014
F-2	0,042	0,031	0,036	0,014
F-3	0,051	0,026	0,034	0,013
F-4	0,063	0,025	0,031	0,013
F-5	0,078	0,022	0,029	0,012
F-6	0,100	0,021	0,028	0,011
F-7	0,134	0,020	0,026	0,011
F-8	0,184	0,018	0,024	0,010
F-9	0,058	0,017	0,023	0,010
F-10	-	0,016	0,021	0,008
F-11	-	0,016	0,022	0,011

Para una mejor interpretación de las estas variaciones se han representado en la figura 6.9 los valores de las amplitudes de los picos en función del espesor del frente del agua y calculado las ecuaciones que mejor se ajustaban a estos valores.





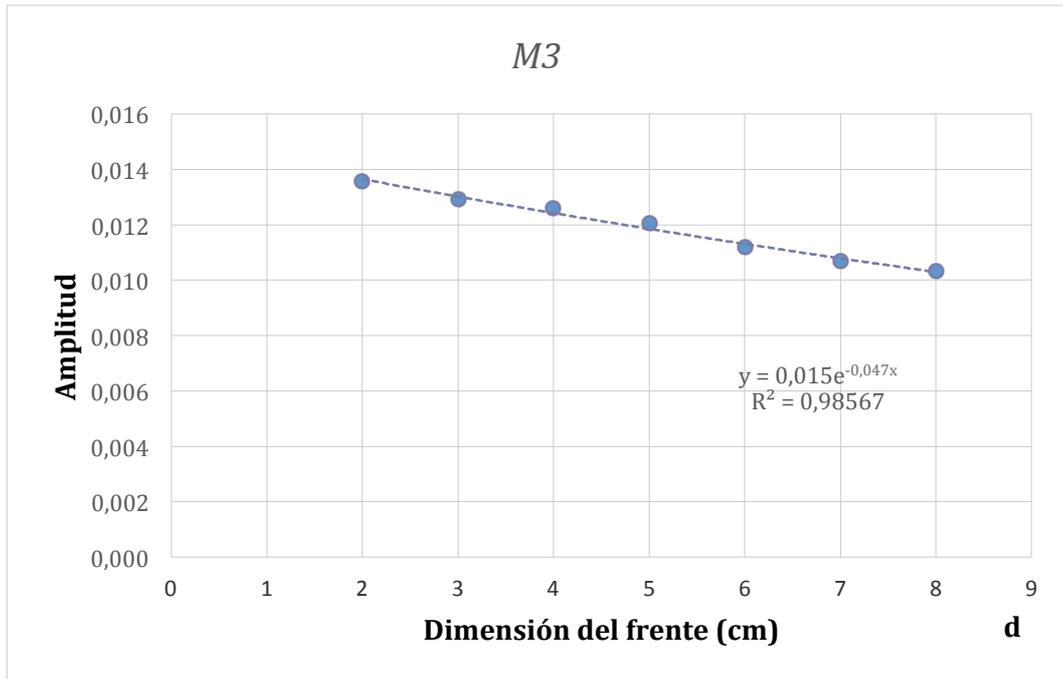


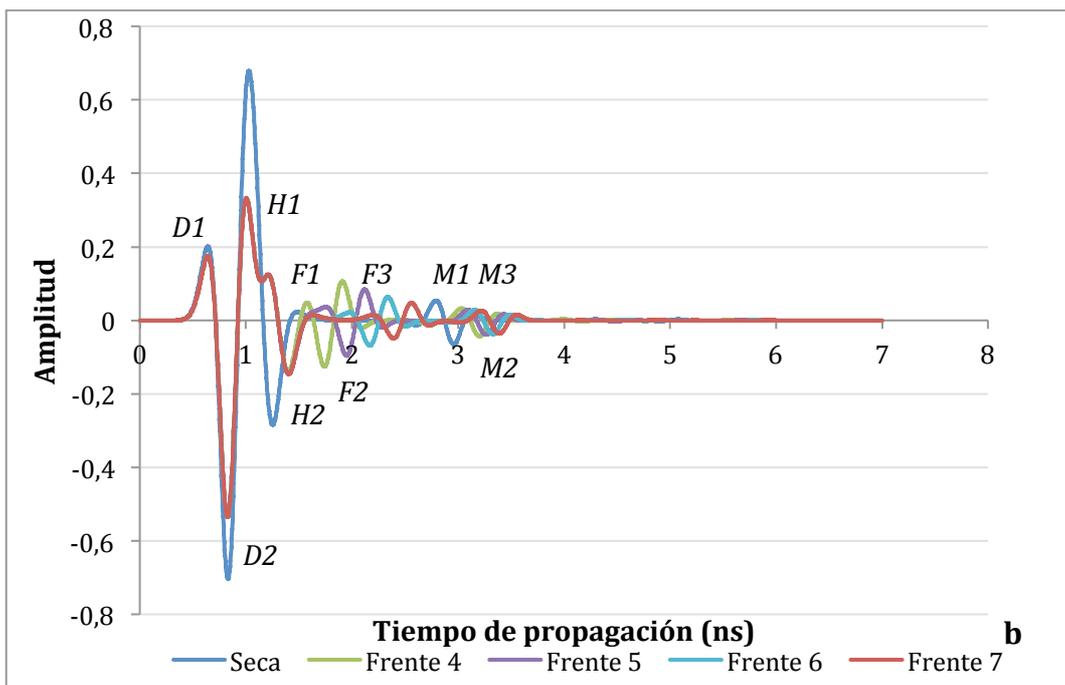
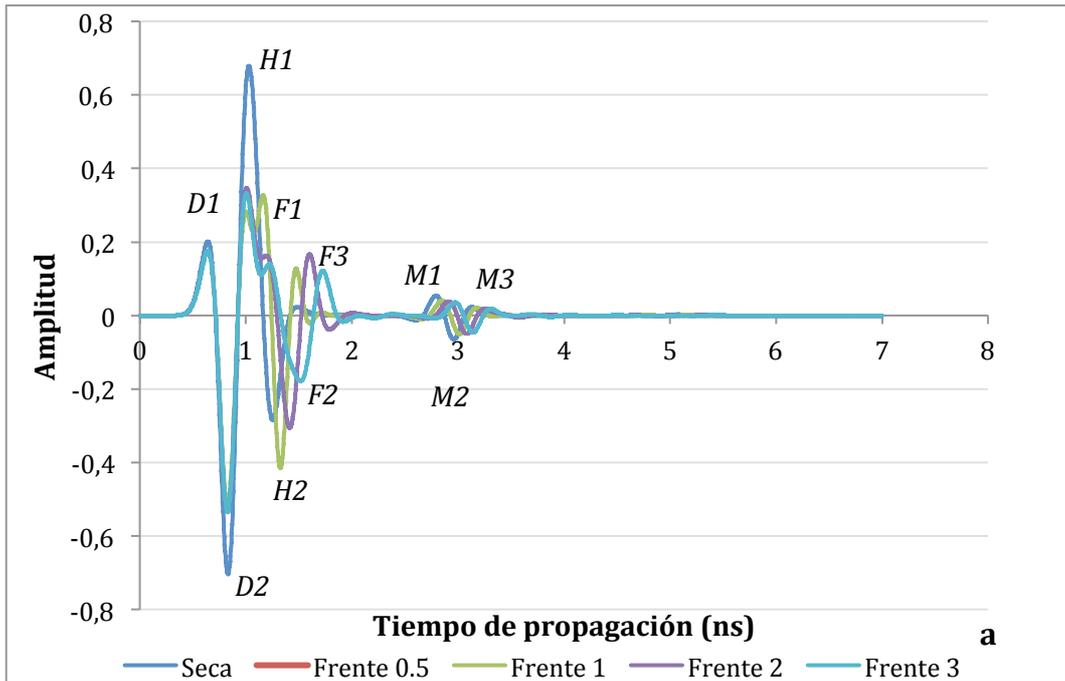
Figura 6.9 (a) Valores de las amplitudes de los picos del frente del agua (b) del pico M1 (c) del pico M2 y (d) del pico M3 en función del espesor del frente. Antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua.

El resultado que se obtuvo para todos los picos era coherente. En el caso de la onda reflejada en el frente (F) se observó que la amplitud del pico aumentaba a medida que aumentaba el tamaño del frente de agua, como era de esperar, ya que al aproximarse el frente a la posición de la antena el recorrido de la onda era menor (ver figura 6.9a). Del mismo modo, en el caso de los picos de la reflexión en el metal (ver figuras: 6.9b, 6.9c y 6.9d) se observó que la amplitud de los picos iba disminuyendo puesto que, al haber cada vez un mayor recorrido de la onda por hormigón húmedo, la onda se iba atenuando cada vez más.

6.3.2.- Caso: Cuando la antena se coloca en la misma cara que se introduce en agua

Resultados

En la figura 6.10 se representan las trazas simuladas para el bloque de hormigón con distintos espesores del frente del agua. Como se puede observar en estas trazas se identifican los siguientes picos: dos de la onda directa ($D1$ y $D2$) dos en la onda del hormigón ($H1$ y $H2$), tres en la onda del frente del agua ($F1$, $F2$ y $F3$) y tres en la onda del metal ($M1$, $M2$ y $M3$). Se han marcado estos picos en las señales modeladas con un frente de 3 cm y de 5 cm (F-3 y F-5), por ser donde más claro se aprecia.



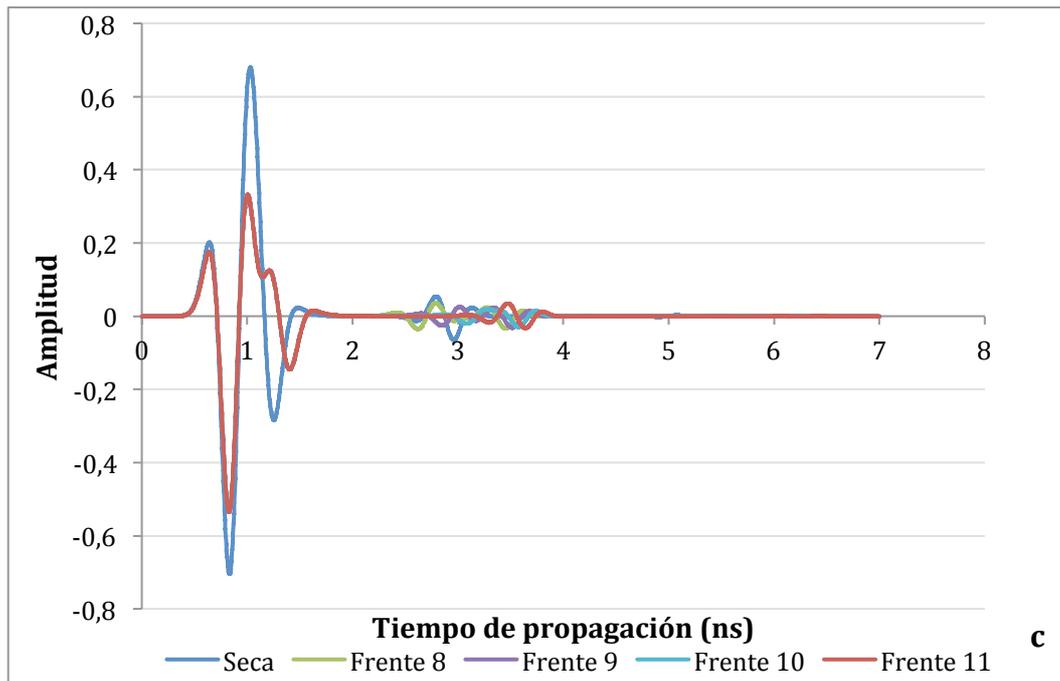


Figura 6.10 (a) Modelo numérico para el bloque seco y con un frente de 0,5 cm, 1 cm, 2 cm y 3 cm (b) para tamaños de frente de 4 cm, 5 cm, 6 cm y 7cm y (c) para 8 cm, 9 cm, 10 cm y 11cm. Antena colocada en la cara que se introduce en agua.

En las señales generadas se podía ver cómo el frente del agua al principio se solapaba con la onda hormigón y a medida que iba avanzando llegaba un momento en el que se solapaba con la que hemos llamado onda metal de modo que no se puede identificar correctamente.

Para interpretar los modelos numéricos generados se han medido los tiempos de llegada (ns) (tabla 6.15) de cada uno de los picos de las ondas registradas y las amplitudes (tabla 6.16) para cada una de las profundidades.

En la tabla 6.15 se observa, tal y como era de esperar, que los valores de los tiempos de llegada de los picos de las ondas directas, D , eran constantes. En el caso de los tiempos en las ondas del hormigón, H , al principio iban variando debido a interferencias con el frente del agua, pero a partir de la traza F-4 (frente de 4 cm de espesor) se mantenían con valor constante, al separarse estas dos ondas. Los tiempos del frente del agua aumentaban como consecuencia del aumento del espesor del frente del agua y los tiempos de llegada de las ondas del metal aumentaban puesto que la permitividad del hormigón húmedo era mayor (velocidad de propagación menor).

Tabla 6.15 Tiempos de llegadas (ns) de los diferentes picos en las trazas simuladas para diferentes profundidades del frente del agua. Antena colocada en la cara que se introduce en agua.

	TIEMPO (ns)												
	Seca	F-0,5	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11
D1	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
D2	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
H1	1,04	1,09	1,17	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
H2	1,26	1,29	1,33	1,42	1,52	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41
F	-	-	1,48	1,61	1,73	1,92	2,13	2,34	2,57	2,80	3,02	-	-
M1	2,80	2,83	2,86	2,92	2,98	3,04	3,10	3,17	3,23	3,29	3,35	3,28	3,48
M2	2,97	3,00	3,02	3,09	3,15	3,21	3,27	3,33	3,40	3,46	3,52	3,58	3,65
M3	3,13	3,17	3,18	3,26	3,32	3,38	3,44	3,50	3,56	3,62	3,68	3,75	3,81

Es importante resaltar que el máximo de la onda *F* es claramente indicador de cómo avanza el frente. A medida que el espesor del frente aumentaba el recorrido de la onda por la zona húmeda aumentaba y, por tanto, lo hacía también el tiempo de llegada de la reflexión de la onda del frente. Esto quedaba también confirmado al realizar el ajuste entre el tiempo de llegada y la profundidad del frente ya que, como se observa en la figura 6.11, nos daba una ecuación lineal con pendiente positiva y con un alto grado de ajuste. Este resultado era esperable, pero lo que es importante es que nos indicaba que las lecturas de los picos de la reflexión en el frente de agua (onda *F*) se hicieron correctamente.

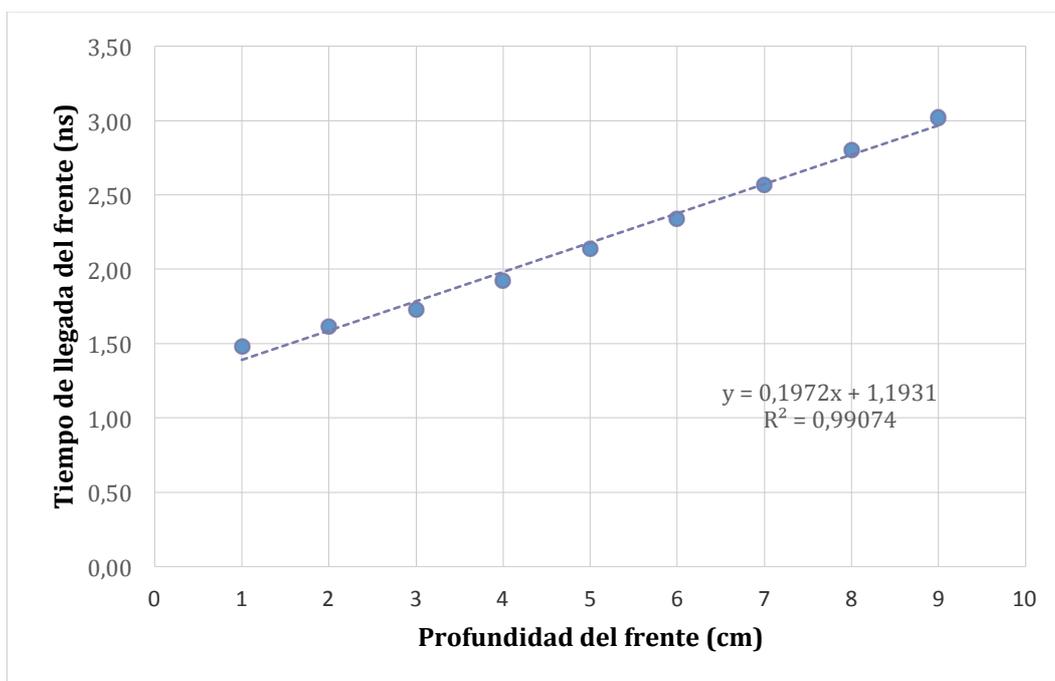


Figura 6.11 Tiempo de llegada del primer pico de la onda reflejada en el frente de agua (ns) en función del espesor del frente (cm). Antena colocada en la cara que se introduce en agua.

En la Tabla 6.16 se muestra el resumen de las amplitudes de los diferentes picos obtenidos. Tras observar la tabla se puede decir que las amplitudes de los picos $D1$ y $D2$ se veían afectadas por la interferencia con las reflexiones en el frente cuando el espesor del mismo era 0,5 cm y 1 cm (F-0,5 y F-1) permaneciendo constantes en el resto. Esta misma situación se producía con las amplitudes $H1$ y $H2$ que daban valores erráticos cuando se producía interferencia con el frente del agua (frentes entre 3 cm y 4 cm) permaneciendo constantes para el resto. Las amplitudes del pico F , disminuían a medida que aumentaba el espesor del frente, salvo cuando se producía solape con la onda hormigón. Y por último, los valores de las amplitudes de la reflexión en el metal ($M1$, $M2$ y $M3$) iban disminuyendo conforme aumentaba el frente dado que en el hormigón húmedo se produce una mayor atenuación que en el hormigón seco.

Tabla 6.16 Amplitudes de los diferentes picos de las trazas obtenidas para el bloque seco y con diferentes espesores del frente (de 0,5 cm hasta 11 cm). Antena colocada en la cara que se introduce en agua.

	AMPLITUD						
	Seca	F-0.5	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5
D1	0,202	0,180	0,176	0,175	0,175	0,175	0,175
D2	-0,704	-0,531	-0,515	-0,535	-0,535	-0,535	-0,535
H1	0,679	0,464	0,327	0,347	0,332	0,332	0,332
H2	-0,284	-0,330	-0,415	-0,305	-0,178	-0,138	-0,146
F	-	-	0,128	0,167	0,121	0,106	0,084
M1	0,054	0,041	0,040	0,038	0,035	0,032	0,029
M2	-0,065	-0,047	-0,050	-0,049	-0,046	-0,043	-0,039
M3	0,023	0,014	0,021	0,018	0,018	0,018	0,016
	AMPLITUD						
	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11	
D1	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175	
D2	-0,535	-0,535	-0,535	-0,535	-0,535	-0,535	
H1	0,332	0,332	0,332	0,332	0,332	0,332	
H2	-0,146	-0,146	-0,146	-0,146	-0,146	-0,159	
F	0,064	0,047	0,035	0,025	-	-	
M1	0,028	0,026	0,024	0,023	0,019	0,035	
M2	-0,038	-0,036	-0,034	-0,032	-0,030	-0,033	
M3	0,015	0,015	0,015	0,014	0,014	0,012	

Interpretación de resultados

Una vez se comprobó que la identificación del máximo del frente del agua era correcta el siguiente paso era comprobar que el procedimiento de lectura de tiempos de llegada de los picos nos permitía determinar la permitividad dieléctrica del hormigón seco y del húmedo. Para ello el procedimiento establecido fue el siguiente.

Paso 1: Cálculo de las propiedades dieléctricas de la probeta seca. Es el mismo que el indicado en el apartado 6.3.1.

Paso 2: Cálculo de las propiedades dieléctricas de la parte de la probeta que estaba seca (hormigón seco). A partir de las lecturas de los tiempos de llegada en los modelos numéricos generados cuando las probetas de hormigón estaban parcialmente húmedas y con la antena situada en la cara húmeda se calcularon los intervalos de tiempo entre las distintas combinaciones del pico de la onda de la reflexión en el frente y los picos de la onda de la reflexión en el metal (tabla B del anexo 1. Tablas). Con el tiempo de propagación y el recorrido en la parte seca se calculó la velocidad de propagación (ec. 6.2) y con ello se determinó la permitividad dieléctrica (ec. 2.3) de la parte seca. Este resultado se muestra en la tabla 6.17

Tabla 6.17 Velocidad de propagación y permitividad dieléctrica para la parte seca de las probetas parcialmente húmedas para distintas combinaciones de picos. Antena colocada en la cara que se introduce en agua.

VELOCIDAD (cm/ns)												
	F-0,5	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11
	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
M1	-	16,00	15,28	14,43	14,23	14,31	14,63	15,19	16,11	18,33	-	-
M2	-	14,28	13,53	12,70	12,37	12,20	12,13	12,08	12,08	12,08	-	-
M3	-	12,96	12,14	11,37	10,96	10,66	10,42	10,11	9,71	9,06	-	-
PERMITIVIDAD												
	F-0,5	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11
	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
M1	-	3,51	3,86	4,32	4,44	4,39	4,20	3,90	3,47	2,68	-	-
M2	-	4,41	4,92	5,58	5,88	6,05	6,12	6,17	6,17	6,17	-	-
M3	-	5,36	6,11	6,96	7,49	7,92	8,28	8,81	9,55	10,96	-	-

En este caso la velocidad y la permitividad presentaban valores aproximados entre si para la combinación de picos *F* y *M2* cuando el frente tenía un espesor entre 3 cm y 9 cm (las celdas correspondientes de la tabla 6.12 están marcadas). La velocidad promedio que se obtenía para estos casos es 12,23 cm/ns con una desviación típica de 0,23 cm/ns. En cuanto a la permitividad se obtenía un valor promedio de 6,02 con una desviación típica de 0,22, es decir, un poco inferior a la introducida en el modelo de simulación (7,00). Es de señalar que el intervalo de 3 cm a 9 cm de espesor del frente, que es en el que se obtienen resultados adecuados, se encuentra en absoluto acuerdo con el criterio 1 de resolución vertical.

Paso 3: Cálculo de las propiedades dieléctricas de la parte de la probeta con frente de agua (hormigón húmedo). Por último, a partir de las

lecturas de los tiempos de llegada en los modelos numéricos generados cuando las probetas de hormigón estaban parcialmente húmedas y con la antena situada en la cara húmeda se calcularon los intervalos de tiempo entre las distintas combinaciones del pico de la onda directa y del hormigón con el pico de la onda de la reflexión en el frente (tabla B del anexo 1. Tablas). Con el tiempo de propagación y el recorrido en la parte húmeda se calculó la velocidad de propagación (ec. 6.2) y con ello se determinó la permitividad dieléctrica (ec.2.3) de la parte húmeda. Este resultado se muestra en la tabla 6.18.

Tabla 6.18 Velocidad de propagación y permitividad dieléctrica para la parte húmeda de las probetas parcialmente húmedas para distintas combinaciones de picos. Antena colocada en la cara que se introduce en agua.

VELOCIDAD (cm/ns)												
	F-0,5	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11
	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
D1	-	6,45	6,65	7,19	7,42	7,56	7,66	7,74	7,80	7,86	-	-
D2	-	8,33	8,27	8,71	8,72	8,67	8,61	8,58	8,55	8,54	-	-
H1	-	6,41	6,75	8,33	8,84	8,99	9,01	9,00	8,98	8,96	-	-
H2	-	13,32	21,20	28,86	15,62	13,96	12,83	12,08	11,54	11,16	-	-
PERMITIVIDAD												
	F-0,5	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11
	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
D1	-	21,67	20,34	17,39	16,33	15,74	15,35	15,03	14,78	14,55	-	-
D2	-	12,99	13,15	11,87	11,84	11,98	12,13	12,23	12,30	12,33	-	-
H1	-	21,89	19,78	12,96	11,51	11,14	11,09	11,11	11,17	11,22	-	-
H2	-	5,07	2,00	1,08	3,69	4,62	5,47	6,17	6,75	7,23	-	-

Como se observa en la tabla, la velocidad y la permitividad presentaban valores muy aproximados entre si para la combinación de picos *D2* y *F* cuando el frente tenía un espesor entre 3 cm y 9 cm (las celdas correspondientes están marcadas en la tabla 6.13). La velocidad promedio que se obtenía para estos casos es 8,63 cm/ns con una desviación típica de 0,07 cm/ns. En cuanto a la permitividad se obtenía un valor promedio de 12,10 con una desviación típica de 0,20, es decir, un poco inferior a la introducida en el modelo de simulación (12,5). Es de señalar que, de nuevo como en el caso anterior, el intervalo de espesor del frente donde se obtuvieron valores coherentes (de 3 cm a 9 cm) se encuentra en absoluto acuerdo con el criterio 1 de resolución vertical.

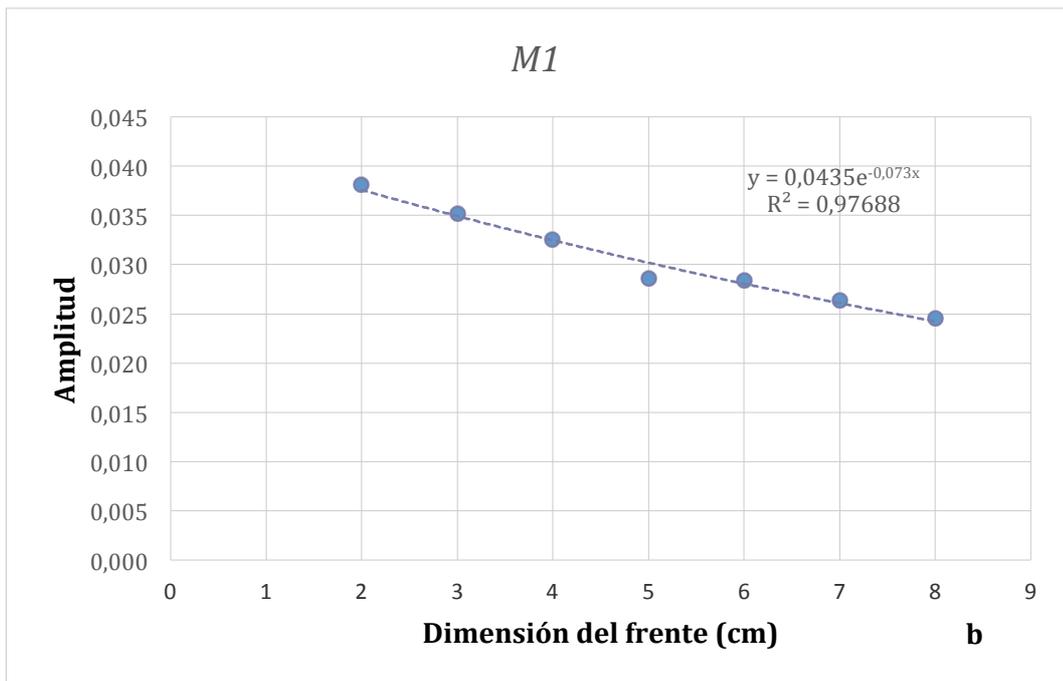
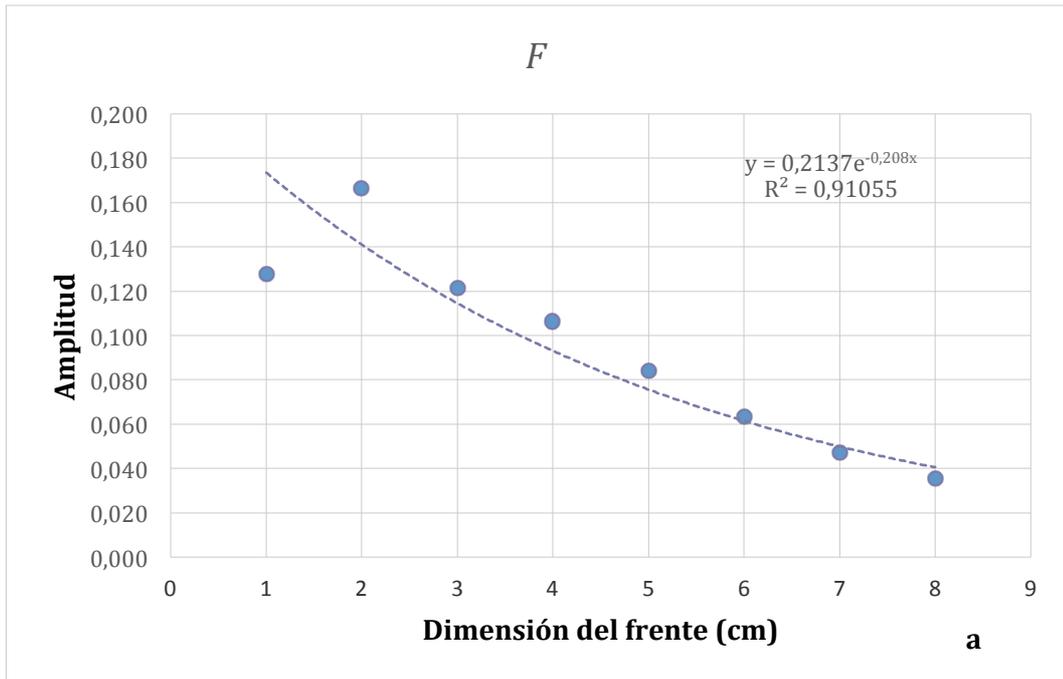
Por último, con respecto a la interpretación de los registros de este caso, es decir, cuando la antena se coloca en la misma cara en la que se produce la inmersión se analizaron las variaciones que se producían en las amplitudes.

Tal y como se ha expuesto anteriormente los máximos de la onda directa, D , y las ondas del hormigón, H , no variaban cuando no había solape con el frente. No obstante, la onda del frente y del metal sí que presentaban variaciones conforme iba aumentando las dimensiones del frente (Tabla 6.19).

Tabla 6.19 Amplitudes de los diferentes picos F, M1, M2 y M3 de las trazas obtenidas para el bloque seco y con diferentes espesores del frente (de 0,5 cm hasta 11 cm). Antena colocada en la cara que se introduce en agua.

	AMPLITUD			
	F	M1	M2	M3
Seca	-	0,054	0,065	0,023
F-0.5	-	0,041	0,047	0,014
F-1	0,128	0,040	0,050	0,021
F-2	0,167	0,038	0,049	0,018
F-3	0,121	0,035	0,046	0,018
F-4	0,106	0,032	0,043	0,018
F-5	0,084	0,029	0,039	0,016
F-6	0,064	0,028	0,038	0,015
F-7	0,047	0,026	0,036	0,015
F-8	0,035	0,024	0,034	0,015
F-9	0,025	0,023	0,032	0,014
F-10	-	0,019	0,030	0,014
F-11	-	0,035	0,033	0,012

Para una mejor interpretación de estas variaciones se han representado en la figura 6.12 los valores de las amplitudes de los picos en función del espesor del frente del agua y calculado las ecuaciones que mejor se ajustaban a estos valores.



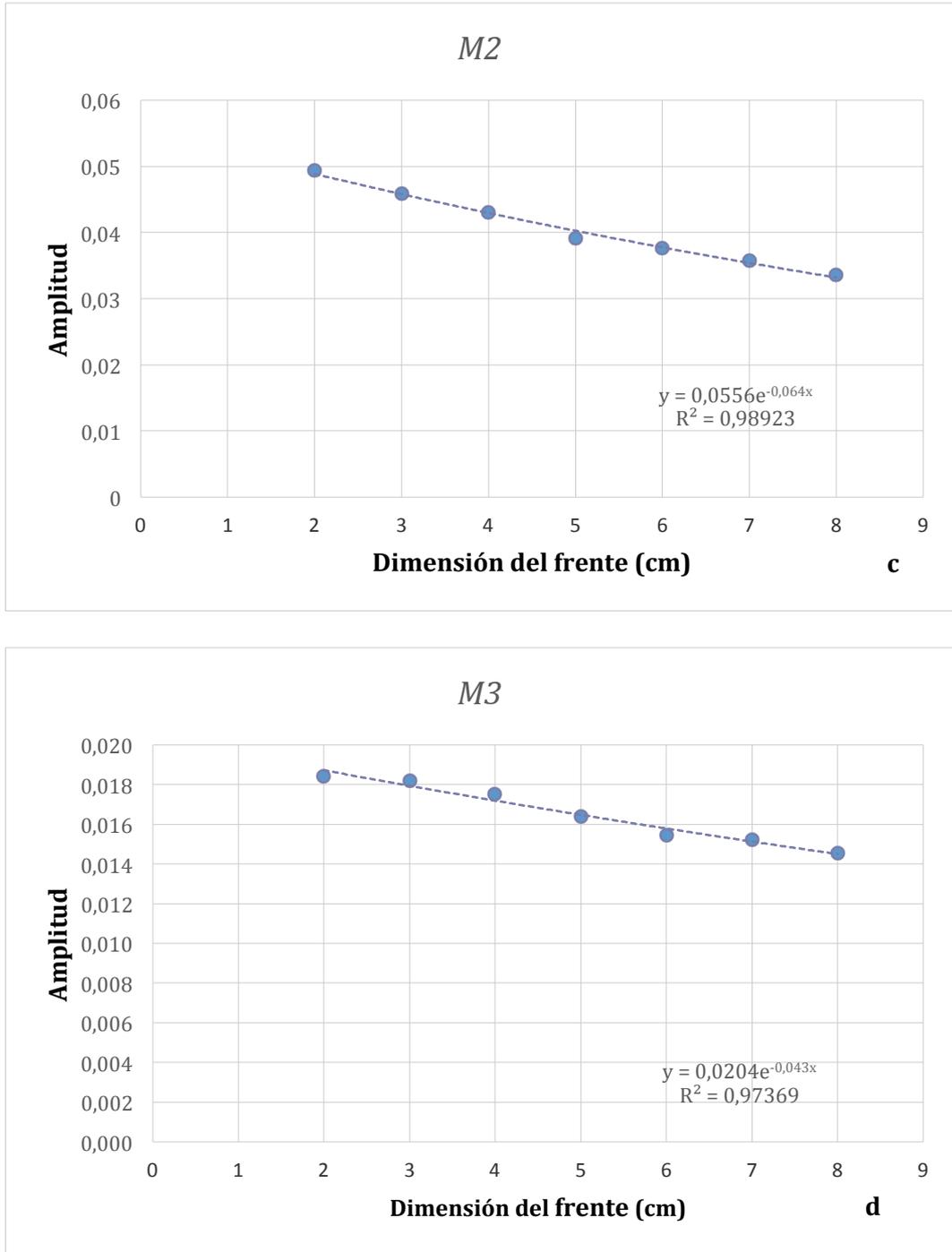


Figura 6.12 (a) Valores de las amplitudes de los picos del frente del agua (b) del pico M1 (c) del pico M2 y (d) del pico M3 en función del espesor del frente. Antena colocada en la cara que se introduce en agua.

El resultado obtenido para todos los picos es coherente puesto que a medida que aumenta el frente del agua la amplitud, tanto la reflexión en el frente como la que se produce en el metal va disminuyendo puesto que se va produciendo una mayor atenuación.

6.3.3.- Comparación con una experiencia real: determinación del frente de avance del agua

Resultados

El primer paso es la generación de modelos que reproduzcan la situación de las probetas después de haber sido sumergidas en agua. Para ello se toman los registros experimentales de las probetas 12 a la 22 porque son las que tienen un frente de agua de espesor mayor a 3 cm (de acuerdo con el criterio Rv-1).

En la figura 6.13 se representan las trazas registradas de forma experimental para la probeta 12, tanto cuando estaba seca como cuando estaba húmeda, con la antena situada en la cara que permanecía seca. Como se puede observar en estas trazas se podían identificar una serie de ondas (reflexiones) con distintos picos. En primer lugar se encontraron dos picos de la onda directa (*D1* y *D2*) y dos de la onda del hormigón (*H1* y *H2*). Estos picos eran idénticos, en posición y amplitud, para la probeta seca y húmeda, ya que la trayectoria de estas ondas no se veía afectada por la presencia del frente de agua. La onda del frente del agua (*F*) que aparecía, obviamente, en la probeta después de la inmersión. Se ha señalado el primer pico positivo ya que es, como se ha visto en los apartados anteriores, adecuado para representar la llegada de la reflexión en el frente del agua y, además, era el más fácil de identificar en las trazas experimentales.

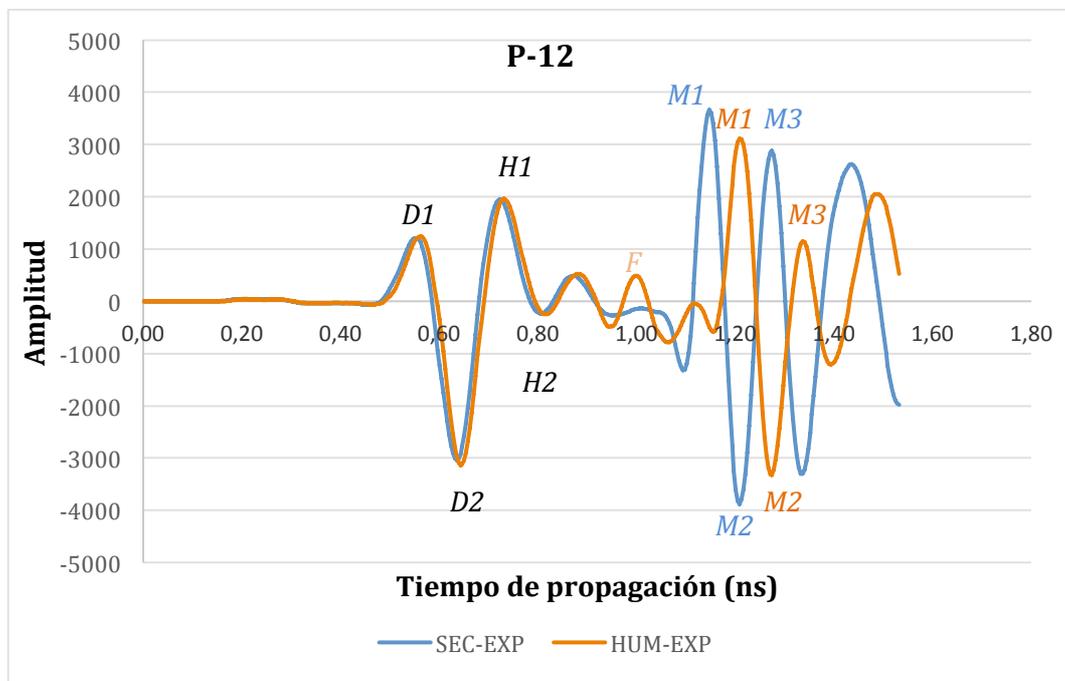


Figura 6.13 Trazas registradas de forma experimental en la probeta 12 cuando estaba seca y húmeda

Por último, tres picos en la onda del metal (*M1*, *M2* y *M3*) en la probeta seca y en la húmeda. Se puede observar que la reflexión en el metal después de la inmersión se retrasaba con respecto a la de la seca, ya que la onda viajaba por una zona de hormigón húmedo y, por tanto, lo hacía a menor velocidad. También se observa que la amplitud de los picos disminuía a causa de la mayor atenuación producida en la zona húmeda.

Para poder generar los modelos numéricos era necesario introducir los valores de las constantes dieléctricas del hormigón seco y húmedo. Para ello partimos de los valores obtenidos de las trazas registradas experimentalmente (anexo 1, Tabla C). A continuación se muestra la rutina empleada a través del ejemplo de la probeta 12 (P-12). Todas las mediciones y cálculos realizados para el resto de probetas se encuentran en el anexo 1, Tabla D y Tabla E.

En primer lugar se midieron los tiempos de llegada de los picos de las ondas (directa, hormigón, frente y metal) en las trazas experimentales para la probeta seca y húmeda (tabla 6.20).

Tabla 6.20 Tiempos de llegada (ns) de los diferentes picos de la traza registrada experimentalmente para la probeta 12 cuando estaba seca y húmeda

P-12	TIEMPO (ns)	
	SEC-EXP	HUM-EXP
D1	1,98	2,02
D2	2,28	2,31
H1	2,60	2,63
H2	-	-
F	-	3,57
M1	4,10	4,32
M2	4,33	4,57
M3	4,55	4,77

En segundo lugar se calcularon los intervalos de tiempo entre las combinaciones de picos que en el apartado anterior se comprobó eran las más adecuadas. Conociendo la trayectoria y el tiempo, se calcularon la velocidad (ec. 6.2) y la constante dieléctrica (ec. 6.3) de la probeta seca y de la zonas seca y húmeda de la probeta húmeda (tabla 6.21).

Tabla 6.21 Incrementos de tiempo (ns) entre las combinaciones de picos adecuadas para la probeta seca y las zonas seca y húmeda de la probeta húmeda. La velocidad y constante dieléctrica calculada con este incremento.

P-12 seca			
D1	M1		
	Δt (ns)	v (cm/ns)	ϵ
	-2,12	11,33	7,02
P-12 húmeda (zona seca 8,89 cm)			
D1	F		
	Δt (ns)	v (cm/ns)	ϵ
	-1,54	11,51	6,8
P-12 húmeda (zona húmeda 3,11 cm)			
F	M1		
	Δt (ns)	v (cm/ns)	ϵ
	-0,75	8,27	13,15

A continuación se generó un modelo como referencia considerando el bloque totalmente seco. Se introdujo en el algoritmo una constante dieléctrica que era el promedio de los valores obtenidos de forma experimental para la probeta completamente seca (7,02) y para la zona seca de la probeta que se había puesto en agua (6,8). Para la probeta P-12 este valor era 6,91.

Se generó también un modelo con un frente de agua cuyo espesor era igual al de la probeta experimental correspondiente (en este caso 3,11 cm de frente de agua). Las constantes dieléctricas introducidas eran: para la zona de hormigón seco la que se utilizó en la del modelo seca de referencia (en este caso 6,91) y en la zona de hormigón húmeda la obtenida en la zona húmeda de la probeta experimental (13,15).

A continuación en la figura 6.14 se muestran las trazas modeladas obtenidas para la probeta 12 simulada.

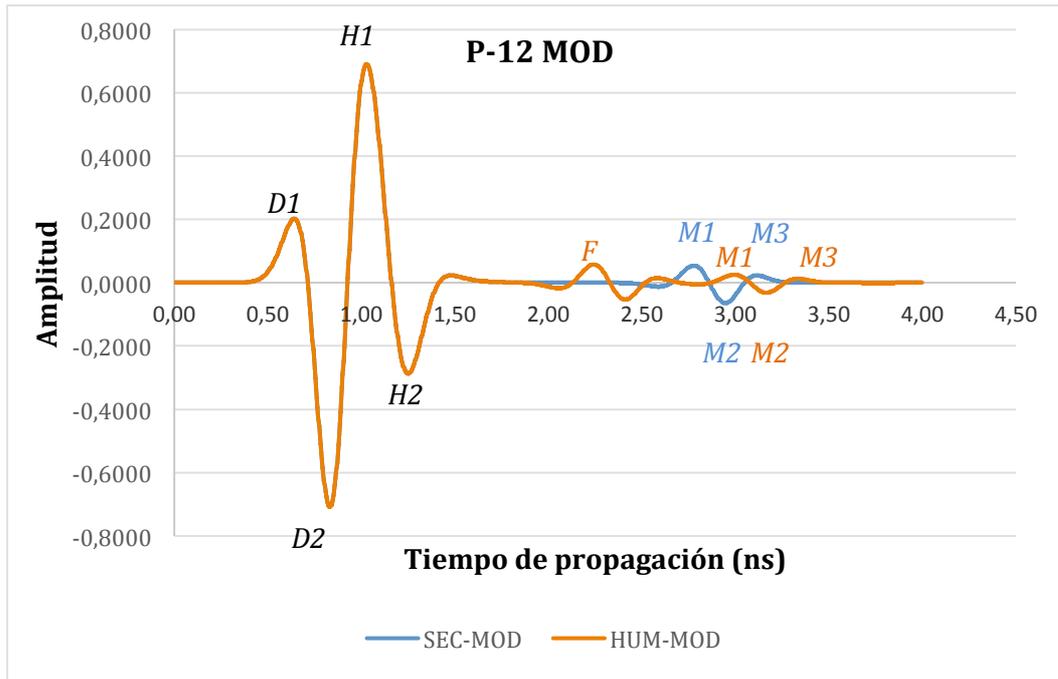


Figura 6.14 Modelo numérico para la probeta 12 simulada en estado seco y parcialmente húmeda

Para interpretar los modelos numéricos generados y compararlos con los correspondientes experimentales se midieron los tiempos de llegada (ns) de cada uno de los picos de las trazas de la probeta 12 modelada (tabla 6.22). Se observa, tal y como era de esperar, que los valores de los tiempos de llegada de los picos de las ondas directas, *D*, y las ondas del hormigón, *H*, eran muy parecidos para la probeta seca y húmeda. Para la probeta húmeda vemos que ya aparecía el frente del agua, *F*, y los tiempos de llegada de las ondas del metal (*M1*, *M2* y *M3*) de la húmeda eran mayores que los de la probeta seca, puesto que la permitividad del hormigón húmedo es mayor (velocidad de propagación menor).

Tabla 6.22 Tiempos de llegada (ns) de los diferentes picos para la probeta 12 modelada en estado seco y parcialmente húmeda

P-12 MOD	TIEMPO (ns)	
	SECA	HÚMEDA
<i>D1</i>	0,65	0,65
<i>D2</i>	0,84	0,84
<i>H1</i>	1,04	1,04
<i>H2</i>	1,26	1,26
<i>F</i>	-	2,25
<i>M1</i>	2,78	3,00
<i>M2</i>	2,94	3,17
<i>M3</i>	3,13	3,34

A partir de las lecturas de los tiempos de llegada de las probetas simuladas se calcularon los intervalos de tiempo entre las distintas combinaciones de picos. En el caso de la probeta seca se calculó la diferencia de tiempos entre la llegada del pico *D1* de la onda directa y el resto de picos de la onda hormigón y la onda metal. En el caso de la probeta húmeda se calculó la diferencia de tiempos entre la llegada del pico *D1* de la onda directa y el resto de picos de la onda hormigón, del frente y la onda metal y, además, la diferencia entre el tiempo de llegada del pico *F* y los picos de la onda metal. Estos incrementos de tiempo para el caso de la probeta 12 modelada (P-12 MOD) se recogen en la tabla 6.23 y en el anexo 1, Tabla F y Tabla G se muestra el valor de los tiempos y de estos incrementos para todas las probetas modeladas, de la 12 hasta la 22 correspondientemente.

Tabla 6.23 Incrementos de tiempo (ns) entre diferentes combinaciones de picos adecuadas para la probeta 12 modelada seca y parcialmente húmeda.

INCREMENTOS DE TIEMPO (COMBINACIÓN DE PICOS) (ns)									
P-12 MOD	D1						F		
	H1	H2	F	M1	M2	M3	M1	M2	M3
SECA	-0,39	-0,61	-	-2,13	-2,29	-2,48	-	-	-
HÚMEDA	-0,39	-0,61	-1,60	-2,35	-2,52	-2,69	-0,75	-0,92	-1,09

El último paso era comprobar que el procedimiento de lectura de tiempos de llegada de los picos nos permitía determinar la permitividad dieléctrica del hormigón seco y del húmedo tanto para la probeta modelada seca y húmeda. Para ello se calcularon los intervalos de tiempo entre las combinaciones de picos que en el apartado anterior se comprobó eran las más adecuadas. Conociendo la trayectoria y el tiempo, se calcularon la velocidad (ec. 6.2) y la constante dieléctrica (ec. 6.3) de la probeta seca y de la zonas seca y húmeda de la probeta húmeda (tabla 6.24).

Tabla 6.24 Incrementos de tiempos de llegada de los máximos para la probeta 12 modelada seca y modelada parcialmente húmeda. La velocidad y constante dieléctrica calculada con este incremento.

P-12 MOD seca			
D1	M1		
	Δt (ns)	v (cm/ns)	ϵ
	-2,13	11,25	7,11
P-12 MOD húmeda (zona seca 8,89 cm)			
D1	F		
	Δt (ns)	v (cm/ns)	ϵ
	-1,6	11,13	7,27
P-12 MOD húmeda (zona húmeda 3,11 cm)			
F	M1		

	Δt (ns)	v (cm/ns)	ϵ
	-0,75	8,24	13,25

Interpretación de resultados

Un primer resultado que muestra la fiabilidad de la simulación es que en las trazas modeladas, como se observa en la figura 6.14, se identificaron los mismos picos que vimos en las experimentales. En primer lugar se encontraron dos picos de la onda directa ($D1$ y $D2$) y dos de la onda del hormigón ($H1$ y $H2$). La onda del frente del agua (F) que aparecía, obviamente, en la probeta simulada con un frente de agua y, por último, tres picos en la onda del metal ($M1$, $M2$ y $M3$) en la probeta seca y en la húmeda. Además, estos picos seguían, como puede observarse, el mismo patrón que los de las trazas de las probetas experimentales: $D1$, $D2$, $H1$ y $H2$ coincidían en posición y amplitud para la probeta seca y húmeda y $M1$, $M2$ y $M3$ de la probeta húmeda se retrasaban y disminuían de amplitud respecto a los de la probeta seca.

En segundo lugar vemos que los valores que se obtuvieron de la velocidad y de la constante dieléctrica del hormigón seco y del hormigón húmedo, a partir de los tiempos de llegada de los picos de las trazas simuladas, son muy próximos a los que se obtuvieron en las probetas que se midieron de forma experimental. Este resultado se pone de manifiesto con la comparación de los resultados mostrados en la tabla 6.21 y la tabla 6.24. Esto también muestra que las combinaciones de picos que proporcionaban resultados más adecuados eran las mismas que las obtenidas en el apartado anterior. Para la probeta seca $D1-M1$ y para después de la inmersión en la parte seca de la probeta $D1-F$ y en la parte húmeda $F-M1$.

En la tabla 6.25 se muestran los resultados de las velocidades de propagación en el hormigón seco y húmedo obtenidas para todas las probetas, de la 12 a la 22. Los valores se obtuvieron a partir de las trazas que se registraron experimentalmente cuando las probetas estaban secas y después de la inmersión en agua y a partir de las trazas modeladas para estas dos mismas situaciones. Vemos que el valor de la velocidad, para cada una de las circunstancias estudiadas, de las once probetas es muy similar como muestra la pequeña desviación típica obtenida en todos los casos. Además, el valor promedio de las velocidades, en hormigón seco y en hormigón húmedo, obtenidas en las probetas experimentales y las modeladas dan valores muy próximos.

En la tabla 6.26 se muestran los resultados de las constantes dieléctricas, obtenidas a partir de las velocidades de propagación, en el hormigón seco y húmedo para todas las probetas, de la 12 a la 22.

Tabla 6.25 Resumen de las velocidades de propagación en las probetas (de la 12 a la 22), secas y parcialmente húmedas, obtenidas a partir de las trazas registradas experimentalmente y las obtenidas con el modelo

VELOCIDAD (cm/ns)						
Probeta	SECA		HÚMEDA		HÚMEDA	
	EXP	MOD	EXP		MOD	
	Seca	Seca	Z. Seca	Z. Húmeda	Z.Seca	Z.Húmeda
12	11,33	11,25	11,51	8,27	11,13	8,24
13	11,40	11,15	11,30	8,59	11,52	8,81
14	11,40	11,37	11,76	8,01	11,75	8,11
15	11,47	11,31	11,52	8,48	10,95	8,86
16	11,47	11,54	12,03	7,79	12,48	7,81
17	11,40	11,46	11,93	7,98	12,38	8,33
18	11,40	11,46	11,90	7,82	13,27	8,02
19	11,40	11,42	11,86	7,81	12,62	8,03
20	11,72	11,69	12,93	7,53	12,93	7,60
21	11,25	11,50	12,19	7,52	13,01	7,73
22	11,33	11,48	12,06	7,75	13,31	8,07
Promedio	11,42	11,42	11,91	7,96	12,30	8,15
Desviación	0,12	0,15	0,43	0,35	0,84	0,40

Tabla 6.26 Resumen de las permitividades dieléctricas en las probetas (de la 12 a la 22), secas y parcialmente húmedas, obtenidas a partir de las trazas registradas experimentalmente y las obtenidas con el modelo

PERMITIVIDAD						
Probeta	SECA		HÚMEDA		HÚMEDA	
	EXP	MOD	EXP		MOD	
	Seca	Seca	Z. Seca	Z. Húmeda	Z.Seca	Z.Húmeda
12	7,02	7,11	6,79	13,16	7,27	13,26
13	6,93	7,24	7,05	12,20	6,78	11,60
14	6,93	6,96	6,51	14,03	6,52	13,68
15	6,84	7,03	6,78	12,52	7,51	11,47
16	6,84	6,75	6,22	14,83	5,78	14,76
17	6,93	6,86	6,32	14,13	5,87	12,97
18	6,93	6,86	6,36	14,72	5,11	13,99
19	6,93	6,91	6,40	14,76	5,65	13,96
20	6,55	6,58	5,38	15,87	5,38	15,58
21	7,11	6,80	6,06	15,92	5,32	15,06
22	7,02	6,83	6,19	14,98	5,08	13,82
Promedio	6,91	6,90	6,37	14,28	6,02	13,65
Desviación	0,16	0,18	0,44	1,23	0,86	1,30

Para una mejor interpretación de estos resultados se han representado estos valores en unas gráficas (Figura 6.15).

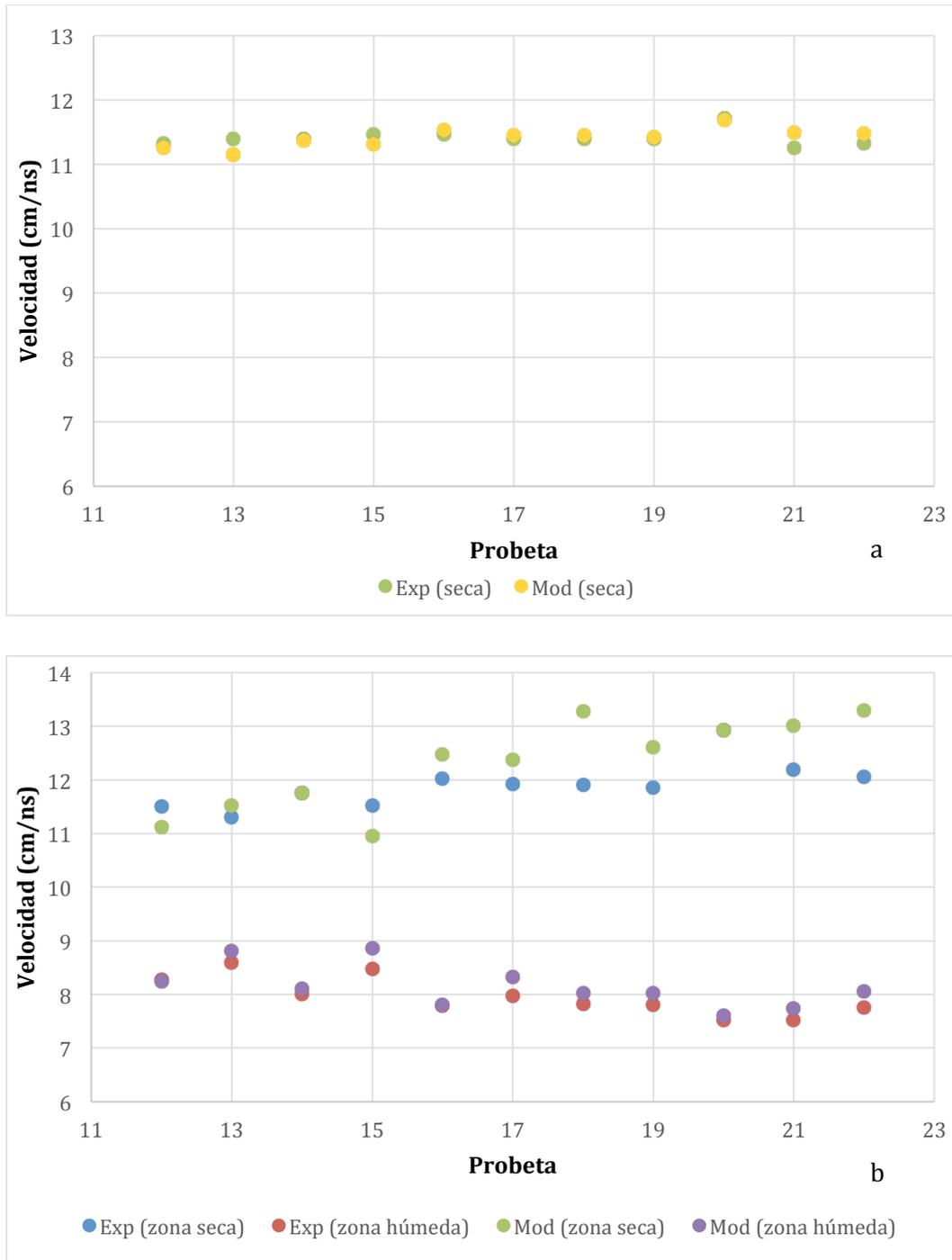
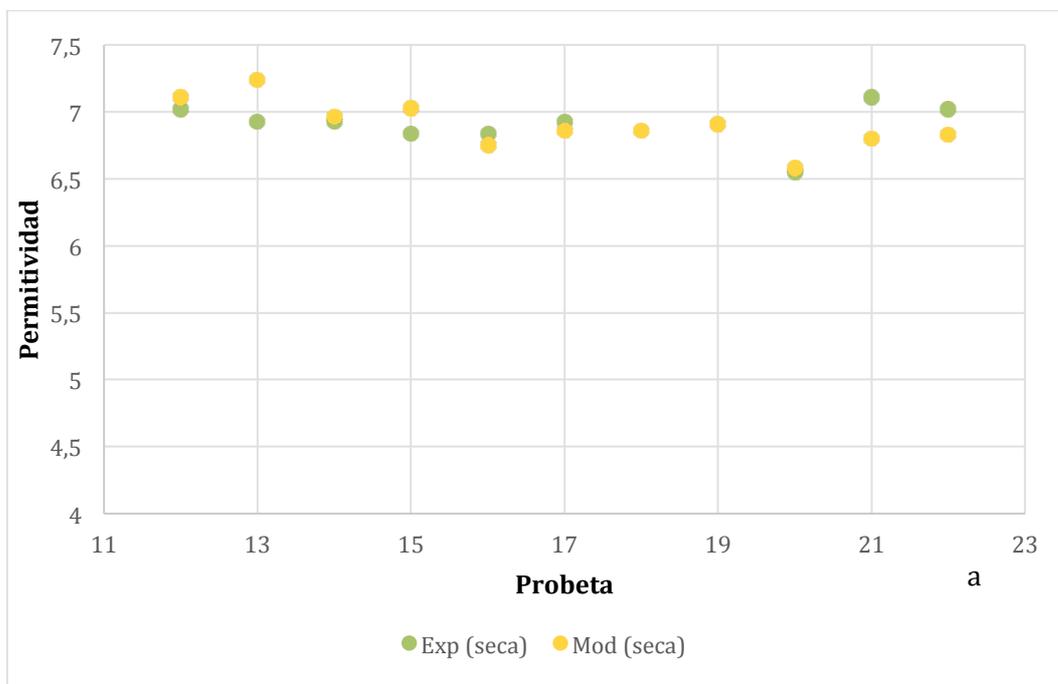


Figura 6.15 (a) Valores de las velocidades de propagación en las probetas experimentales y modeladas cuando estaban completamente secas (b) velocidades de la zona seca y de la zona húmeda de las probetas experimentales y modeladas cuando estaban parcialmente húmedas

En estas figuras se representan los valores de las velocidades de las probetas modeladas y experimentales cuando estaban completamente secas

(Figura 6.15a). En la figura se puede observar que todos los puntos se encuentran en una franja muy estrecha y los valores experimentales y los de los modelos prácticamente son coincidentes. También se representan (Figura 6.15b) las velocidades en las zonas seca y húmeda de las probetas modeladas y experimentales cuando estaban parcialmente húmedas. En este caso se observa una mayor dispersión de valores, aunque no es muy grande, y una gran coincidencia, en general, entre los valores experimentales y los de los modelos. Esta coincidencia es particularmente manifiesta en la zona húmeda.

En la figura 6.16 se representan los valores de la permitividad dieléctrica obtenidas a partir de las velocidades de propagación de las probetas modeladas y experimentales cuando estaban completamente secas (Figura 6.15a) y cuando estaban parcialmente húmedas (Figura 6.15b).



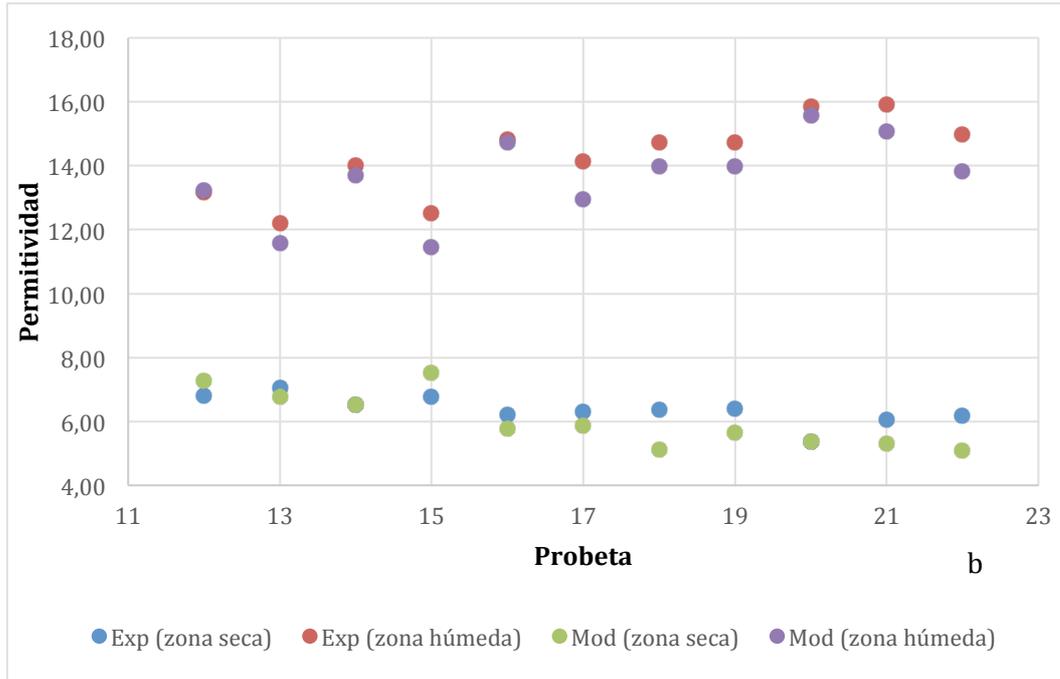


Figura 6.16 (a) Valores de las permitividades dieléctricas en las probetas experimentales y modeladas cuando estaban completamente secas (b) permitividades dieléctricas de la zona seca y de la zona húmeda de las probetas experimentales y modeladas cuando estaban parcialmente húmedas

Los valores de la permitividad representados, tanto para las probetas experimentales como las modeladas, son muy próximos a 7 cuando las probetas estaban completamente secas. Cuando se encontraban parcialmente húmedas se obtienen valores de la permitividad de la zona seca ligeramente inferiores a 7, siendo más pequeña, de forma general, la permitividad obtenida con el modelo. En la zona húmeda se obtienen valores próximos a 14, siendo también en este caso más pequeña, de forma general, la permitividad obtenida con el modelo.

7. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo era estudiar, mediante modelizaciones numéricas, el comportamiento de ondas electromagnéticas de 2 GHz cuando se propagan por un bloque de hormigón que se encuentra parcialmente húmedo. Es decir, el bloque tiene una zona seca y otra húmeda cuyas proporciones van variando. Los modelos se generaron simulando dos posiciones de la antena, generadora y receptora. En una de las posiciones la antena estaba situada sobre la cara del bloque en contacto con la parte seca del hormigón y en la otra posición estaba situada sobre la cara del bloque que estaba en contacto con la parte húmeda del hormigón. La generación de estos modelos se realizó por medio del software *gprMax*, que está basado en el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD). La fiabilidad de los modelos generados ha sido contrastada mediante la comparación de los resultados obtenidos a partir de los modelos con los que anteriormente se habían obtenido a partir de ensayos experimentales. Estos ensayos se llevaron a cabo con un equipo de georradar de la marca GSSI y con una antena de 2 GHz.

Los resultados de este trabajo, desarrollado partiendo de los objetivos iniciales, permitieron llegar a las siguientes conclusiones:

En lo que se refiere al conocimiento que he adquirido sobre la técnica no destructiva del georradar puedo concluir que la realización del presente trabajo y la documentación previa a su realización han contribuido de forma notable a ampliar mi instrucción sobre el fundamento teórico del georradar, los métodos de medición, así como conocer la potencialidad de su aplicación en el ámbito descrito en este estudio.

Considerando que la técnica del georradar ya no es tan novedosa, y aunque su utilización es cada vez mayor en distintos ámbitos, he podido constatar que su aplicación sigue siendo muy limitada en sectores como la edificación y la construcción. Sin embargo, es una técnica no destructiva que puede tener un gran potencial como herramienta de diagnóstico en la ingeniería de la construcción y, particularmente, como técnica para caracterizar materiales como, por ejemplo, el hormigón, que ha sido el material objeto de estudio en este trabajo.

Realizar este trabajo me ha permitido conocer cuáles son los métodos matemáticos que actualmente son utilizados en la generación de modelos numéricos realistas de propagación de ondas electromagnéticas. Además, he aprendido a generar estos modelos partiendo del software libre *gprMax*. Esto último ha supuesto por mi parte una gran dedicación ya que este software actualmente no está completamente desarrollado. En estos momentos uno de los grupos investigadores de georradar más importantes y prestigiosos de Europa sigue desarrollándolo.

Las conclusiones obtenidas a partir de los resultados de los modelos numéricos generados, para simular la propagación de ondas electromagnéticas en bloques de hormigón en el que avanza, desde una cara hacia la opuesta, un frente de agua, son:

En la fase de calibración se concluyó que, en el caso de estudiar hormigón con una antena de 2 GHz, el criterio que se ha de aplicar para determinar la resolución vertical, es decir, la distancia vertical mínima entre dos eventos para que puedan ser identificados separadamente, es que sea igual a una semilongitud de onda (en este trabajo se ha llamado criterio 1). En el caso de hormigón seco este espesor mínimo es de aproximadamente 3 cm y en el caso de húmedo 2 cm.

A continuación se comprobó en primer lugar que los modelos generados simulando bloques parcialmente húmedos, tanto en los que se consideró la antena situada en la cara de la parte seca o en la húmeda opuesta, seguían un patrón de comportamiento coherente (los tiempos de llegada y las amplitudes de las señales) cuando la dimensión del frente iba variando. Esto constituye una primera confirmación de la adecuación de los modelos.

Seguidamente se comprobó con estos modelos que el primer pico positivo de la onda reflejada en el frente de agua, F , (llamada onda frente en este trabajo) es el que indicaba de forma más clara cómo avanzaba dicho frente. Esta conclusión quedaba corroborada por la alta correlación obtenida en los ajustes lineales realizados entre el tiempo de llegada de este pico y la profundidad del frente. Este resultado es de gran importancia ya que es precisamente este pico de la onda del frente el que mejor se identifica en las trazas experimentales.

Una vez mostrada la coherencia de las trazas simuladas, se determinó qué combinación de picos resultaba la más adecuada para estudiar cada caso. Cuando el bloque estaba seco se comprobó que la combinación más adecuada era $D1-M1$, $D2-M2$ y $H1-M3$. Se mostró que considerando el intervalo de tiempo entre estos picos la permitividad dieléctrica que se obtenía era muy próxima a 7, que era la que se había introducido en el modelo.

Del mismo modo cuando se estudiaba el avance del frente del agua desde la cara seca (opuesta a la que se introduce en agua) la combinación de picos más adecuada era $D1-F$ en la zona seca y $F-M1$ en la zona húmeda. Considerando el intervalo de tiempo entre $D1-F$ la permitividad dieléctrica que se obtenía era en promedio 6,98 (desviación típica 0,03), es decir, muy próxima a 7, que era la que se había introducido en el modelo para la zona seca. Asimismo, considerando el intervalo de tiempo entre $F-M1$ la permitividad dieléctrica que se obtenía era en promedio 11,54 (desviación típica 0,28), es decir, un poco inferior a 12,5, que era la que se había introducido en el modelo para la zona húmeda.

También se estudió el avance del frente del agua desde la cara húmeda (misma que se introduce en agua). En este caso la combinación de picos más adecuada era *D2-F* en la zona húmeda y *F-M2* en la zona seca. Considerando el intervalo de tiempo entre *D2-F* la permitividad dieléctrica que se obtenía era en promedio 12,10 (desviación típica 0,20), es decir, muy próxima a 12,5, que era la que se había introducido en el modelo para la zona húmeda. Asimismo, considerando el intervalo de tiempo entre *F-M2* la permitividad dieléctrica que se obtenía era en promedio 6,02 (desviación típica 0,22), es decir, un poco inferior a 7, que era la que se había introducido en el modelo para la zona seca.

Finalmente se estableció un procedimiento para comparar las trazas que se habían obtenido en un ensayo experimental previo con las trazas simuladas con el modelo. Se obtuvo que tanto las velocidades de propagación como las permitividades dieléctricas halladas en todos los casos, con las combinaciones de picos determinadas para el avance del frente del agua desde la cara seca (opuesta a la que se introduce en agua), eran muy similares para los resultados experimentales y para los del modelo. Esto de nuevo ponía de manifiesto la adecuación de los modelos para estudiar el comportamiento de ondas electromagnéticas de 2 GHz cuando se propagan por un bloque de hormigón que se encuentra parcialmente húmedo y, además, se ha podido establecer qué combinaciones de picos

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azwin N., Rosli S., Nordiana M.M., Nisa A. (2013) Predictive mapping of underground utilities using Ground Penetrating Radar. *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, 2, 104-108.

Benedetto A., Manacorda G., Simi A., Tosti F. (2012) Novel perspectives in bridges inspection using GPR. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 27 (3), 239-251.

Brancaccio A., Soldovieri F., Leone G., Sglavo D., Pierri R. (2006) Microwave characterization of materials in civil engineering.

Botella Y. (2018) Estudio del efecto de las propiedades dieléctricas del hormigón en los parámetros de las ondas electromagnéticas del georradar. Modelización numérica del comportamiento del hormigón con *gprMax*.

Capuz-Lafarga L., R. Capuz Lladró, García García F., Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., Díez Barra R. (2011) Evaluación de la madera estructural para la rehabilitación de las Naves Cros (Valencia, España) por medio de diferentes técnicas no destructivas". CIMAD 11 - 1^{er} Congreso Ibero-Latino Americano de la Madera en la Construcción, Coimbra, Portugal.

Carcione J.M. (1996a) Ground-penetrating radar: Wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media. *Geophysics*, 61 (6), 1664-1677.

Carcione J.M. (1996b) Wave propagation in anisotropic, saturated porous media: Planewave theory and numerical simulation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 99 (5), 2655-2666.

García F., Blanco M.R., Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., Tort-Ausina I., Benlloch J., Montalvá J.L. (2007) GPR technique as a tool for cultural heritage restoration: San Miguel de los Reyes Hieronymite Monastery, 16th century (Valencia, Spain). *Journal of Cultural Heritage*, 8 (1), 87-92.

Fernández Castilla A. (2015) Aplicación de la técnica no destructiva del georradar para evaluar la absorción de agua en hormigón endurecido. Trabajo Final de Máster de la Universitat Politècnica de València.

Halabe U.B. (1990) *Condition assessment of reinforced concrete structures using electromagnetic waves*. Tesis doctoral de MIT.

Hugenschmidt J., Mastrangelo R. (2006) GPR inspection of concrete bridges. *Cement and Concrete Composites*, 28 (4), 384-392.

Huisman J.A., Snepvangers J.J.C., Bouten W., Heuvelink G.B.M. (2003) Monitoring temporal development of spatial soil water content variation: comparison of ground penetrating radar and time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*, 2, 519-529.

Jeng Y., Chen C. (2012) Subsurface GPR imaging of a potential collapse area in urban environments. *Engineering Geology*, 147, 57-67.

Klysz G., Balayssac J.P., Laurens S. (2007) Spectral analysis of radar surface waves for non-destructive evaluation of cover concrete. *NDT & Engineering International*, 37, 221-227.

Klysz G., Balayssac J.P., Ferrieres X. (2008) Evaluation of dielectric properties of concrete by a numerical FDTD model of a GPR coupled antenna-Parametric study. *NDT & Engineering International*, 41, 621-631.

Lalagüe A., Hoff I. (2010) Determination of space behind pre-cast concrete elements in tunnels using GPR". *13th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Lecce, Italia.

Laurens S., Balayssac J.P., Rhazi J., Argligue G. (2002) Influence of concrete relative humidity on the amplitude of Ground-penetrating radar (GPR) signal. *Materials and Structures*, 35, 198-203.

Laurens S., Balayssac J.P., Rhazi J., Klysz G., Arlignie G. (2005) Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modelling. *Materials and Structures*, 38 (283), 827-832.

Maierhofer C., Leipold S., Wiggerhausere H. (1998) Investigations of the influence of moisture and salt content on the dielectric properties of brick materials using radar. *7th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Kansas, EEUU.

Marshall, Stanley V., Richard E. y Skitek G. (1982) *Electromagnetic concepts and applications*. Editorial Prentice Hall International, 734 pp.

Neville A.M. (1997) *Properties of concrete*. Fourth Edition. Editorial: Prentice Hall.

Nigel J., Cassidy N., Eddied 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 (4), 263-276.

Pérez V., Garcia F.G., Rodríguez-Abad I. (2008) GPR evaluation of the damage found in the reinforced concrete base of a block of flats: A case study. *NDT & Engineering International*, 41 (5), 341-353.

Pérez-Gracia V. (2014) Innovative inspection procedure for effective GPR surveying of buildings. *Cost Action TU 1208. Civil engineering applications of ground penetrating radar*. AracneEditrice, Roma, Italia.

Ramírez M., García F., Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., Benlloch J. (2008) Ground-penetrating radar survey for subfloor mapping and analysis of structural damage in the SagradoCorazón de Jesús Church, Spain. *Archaeological Prospection*, 15 (4), 285-292.

Robert A. (1996) Dielectric permittivity of concrete between 50 MHz and 1 GHz and GPR measurements for building materials evaluation. *6th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Sendai, Japón.

Robert A. (1998) Dielectric permittivity of concrete between 50 MHz and 1 GHz and GPR measurements for building materials evaluation. *Journal of Applied Geophysics*, 40, 89-94.

Rodríguez Abad, I. (2016) Apuntes de la asignatura de Ensayos y Comportamiento en Servicios del Máster en Edificación de la Universidad Politécnica de Valencia.

Rodríguez Abad, I. (2010) Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, España.

Sbartai Z.M., Laurens S., Balayssac J.P., Arliguie G., Ballivy G. (2006a) Ability of the direct wave of radar ground-coupled antenna for NDT of concrete structures. *NDT & Engineering International*, 39 (5), 400-407.

Sbartai Z.M., Laurens S., Balayssac J.P., Ballivy G., Arliguie G. (2006b) Effect of concrete moisture on radar signal amplitude. *ACI Materials Journal*, 103 (6), 419-426.

Soutsos M.N., Bungey J.H., Millard S.G., Shaw M.R., Patterson A. (2001) Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing. *NDT & Engineering International*, 34, 419-425.

Sutinen R. (1992) Glacial deposits, their electrical properties and surveying by image interpretation and ground penetrating radar. *Geological Survey of Finland*, 359, 132 pp.

Turner G. y Siggins A.F. (1994) Constant Q-Attenuation of Subsurface Radar Pulses. *Geophysics*, 59 (), 1192-1200.

Viriyametantont K., Laurens S., Klysz G., Balayssac J.P., Arliguie G. (2008) Radar survey of concrete elements: Effect of concrete properties on propagation velocity and time zero. *NDT & Engineering International*, 41 (3), 198-207.

Warren C., Giannopoulos A.(2017): gprMax User Guide. Release 3.1.1.

Xu T. y Mcmechan G.A. (1997) GPR attenuation and its numerical simulation in 2.5 dimensions. *Geophysics*, 62 (2), 403-414.

Zagoskin V., Iljushenko V.N., Lighthart L.P., Kataev S.G., Yarovoy A.G. (2006) Dielectric properties of moist soils. *11th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Ohio, EEUU.

Zonghou X. y Tripp A.C. (1997) Ground-penetrating radar responses of dispersive models. *Geophysics*, 62 (4), 1127-1131.

Yelf, R. and Yelf, D. [2006] *Where is the True Time Zero? Electromagnetic Phenomena*, 7 (1), 158-163.

ANEXOS

ANEXO 1 Tablas

Tabla A. Incrementos de tiempos de llegada de distintas combinaciones de los picos para los diferentes frentes de agua cuando la antena se coloca en la cara opuesta a la que se introduce en agua.

INCREMENTOS DE TIEMPO (COMBINACIONES DE MÁXIMOS) (ns)								
	D1				D2			
	F	M1	M2	M3	F	M1	M2	M3
Seca	-	-2,15	-2,32	-2,49	-	-1,96	-2,13	-2,29
F-0.5	-	-2,13	-2,32	-2,50	-	-1,94	-2,13	-2,31
F-1	-1,99	-2,25	-2,39	-2,55	-1,79	-2,06	-2,19	-2,36
F-2	-1,82	-2,26	-2,44	-2,61	-1,63	-2,07	-2,25	-2,42
F-3	-1,65	-2,33	-2,50	-2,67	-1,46	-2,14	-2,31	-2,48
F-4	-1,48	-2,39	-2,56	-2,73	-1,29	-2,20	-2,37	-2,54
F-5	-1,31	-2,45	-2,63	-2,79	-1,12	-2,26	-2,43	-2,60
F-6	-1,14	-2,52	-2,69	-2,86	-0,95	-2,33	-2,50	-2,66
F-7	-0,98	-2,58	-2,75	-2,91	-0,79	-2,38	-2,56	-2,72
F-8	-0,83	-2,64	-2,81	-2,98	-0,64	-2,45	-2,62	-2,79
F-9	-0,72	-2,70	-2,88	-3,04	-0,53	-2,51	-2,68	-2,85
F-10	-	-2,76	-2,94	-3,10	-	-2,57	-2,75	-2,91
F-11	-	-2,83	-3,00	-3,17	-	-2,63	-2,81	-2,98

	H1				H2			
	F	M1	M2	M3	F	M1	M2	M3
Seca	-	-1,76	-1,93	-2,10	-	-1,54	-1,71	-1,88
F-0.5	-	-1,74	-1,93	-2,11	-	-1,52	-1,71	-1,89
F-1	-1,60	-1,86	-2,00	-2,16	-1,37	-1,64	-1,78	-1,94
F-2	-1,43	-1,88	-2,05	-2,22	-1,21	-1,65	-1,83	-2,00
F-3	-1,26	-1,94	-2,11	-2,28	-1,04	-1,72	-1,89	-2,06
F-4	-1,09	-2,01	-2,18	-2,28	-0,87	-1,78	-1,95	-2,12
F-5	-0,92	-2,06	-2,24	-2,40	-0,70	-1,84	-2,01	-2,18
F-6	-0,75	-2,13	-2,30	-2,47	-0,53	-1,91	-2,08	-2,24
F-7	-0,59	-2,19	-2,36	-2,53	-0,37	-1,96	-2,14	-2,30
F-8	-0,44	-2,25	-2,43	-2,59	-0,21	-2,02	-2,19	-2,36
F-9	-0,33	-2,32	-2,49	-2,66	-0,14	-2,12	-2,29	-2,46
F-10	-	-2,37	-2,54	-2,70	-	-2,12	-2,29	-2,45
F-11	-	-2,45	-2,62	-2,79	-	-2,24	-2,42	-2,59

	F		
	M1	M2	M3
Seca	-	-	-
F-0.5	-	-	-
F-1	-0,26	-0,40	-0,57
F-2	-0,44	-0,62	-0,79

F-3	-0,69	-0,85	-1,02
F-4	-0,92	-1,09	-1,25
F-5	-1,14	-1,32	-1,48
F-6	-1,37	-1,54	-1,71
F-7	-1,59	-1,77	-1,93
F-8	-1,81	-1,99	-2,15
F-9	-1,98	-2,16	-2,32
F-10	-	-	-
F-11	-	-	-

Tabla B. Incrementos de tiempos de llegada de distintas combinaciones de los picos para los diferentes frentes de agua cuando la antena se coloca en la misma cara que se introduce en agua.

INCREMENTOS DE TIEMPO (COMBINACIONES DE MÁXIMOS) (ns)								
	D1				D2			
	F	M1	M2	M3	F	M1	M2	M3
Seca	-	-2,15	-2,32	-2,49	-	-1,96	-2,13	-2,29
F-0.5	-	-2,18	-2,35	-2,52	-	-1,99	-2,16	-2,33
F-1	-0,84	-2,21	-2,38	-2,53	-0,65	-2,02	-2,19	-2,34
F-2	-0,96	-2,27	-2,44	-2,61	-0,77	-2,08	-2,25	-2,42
F-3	-1,09	-2,33	-2,50	-2,67	-0,90	-2,14	-2,31	-2,48
F-4	-1,27	-2,39	-2,56	-2,73	-1,08	-2,21	-2,38	-2,54
F-5	-1,48	-2,46	-2,63	-2,79	-1,29	-2,27	-2,44	-2,60
F-6	-1,70	-2,52	-2,69	-2,85	-1,51	-2,33	-2,50	-2,66
F-7	-1,92	-2,58	-2,75	-2,91	-1,73	-2,39	-2,56	-2,72
F-8	-2,15	-2,65	-2,81	-2,97	-1,96	-2,46	-2,62	-2,78
F-9	-2,38	-2,70	-2,87	-3,04	-2,19	-2,51	-2,68	-2,85
F-10	-	-2,63	-2,94	-3,10	-	-2,44	-2,75	-2,91
F-11	-	-2,83	-3,00	-3,16	-	-2,65	-2,81	-2,97

	H1				H2			
	F	M1	M2	M3	F	M1	M2	M3
Seca	-	-1,76	-1,93	-2,10	-	-1,54	-1,71	-1,88
F-0.5	-	-1,74	-1,91	-2,08	-	-1,54	-1,71	-1,88
F-1	-0,31	-1,69	-1,85	-2,01	-0,15	-1,52	-1,69	-1,85
F-2	-0,59	-1,90	-2,07	-2,24	-0,19	-1,50	-1,67	-1,84
F-3	-0,72	-1,97	-2,14	-2,30	-0,21	-1,46	-1,62	-1,79
F-4	-0,90	-2,03	-2,20	-2,30	-0,51	-1,64	-1,81	-1,97
F-5	-1,11	-2,09	-2,26	-2,43	-0,72	-1,69	-1,86	-2,03
F-6	-1,33	-2,15	-2,32	-2,48	-0,94	-1,76	-1,93	-2,09
F-7	-1,56	-2,21	-2,38	-2,55	-1,16	-1,82	-1,99	-2,15
F-8	-1,78	-2,28	-2,44	-2,61	-1,39	-1,88	-2,05	-2,21
F-9	-2,01	-2,34	-2,51	-2,67	-1,61	-1,94	-2,11	-2,28

F-10	-	-2,27	-2,57	-2,73	-	-1,87	-2,18	-2,34
F-11	-	-2,47	-2,63	-2,80	-	-2,07	-2,24	-2,40

	F		
	M1	M2	M3
Seca	-	-	-
F-0.5	-	-	-
F-1	-1,37	-1,54	-1,70
F-2	-1,31	-1,48	-1,65
F-3	-1,25	-1,42	-1,58
F-4	-1,12	-1,29	-1,46
F-5	-0,98	-1,15	-1,31
F-6	-0,82	-0,99	-1,15
F-7	-0,66	-0,83	-0,99
F-8	-0,50	-0,66	-0,82
F-9	-0,33	-0,50	-0,66
F-10	-	-	-
F-11	-	-	-

Tabla C. Permitividad dieléctrica para cada una de las probetas tanto para la experimental como para la modelada

Permitividad Dieléctrica			
Probeta	Experimental	Modelada	
	Seca	Seca	Húmeda
12	6,70	6,91	13,15
13	6,56	6,99	12,21
14	6,31	6,72	14,02
15	6,39	6,81	12,53
16	6,11	6,53	14,84
17	6,19	6,63	14,14
18	6,17	6,64	14,70
19	6,22	6,67	14,74
20	5,97	6,38	15,87
21	6,14	6,58	15,92
22	6,13	6,60	15,00

Tabla D. Tiempos de llegada de los picos para las diferentes probetas secas y húmedas experimentales

TIEMPO (ns)								
Probeta	D1	D2	H1	H2	F	M1	M2	M3
12								
SECA-EXP	1,98	2,28	2,60	-	-	4,1	4,33	4,55
HUM-EXP	2,02	2,31	2,63	-	3,57	4,32	4,57	4,77
13								
SECA-EXP	2,01	2,30	2,61	-	-	4,12	4,33	4,57
HUM-EXP	2,02	2,31	2,63	-	3,51	4,35	4,57	4,80
14								
SECA-EXP	2,01	2,30	2,60	-	-	4,12	4,33	4,57
HUM-EXP	2,08	2,37	2,67	-	3,51	4,40	4,62	4,87
15								
SECA-EXP	2,01	2,30	2,60	2,88	-	4,10	4,32	4,55
HUM-EXP	2,05	2,34	2,65	2,93	3,50	4,36	4,58	4,83
16								
SECA-EXP	2,00	2,30	2,60	-	-	4,09	4,31	4,54
HUM-EXP	2,02	2,31	2,63	-	3,36	4,38	4,61	4,85
17								
SECA-EXP	2,01	2,31	2,61	-	-	4,12	4,35	4,57
HUM-EXP	2,05	2,34	2,65	-	3,38	4,40	4,63	4,87
18								
SECA-EXP	2,01	2,30	2,61	-	-	4,12	4,33	4,57
HUM-EXP	2,02	2,32	2,63	-	3,27	4,44	4,66	4,88
19								
SECA-EXP	2,01	2,30	2,60	-	-	4,12	4,32	4,57
HUM-EXP	2,01	2,31	2,61	-	3,32	4,40	4,63	4,87
20								
SECA-EXP	2,01	2,30	2,61	-	-	4,10	4,32	4,40
HUM-EXP	2,02	2,31	2,63	-	3,29	4,40	4,62	4,85
21								
SECA-EXP	2,00	2,30	2,61	-	-	4,13	4,33	4,57
HUM-EXP	2,04	2,32	2,64	-	3,28	4,46	4,68	4,89
22								
SECA-EXP	2,00	2,30	2,61	-	-	4,12	4,32	4,55
HUM-EXP	2,02	2,34	2,67	-	3,24	4,44	4,68	4,91

Tabla E. Incrementos de tiempos de llegada de distintas combinaciones de picos para las diferentes probetas secas y húmedas experimentales

INCREMENTOS DE TIEMPO (COMBINACIÓN DE MÁXIMOS) (ns)									
Probeta	D1						F		
12	H1	H2	F	M1	M2	M3	M1	M2	M3
SECA-EXP	-0,60	-	-	-2,12	-2,35	-2,57	-	-	-
HUM-EXP	-0,60	-	-1,54	-2,30	-2,54	-2,75	-0,75	-1,00	-1,20
13									
SECA-EXP	-0,60	-	-	-2,11	-2,32	-2,56	-	-	-
HUM-EXP	-0,60	-	-1,49	-2,32	-2,54	-2,78	-0,83	-1,05	-1,29
14									
SECA-EXP	-0,59	-	-	-2,11	-2,32	-2,56	-	-	-
HUM-EXP	-0,59	-	-1,44	-2,32	-2,54	-2,79	-0,89	-1,11	-1,35
15									
SECA-EXP	-0,60	-0,88	-	-2,09	-2,31	-2,54	-	-	-
HUM-EXP	-0,60	-0,88	-1,45	-2,31	-2,53	-2,78	-0,86	-1,08	-1,33
16									
SECA-EXP	-0,60	-	-	-2,09	-2,31	-2,54	-	-	-
HUM-EXP	-0,60	-	-1,34	-2,35	-2,58	-2,83	-1,01	-1,24	-1,49
17									
SECA-EXP	-0,60	-	-	-2,11	-2,34	-2,56	-	-	-
HUM-EXP	-0,60	-	-1,33	-2,35	-2,58	-2,82	-1,03	-1,26	-1,49
18									
SECA-EXP	-0,60	-	-	-2,11	-2,32	-2,56	-	-	-
HUM-EXP	-0,60	-	-1,24	-2,42	-2,64	-2,86	-1,18	-1,39	-1,61
19									
SECA-EXP	-0,60	-	-	-2,11	-2,31	-2,56	-	-	-
HUM-EXP	-0,60	-	-1,31	-2,39	-2,63	-2,86	-1,08	-1,31	-1,54
20									
SECA-EXP	-0,60	-	-	-2,09	-2,31	-2,39	-	-	-
HUM-EXP	-0,60	-	-1,27	-2,38	-2,60	-2,83	-1,11	-1,33	-1,56
21									
SECA-EXP	-0,60	-	-	-2,13	-2,34	-2,57	-	-	-
HUM-EXP	-0,60	-	-1,24	-2,42	-2,64	-2,86	-1,18	-1,39	-1,61
22									
SECA-EXP	-0,64	-	-	-2,12	-2,32	-2,56	-	-	-
HUM-EXP	-0,64	-	-1,22	-2,42	-2,65	-2,88	-1,20	-1,44	-1,67

Tabla F. Tiempos de llegada de los picos para las diferentes probetas secas y húmedas modeladas

TIEMPO (ns)								
Probeta	D1	D2	H1	H2	F	M1	M2	M3
12								
SEC-MOD	0,65	0,84	1,04	1,26	-	2,78	2,94	3,13
HUM-MOD	0,65	0,84	1,04	1,26	2,25	3,00	3,17	3,34
13								
SEC-MOD	0,65	0,84	1,04	1,26	-	2,80	2,96	3,17
HUM-MOD	0,65	0,84	1,04	1,26	2,19	3,00	3,18	3,35
14								
SEC-MOD	0,65	0,84	1,04	1,25	-	2,76	2,92	3,09
HUM-MOD	0,65	0,84	1,04	1,25	2,16	3,04	3,21	3,38
15								
SEC-MOD	0,65	0,84	1,04	1,26	-	2,77	2,94	3,11
HUM-MOD	0,65	0,84	1,04	1,26	2,17	3,00	3,17	3,33
16								
SEC-MOD	0,65	0,84	1,03	1,25	-	2,73	2,89	3,06
HUM-MOD	0,65	0,84	1,03	1,25	2,07	3,08	3,25	3,42
17								
SEC-MOD	0,65	0,84	1,03	1,25	-	2,74	2,91	3,08
HUM-MOD	0,65	0,84	1,03	1,25	2,08	3,06	3,23	3,40
18								
SEC-MOD	0,65	0,84	1,03	1,25	-	2,74	2,91	3,08
HUM-MOD	0,65	0,84	1,03	1,25	1,99	3,13	3,30	3,47
19								
SEC-MOD	0,65	0,84	1,03	1,25	-	2,75	2,91	3,08
HUM-MOD	0,65	0,84	1,03	1,25	2,06	3,11	3,28	3,45
20								
SEC-MOD	0,65	0,84	1,03	1,25	-	2,70	2,87	3,04
HUM-MOD	0,65	0,84	1,03	1,25	2,02	3,12	3,30	3,47
21								
SEC-MOD	0,65	0,84	1,03	1,25	-	2,73	2,90	3,07
HUM-MOD	0,65	0,84	1,03	1,25	2,01	3,16	3,33	3,50
22								
SEC-MOD	0,65	0,84	1,03	1,25	-	2,74	2,90	3,07
HUM-MOD	0,65	0,84	1,03	1,25	1,98	3,14	3,31	3,48

Tabla G. Incrementos de tiempos de llegada de distintas combinaciones de picos para las diferentes probetas secas y húmedas modeladas

INCREMENTOS DE TIEMPO (COMBINACIÓN DE MÁXIMOS) (ns)									
Probeta	D1						F		
12	H1	H2	F	M1	M2	M3	M1	M2	M3
SEC-MOD	-0,39	-0,61	-	-2,13	-2,29	-2,48	-	-	-
HUM-MOD	-0,39	-0,61	-1,60	-2,35	-2,52	-2,69	-0,75	-0,92	-1,09
13									
SEC-MOD	-0,39	-0,61	-	-2,15	-2,32	-2,53	-	-	-
HUM-MOD	-0,39	-0,61	-1,54	-2,36	-2,53	-2,70	-0,81	-0,99	-1,16
14									
SEC-MOD	-0,39	-0,60	-	-2,11	-2,28	-2,44	-	-	-
HUM-MOD	-0,39	-0,60	-1,51	-2,39	-2,56	-2,73	-0,88	-1,05	-1,22
15									
SEC-MOD	-0,39	-0,61	-	-2,12	-2,29	-2,46	-	-	-
HUM-MOD	-0,39	-0,61	-1,52	-2,35	-2,52	-2,69	-0,82	-1,00	-1,16
16									
SEC-MOD	-0,39	-0,60	-	-2,08	-2,24	-2,42	-	-	-
HUM-MOD	-0,39	-0,60	-1,42	-2,43	-2,60	-2,77	-1,01	-1,18	-1,34
17									
SEC-MOD	-0,39	-0,60	-	-2,09	-2,26	-2,43	-	-	-
HUM-MOD	-0,39	-0,60	-1,44	-2,42	-2,59	-2,75	-0,98	-1,15	-1,32
18									
SEC-MOD	-0,39	-0,60	-	-2,09	-2,26	-2,43	-	-	-
HUM-MOD	-0,39	-0,60	-1,34	-2,49	-2,66	-2,82	-1,15	-1,32	-1,48
19									
SEC-MOD	-0,39	-0,60	-	-2,10	-2,27	-2,44	-	-	-
HUM-MOD	-0,39	-0,60	-1,41	-2,46	-2,63	-2,81	-1,05	-1,22	-1,40
20									
SEC-MOD	-0,39	-0,60	-	-2,05	-2,22	-2,39	-	-	-
HUM-MOD	-0,39	-0,60	-1,37	-2,47	-2,65	-2,82	-1,10	-1,27	-1,44
21									
SEC-MOD	-0,39	-0,60	-	-2,09	-2,26	-2,43	-	-	-
HUM-MOD	-0,39	-0,60	-1,37	-2,51	-2,68	-2,85	-1,14	-1,32	-1,48
22									
SEC-MOD	-0,39	-0,60	-	-2,09	-2,26	-2,43	-	-	-
HUM-MOD	-0,39	-0,60	-1,34	-2,49	-2,66	-2,83	-1,16	-1,33	-1,49

ANEXO 2 Índice de Figuras

Figura 2.1 Esquema de propagación de las ondas electromagnéticas.....	12
Figura 2.2 Fundamento de la técnica de georradar.....	13
Figura 2.3 Adquisición puntual (a) y de perfiles (b).	17
Figura 2.4 Esquema de adquisición de datos mediante Common Mid Point.	18
Figura 2.5 Cabecera de un registro obtenido con el georradar, con los principales parámetros del registro: modelo de la antena (5100), frecuencia central de emisión según GSSI (1500 MHz), rango del registro (Range R = 5 ns), posición de inicio de la señal (Position P =-0,5 ns), puntos por traza (sample/scan = 512).....	19
Figura 2.6 Ejemplo de trayectoria de propagación de las ondas (a), traza registrada para un rango de 6 ns (b), posición de la señal a 1,75 ns y puntos por traza que componen la traza (c).	21
Figura 2.7 Descripción de un radargrama: (a) Trayectoria de propagación de las ondas, (b) trazas que componen un radargrama, (c) escala de color para la representación de amplitudes y (d) trazas que componen el radargrama por medio de escala de color.....	23
Figura 4.1 Captura de pantalla de la web de inicio del software gprMax (www.gprmax.com).....	47
Figura 4.2 Archivos necesarios para la descarga de Miniconda.....	48
Figura 4.3 Proceso de instalación de Miniconda.....	49
Figura 4.4 Comprobación de la correcta instalación de Miniconda.	50
Figura 4.5 Comprobación de la correcta instalación de los archivos de gprMax.	50
Figura 4.6 Pantalla de activación del gprMax.....	51
Figura 4.7 Archivo input, con los comandos esenciales	55
Figura 4.8 Activación del software gprMax.....	56
Figura 4.9 Visualización de la pantalla del programa Anaconda donde se encuentran los input files.....	57
Figura 4.10 Programa Anaconda ejecutando un archivo con formato “.in”.....	57
Figura 4.11 Programa Anaconda ejecutando un archivo output para visualizar los resultados.....	58
Figura 4.12 Resultado del modelado numérico de la propagación de las ondas electromagnéticas por medio del procedimiento matemático FDTD, a través del software gprMax.....	59
Figura 4.13 Visualización del software Paraview.....	60
Figura 4.14. Visualización programa HDFView para la transformación de formatos.	62
Figura 5.1 Antena Palm 2 GHz de la marca GSSI (https://www.geophysical.com/antennas).....	67
Figura 5.2 Código para la generación del modelo numérico de la emisión al aire con una antena de 2 GHz.....	67

Figura 5.3 Código para la generación del modelo numérico de la emisión al aire con una antena de 2 GHz en la que se colocó un reflector metálico bajo la muestra	68
Figura 5.4 Esquema de propagación de ondas al emitir a 15 cm del bloque de hormigón.....	70
Figura 5.5 Código para la generación del modelo numérico de al propagarse por el interior del hormigón, colocando la antena a una distancia de 15 cm.....	70
Figura 5.6 Esquema de propagación de ondas al emitir con la antena pegada al bloque de hormigón.....	71
Figura 5.7 Código para la generación del modelo numérico de al propagarse por el interior del hormigón, colocando la sobre el bloque de hormigón.....	72
Figura 5.8 Geometría física del modelo generado para estudio de la resolución vertical en un bloque de hormigón	73
Figura 5.9 Código para la generación del modelo numérico del estudio de la resolución vertical en un bloque de hormigón	74
Figura 5.10 Esquema de los bloques de hormigón a estudio cuando se introducen parcialmente en agua.....	75
Figura 5.11 Geometría física del modelo generado para estudio del avance del agua sumergido parcialmente.....	76
Figura 5.12 Código para la generación del modelo numérico del estudio del avance del agua al sumergir la probeta de hormigón, para un frente de agua de 2 cm.	77
Figura 5.13 Geometría física del modelo generado para estudio del avance del agua sumergido parcialmente cuando la antena se colocó en la misma zona de la probeta que se produce la inmersión.	78
Figura 5.14 Código para la generación del modelo numérico del estudio del avance del agua al sumergir la probeta de hormigón, para un frente de agua de 2 cm al colocar la antena en el lado de la inmersión.	79
Figura 5.15 (a) Moldes para la fabricación de las probetas y (b) curado del hormigón	81
Figura 5.16 Cubrición de las probetas con film plástico durante 2 días y desmoldado de probetas de hormigón.....	82
Figura 5.17 (a) Dibujo de cuadrícula de referencia para mediciones con georradar y (b) cuadrícula de 50 x 50 mm de referencia	83
Figura 5.18 (a) Horno de secado de las probetas y (b) tanda de secado de 8 probetas	84
Figura 5.19 (a) Equipo de georradar modelo SIR-3000 y (b) antena de 2GHz montada con odómetro de GSSI	85
Figura 5.20 Colocación de la probeta sobre papel de aluminio para la medición con georradar.....	86
Figura 5.21 Geometría física del modelo generado para la determinación de las propiedades dieléctricas cuando las probetas estaban secas.	88

Figura 5.22 Código para la generación del modelo numérico del estudio para la determinación de las propiedades dieléctricas cuando las probetas estaban secas.	88
Figura 5.23 Geometría física del modelo generado para la determinación de las propiedades dieléctricas cuando las probetas estaban en inmersión.....	89
Figura 5.24 Código para la generación del modelo numérico del estudio para la determinación de las propiedades dieléctricas cuando las probetas estaban en inmersión.	89
Figura 6.1 Traza modelada considerando que la antena está pegada sobre un bloque de hormigón seco	92
Figura 6.2 Esquema de la trayectoria de propagación de ondas en un bloque de hormigón, bajo el cual se coloca un reflector metálico	93
Figura 6.3 Comparación entre la señal registrada experimentalmente al emitir al aire y el modelo numérico generado para una antena de 2 GHz	95
Figura 6.4 Modelo numérico generado al emitir al aire y colocar un reflector metálico de 1 cm de grosor a 25 cm de distancia	96
Figura 6.5 (a) Modelo numérico generado cuando la antena estaba situada a 15 cm de separación del bloque de hormigón y (b) cuando estaba colocada sobre el hormigón	99
Figura 6.6 (a) Modelo numérico para un bloque de hormigón de tamaño 20 cm, 15 cm y 12 cm (b) para tamaños de 8 cm, 5 cm y 4 cm y (c) para 3 cm y 2 cm...	104
Figura 6.7 (a) Modelo numérico para el bloque seco y con un frente de 0,5 cm, 1 cm, 2 cm y 3 cm (b) para tamaños de frente de 4 cm, 5 cm, 6 cm y 7 cm y (c) para 8 cm, 9 cm, 10 cm y 11 cm. Antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua.	109
Tabla 6.9 Tiempos de llegadas (ns) de los picos en las trazas simuladas para diferentes profundidades del frente del agua con la antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua.....	109
Figura 6.8 Tiempo de llegada del primer pico de la onda reflejada en el frente de agua (ns) en función del espesor del frente (cm). Antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua.....	110
Tabla 6.10 Amplitudes de los picos de las trazas obtenidas para el bloque seco y con diferentes espesores del frente (de 0,5 cm hasta 11 cm). Antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua.....	111
Tabla 6.11 Velocidades de propagación y permitividad dieléctrica para la probeta seca para distintas combinaciones de picos. Antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua.....	112
Tabla 6.12 Velocidad de propagación y permitividad dieléctrica para la parte seca de las probetas parcialmente húmedas (distintas profundidades del frente) para distintas combinaciones de picos. Antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua.....	113

Tabla 6.13 Velocidad de propagación y permitividad dieléctrica para la parte húmeda de las probetas parcialmente húmedas para distintas combinaciones de picos. Antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua. 114

Figura 6.9 (a) Valores de las amplitudes de los picos del frente del agua (b) del pico M1 (c) del pico M2 y (d) del pico M3 en función del espesor del frente. Antena colocada en la cara opuesta a la que se introduce en agua..... 117

Figura 6.10 (a) Modelo numérico para el bloque seco y con un frente de 0,5 cm, 1 cm, 2 cm y 3 cm (b) para tamaños de frente de 4 cm, 5 cm, 6 cm y 7cm y (c) para 8 cm, 9 cm, 10 cm y 11cm. Antena colocada en la cara que se introduce en agua..... 119

Tabla 6.15 Tiempos de llegadas (ns) de los diferentes picos en las trazas simuladas para diferentes profundidades del frente del agua. Antena colocada en la cara que se introduce en agua..... 120

Figura 6.11 Tiempo de llegada del primer pico de la onda reflejada en el frente de agua (ns) en función del espesor del frente (cm). Antena colocada en la cara que se introduce en agua..... 120

Figura 6.13 Trazas registradas de forma experimental en la probeta 12 cuando estaba seca y húmeda 127

Figura 6.14 Modelo numérico para la probeta 12 simulada en estado seco y parcialmente húmeda 130

Figura 6.15 (a) Valores de las velocidades de propagación en las probetas experimentales y modeladas cuando estaban completamente secas (b) velocidades de la zona seca y de la zona húmeda de las probetas experimentales y modeladas cuando estaban parcialmente húmedas..... 134

Figura 6.16 (a) Valores de las permitividades dieléctricas en las probetas experimentales y modeladas cuando estaban completamente secas (b) permitividades dieléctricas de la zona seca y de la zona húmeda de las probetas experimentales y modeladas cuando estaban parcialmente húmedas 136

ANEXO 3 Índice de Tablas

Tabla 1.1 Profundidad máxima del agua según la clase de exposición ambiental especificado en la EHE-08.....	6
Tabla 2.1 División general por bandas de frecuencia.....	15
Tabla 5.1 Principales características de la antena de 2 GHz de GSSI.	66
https://www.geophysical.com/antennas)	66
Tabla 5.2 Características de las probetas para modelar sus propiedades electromagnéticas	87
Tabla 6.1 Samples, amplitudes y tiempos de llegada de los picos que componen las señales al emitir al aire y al colocar un reflector metálico a 25 cm	97
Tabla 6.3 Samples, amplitud y tiempos de llegada de los picos de las señales cuando la antena se colocó a cierta distancia del bloque de hormigón y cuando estaba sobre el bloque	100
Tabla 6.4 Combinaciones de picos para el cálculo de incrementos de tiempo cuando la antena se encuentra pegada sobre el bloque de hormigón.....	101
Tabla 6.5 Resolución vertical en hormigón endurecido según los diferentes criterios para una antena de 2 GHz.....	102
Tabla 6.6 Amplitudes de las reflexiones en el metal para los diferentes tamaños de la probeta	104
Tabla 6.7 Tiempos de llegada de los picos de la onda reflejada en el metal para los diferentes tamaños del bloque de hormigón.....	105
Tabla 6.8 Intervalos de tiempo (ns) entre las llegadas de las diferentes combinaciones de picos para los diferentes tamaños del bloque del hormigón (cm) y el intervalo teórico(ns)	106
Tabla 6.16 Amplitudes de los diferentes picos de las trazas obtenidas para el bloque seco y con diferentes espesores del frente (de 0,5 cm hasta 11 cm). Antena colocada en la cara que se introduce en agua.....	121
Tabla 6.17 Velocidad de propagación y permitividad dieléctrica para la parte seca de las probetas parcialmente húmedas para distintas combinaciones de picos. Antena colocada en la cara que se introduce en agua.....	122
Tabla 6.18 Velocidad de propagación y permitividad dieléctrica para la parte húmeda de las probetas parcialmente húmedas para distintas combinaciones de picos. Antena colocada en la cara que se introduce en agua.	123
Tabla 6.19 Amplitudes de los diferentes picos F, M1, M2 y M3 de las trazas obtenidas para el bloque seco y con diferentes espesores del frente (de 0,5 cm hasta 11 cm). Antena colocada en la cara que se introduce en agua.....	124
Figura 6.12 (a) Valores de las amplitudes de los picos del frente del agua (b) del pico M1 (c) del pico M2 y (d) del pico M3 en función del espesor del frente. Antena colocada en la cara que se introduce en agua.....	126
Tabla 6.20 Tiempos de llegada (ns) de los diferentes picos de la traza registrada experimentalmente para la probeta 12 cuando estaba seca y húmeda.....	128

Tabla 6.21 Incrementos de tiempo (ns) entre las combinaciones de picos adecuadas para la probeta seca y las zonas seca y húmeda de la probeta húmeda. La velocidad y constante dieléctrica calculada con este incremento.	129
Tabla 6.22 Tiempos de llegada (ns) de los diferentes picos para la probeta 12 modelada en estado seco y parcialmente húmeda.....	130
Tabla 6.23 Incrementos de tiempo (ns) entre diferentes combinaciones de picos adecuadas para la probeta 12 modelada seca y parcialmente húmeda.....	131
Tabla 6.24 Incrementos de tiempos de llegada de los máximos para la probeta 12 modelada seca y modelada parcialmente húmeda. La velocidad y constante dieléctrica calculada con este incremento.....	131
Tabla 6.25 Resumen de las velocidades de propagación en las probetas (de la 12 a la 22), secas y parcialmente húmedas, obtenidas a partir de las trazas registradas experimentalmente y las obtenidas con el modelo	133
Tabla 6.26 Resumen de las permitividades dieléctricas en las probetas (de la 12 a la 22), secas y parcialmente húmedas, obtenidas a partir de las trazas registradas experimentalmente y las obtenidas con el modelo	133
Tabla A. Incrementos de tiempos de llegada de distintas combinaciones de los picos para los diferentes frentes de agua cuando la antena se coloca en la cara opuesta a la que se introduce en agua.....	146
Tabla B. Incrementos de tiempos de llegada de distintas combinaciones de los picos para los diferentes frentes de agua cuando la antena se coloca en la misma cara que se introduce en agua.....	147
Tabla C. Permitividad dieléctrica para cada una de las probetas tanto para la experimental como para la modelada	148
Tabla D. Tiempos de llegada de los picos para las diferentes probetas secas y húmedas experimentales	149
Tabla E. Incrementos de tiempos de llegada de distintas combinaciones de picos para las diferentes probetas secas y húmedas experimentales	150
Tabla F. Tiempos de llegada de los picos para las diferentes probetas secas y húmedas modeladas.....	151
Tabla G. Incrementos de tiempos de llegada de distintas combinaciones de picos para las diferentes probetas secas y húmedas modeladas.....	152

ANEXO 4 Calibración de la antena

Teniendo en cuenta la gran cantidad de archivos que forman el anexo, este se adjuntará en formato digital (CD). Dicho anexo se incluye en la carpeta: “Anexo 4: Calibración de la antena”

En la citada carpeta se encuentran los archivos con los algoritmos en formato Excel, el cual nos permite realizar el estudio de la calibración de la antena. Se nombran con la referencia al capítulo al que pertenecen (Capítulo 6, apartados 6.2.1, 6.2.2 y 6.2.3) e incluye los resultados numéricos adquiridos, las tablas y los cálculos que fueron imprescindibles para interpretar dichos resultados.

ANEXO 5 Efecto del avance del frente del agua en probetas de hormigón.

Teniendo en cuenta la gran cantidad de archivos que forman el anexo, este se adjuntará en formato digital (CD). Dicho anexo se incluye en la carpeta: "Anexo 5: Efecto del avance del frente del agua en probetas de hormigón".

En la citada carpeta se encuentran los archivos con los algoritmos en formato Excel, el cual nos permite realizar el estudio de la calibración de la antena. Se nombran con la referencia al capítulo al que pertenecen (Capítulo 6, apartados 6.3.1 y 6.3.2) e incluye los resultados numéricos adquiridos, las tablas y los cálculos que fueron imprescindibles para interpretar dichos resultados.

ANEXO 6 Determinación del frente de avance del agua

Teniendo en cuenta la gran cantidad de archivos que forman el anexo, este se adjuntará en formato digital (CD). Dicho anexo se incluye en la carpeta: "Anexo 6: Determinación del frente de avance del agua".

En la citada carpeta se encuentran los archivos con los algoritmos en formato Excel, el cual nos permite realizar el estudio de la calibración de la antena. Se nombran con la referencia al capítulo al que pertenecen (Capítulo 6, apartado 6.3.3) e incluye los resultados numéricos adquiridos, las tablas y los cálculos que fueron imprescindibles para interpretar dichos resultados.

ANEXO 7 Extracto del artículo: *A review of Ground-penetrating radar application in civil engineering*

W. Wai-Lok Lai et al.

NDT and E International 96 (2018) 58–78

Table 1
Some examples of applications of GPR on BUILDINGS.

References	Antenna frequency	City	Building types	Subject of investigation	3D*	Major findings and remarks
Kanli et al. (2015) [43]	400 and 900 MHz	Sopron, Hungary	fire tower	VOIDS and cracks before and after cement injection	No	Reflections from the fractured and porous zones are weakened or lost. Cores are available to validate the signal.
Orlando and Slob (2009) [78]	2 GHz	Chieti, Italy	historical building	Floor stability affected by a landslide	Yes	Utility, Iron bar and some cracks can be detected from parallel broadside profiles after 3D single component algorithm. The variation of images is caused by season changes. Electromagnetic wave velocity in summer is higher than in winter.
Xie et al. (2013) [69]	–	–	–	RC structure voids	No	support vector machine model is developed to automatically identify voids with high accuracy. Multiple waves caused by steel bars contribute to void positioning.
Barraca et al. (2016) [57]	500 and 800 MHz, 1.6 GHz	Ilhavo, Portugal	Rehabilitation building	Local Geological Condition; unknown infrastructure location; removed walls; moisture and fracturing investigation	No	GPR is capable of investigating local geological conditions, mapping infrastructure, locating altered elements, as well as understanding changes in construction materials and pathologies and fracturing. Interpretation on different brick requires more experiments.
Panisoa et al. (2016) [80]	500 MHz	Svaty Jur, Slovakia	church	Subsurface anthropogenic structure; wall foundation	Yes	Four medieval crypts are delineated; west wall foundation in 1/3 of the nave, and northwards oriented. Spatial model integrated in to the visualization helps to yield more realistic images of the subsurface features.
Rucka et al. (2016) [50]	2 GHz	Gdansk, Poland	tower of church	Boundary between masonry and reinforced concrete	No	The diffraction-refraction scattering at the boundary are identified with the developed procedure. A series of formulations are derived to describe the refracted hyperbolic diffraction curve. The point of the refraction indicates the boundary between media.
Pérez-Gracia et al. (2013) [41]	900 MHz and 1.5 GHz	Palma, Spain	cathedral	Inner structure of walls, damaged zones	No	Columns are built with mass if ashlar, with no important voids or irregular materials. A few centimeters' irregularities present in walls' inner side; buttresses are made by two stones walls with irregular materials filled. The inner stone contact is close to the surface when the profile is on a stones junction
Ranalli et al. (2004) [32]	600 and 1600 MHz	L'Aquila, Italy	church	Wall thickness, internal masonry structure and detachments or cracks' locations	No	Wall thickness vary fairly; elongated stones, detachments and cracks in façade and ashlar facing are found. Wall thickness is a significant finding in seismic modelling.
García García et al. (2007) [45]	400 and 900 MHz, 1.5 GHz	Valencia, Spain	church	Location of tombs	Yes	Mausoleums are solid, and anomalies are found in the crypt floor profiles. 3D cut-out display was suggested. Spectral analysis is a suitable tool for object recognition
Pérez-Gracia et al. (2008) [46]	500 and 900 MHz	Valencia, Spain	theatre	Point of contact between before and after modification	No	The velocity obtained in the older part of the theatre are lower than expected because the materials are wet. Sharp variation in wave velocity occurs at the point of contact between different materials
González-Drigo et al. (2008) [34]	400 and 900 MHz	Barcelona, Spain	historical building	Structural strength of the modified columns and load-bearing walls	No	Local weakness of the floor, original power lines and water conduction are detected. Structural elements can be identified by analyzing wave velocities. Reflections of cluttered material around may lead to misinterpretation of the data.
Kilic (2015) [65]	2 GHz	Urla, Turkey	primary school	Cavities and water ingress hidden within a structure	Yes	VOIDS, change of materials and pipes are evident in radargram. Integrated approach can detect both visible and hidden structural condition.
Kim et al. (2014) [66]	1200 MHz	Korea	prototype containment building	Concrete structure	No	Reliable images corresponding to the reinforced steel bars and defects such as void, but void and metal sheath pipes beneath the reinforcing steel bars could not be detected by GPR because of electromagnetic shielding. Pre-test helps in select best array of antenna concerning polarization.
Moropoulou et al. (2013) [51]	1.6 GHz	–	cultural heritage	Preservation state of structural system and mosaics	No	Cracks are detected penetrate into the complete thickness of the ashlar; pulse penetrate into the masonry and detects. Pay attention on void spaces when deciding large portion of the mosaic.
Barrile and Pucinotti (2005) [33]	1600 MHz	–	civil building	Location of steel reinforcement; seismic vulnerability of the building.	No	Aspect on the structural elements investigate are important. Steel bars are located. Radar wave would be sharply reflected at the interface between rebar and concrete.

3D* means either cube view or slice scan.

ANEXO 8 Artículo del *International Conference on Construction Research/ Eduardo Torroja*, con título: *Vertical resolution of ground-penetrating radar signals numerical modeling by gprMax on hardened concrete*

International Conference on construction research – EDUARDO TORROJA
Architecture, Engineering, Concrete / AEC 2018
Where do we come from? Where are we going?



**VERTICAL RESOLUTION OF GROUND-PENETRATING
RADAR SIGNALS NUMERICAL MODELING BY
GPRMAX ON HARDENED CONCRETE**

Isabel RODRIGUEZ-ABAD

Assistant Professor. Universitat Politècnica de València. isrodab@upvnet.upv.es

Jesús MENÉ-APARICIO

Associate Professor. Universitat Politècnica de València. jmene@upv.es

Rosa MARTÍNEZ-SALA

Associate Professor. Universitat Politècnica de València. rmsala@fis.upv.es

Leticia SABATER

Student. Universitat Politècnica de València. lesabel@arq.upv.es

ABSTRACT

Ground-penetrating radar (GPR) technique is widely applied to characterize building materials. Their electromagnetic properties variations can be recorded by means of GPR, and these are closely related to other physical properties. GPR equipment generates electromagnetic waves (EWs), that are to be reflected by any surface presenting different electric impedance and the receiver antenna acquires those reflections. When dealing with GPR data, resolution is a critical factor, when working with high frequency antennas, due to the fact that it depends on the bandwidth of the antenna. Therefore, it would be recommendable prior to any experimental program development, to be sure of the vertical resolution limitations. For this purpose, in this study we modeled numerically EWs that travelled through different concrete sample sizes. The GPR numerical model was created based on the finite-difference-time-domain (FDTD) method by means of the gprMax software. After analyzing the vertical resolution calculated from the numerical modeling, the results were compared with those derived from different theoretical criteria.

RESUMEN

El georradar (GR) es una técnica ampliamente empleada para registrar las variaciones de las propiedades electromagnéticas de los materiales que, además, están estrechamente relacionadas con otras propiedades físicas. El GR genera ondas electromagnéticas (OEM) que se registrarán tras reflejarse en cualquier superficie con diferente impedancia eléctrica. Cuando se registran datos de GR con antenas de alta frecuencia la resolución, que

depende principalmente del ancho de banda, es un factor clave. Es por ello que previamente a cualquier estudio experimental, es recomendable conocer cuáles son sus limitaciones. Con ese objetivo, en este trabajo se modeló numéricamente las OEM al viajar por muestras de hormigón de diferente tamaño. Los modelos numéricos basados en el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo, se realizaron por medio del software gprMax. Tras el análisis de la resolución vertical calculada por medio de la modelación numérica, ésta se comparó con los diferentes criterios teóricos para su cálculo.

Palabras clave: *Ground-penetrating radar, concrete, resolution, numerical modeling, gprMax, FDTD*

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la técnica del georradar se aplica en el campo de la ingeniería civil, arquitectura e ingeniería de edificación en un gran número de tipos de estudios: análisis de pavimentos, puentes, túneles, etc.[1] Además, en cuanto a la caracterización de materiales de construcción, las variaciones de las propiedades electromagnéticas de los materiales se pueden registrar mediante georradar y están estrechamente relacionadas con las propiedades físicas de los materiales (densidad, contenido de agua, anisotropía, etc. [2-3]).

El equipo de georradar genera ondas electromagnéticas (OEM) en el rango de las microondas y consiste en una unidad central, que controla la emisión y recepción de la energía. La antena emite energía que viaja por el material a estudio y se reflejará en cualquier superficie que presente un contraste de impedancia eléctrica y, finalmente, la antena receptora la registrará. Cuando se registran datos de georradar la resolución es un factor determinante, ya que determina la capacidad para identificar objetos separadamente o el espesor mínimo detectable [4]. De hecho, la resolución vertical es un factor clave con antenas de alta frecuencia, debido al hecho de que

ésta dependerá de la duración del pulso electromagnético y del ancho de banda de la antena. Por todo ello, previamente a cualquier estudio experimental, es recomendable conocer cuáles van a ser las limitaciones a la hora de la adquisición de los registros.

Con ese objetivo, en este trabajo se modeló numéricamente las OEM que viajaban por muestras de hormigón de diferente tamaño. Los modelos numéricos se basaron en el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) y se realizaron por medio del software gprMax. La frecuencia de estudio fue 2 GHz, ya que es ésta la de la antena comercial que la empresa líder del sector (GSSI), comercializa para el hormigón. Tras el análisis de la resolución vertical calculada por medio de la modelación numérica, ésta se comparó con los diferentes criterios teóricos para su cálculo.

2. RESOLUCIÓN VERTICAL

Una de las principales características de los datos registrados con georradar es la resolución y está principalmente relacionada con las características de la antena y con las propiedades electromagnéticas del medio. En definitiva, la resolución establece la



capacidad del georradar para distinguir señales de reflectores por separado. De hecho, conocer la resolución vertical es un factor clave cuando se registran señales con el georradar, ya que se define como la capacidad del georradar para detectar, como anomalías individuales, dos objetos separados a lo largo del eje vertical, es decir, en el tiempo.

Según [5] la resolución vertical (Rv_1) generalmente se calcula como:

$$Rv_1 = \frac{\lambda}{4} \quad (1)$$

donde λ es la longitud de onda en el medio a estudio. A esta forma de calcular la resolución le denominaremos de ahora en adelante criterio 1. No obstante, se debe tener en cuenta que λ variará dependiendo de la frecuencia de emisión de las ondas (f) y de la velocidad de propagación (v) siguiendo la siguiente relación:

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

Asimismo, la velocidad de propagación dependerá de las propiedades dieléctricas del medio, que para el caso de un medio de bajas pérdidas, como es el hormigón se considera que dependerá fundamentalmente de la permitividad dieléctrica relativa del material (ε):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (3)$$

donde c es la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío ($c = 30 \text{ cm/ns}$).

Pero, además, según indica [5] en las mediciones experimentales, es habitual considerar que la Rv se calcule por medio de lo que denominamos a partir de ahora criterio 2:

$$Rv_2 = \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para la consecución del objetivo de esta investigación se generaron una serie de modelos numéricos que simulaban la propagación de las ondas en bloques de hormigón de diferentes tamaños. Los modelos numéricos que se generaron se basan en el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) y el software necesario para la generación de los modelos es el gprMax [6]. Este software permite por medio de la generación de un *input file* crear un escenario teórico en el que se definen las propiedades de los medios a estudio y por medio del método FDTD genera cómo será la propagación de las ondas electromagnéticas en ese escenario.

Según [7], el hormigón endurecido secado al horno presenta una ε que varía de 3 a 5 dependiendo de su composición mineral. Además, [8] consideran que la variación de la conductividad (σ) para una frecuencia de estudio de 1,5 GHz, varía de 10^{-4} S/m en el hormigón seco, hasta 10^{-1} S/m en el hormigón saturado. Pudiéndose considerar, por tanto, que un hormigón seco es de baja conductividad y que, en consecuencia, la velocidad de propagación se puede calcular por medio de la ecuación 3.

Por todo ello, los modelos numéricos generados partían de las siguientes propiedades dieléctricas: $\varepsilon = 5$ y $\sigma = 10^{-4} \text{ S/m}$, es decir de un hormigón endurecido seco. Y se generaron modelos de propagación para tamaños de probeta de 20 cm (H 20), 15 cm (H 15), 12 cm (H 12), 8 cm (H 8), 5 cm (H 5), 4 cm (H 4), 3 cm (H 3), 2 cm (H 2) y 1 cm (H 1). En la Figura

1 se presenta el esquema del dispositivo de medida simulado, así como las trayectorias de las ondas que se esperaban registrar.

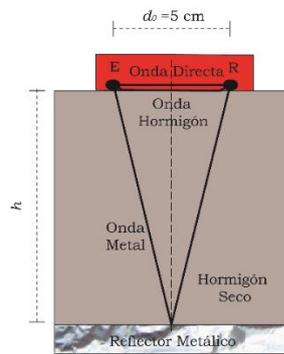


Figura 1: Esquema de dispositivo de registro simulado en los modelos numéricos.

A continuación, por medio del diseño experimental realizado se comprobará cuál de estos criterios de cálculo de Rv se ajustaba mejor a las características de las señales modeladas numéricamente en hormigón endurecido completamente seco.

4. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

En primer lugar, se calculó la Rv atendiendo a los criterios expuestos y teniendo en cuenta que la frecuencia central de emisión de la antena era de 2 GHz (Tabla 1). El siguiente paso consistió en identificar las reflexiones esperadas en los modelos numéricos generados.

Como se observa en la Figura 2, para la probeta H 20, en primer lugar, se registró la onda directa a partir de sus máximos $D1$ y $D2$. Esta onda es la que viajaba directamente entre emisor y receptor y

llegaba en primer lugar.

Tabla 1: Resolución vertical según los diferentes criterios del hormigón endurecido con una antena de 2 GHz de frecuencia central

Criterio	ϵ	v (cm/ns)	λ (cm)	Rv (cm)
1	5	13,42	6,71	3,35
2	5	13,42	3,35	1,68

A continuación, se registró la que denominamos onda del hormigón, con sus máximos $H1$ y $H2$. Esta reflexión se produce como consecuencia del cambio de propiedades dieléctricas entre el aire y el hormigón. Seguidamente, la energía viajaba por el interior de la probeta de hormigón hasta que encontraba un nuevo cambio de propiedades dieléctricas. Esto sucedía al llegar a la base de la probeta de hormigón donde se había colocado un reflector metálico (Figura 1).

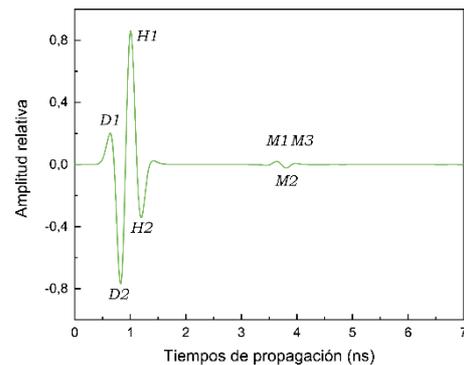


Figura 2: Modelo numérico para la probeta H 20, en la que se identificaban las señales: onda directa, onda hormigón y onda metal por medio de los máximos que las componen.



A esta última reflexión le denominamos onda metal y se pudo identificar a partir de sus 3 máximos ($M1$, $M2$ y $M3$). Como se observa en la Figura 3 mientras las probetas tengan un tamaño superior a los 8 cm, todas las reflexiones se registran y se identifican con claridad sus máximos.

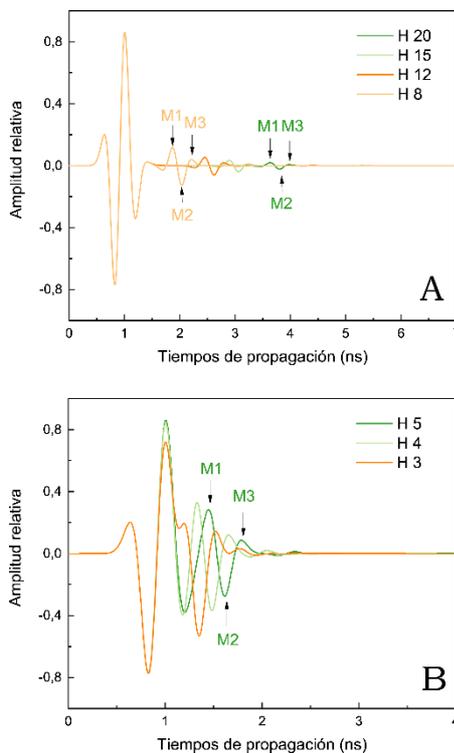


Figura 3: Modelos numéricos para probetas de diferente tamaño.

Ahora bien, conforme disminuía el tamaño de la probeta la onda metal cada vez se encontraba más próxima a la onda hormigón. Además, al ser la trayectoria que recorría más corta las amplitudes de los máximos de la onda metal iba

aumentando. De hecho, como se observa en la Figura 3b, a partir de tamaños de probeta de 5 cm empezaba a ser complejo identificar ambas señales por separado. Y en el caso de la probeta H 2 y H 1, no se pudo identificar por separado.

Con el objetivo de comprobar si los máximos identificados en las probetas de menor tamaño correspondían efectivamente a la onda metal o bien estaban de alguna forma afectadas por la onda del hormigón, se desarrolló el siguiente algoritmo de comprobación. Dado que se parten de valores de propiedades dieléctricas conocidas fue posible calcular el incremento de tiempo teórico (Δt_t) que tendrían que tardar en llegar las ondas del metal para cada uno de los tamaños:

$$\Delta t_t = \frac{2 \cdot h}{v} = \frac{2 \cdot h}{\frac{c}{\sqrt{\epsilon}}} \quad (5)$$

donde h es el tamaño de la probeta. En la última columna de la Tabla 2 se presentan los Δt_t que se obtuvieron para cada tamaño de probeta. Además, en esta tabla, tras haber medido en los modelos numéricos los tiempos de llegada de cada uno de los máximos se han calculado los incrementos de tiempo de llegada entre el hormigón y el metal. Pero para ello se tuvo en cuenta que no hay un criterio único que establezca cual es el máximo representativo de la llegada de la onda. Es por ello que los incrementos de tiempo calculados se obtuvieron con todas las combinaciones de máximos posibles. Como se observa en la tabla las combinaciones de máximos cuyo incremento de tiempo coincide con el teórico esperado son el $D1-M1$, $D2-M2$ y $H1-M3$. No obstante, para el caso de H 3, se comprobó que a pesar de identificar

este máximo, el tiempo de llegada no se correspondía con ninguna de las combinaciones de máximos anteriores.

Tabla 2: Incrementos de tiempo calculados con todas las combinaciones de máximos posibles de los modelos numéricos en ns y el incremento teórico esperado.

Tamaño		D1	D2	H1	H2	Δt_i
H 20	M1	3,00	2,81	2,63	2,44	2,98
	M2	3,17	2,98	2,80	2,61	
	M3	3,34	3,15	2,98	2,78	
H 15	M1	2,26	2,07	1,89	1,70	2,24
	M2	2,43	2,24	2,06	1,87	
	M3	2,60	2,41	2,23	2,04	
H 12	M1	1,82	1,63	1,45	1,26	1,79
	M2	1,99	1,80	1,62	1,43	
	M3	2,16	1,97	1,79	1,60	
H 8	M1	1,24	1,05	0,87	0,68	1,19
	M2	1,40	1,21	1,04	0,84	
	M3	1,57	1,39	1,21	1,02	
H 5	M1	0,81	0,62	0,45	0,25	0,75
	M2	0,98	0,79	0,62	0,42	
	M3	1,15	0,96	0,79	0,59	
H 4	M1	0,69	0,50	0,33	0,15	0,60
	M2	0,85	0,66	0,48	0,30	
	M3	1,02	0,83	0,65	0,48	
H 3	M1	0,55	0,37	0,19	-	0,45
	M2	0,72	0,53	0,35	-	
	M3	0,89	0,70	0,52	-	

Esto nos corroboraba como a pesar de identificar una serie de máximos, debido a la interferencia con la onda hormigón, esta lectura de tiempo estaba alterada y no podía emplearse como representativa de la llegada de la onda del metal.

De esta forma se comprobó que, efectivamente, el criterio más adecuado para el cálculo de la Rv es el criterio 1 (véase apartado 2. Resolución vertical), ya que de forma experimental por medio de la generación de los modelos numéricos se observó que para piezas de 3 cm o menores no fue posible identificar por separado las reflexiones correspondientes a la onda hormigón y onda metal.

Por otra parte, en los modelos numéricos generados se evidenció otro fenómeno que es interesante resaltar y que nos aportó información complementaria sobre la resolución vertical. En la Tabla 3 se muestran las amplitudes que presentaban cada uno de los máximos que componían las señales de los modelos numéricos. La amplitud de los máximos de la onda directa y de la onda del hormigón, como era de esperar no variaban su amplitud hasta que la probeta tenía un tamaño de 4 cm, debido a que como se ha comprobado en los tiempos de llegada, ambas ondas no interferían entre ellas. Hay que destacar que en el caso de la H 4, la amplitud si se vio ligeramente afectada en todos los máximos debido al solape, excepto en el caso del D1. Es por ello, que en este caso sólo podremos utilizar como combinaciones de máximos para estudiar el tamaño de la probeta la combinación D1-M1. Por último, respecto a H 3, a pesar de que se comprobó que igual que ocurría con H 4, el D1 no estaba afectado del solape entre señales, el máximo M1 sí estaba solapado con la onda del



hormigón, tal y como se observa en tiempos de llegada y amplitudes. Por todo ello, se vuelve a confirmar que la R_v del hormigón de las características detalladas en este estudio se encontraba entre los 3 y 4 cm, en perfecta coherencia con el denominado criterio 1

Tabla 3: Amplitudes de los máximos de los máximos de los modelos numéricos para los diferentes tamaños de probeta.

Tamaño	D1	D2	H1	H2
H 20	0,202	-0,767	0,861	-0,342
H 15	0,202	-0,767	0,861	-0,342
H 12	0,202	-0,767	0,861	-0,342
H 8	0,202	-0,767	0,861	-0,342
H 5	0,202	-0,767	0,861	-0,379
H 4	0,202	-0,768	0,844	-0,396
H 3	0,202	-0,774	0,720	-

Asimismo, como se ha comentado anteriormente, las amplitudes de la onda del metal se veían claramente afectadas como consecuencia de la disminución del tamaño de las probetas. Con objeto de comprender mejor el comportamiento de este fenómeno se estudió cuáles eran las ecuaciones más representativas para caracterizarlo por medio de ecuaciones de ajuste (Figura 4). Se comprobó cómo las amplitudes de los máximos de la onda del metal disminuían de forma exponencial con la distancia. Este resultado estaba en perfecta coherencia con la teoría de la atenuación de la propagación de las ondas electromagnéticas y muestra, por tanto, la validez de los modelos numéricos que se generaron. Además, los altos coeficientes de correlación obtenidos de las

ecuaciones de ajuste (Tabla 4) ponene de manifiesto que la programación se realizó correctamente.

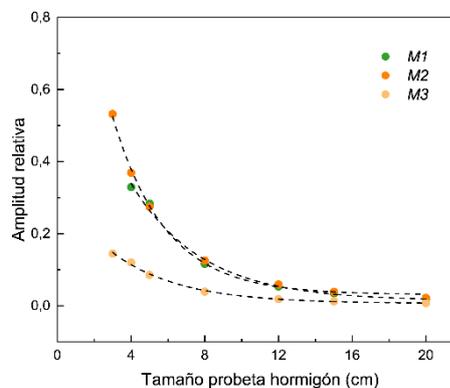


Figura 4: Evolución de las amplitudes de la onda metal dependiendo del tamaño de la probeta.

Ahora bien, para el caso del máximo $M1$ se ha extraído del ajuste el valor para el H 3, ya que cómo se vio la amplitud del mismo no era representativa únicamente de este máximo.

Tabla 4: Coeficientes de las ecuaciones de ajuste entre las amplitudes de las ondas del metal y el tamaño de las probetas.

Máximo	Ecuación: $y = a + b \cdot e^{(c \cdot x)}$			
	a	b	c	R^2
M1	0,014	0,931	-0,262	0,99
M2	0,030	1,404	-0,348	0,99
M3	0,006	0,321	-0,273	0,99

5. CONCLUSIONES

La técnica del georradar presenta un gran potencial como método para caracterizar materiales de construcción. Pero para ello, se debe conocer previamente cuál es su

limitación a la hora de detectar reflexiones. En este estudio por medio de la modelación numérica de las señales de georradar y su análisis paramétrico se desarrolló de forma exitosa un algoritmo de trabajo para poder confirmar cuál de los criterios actualmente considerados para calcular la resolución vertical es más adecuado en el caso de trabajar con hormigón endurecido.

AGRADECIMIENTOS

La investigación presentada se enmarca en el proyecto concedido en la subvención para la realización de proyectos de I+D+i desarrollados por grupos de investigación emergentes (GV/2017) y que lleva por título: "Caracterización de materiales de construcción por medio de las técnicas no destructivas del georradar y la termografía de infrarrojos", del Programa para la promoción de la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación en la *Comunitat Valenciana* de 2017.

REFERENCIAS

- [1] V. Pérez-Gracia "Innovative inspection procedure for effective GPR surveying of buildings" *Cost Action TU 1208. Civil engineering applications of ground penetrating radar*, 2014.
- [2] I. Rodríguez-Abad, R. Martínez-Sala, R. Capuz Lladró, R. Díez Barra, F. García-García F. "Assessment of the variation of the moisture content in the Pinus pinaster Ait. using the nondestructive GPR technique" *Materiales de Construcción*, vol. 61 (301), pp. 143-156, 2011.
- [3] R. Martínez-Sala, I. Rodríguez-Abad, R. Díez Barra, R. Capuz Lladró "Assessment of the dielectric anisotropy in timber using the nondestructive GPR technique" *Construction & Building Materials*, vol. 38, pp. 903-911, 2013.
- [4] D. Daniels "Ground-Penetration radar" *Institution of Electrical Engineers*, 2004.
- [5] V. Pérez-Gracia, D. Di Capua, R. González-Drigo, L. Pujades "Laboratory characterization of a GPR antenna for high-resolution testing: Radiation pattern and vertical resolution" *NDT&E International*, vol. 42, pp. 336-344, 2009.
- [6] C. Warren, A. Giannopoulos, I. Giannakis "gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar" *Computer Physics Communications*, vol. 209, pp. 163-170, 2016.
- [7] S. Laurens, J.P. Balayssac, J. Rhazi, G. Klysz, G. Arliguie "Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modelling" *Materials and Structures*, vol. 38 (283), pp. 827-832, 2005.
- [8] G. Klysz, J.P. Balayssac, X. Ferrieres "Evaluation of dielectric properties of concrete by a numerical FDTD model of a GPR coupled antenna-Parametric study" *NDT & Engineering International*, vol. 41, pp. 621-631, 2008.