



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

MÁSTER EN EDIFICACIÓN

ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS PROPIEDADES DIELECTRICAS DEL
HORMIGÓN EN LOS PARÁMETROS DE LAS ONDAS
ELECTROMAGNÉTICAS DEL GEORRADAR. MODELIZACION
NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CON GPRMAX.

AUTORA:

YOUMANA BOTELLA CAMPELLO

DIRECTORES DE TRABAJO:

ISABEL RODRÍGUEZ ABAD

ROSA MARÍA MARTÍNEZ SALA

VALENCIA, JULIO 2018

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.

En primer lugar, agradecer a mis tutoras de proyecto Dña. Isabel Rodríguez Abad y Dña. Rosa Martínez Sala por los consejos dados y la atención prestada durante la elaboración del trabajo.

También a mis amigas Erica Sánchez y Sarai Martínez, con las cuales empecé la experiencia de cambiar de ciudad, trasladándonos a Valencia y conviviendo juntas como una familia. Además a mis compañeros de Máster, a cuatro de ellos en especial, los cuales saben quién son, ya que han estado conmigo estos dos últimos años.

Por último a mi familia y mi pareja, Guillermo Barber, que han sido durante los años de universidad el pilar más importante para que hoy en día esté aquí, por su paciencia y apoyo en este recorrido de mi vida.



RESUMEN

El georradar es una técnica de ensayo de materiales que cada vez está más presente en diferentes campos de estudio debido a su carácter no destructivo. De hecho, es una técnica que en edificación se emplea cada vez más para inspeccionar y diagnosticar patologías, como fisuras o humedades. El funcionamiento del georradar se basa en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas en el espectro de las microondas.

Dentro de la multitud de aplicaciones de la técnica del georradar se encuentra la caracterización de materiales. En el ámbito de la construcción, estos materiales pueden ser el hormigón, la piedra o la madera.

En este trabajo se analiza por medio de una simulación numérica cuál es el comportamiento del hormigón frente a la propagación de ondas electromagnéticas. Para ello se ha utilizado el software *gprMax*, el cual todavía se encuentra en fase de desarrollo, siendo sus creadores líderes en Europa en la investigación de la aplicación del georradar en ingeniería. Este software ha permitido estudiar, mediante la modelización numérica, el comportamiento de las ondas a través del hormigón en diferentes casos.

Por una parte se ha estudiado cómo influye en dicho comportamiento la antena que se emplea, en cuanto a la separación entre emisor y receptor de la misma, así como en lo que respecta a la distancia de separación de la antena con la superficie del hormigón. Por otro lado, se ha analizado también el comportamiento en función de las características del material que más influyen en la propagación electromagnética. Para ello, en primer lugar se ha variado la permitividad dieléctrica, la cual depende del grado de humedad del hormigón, y posteriormente su conductividad eléctrica.

Con todo esto, se podrán comparar los valores de los parámetros de onda obtenidos mediante la simulación numérica con los valores reales que se extrajeron en trabajos experimentales desarrollados anteriormente sobre probetas de hormigón. Estas comparaciones servirán para obtener resultados en dos sentidos. Por un lado se podrá comprobar la bondad del modelo de simulación elegido y por otro, se podrá comprender y analizar con mayor detalle las señales reales. Finalmente, este conocimiento de la señal real nos permitirá poder aplicar con mayor fiabilidad el georradar a la caracterización no destructiva del hormigón.

Por último, comentar que el presente Trabajo Final de Máster se enmarca en el proyecto aprobado el 30 de noviembre, por la Dirección General de Universidad, Investigación y Ciencia y que concede la subvención para la realización de proyectos 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



tecnològic y la innovación en la *Comunitat Valenciana*, publicado el 25 de enero de 2017.

Asimismo, parte de los resultados obtenidos en este Trabajo Final de Máster ha sido aceptado para su presentación en el Congreso Internacional "*Near Surface Geoscience Conferences and Exhibition*", organizado por *European Association of Geoscientists and Engineers*, que se celebrará del 9 al 13 de septiembre de 2018 en Oporto (Portugal). La investigación realizada lleva por título "*Parametric study of GPR signals numerical model to analyze hardened concrete response at different antenna positions*" y se incluye al final del presente documento.

RESUM

El georradar és una tècnica d'assaig de materials que cada vegada està més present en diferents camps d'estudi degut al seu caràcter no destructiu. De fet, és una tècnica que en edificació s'empra cada vegada més per a inspeccionar i diagnosticar patologies, com a fissures o humitats. El funcionament del georradar es basa en l'emissió i recepció d'ones electromagnètiques en l'espectre de les microones.

Dins de la multitud d'aplicacions de la tècnica del georradar es troba la caracterització de materials. En l'àmbit de la construcció, estos materials poden ser el formigó, la pedra o la fusta.

En aquest treball s'analitza per mitjà d'una simulació numèrica quin és el comportament del formigó enfront de la propagació d'ones electromagnètiques. Per a això s'ha utilitzat el programari *gprMax*, el qual encara es troba en fase de desenrotllament, sent els seus creadors líders a Europa en la investigació de l'aplicació del georradar en enginyeria. Este programari ha permès estudiar, per mitjà de la modelització numèrica, el comportament de les ones a través del formigó en diferents casos.

D'una banda s'ha estudiat com influïx en el dit comportament l'antena que s'empra, quant a la separació entre emissor i receptor de la mateixa, així com pel que fa a la distància de separació de l'antena amb la superfície del formigó. D'altra banda, s'ha analitzat també el comportament en funció de les característiques del material que més influïxen en la propagació electromagnètica. Per a això, en primer lloc s'ha variat la permitivitat dielèctrica, la qual depén del grau d'humitat del formigó, i posteriorment la seua conductivitat elèctrica.

Amb tot açò, es podran comparar els valors dels paràmetres d'onda obtinguts per mitjà de la simulació numèrica amb els valors reals que es van extraure en treballs experimentals desenrotllats anteriorment sobre provetes de formigó. Estes comparacions serviran per a obtindre resultats en dos sentits. Per un costat es podrà comprovar la bondat del model de simulació triat i d'un altre, es podrà comprendre i analitzar amb major detall els senyals reals. Finalment, este coneixement del senyal real ens permetrà poder aplicar amb major fiabilitat el georradar a la caracterització no destructiva del formigó.

Finalment, comentar que el present Treball Final de Màster s'emmarca en el projecte aprovat el 30 de novembre, per la Direcció General d'Universitat, Investigació i Ciència i que concedeix la subvenció per a la realització de projectes d'I+D+i desenrotllats per grups d'investigació emergents (GV/2017) de duració de 2 anys i que porta per títol: "Caracterización de materiales de construcción por mitjà de les tècniques no destructives del georradar i la termografia d'infrarrojos", pertanyent al Programa per a la promoció de la investigació científica, el desenrotllament tecnològic i la innovació en la Comunitat Valenciana, publicat el 25 de gener de 2017.



Així mateix, part dels resultats obtinguts en aquest Treball Final de Màster ha sigut acceptat per a la seua presentació en el Congrés Internacional *“Near Surface Geoscience Conferences and Exhibition”*, organitzat per *European Association of Geoscientists and Engineers*, que es celebrarà del 9 al 13 de setembre de 2018 en Porto (Portugal). La investigació realitzada porta per títol *“Parametric study of GPR signals numerical model to analyze hardened concrete response at different antenna positions”* i s'inclou al final del present document.

ABSTRACT

Ground penetrating radar (GPR) is a material testing technique that is increasingly present in different fields of study due to its non-destructive nature. In fact, it is a technique that is increasingly used in buildings to inspect and diagnose pathologies, such as fissures or moisture. The operation of the georadar is based on the emission and reception of electromagnetic waves in the microwave spectrum.

The characterization of materials is among the multitude of applications of the GPR technique. In the field of construction, these materials can be concrete, stone or wood.

In this work, the behavior of concrete against the propagation of electromagnetic waves is analyzed by means of a numerical simulation. For this, the gprMax software has been used, which is still in the development phase, being its leading creators in Europe in the research of the application of georadar in engineering. This software has allowed us to study, through numerical modeling, the behavior of waves through concrete in different cases.

On the one hand, it has been studied how the antenna that is used influences in said behavior, in terms of the separation between emitter and receiver thereof, as well as with respect to the separation distance of the antenna with the surface of the concrete. On the other hand, we have also analyzed the behavior according to the characteristics of the material that most influence electromagnetic propagation. To do this, the dielectric permittivity has been varied in the first place, which depends on the moisture level of the concrete, and subsequently on its electrical conductivity.

With all this, it will be possible to compare the values of the wave parameters obtained by means of the numerical simulation with the real values that were extracted in experimental works previously developed on concrete specimens. These comparisons will serve to obtain results in two senses. On the one hand, the goodness of the chosen simulation model can be verified and, on the other hand, real signals can be understood and analyzed in greater detail. Finally, this knowledge of the real signal will allow us to apply with greater reliability the georadar to the non-destructive characterization of concrete.

Finally, it is important to comment that this Final Master's Project is part of the project approved on November 30, by the *Dirección General de Universidad, Investigación y Ciencia* and provides budget for the realization of R&D&I projects developed by emerging research groups (GV / 2017), lasting 2 years and entitled: "Characterization of building materials by means of non-destructive Ground-penetrating and infrared thermography techniques", belonging to the Program for the promotion of scientific research, technological development and innovation in the *Comunitat Valenciana*, published on January 25, 2017.



Also, part of the results obtained in this Master's Final Project has been accepted for presentation at the International Congress "Near Surface Geoscience Conferences and Exhibition", organized by the European Association of Geoscientists and Engineers, to be held from 9 to 13 September of 2018 in Porto (Portugal). The research carried out is entitled "Parametric study of GPR signals numerical model to analyze hardened concrete response at different antenna positions" and it is included at the end of this document.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Objetivos del estudio	7
1.2. Contenidos del Trabajo Final de Máster	8
2. FUNDAMENTOS DE LA PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN EL HORMIGÓN	9
2.1. Fundamentos teóricos de las ondas electromagnéticas.....	9
2.2. Parámetros electromagnéticos de un medio.....	12
2.3. Velocidad de propagación y atenuación de las ondas electromagnéticas ...	14
2.4. Relación entre la variación de las propiedades electromagnéticas del hormigón y sus propiedades físicas.....	16
2.4.1. Variación de la permitividad dieléctrica relativa en el hormigón.....	16
2.4.2. Variación de la conductividad eléctrica en el hormigón	18
3. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA DEL GEORRADAR EN EL ÁMBITO DE LA CONSTRUCCIÓN	22
4. EL GEORRADAR	25
4.1. Componentes del equipo de georradar	25
4.2. Métodos de adquisición de registros de georradar	28
4.3. Tratamiento e interpretación de registros.....	29
4.3.1. Parámetros de un registro.....	29
4.3.2. Registros de amplitudes	31
4.3.3. Resolución del georradar.....	32
4.3.4. Parámetros necesarios para la interpretación de los registros de georradar	33
5. MODELADO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	34
5.1. Introducción al modelado de ondas electromagnéticas	34
5.2. El software <i>gprMax</i>	36
5.2.1. Instalación del programa <i>gprMax</i>	36
5.2.2. Ejecutar <i>gprMax</i>	37
5.2.3. Obtención de gráficas e imágenes	40
5.2.4. Obtención de datos en formato ASCII.....	43



5.2.5.	Comandos básicos de un <i>input file</i>	45
6.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	48
6.1.	Calibración de la antena de 2 GHz.....	48
6.1.1.	Distancia de separación entre antena emisora y receptora.....	48
6.1.2.	Modelado de reflexiones de la propagación de las ondas.....	51
6.1.3.	Modelado de la propagación de las ondas en el hormigón.....	53
6.2.	Efecto de las propiedades del hormigón en las señales de georradar.....	56
6.2.1.	Composición del hormigón.....	57
6.2.2.	Contenido de agua.....	58
6.3.	Descripción del estudio experimental de registros de georradar.....	60
6.3.1.	Fabricación de las probetas.....	60
6.3.2.	Adquisición de registros con georradar.....	61
7.	RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.....	63
7.1.	Efecto de los parámetros electromagnéticos en la propagación de las ondas de georradar.....	63
7.2.	Calibración de la antena de 2 GHz.....	66
7.2.1.	Distancia de separación entre antena emisora y receptora.....	66
7.2.2.	Modelado de reflexiones de la propagación de las ondas.....	71
7.2.3.	Modelado de la propagación de las ondas en el hormigón.....	78
7.3.	Efecto de las propiedades del hormigón en las señales de georradar.....	88
7.3.1.	Composición del hormigón.....	88
7.3.2.	Contenido de agua.....	100
7.4.	Comparación con estudio experimental: determinación de las propiedades dieléctricas.....	107
7.5.	Análisis espectral: Evolución de frecuencias.....	111
7.5.1.	Evolución de la frecuencia central dependiendo de la variación de la composición del hormigón.....	111
7.5.2.	Evolución de la frecuencia central dependiendo de la variación de contenido de humedad.....	113
8.	CONCLUSIONES.....	116
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119

ANEXOS	122
1. ÍNDICE DE FIGURAS	123
2. ÍNDICE DE TABLAS	127
3. CALIBRACIÓN DE LA ANTENA	129
4. EFECTO DE LA COMPOSICIÓN DEL HORMIGÓN EN LAS SEÑALES DE GEORRADAR	130
5. EFECTO DEL CONTENIDO DE AGUA EN LAS SEÑALES DE GEORRADAR	131
6. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DIELECTRICAS DE UN DISEÑO EXPERIMENTAL.....	132
7. ANÁLISIS ESPECTRAL DE LOS MODELOS NUMÉRICOS	133
8. ARTÍCULO PARA EL CONGRESO INTERNACIONAL “NEAR SURFACE GEOSCIENCE CONFERENCES AND ENHIBITION”	134



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, como son el análisis de pavimentos, puentes, túneles, localización de suministros, así como en la caracterización de materiales.

En cuanto a la caracterización de materiales de construcción, las variaciones de las propiedades electromagnéticas de los materiales se pueden registrar mediante georradar. Además, éstas están estrechamente relacionadas con las propiedades físicas de los materiales (densidad, contenido de agua, etc.). Es por esto que la técnica del georradar puede proporcionar información relevante que permita evaluar las variaciones de las propiedades de los materiales de construcción, en concreto en el hormigón, que es el material a estudio en este trabajo. Recientemente se han publicado una serie de trabajos muy interesantes aplicando la técnica del georradar para caracterizar el estado del hormigón. Ejemplo de ello son las investigaciones que estiman el contenido de agua libre en el hormigón por medio del análisis de los parámetros de las ondas registradas con georradar o los trabajos que determinan el rango de penetración del frente de avance del agua en el hormigón.

De hecho, los cambios en las propiedades electromagnéticas del hormigón se pueden asociar con cambios en otras propiedades físicas. Es por ello que esta investigación se centra en la aplicación de la técnica del georradar para estimar los efectos que producen las variaciones de ciertas propiedades en las señales de georradar. El análisis de los datos generados por georradar se realizan mediante el estudio de los parámetros de onda: velocidades de propagación, amplitudes de las señales y espectros de frecuencia.

El equipo de georradar genera ondas electromagnéticas en el rango de las microondas. El equipo consiste en una unidad central, que controla la emisión y recepción de la energía electromagnética. La antena emisora emite energía que viaja por el material a estudio. Esas ondas se reflejarán en cualquier superficie que presente un contraste de impedancia eléctrica y, finalmente, la antena receptora registrará estas reflexiones. El problema surge cuando es necesario determinar el tiempo de llegada exacto de las reflexiones, ya que algunas de ellas se encuentren solapadas. Esta situación se hace especialmente crítica cuando se trabaja con probetas de hormigón de pequeñas dimensiones y antenas de georradar de alta frecuencia (2 GHz).

Por todo ello, previamente a cualquier estudio experimental, es recomendable estar seguros del significado de los cambios en los parámetros de onda de las señales de georradar. 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 que se produzcan solapes. En este trabajo se estudian qué variaciones se producen para diferentes composiciones de hormigón cuando está completamente seco y las



variaciones como consecuencia de diferentes contenidos de agua. 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.

1.1. Objetivos del estudio

Con todo lo anterior en mente, el objetivo principal de este trabajo es realizar una modelización numérica de señales electromagnéticas para el caso de propagación en hormigón de diferentes características. Esto permitirá una mejor comprensión de la propagación, por el interior del hormigón, de las ondas electromagnéticas generadas con un equipo de georradar comercial. 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 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 los software libres disponibles actualmente en la comunidad científica.
- Evaluar el comportamiento del hormigón de diferentes composiciones y contenidos de humedad por medio de la modelación numérica de la propagación de ondas electromagnéticas por el interior del hormigón.
- Mejorar las habilidades de procesado de imágenes de georradar y análisis de datos.

1.2. Contenidos del Trabajo Final de Máster

A continuación, se va a realizar un breve resumen de los contenidos que componen el presente Trabajo Final de Máster, dividido en capítulos y subcapítulos, con los cuales se quiere lograr los objetivos nombrados anteriormente.

El capítulo 1 es una introducción de la investigación que se va a llevar a cabo a cerca de la técnica no destructiva del georradar, donde se tratan los problemas a estudiar, así como los objetivos que se desea conseguir.

En el capítulo 2 se describen los fundamentos de la propagación de las ondas electromagnéticas en el hormigón, estudiando todos los parámetros que intervienen. En el capítulo 3 se explica cómo se emplea la técnica no destructiva del georradar en el ámbito de la construcción. En el capítulo 4 se describe la técnica del georradar para poder conocer desde los equipos empleados hasta los resultados finales que dicho equipo puede aportar.

El capítulo 5 explica cómo se ha puesto en práctica el software empleado (*gprMax*), conociendo lo necesario para su uso, cómo instalarlo y cómo programar los archivos necesarios para finalmente obtener graficas en *Excel*. Seguidamente, en el capítulo 6 se han aplicado los conocimientos del capítulo anterior, realizando la programación experimental. En el capítulo 7 se han estudiado los resultados de la anterior programación, interpretándolos y comparándolos con datos reales.

En el capítulo 8 se ha llegado a unas conclusiones finales tras todo el estudio anterior y se han enumerado y propuesto las futuras líneas de investigación. En el capítulo 9 se han expuesto las referencias bibliográficas que se han necesitado para llevar a cabo todo el estudio.

2. FUNDAMENTOS DE LA PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN EL HORMIGÓN

2.1. Fundamentos teóricos de las ondas electromagnéticas

Las ecuaciones de Maxwell forman las bases teóricas de todos los fenómenos electromagnéticos. Las aportaciones de las ecuaciones de Maxwell a la física son enormes y muy impresionantes. El formalismo de Maxwell predice la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio a la velocidad de la luz. Esta teoría fue confirmada años más tarde experimentalmente por Heinrich Hertz, quien generó y detectó ondas electromagnéticas. Este descubrimiento ha permitido que sistemas cotidianos como la radio, la televisión o el radar sean posibles.

Mediante la idea de que la luz es una forma de radiación electromagnética, la teoría de Maxwell unió los conceptos de la luz y el electromagnetismo. Las ondas electromagnéticas son generadas por cargas eléctricas oscilantes. Las ondas radiadas están formadas por un campo eléctrico y uno magnético, que forman ángulos rectos entre sí y con la dirección de la propagación de la onda.

Suponiendo que la onda electromagnética es una onda plana, es decir, que viaja en una dirección, dicha onda tendría las siguientes propiedades: viaja en la dirección X (la dirección de propagación), el campo eléctrico E está en la dirección Y y el campo magnético B en la dirección Z . Además, las ondas cuyos campos eléctrico y magnético están restringidos a ser paralelos a ciertas líneas en el plano YZ son conocidas como ondas polarizadas linealmente.

Las componentes del campo eléctrico E se miden en N/C (Newton/Coulomb) y las del campo magnético B en Weber/m² (Wb/m²) o teslas (T).

La teoría de Maxwell demostró que la relación entre las amplitudes del campo eléctrico y las del campo magnético en una onda electromagnética es $E = cB$, siendo E la componente del campo eléctrico, B la componente del campo magnético y c la velocidad de la luz en el vacío ($c = 2,99792 \times 10^8$ m/s).

Sin embargo, en cualquier otro medio la velocidad de las ondas electromagnéticas (v) dependerá de las propiedades eléctricas del medio por el que viaja, tal y como se detallará más adelante.

Cuanto mayor es la distancia (r) a la fuente de las ondas, las amplitudes del campo eléctrico y magnético disminuyen en proporción $1/r$. Las ondas radiadas pueden detectarse a grandes distancias desde las cargas oscilantes que las generan. Además, las ondas electromagnéticas conducen energía y momento y, en consecuencia, ejercen presión sobre una superficie.

Las ondas electromagnéticas cubren un amplio espectro de frecuencias (f). Por ejemplo, las ondas de radio (frecuencias de aproximadamente 10^7 Hz) son ondas

electromagnéticas producidas por corrientes oscilantes en una antena de transmisión de una torre de radio. Las ondas luminosas son una forma de radiación electromagnética de alta frecuencia (alrededor de 10^{14} Hz) producidas por electrones dentro de sistemas atómicos.

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 más sencilla es la ecuación de onda sinusoidal que describe la perturbación que se produce a lo largo del eje X en un tiempo dado:

$$y = A \text{ sen } [kx - wt] \quad \text{ec. 2.1}$$

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

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{ec. 2.2}$$

$$w = 2\pi f \quad \text{ec. 2.3}$$

donde λ es la longitud de onda, definida como la distancia que recorre una perturbación en un periodo y f la frecuencia de la onda, entendida como la magnitud que mide el número de repeticiones en un suceso periodo. 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:

$$v = \lambda \cdot f \quad \text{ec. 2.4}$$

Lógicamente, estos parámetros dependerán de la fuente que genere la onda. En este caso de estudio, que las ondas se generan por medio del equipo de georradar, serán precisamente estos parámetros los que caracterizarán las diferencias entre unos equipos.

Esta ecuación sería propia de la onda sinusoidal monofrecuencial. Sin embargo, las ondas que se van a registrar están compuestas por la superposición de varias ondas, lo que quiere decir que se trata de señales complejas, teniendo cada una de ellas frecuencias diferentes y por lo tanto la ecuación de las ondas electromagnéticas es una ecuación multifrecuencial.

Ahora bien, la ec. 2.1 es la ecuación de onda electromagnética en el dominio del tiempo, ya que se estudia la perturbación a lo largo del tiempo. Pero también, a partir del análisis de las series de Fourier, por medio del cálculo de la Transformada de Fourier (FFT), se pueden ir separando las distintas componentes frecuenciales que conforman la onda recibida y por tanto cada una de las ondas individuales que la componen. El resultado de este cálculo se denomina espectro y lo que representa es la intensidad de cada una de las frecuencias que componen la onda multifrecuencial compleja, es decir

la ecuación de onda en el dominio espectral. El análisis espectral puede aportar información complementaria de cómo se propaga la onda electromagnética por el medio a estudio.

Por todo ello, cuando se registran ondas electromagnéticas de forma experimental generadas por un equipo de georradar los parámetros que se pueden medir al analizar dichas ondas 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 se podrán obtener las frecuencias que componen las ondas registradas y las variaciones de las mismas.

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.

2.2. Parámetros electromagnéticos de un medio

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 proporciona una medida de la respuesta de sus cargas libres en presencia de un campo eléctrico externo, es decir, de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica. La conductividad de un material (σ) se expresa en $(\Omega\text{m})^{-1}$ o Siemens/m (S/m).

En general, se puede distinguir entre materiales conductores, semiconductores y aislantes. Pertenecen al primer grupo aquellos materiales cuya $\sigma > 10^5$ S/m, mientras que materiales que presentan $\sigma < 10^{-8}$ S/m se clasifican como aislantes, siendo los semiconductores aquellos cuya conductividad se encuentra entre estos dos valores.

En general, la conductividad eléctrica se presenta como un valor complejo:

$$\sigma = \sigma' - i\sigma'' \quad \text{ec. 2.5}$$

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).

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad \text{ec. 2.6}$$

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 denominado factor de pérdidas.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - i\varepsilon_r'' \quad \text{ec. 2.7}$$

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 Henrios/metro (H/m) 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.

2.3. Velocidad de propagación y atenuación de las ondas electromagnéticas

Tal y como se ha visto en la ec. 2.4, la velocidad de propagación de una onda electromagnética depende de la longitud de onda y de su frecuencia. Ahora bien, estos parámetros se verán alterados dependiendo de las propiedades electromagnéticas del medio por el que viajen.

Es por ello que la velocidad de propagación de una onda (v) por un medio material se puede expresar a partir de los parámetros que definen la propagación de una onda electromagnética el medio: la conductividad, la permitividad dieléctrica y la permeabilidad magnética del medio.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu \cdot \epsilon}{z} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon} \right)^2} + 1 \right)}} \quad \text{ec. 2.8}$$

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:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad \text{ec. 2.9}$$

La velocidad más elevada se obtiene para el aire, mientras que la menor la presenta el agua. 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. 2.9 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, puede obtenerse un valor del nivel de decaimiento de la energía (α) por medio del decaimiento de la amplitud (A) de la onda conforme ésta se propaga por el medio material en decibelios.

$$\alpha = 20 \cdot \log\left(\frac{A_i}{A_0}\right) \quad \text{ec. 2.10}$$

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 propagan por un medio, cuya velocidad de propagación está relacionada con la permitividad dieléctrica relativa del material y cuya atenuación dependerá principalmente de la conductividad.

2.4. Relación entre la variación de las propiedades electromagnéticas del hormigón y sus propiedades físicas

En la propagación de ondas electromagnéticas generadas por un equipo de georradar a través de hormigón, se puede apreciar cómo estas ondas pueden cambiar dependiendo de las propiedades electromagnéticas, como son la conductividad eléctrica, la permitividad dieléctrica relativa y la permeabilidad magnética, de dicho material. Hay que tener en cuenta que la permeabilidad magnética del hormigón es considerada $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$, es decir, igual que la del aire o el vacío. Esto es debido a que el hormigón es un material no magnético.

Por tanto, los parámetros electromagnéticos, referidos al hormigón, que pueden cambiar son la permitividad dieléctrica relativa y la conductividad eléctrica, siendo los factores causantes de ellos los que se van a exponer a continuación.

2.4.1. Variación de la permitividad dieléctrica relativa en el hormigón

Como ya se ha explicado en el apartado 2.2, la permitividad dieléctrica relativa (ϵ_r) de un material es una constante física que se encuentra relacionada con la capacidad de polarización de dicho material en presencia de un campo eléctrico.

La variación de permitividad dieléctrica puede estar entre 4, cuando el hormigón está seco, hasta 8-9 cuando el hormigón está húmedo (Laurens et al. 2002). Sin embargo, los factores que hacen que la permitividad varíe son: la frecuencia de emisión, el proceso de hidratación, los componentes, el contenido de agua y la presencia de cloruros, los cuales se van explicar a continuación.

Dependencia de la frecuencia

El hormigón es un material poroso y heterogéneo, relleno de una solución electrolítica. Como sucede con todos los materiales, su permitividad depende de la frecuencia de las ondas electromagnéticas. Halabe (1990) hizo una teoría sobre la permitividad dieléctrica relativa del hormigón y más tarde demostró que, tanto la parte real como la imaginaria, varían dependiendo de la frecuencia, para una determinada temperatura, salinidad, porosidad y saturación de los poros.

Otro estudio es el realizado por Robert (1998), en el que se analizó la variación de permitividad relativa del hormigón dependiendo de la frecuencia. Para ello investigó sobre el comportamiento en frecuencias que van entre los 50 MHz a 1 GHz. Este estudio fue posible tras la fabricación de muestras de hormigón de varios tipos y la comprobación de sus comportamientos a lo largo de un año. Estas pruebas fueron realizadas en probetas de hormigón con relación A/C de 0,55 y un proceso de curado en inmersión de agua.

Se demostró, a los 3 días de la fabricación de dichas probetas, que ambas partes de la permitividad relativa, real e imaginaria, descendían cuando la frecuencia de medición aumentaba. Sin embargo, este descenso respecto de la frecuencia no era lineal, ya que en el primer intervalo entre 50 MHz y 200 MHz el valor de ϵ_r' variaba de 19 a 12, pero en el intervalo de 200 MHz hasta la frecuencia límite de estudio, es decir 1 GHz, disminuía aproximadamente de 12 a 10. En cuanto a la componente imaginaria, también se comprobó que hasta los 400 MHz ϵ_r'' descendía de 9 a 4, así como hasta 1 GHz de 9 a 3, volviéndose a confirmar las dos velocidades de descenso en relación a la frecuencia.

Dependencia del proceso de hidratación del hormigón

En el estudio de Robert (1998), explicado anteriormente, también se llevaron a cabo comprobaciones sobre el proceso de hidratación del cemento y su influencia en la permitividad dieléctrica relativa, produciéndose un descenso de ésta derivada del tiempo de fabricación. Los 28 primeros días de fabricación eran los que presentaban mayor disminución de permitividad. Por otra parte, los registros de las pruebas al año de fabricación no mostraban una gran influencia de la permitividad. Además, en dicho estudio también se llega a la conclusión de que la velocidad de variación desciende con el tiempo de fabricación, siempre que la frecuencia de estudio sea muy baja (alrededor de los 100 MHz), así como a altas frecuencias (1 GHz) la variación de la parte real casi no se aprecia, siendo su valor aproximadamente 7,5.

Dependencia de los componentes

El hormigón, como material heterogéneo que es, tiene 3 fases diferenciadas. En primer lugar la fase sólida, como cemento, áridos, componentes hidratados, etc. En segundo lugar la fase gaseosa, es decir, aire. Por último la fase líquida, la cual es una solución conductora. La porosidad del material se define por el aire y la solución salina.

El estudio de Laurens et al. (2005) muestra que en la fase sólida la permitividad relativa sólo tiene componente real, la cual varía entre 3 y 5, dato que depende de su composición mineral. Esto sirve para demostrar que la pérdida en la fase sólida del hormigón es insignificante y no varía dependiendo de la frecuencia. Entonces, la existencia de factores de pérdida se da como consecuencia de la fase líquida. Específicamente, la constante dieléctrica de una solución puede variar de los 40 (alta salinidad) a los 81 (agua pura).

Dependencia del contenido de agua

Autores como Soutsos et al. (2001) han estudiado factores tan importantes como las propiedades dieléctricas y su variación dependiendo de la presencia del agua en el hormigón. Se fabricaron probetas con relaciones de A/C con valores entre 0,82 y 0,58 y se emplearon frecuencias de estudio desde los 10 MHz hasta 1 GHz. Lo que se demostró en este estudio es que el contenido de agua en el hormigón es uno de los factores más importantes en cuanto a la variación de permitividad. Cuando el contenido de agua

umentaba en una probeta de hormigón, la permitividad relativa también aumentaba, significando que el material principal que afecta a la permitividad es la matriz del hormigón y no los áridos que se emplean para su fabricación. Un ejemplo de ello es que en valores de contenido de agua = 0,2 %, la ϵ rondaba los 6,5.

Sin embargo, en frecuencias mayores a los 500 MHz, prácticamente no había variación en la permitividad, siempre y cuando el contenido de agua no fuera mayor al 5,5 %. No obstante, si el contenido de agua era alto, como 12 %, la permitividad descendía desde 14 en frecuencias de estudio de 50 MHz hasta 8 para frecuencias de 1 GHz.

Dependencia del contenido de cloruros

El ataque químico por parte del contenido de cloruros en el hormigón reforzado es otro de los principales problemas en dicho material que algunos autores han estudiado. Esto es debido a que el efecto de un alto contenido de cloruros puede promover el proceso de corrosión en el refuerzo de acero.

Uno de los autores ya comentados anteriormente, Robert (1998), también estudió este efecto del contenido de cloruros en relación con la permitividad. Tras realizar las pruebas necesarias, los resultados efectivamente concluyeron que la disolución de cloruros en el hormigón afectaba claramente cuando las frecuencias de estudio eran bajas, mientras que dicho efecto no se apreciaba en la permitividad cuando las frecuencias eran altas (1 GHz). Este hecho es muy relevante en este tipo de estudio para tener en cuenta las frecuencias que se deben emplear. En la actualidad, se tiende a utilizar equipos de frecuencias altas, 1 GHz o más, ya que proporcionan una resolución mayor, hecho que es contrario a las teorías explicadas.

2.4.2. Variación de la conductividad eléctrica en el hormigón

La conductividad de un material es una propiedad que mide la capacidad de dicho medio de conducir la corriente eléctrica. Aunque, como se verá más adelante, el valor de la conductividad se considera despreciable, en el hormigón sí afecta cuando se trata de medidas de georradar, así como a su cálculo de velocidad. Es por ello, que se van a nombrar en primer lugar los principios fundamentales antes de explicar las características de variación en el hormigón.

Principios generales de corriente eléctrica continua: la conductividad

Los materiales sometidos a un campo eléctrico pueden tener un comportamiento de material conductor o en contraposición de material aislante o dieléctrico. En primer lugar, se dice que se comportan como conductores cuando no pongan oposición al paso de cargas libres, que tendrán libertad de desplazamiento en el interior del material. Por otro lado, cuando las partículas están ligadas a las moléculas que los componen se dice que el material es dieléctrico.

Además de estos dos tipos de materiales también se pueden encontrar los llamados semiconductores y electrolitos. Estos son los que tienen unas características entre los anteriores.

Si se somete un material a un campo eléctrico, sobre los portadores de carga del material actuará una fuerza que los pondrá en movimiento dentro del propio material. En algunos materiales conductores, como pueden ser los metales, estos portadores de la carga son los electrones atómicos de valencia. Sin embargo, en materiales electrolitos los encargados de conducir la corriente son los iones positivos y negativos.

Con todo esto, la corriente eléctrica es el movimiento de las cargas libres a través de un material conductor. La intensidad de corriente (I) es la magnitud fundamental que define la corriente eléctrica. Esta magnitud se define como la velocidad a la que se transporta la carga (Q) por un punto dado en un sistema conductor:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad \text{ec. 2.11}$$

donde $Q = Q(t)$ es la carga neta transportada en el tiempo t . Los amperios (A) son las unidades por las que se mide la intensidad de corriente.

La densidad de corriente (J) es otro de los parámetros intervinientes en la corriente eléctrica. Ésta se define como la relación entre la intensidad de corriente y la sección nominal del material en el que tiene lugar el fenómeno. Al tratarse de una cantidad vectorial, únicamente dependerá de las coordenadas del punto del conductor en el momento dado de estudio.

Cuando en el interior de un material conductor las cargas libres se ponen en movimiento, esto es debido a que se ha visto sometido a un campo eléctrico (E) y a la acción de su fuerza. En un primer momento, este movimiento es acelerado, aunque rápidamente se vuelve uniforme gracias a los choques que se producen entre los iones fijos y los que se encuentran en movimiento. La velocidad de arrastre, es decir, la velocidad final de las cargas no corresponde con la que cada una de ellas experimenta, sino que será el valor promedio. Es por ello que la velocidad media de movimiento de carga de un medio conductor, además del campo eléctrico, también dependerá de la naturaleza de dicho medio.

Por tanto, la densidad de corriente (J) de un material conductor se conoce como:

$$J = \sigma \cdot E \quad \text{ec. 2.12}$$

donde E es la intensidad del campo eléctrico y σ es la conductividad, es decir, la facilidad que presenta el medio conductor a que las cargas se muevan en su interior. A los materiales que cumplen con esta relación se les denomina conductores lineales u óhmicos, ya que la ec. 2.12 es la expresión de la Ley de Ohm en forma local.

Otro modo de expresar la ec. 2.12 es:

$$E = \frac{1}{\sigma} \cdot J = \rho \cdot J \quad \text{ec. 2.13}$$

donde ρ , que es la inversa de la conductividad se denomina resistividad. Esta nomenclatura es debida a que la información que da es acerca de la oposición del material al movimiento de electrones en su interior. Por ejemplo, si se somete un material a un campo eléctrico (E) muy grande y se genera una densidad de corriente (J) muy pequeña, esto significaría que la resistencia (ρ) que ofrece el material al movimiento de cargas es muy alta.

El Ohmio (Ω) es la unidad de medida de la resistencia, que es la resistencia de un conductor que teniendo entre sus extremos una diferencia de potencial de 1 voltio circula por él la intensidad de 1 amperio a una temperatura dada.

$$1 \text{ Ohmio} = \frac{1 \text{ Voltio}}{1 \text{ Amperio}} = 1 \Omega = \frac{V}{A} \quad \text{ec. 2.14}$$

Variación de la conductividad eléctrica en el hormigón

Neville (2007) se encargó de describir detalladamente las propiedades eléctricas del hormigón. En este documento se describe como el hormigón fresco, es decir antes del curado, tiene el comportamiento de un material electrolito, que incluso llega a alcanzar una resistividad de $100 \Omega \cdot m$. Esto puede considerarse como si el hormigón fuera un semiconductor, aunque una vez curado al aire, la resistividad aumenta de forma importante, llegando a alcanzar un valor en torno a $10^4 \Omega \cdot m$. Si el curado fuera en horno, estos valores serían de $10^9 \Omega \cdot m$, lo que entonces se consideraría como un material aislante.

La corriente eléctrica se conduce en el hormigón fresco gracias a los iones del agua evaporable. Por esa razón aumenta su resistividad una vez curado. Además, la resistividad de los áridos convencionales es enormemente más grande, algo que es importante saber. Cuando el agua ya se ha evaporado, la corriente eléctrica se conduce por el agua combinada. Esto hace que la resistividad disminuya significativamente conforme aumenta la relación A/C. En la Tabla 2.1 se puede ver un ejemplo numérico realizado por el mismo Neville (2007), para diferentes tipos de pasta de cemento.

Tabla 2.1. Influencia de la relación A/C y el tiempo de curado en la resistividad ($\Omega.m$) de pastas de cemento Portland (Neville, 1997).

	Días de curado (1000 Hz, 4 V)		
A/C	7	28	90
0,4	10,3	11,7	15,7
0,5	7,9	8,8	10,9
0,6	5,3	7,0	7,6

En otro estudio, esta vez realizado por Soutsos et al. (2001) también quedó demostrado cómo en la variación de la conductividad el contenido de agua era un factor clave. En este se comprobó cómo cuando el contenido de agua aumentaba la conductividad también lo hacía. Además, se consiguió demostrar que los valores de conductividad aumentaban solamente de 0 a 0,02 S/m desde la frecuencia de 5 MHz hasta 1 GHz. Sin embargo, actuando con las mismas frecuencias pero con contenidos de agua del 12 % la conductividad crecía de 0,03 S/m hasta 0,1 S/m.

En la publicación de Klysz et al. (2008) también se realizó el estudio de la variación de conductividad en el hormigón, donde se analizó que para una frecuencia de estudio de 1,5 GHz, dicha conductividad varía 10^{-4} S/m en el hormigón seco hasta 10^{-1} S/m en el hormigón saturado y que aumenta de forma lineal con el contenido de agua.

Por otra parte, otro factor a tener en cuenta es que conforme aumenta el voltaje también aumenta la resistividad. Neville (1997) en su estudio muestra un ejemplo en el que para una pasta de cemento Portland secada al horno con una relación A/C = 0,49, cuando se aplica un voltaje de 100 V, la resistividad se encuentra próxima a $10^8 \Omega.m$. Mientras que cuando el voltaje aplicado está en torno a 5000 V la resistividad supera los $10^9 \Omega.m$.

3. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA DEL GEORRADAR EN EL ÁMBITO DE LA CONSTRUCCIÓN

En inglés, el nombre de georradar se conoce como *Ground Penetrating Radar*, también conocido con sus siglas GPR. Este nombre viene de la evolución de los primeros radares desarrollados durante la Segunda Guerra Mundial. Aunque los primeros se inventaron con la función de detectar aviones y barcos, más tarde evolucionaron para detectar elementos en medios más complejos, como es el subsuelo, de ahí su nombre.

A partir de los años 50, se produce una evolución en el desarrollo tecnológico que lleva a que estos aparatos comiencen a utilizarse para otros fines, en áreas como son la geología, la minería, la glaciología e incluso la ingeniería, todos ellos relacionados con la caracterización del subsuelo.

Actualmente, son cada vez más las áreas de estudio que aplican el georradar en sus investigaciones, siendo empleado como sistema de ensayo no destructivo y resolutivo en diferentes tipos de estudio. Por una parte, se emplea en estudios geológicos, hidrológicos, del medio ambiente y arqueológicos. Por otra parte, en el campo de la ingeniería (sobretudo civil) y la arquitectura también se ha vuelto una técnica relevante, debido a la existencia del valor patrimonial y artístico. Todas estas áreas de estudio se pueden ver reunidas cada 2 años en el encuentro internacional sobre georradar: *International Conference on Ground Penetrating Radar*, donde diferentes expertos de todos los campos se reúnen para dar conferencias sobre este sistema. La próxima edición se celebrará en Suiza en 2018, siendo su decimoséptima edición.

Dentro del campo de la ingeniería y la construcción, hay un gran número de estudios que emplean la técnica del georradar. Algunos de estos son en la detección y localización de instalaciones, el análisis de estado de infraestructuras de transporte, puentes, túneles, edificios, así como en la caracterización y diagnóstico de materiales de construcción. Este último ámbito es en el que se va a basar el trabajo que se está llevando a cabo. A continuación se va a hacer una explicación de cada uno de los estudios en los que puede ser empleado.

Detección y localización de instalaciones

La necesidad de un cambio de situación, reparación o mejora de las infraestructuras de instalaciones básicas es algo que es necesario a menudo en las áreas urbanas. Es por ello que es muy importante la detección, el posicionamiento y la localización de dichas instalaciones, ya que si todo esto no se conociera podría dañarse la instalación, teniendo consecuencias como la interrupción de su suministro y la reparación de ellas por costes mucho más elevados de lo pertinente. Por todo esto, el cartografiado de las instalaciones es muy importante antes de realizar las actuaciones necesarias.

Lo que se quiere transmitir con dicho cartografiado es la posición de las infraestructuras, así como el tipo de servicio que hay enterrado, ya que se pueden encontrar instalaciones de todo tipo, como líneas de comunicación, distribución de electricidad, gas natural, agua, evacuación de residuos, etc. Hoy en día se está llevando a cabo una nueva técnica por la que el georradar genera imágenes 3D del subsuelo, pudiendo cartografiarse toda la estructura necesaria, siempre que sea a poca profundidad y en zonas casi totalmente urbanizadas (Jeng y Chen, 2012).

Análisis del estado de infraestructuras de transporte

Es importante conocer el estado de este tipo de infraestructuras, ya sea cuando se está llevando a cabo su construcción, por si se encuentra alguna zona débil donde se ha realizado una mala ejecución, como cuando ya están en servicio, por si se encuentran zonas dañadas como consecuencia de su uso. Estas mediciones con georradar se pueden emplear en cualquiera de las fases que sea necesario, así como en el pavimento que se tenga, ya sean pavimentos flexibles como el asfalto o pavimentos rígidos como el hormigón. Los usos más comunes por los cuales se realizan estas comprobaciones son: para la localización de los refuerzos del hormigón, para conocer el espesor final de las capas del pavimento, tanto de asfalto como de hormigón, así como para advertir las heterogeneidades en el pavimento.

Análisis del estado de puentes y túneles

La utilización del georradar en puentes es similar a las explicadas en las infraestructuras de transporte, ya que sus principales objetivos son la localización de las armaduras en las losas de hormigón, conocer el estado del recubrimiento del hormigón, conocer una estimación de las dimensiones de las losas así como su posible deterioro, etc. Esto es igual tanto en puentes de hormigón como en puentes realizados con pétreos naturales.

En cuanto a túneles, esta aplicación del georradar no está muy extendida por varios motivos, como pueden ser la escasez de estas infraestructuras o la dificultad de acceder a ellas. Sin embargo, los principales estudios demuestran que se utilizan para determinar el espesor y las condiciones de los muros, así como el análisis de estado de los refuerzos y la detección de posibles huecos existentes entre el hormigón y las rocas.

Análisis del estado de edificaciones

El uso de la técnica del georradar aplicado al campo de la edificación es relativamente nuevo, siendo anteriormente más empleado como técnica de inspección en los campos de ingeniería civil y arqueología.

Hoy en día, la utilización que se le da al georradar en edificación es mayoritariamente como técnica complementaria o de apoyo para estudios más completos. Un ejemplo de ello es cómo se está utilizando para formar parte de estudios

preliminares en la restauración de edificios con valores patrimoniales y artísticos, permitiendo inspeccionar los daños en la estructura (Pérez-Gracia, 2014).

El potencial del georradar en este campo es muy elevado por muchos motivos. En primer lugar, y es el más importante, es porque se trata de una técnica no destructiva, lo que permite detectar dónde está el daño y repararlo sin dañar la edificación. Además, es un sistema que se puede aplicar in situ, registrando los datos mediante un software que da a conocer con una precisión milimétrica donde se encuentran los defectos que se quieren conocer, ya sean grietas, humedades, etc.

Por otra parte, el hecho de que los datos recogidos con el software permitan crear una imagen tridimensional de la estructura interna de las zonas analizadas también es una gran ventaja, pudiendo conocer el grado de funcionalidad de las piezas o las partes necesarias, sin necesidad de dañar con catas o ensayos destructivos.

Todo esto convierte al georradar en una de las técnicas más apropiadas para el estudio y evaluación de cualquier tipo de construcción arquitectónica. Algunos de los fines para los que se utiliza en edificación son: detección de humedades en el subsuelo, determinación de profundidades y espesores de zapatas de cimentación, localización de estructuras o cavidades enterradas en el subsuelo, tales como criptas, enterramientos, etc. Esto es algo que García et al. (2007), Ramírez et al. (2008), Pérez et al. (2008) y Capuz-Lafarga et al. (2011) detallan en sus estudios.

Caracterización y diagnóstico de materiales de construcción

El estudio y caracterización de materiales de construcción, ya sea hormigón, madera, obras de fábrica, etc, cada vez juega un papel más importante como una de las aplicaciones del georradar debido a la importancia de comprobar las patologías que presentan los mismos. Un ejemplo muy significativo de ello es la importancia de la influencia del agua en el proceso de deterioro de una gran parte de los materiales empleados en la construcción. Esto es algo que muchos autores han estudiado, como por ejemplo Laurens et al. (2005) que analiza la variación del contenido de humedad de diferentes medios como suelos, Huisman et al. (2003) y Zagoskin et al. (2006) en el hormigón o Maierhofer et al. (1998) en los muros de obra de fábrica.

Otro autores como Sabartaï et al. (2006a - 2006b), Klysz y Balayssac (2007) y Viriyametantont et al. (2008) han estudiado la variación del contenido de humedad en diferentes ensayos de hormigón durante el proceso de curado mediante protocolos. El proyecto que se está llevando a cabo quiere estudiar esta caracterización del georradar sobre el hormigón.

4. EL GEORRADAR

4.1. Componentes del equipo de georradar

Los principales componentes de un equipo de georradar son la unidad central, la antena emisora y receptora, así como una serie de accesorios y equipos complementarios.

Unidad central

La unidad central, también llamada unidad de control, es la parte que se encarga de controlar las antenas, coordinar los diferentes accesorios que se pueden añadir en el equipo básico, así como del registro la señal emitida. También es el aparato encargado de coordinar el almacenamiento de la señal en cualquier tipo de soporte, ya sea magnético, fotográfico, en papel, etc. Además, en algunos casos incluso es capaz de realizar el tratamiento básico de las señales durante el proceso de adquisición de datos.

Es posible la realización del procesado básico de la señal gracias a que la unidad central lleva instalado un software informático, además de llevar incorporados diferentes servicios que permiten actuar sobre la señal emitida así como sobre los registros que se consiguen: filtrados y modificación de la ganancia del registro, entre otros procesados. Esta unidad también suele ir conectada a un monitor que permite visualizar la señal conforme se va obteniendo. La forma de visualización puede ser elegida entre trazas de amplitud, también llamada A-scan (

Figura 4.1a) o bien por escalas de colores o distintos tonos de gris, también llamadas B-scan (

Figura 4.1b), siendo cada color o tono un intervalo de amplitudes de la onda registrada.



a

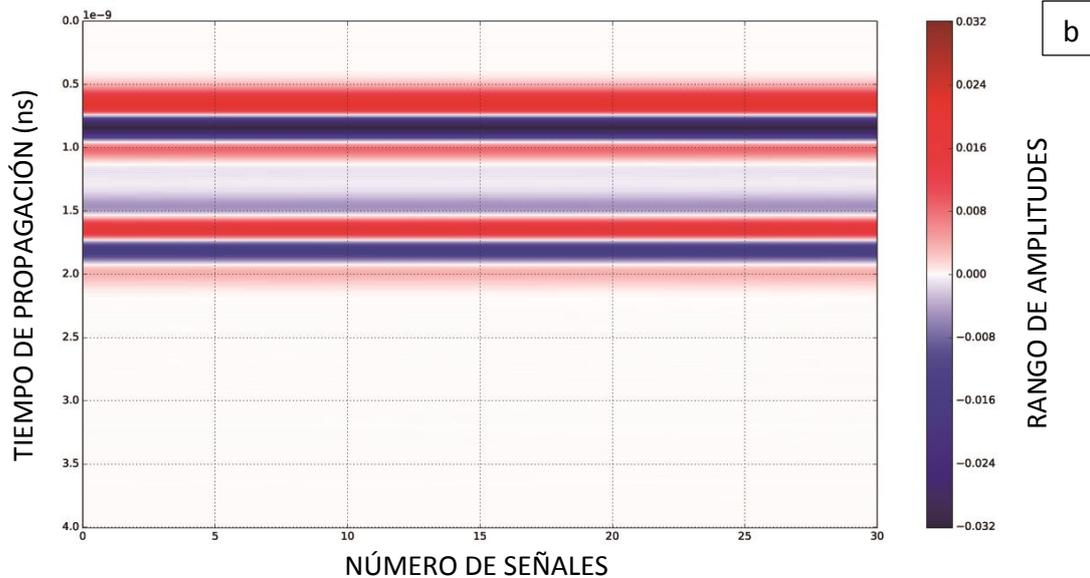


Figura 4.1. Representación de señales mediante trazas de amplitud o A-scan (a) y mediante escalas de colores o B-scan (b).

Antenas

Las antenas son la parte fundamental del equipo de georradar, ya que son la parte encargada de emitir el pulso electromagnético y de recibir la energía que regresa a la superficie tras haber sufrido reflexiones. Las antenas se clasifican en varios grupos dependiendo de distintas características.

La primera es en función de las características del campo radiado, pudiendo ser antenas isotrópicas o antenas direccionales. Las isotrópicas radian la energía en todas direcciones del espacio por igual y sin tener direcciones privilegiadas. Estas antenas se dicen que son ideales, ya que en la práctica conseguir una perfecta isotropía en la emisión es imposible. Si el medio en el que radia la antena la energía se considera homogéneo e infinito (sin discontinuidades), el frente de ondas que se propaga es esférico. Las antenas direccionales son las que tienen una dirección determinada de radiación, siendo la emisión que produce heterogénea en todas las direcciones.

La segunda clasificación depende de la frecuencia central de la emisión de la antena. La longitud de onda (λ) del pulso emitido depende de esta frecuencia (f) y de la velocidad de la onda en el medio (v):

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{ec. 4.1}$$

Las bandas de frecuencia con las que se trabaja en el georradar son las de radiofrecuencia y microondas, es decir, las que están situadas entre 3 GHz y 10 MHz. La elección de la antena dependerá de las necesidades.

La elección de la frecuencia central de la antena es la que dicta la penetración de la señal que se emite dentro del material que se quiere estudiar. Es por ello que este es uno de los factores más importantes a tener en cuenta, ya que es el encargado de limitar

el alcance y su resolución. De esta forma, una antena con baja frecuencia puede alcanzar mayor profundidad que una con alta frecuencia, debido a que se atenúa menos.

La tercera clasificación depende del número de dipolos implementados, pudiendo ser monoestáticas, cuando son emisoras y receptoras, o biestáticas, cuando disponen de dos módulos separados, una antena emisora y otra receptora.

Accesorios y equipos complementarios

Las partes del equipo ya explicadas son elementos básicos a los cuales se les puede añadir diferentes accesorios que ayuden a facilitar la toma y adquisición de datos. Los accesorios que existen son diversos, pero se pueden clasificar en dos grupos. Por una parte están los complementos para la visualización y almacenamiento de los registros, como pueden ser las impresoras, las pantallas de visualización, los programas informáticos y las unidades de registro de datos en soporte magnético (cinta o disco) u óptico.

Por otra parte están los accesorios para situar los perfiles. Dentro de este último también hay de dos tipos. En primer lugar los marcadores, que permiten introducir una marca en el registro cada vez que se presiona un pulsador, lo que permite introducir marcas que indican el principio y final del perfil, además de advertir si existe algún elemento especial en el perfil. En segundo lugar, encontramos los odómetros, que a veces van implementados en un soporte de ruedas donde también va la antena. Estos aparatos permiten determinar la posición de los distintos puntos del perfil con mayor precisión que en el caso de los marcadores. Hoy en día, los equipos de georradar se fabrican integrando en ellos GPS, que permiten la determinación de las coordenadas de los perfiles.

4.2. Métodos de adquisición de registros de georradar

Dependiendo del problema a estudiar mediante el método de georradar, así como de los resultados que se desea obtener, la adquisición de datos podrá ser mediante perfiles o puntuales.

En primer lugar, para generar un perfil se debe desplazar la antena a lo largo de una línea, lo que hará que esta emita un elevado número de pulsos por segundo (entre 1 y 100 pulsos/segundo). En este caso aunque la adquisición realmente sea puntual, se puede considerar continua por la cantidad de trazas que se tienen en todo el perfil, teniendo en cuenta que también depende de la velocidad de desplazamiento de la antena, procurando siempre que sea lo más constante posible.

Si por el contrario se quiere realizar la adquisición de datos de forma puntual, se colocará la antena en un punto concreto y no se desplazará en ningún momento, emitiendo y recibiendo los datos de esa área concreta de estudio. Así se dispondrá de información del interior del medio situado en la vertical del punto donde se ubica la antena.

El estudio realizado en el presente trabajo final de master ha sido mediante el método puntual en todos sus apartados.

Existen otros tipos de adquisición de registro, como el *Common Mid Point*, la transiluminación, la tomografía, la reflexión y refracción de gran ángulo y los sondeos, siendo variaciones de las técnicas ya explicadas anteriormente y que se describe en detalle en la Rodríguez-Abad (2010).

4.3. Tratamiento e interpretación de registros

Para que los resultados finales a los que se quiere llegar con la técnica de georradar sean correctos, se debe realizar una planificación de la campaña. El registro que proporciona el georradar se llama radargrama. El proceso de interpretación de estos es largo, siendo necesario conocer los principales parámetros de registro así como los cálculos necesarios para su correcta interpretación.

4.3.1. Parámetros de un registro

El archivo de registro es el encargado de recoger todos los parámetros que definen al radargrama. Todos los registros contienen una cabecera de texto con la información necesaria sobre cómo se realiza la adquisición. Esta información es variada, conteniendo datos como el nombre del fichero, la fecha de registro y las fechas de modificaciones posteriores, pero los datos importantes se van a detallar uno a uno a continuación.

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. Las reflexiones que son alcanzadas por la antena en tiempos de propagación dobles superiores al rango no quedarán registradas. Por otra parte, el tiempo límite de la ventana se debe seleccionar de modo que el registro de la anomalía buscada esté incluido. No obstante, es aconsejable que dicho tiempo sea lo suficientemente grande como para que una velocidad más baja de la esperada no pueda evitar la detección de las anomalías que se desea detectar.

Por todo esto, el ajuste del rango requiere un conocimiento preliminar para poder tener una idea de la posible profundidad máxima que se va a estudiar, así como de la velocidad aproximada de la onda electromagnética en su propagación por el medio.

Posición de inicio de la señal

La posición de inicio de la señal (P), es el parámetro encargado de seleccionar el tiempo de inicio de la ventana temporal, el cual viene determinado por la suma del tiempo de inicio y el rango del registro. Este parámetro debe ser ajustado antes de empezar la adquisición de datos. Para ello conviene situar la antena sobre el medio para así 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.

Puntos por traza

Los puntos por trazas, también llamados *samples*, se pueden definir como el muestreo de cada traza, es decir, los puntos que se utilizan para la representación de la señal recibida. Es posible seleccionar cualquier muestreo, pero normalmente 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. El número de puntos que se elija dependerá de la ventana temporal, ya que cuanto mayor sea esta última, más elevado tendrá que ser el número de puntos, siempre que se quiera tener una resolución mayor.

En los siguientes capítulos del presente trabajo se verá como el muestreo en las señales reales que se han estudiado son de 512 puntos (o *samples*), sin embargo las señales modeladas por el software *gprMax* son de 1818 puntos.

Velocidad de transmisión y de registro

Este parámetro se refiere al número de pulsos por segundo que puede transmitir y registrar un equipo de georradar. Estos factores se pueden ajustar antes o durante la adquisición de datos, para que concuerden con las necesidades del estudio. La velocidad de propagación es tan elevada que la tecnología actual no permite registrar cada una de las trazas individuales reflejadas. Para solucionar este problema, el georradar efectúa un muestreo de la señal obteniendo información de varios pulsos emitidos para reconstruir una única traza.

Teniendo en cuenta esta velocidad de registro máxima, se elegirá la velocidad de registro de estudio. Esto se hará teniendo en cuenta la resolución horizontal que se desea alcanzar, así como la velocidad a la que se desplaza la antena sobre la superficie del material.

Superposición de trazas

Será posible realizar una suma de las trazas adyacentes, ya sea durante la adquisición de los registros o posterior a ella. Dependiendo del estudio, se elegirá el número de trazas superpuestas. Estas superposiciones son las encargadas de reducir los efectos debidos a fenómenos aleatorios, mientras que los efectos ocasionados por fenómenos deterministas quedan realzados, lo que hace que queden mejor definidos en el radargrama.

Sin embargo, una excesiva superposición de trazas puede disminuir las amplitudes hasta quedar indistinguible, obteniendo un radargrama característico de un medio continuo.

Ganancia

La ganancia consiste en la amplificación de la señal recibida. Al igual que la superposición, se puede realizar durante o posteriormente al procesado de datos. El

objetivo de aplicar dicha ganancia es el de disminuir los efectos de atenuación que se puedan producir. Esto es posible realizarlo aumentando la amplitud de las reflexiones que proceden de tiempos de propagación mayores.

Hay que tener en cuenta que cuando se aplican ganancias se está amplificando toda la señal recibida, incluso el ruido. Es por ello que una ganancia excesiva en tiempos de propagación altos, donde la amplitud de la señal es similar a la del ruido, también puede amplificarse el ruido electrónico del equipo y el cableado, lo que podría producir registros confusos. En conclusión, al analizar los registros a los cuales se les ha aplicado una ganancia, habrá que tener en cuenta que las amplitudes están modificadas.

Filtros frecuenciales aplicados durante la adquisición de datos

El hecho de añadir un filtro a la toma de datos en ocasiones puede no ser la mejor opción, debido a que la adquisición de datos con un filtrado impide registrar parte de la señal. Es por ello que si no se selecciona correctamente el filtro aplicado se podría perder parte de los datos de interés a recoger para el estudio. Esto puede pasar ya que en muchas ocasiones no se conoce exactamente la variación que se origina en el rango de frecuencias.

No obstante, en ocasiones el filtrado es necesario, como por ejemplo cuando se necesita una interpretación rápida de forma casi simultánea a la adquisición. Si es así, hay que tener en cuenta el comportamiento de las antenas que se utilizaran y los rangos de frecuencia emitidos y recibidos. Si se conocen estos parámetros, la señal puede quedar bastante mejorada por el filtro.

4.3.2. Registros de amplitudes

Un radargrama se compone de un gran número de trazas de amplitud. En su eje horizontal quedan representadas las distancias sobre la superficie del material por el que se pasa la antena, mientras que en el eje vertical se representan los tiempos dobles de propagación de las ondas electromagnéticas que se han ido reflejando, en las anomalías del medio.

El número de trazas que forman un radargrama depende de algunos factores. Estos son: la longitud del registro, la velocidad a la que se haya deslizado la antena por el perfil, el número de pulsos emitidos por segundo por la antena, el muestreo y la velocidad de registro del equipo de georradar.

A la hora de usar un radargrama es necesario conocer que cada una de las trazas que forman parte del mismo es un registro de las amplitudes procedentes de las reflexiones internas del medio. Es por ello que el conjunto de dichas trazas permite el control del conjunto de amplitudes en todo el desplazamiento, lo que lleva como resultado a la representación del objeto de reflexión. Debido al aporte de energía que proviene de las reflexiones durante la propagación, se producen incrementos de

amplitud en las trazas. Es por ello que los registros indican las amplitudes y los tiempos de propagación.

Los datos finales pueden ser representados como un registro de amplitudes (Figura 4.1a) o con una representación en escala de colores (

Figura 4.1b) La elección de representación depende de la persona que realice el estudio, ya que los resultados son exactamente iguales. Mientras que la representación mediante registro de amplitudes se centra en la representación del valor, la de escala de colores consigue efectos visuales mediante una escala que relaciona intervalos de amplitudes con escala de colores. Cada uno de los intervalos quedará asociado a un color, pudiéndose reconocer sin problemas.

4.3.3. Resolución del georradar

La resolución de un equipo de georradar es la capacidad que tienen las antenas de dicho equipo para distinguir elementos diferentes en un medio a estudiar, pudiendo referirse a la profundidad (resolución vertical) o diferentes elementos en el interior del medio, cercanos a la superficie y paralelos a ella (resolución horizontal).

Resolución vertical

Se dice que una antena tiene resolución vertical cuando es capaz de diferenciar dos señales muy cercanas en el tiempo. Esto significa que dicha antena es capaz de separar dos reflexiones producidas en un mismo medio por diferentes anomalías consecutivas en el tiempo de propagación.

Las antenas de los equipos de georradar están diseñadas para que se cumpla la relación entre el ancho de banda (B) y la frecuencia central (f_c) como se muestra en la siguiente ecuación:

$$B \cong f_c = \frac{1}{T} = 1.6 \text{ GHz} \quad \text{ec. 4.2}$$

siendo T la duración del pulso y f_c la frecuencia central de emisión. Uno de los factores más importantes de una antena es el ancho de banda, teniendo que ser considerable debido a que es el encargado de dar mayor capacidad de resolución al equipo.

Un ejemplo de medida de resolución vertical podría ser el espesor mínimo (e_{medio}) que puede tener una capa de un medio para que sean distinguibles en el radargrama las reflexiones producidas en las dos superficies que delimitan dicha capa. Para que el georradar pueda estudiar dicha capa intermedia con nitidez, es necesario que cuando la reflexión de la base alcance la cara superior, ya se haya reflejado la primera señal en su totalidad. La resolución vertical (R_v) se puede expresar como:

$$R_v = e_{medio} \geq \frac{v \cdot T}{2} = \frac{\lambda}{2} \quad \text{ec. 4.3}$$

donde v es la velocidad de propagación de las ondas en el medio, T la duración de la señal y λ la longitud de onda de la señal.

Resolución horizontal

La resolución horizontal está relacionada con la capacidad de la antena para diferenciar dos elementos contiguos en la dirección de su desplazamiento. Esta resolución depende de parámetros como 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.

Como ya se ha explicado, el georradar emite impulsos cortos a una frecuencia fija, agrupándolos en ondas de barrido que dan lugar a un número de trazas registradas por segundo. El número de trazas dependerá de la velocidad de la antena.

Si el número de trazas es muy elevado, a la hora de detectar el reflector puede producir registros donde el elemento se alargue, pudiendo causar una mala interpretación de los resultados. Es por ello que se deben controlar de forma adecuada la velocidad y el número de trazas.

4.3.4. Parámetros necesarios para la interpretación de los registros de georradar

Para conocer la equivalencia entre el tiempo doble de propagación y la profundidad de penetración (h) se debe conocer la permitividad efectiva del medio o en su caso la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas, viniendo dadas ambas por las siguientes ecuaciones:

$$h = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon}} = \Delta t \quad \text{ec. 4.4}$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad \text{ec. 4.5}$$

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

5. MODELADO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

En este capítulo se va a realizar una introducción teórica de los conceptos que son necesarios conocer para comprender cómo se ha realizado el estudio de georradar que se ha llevado a cabo, mediante el modelado de señales en diferentes situaciones.

Par ello se van a explicar los métodos matemáticos empleados por los creadores de los programas, así como cómo se puede trabajar con dichos softwares con los cuales se ha llegado a unas conclusiones tras su aprendizaje y ejecución.

5.1. Introducción al modelado de ondas electromagnéticas

El software para el modelado de las ondas electromagnéticas es el *gprMax*. Este software resuelve las ecuaciones de Maxwell usando el método de las Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (*Finite-Difference Time-Domain*, FDTD). Este método se utiliza para resolver problemas electromagnéticos transitorios utilizando diferencias finitas.

Las ecuaciones de Maxwell describen todos los fenómenos electromagnéticos, relacionando el campo eléctrico y el magnético con sus fuentes. En la Figura 5.1 se pueden apreciar dichas ecuaciones, donde t es el tiempo en segundos y q_v es la densidad de carga eléctrica volumétrica (culombios/m³).

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_s \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= q_v\end{aligned}$$

Figura 5.1. Ecuaciones de Maxwell.

Para simular la respuesta del georradar de un objetivo particular o conjunto de objetivos, las ecuaciones anteriores deben resolverse según la geometría del problema y las condiciones iniciales.

La naturaleza del problema del georradar se clasifica como un valor inicial: problema de límite abierto. Esto significa que para obtener una solución debe haber una condición inicial que permita que los campos resultantes se propaguen a través del espacio alcanzando un valor cero en el infinito ya que no hay límites específicos que limiten la geometría del problema y donde los campos electromagnéticos pueden tomar un valor predeterminado.

El método FDTD enfoca la solución numérica de las ecuaciones de Maxwell discretizando tanto el espacio como el tiempo. Por lo tanto, los pasos de discretización espacial Δx , Δy y Δz y temporal Δt desempeñan un papel muy importante, ya que cuanto más pequeños son, más cerca está el modelo FDTD de una representación real del

problema. Sin embargo, los valores de los pasos de discretización siempre tienen que ser finitos, ya que los ordenadores tienen una cantidad limitada de almacenamiento y velocidad de procesamiento es finita.

Uno de los problemas existentes a la hora de modelar problemas de límites abiertos, como es el caso del georradar, es el truncamiento del dominio computacional a una distancia finita de las fuentes y los objetivos donde los valores de los campos electromagnéticos no pueden calcularse directamente mediante el método numérico aplicado dentro del modelo. Por lo tanto, una condición aproximada conocida como condición de contorno absorbente (*Absorbing Boundary Conditions, ABC*) se aplica a una distancia suficiente de la fuente para truncar y, por lo tanto, limitar el espacio computacional. El objetivo de este ABC es absorber cualquier onda que incida en él, simulando así un espacio ilimitado. El espacio computacional (el modelo) limitado por el ABC debe contener todas las características importantes del modelo, como las fuentes, los puntos de salida y los objetivos (ejemplo en la Figura 5.2).

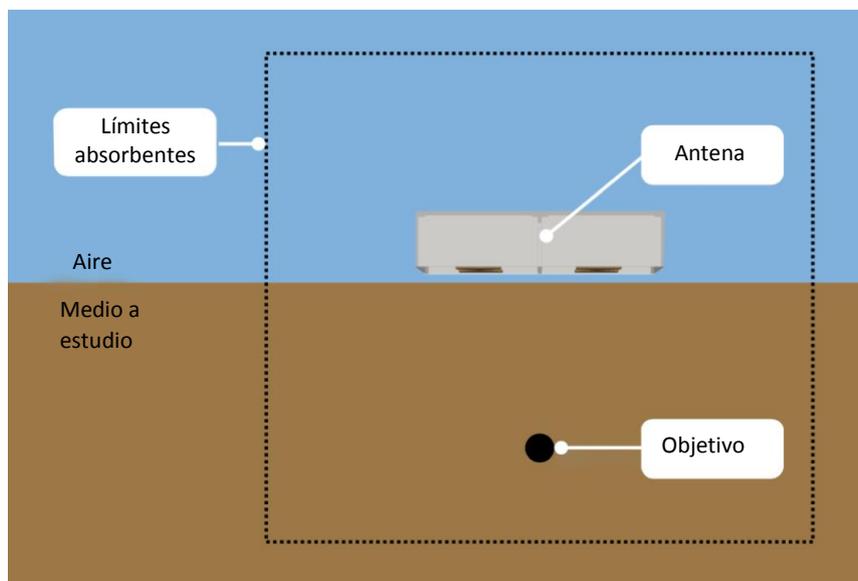


Figura 5.2. Problema de límites de GPR expresado gráficamente. (Fuente: <http://www.gprmax.com/>)

Se supone que el medio que contiene el objetivo es de extensión infinita. Por lo tanto, las únicas ondas reflejadas serán las que se originan en el objetivo. En casos en que el medio receptor no sea infinito (como puede ser, una losa de hormigón) se puede suponer un alcance infinito, siempre y cuando las reflexiones reales producidas en la terminación de la losa no sean de interés o su tamaño real sea lo suficientemente grande como para que estas reflexiones no afecten la solución para la ventana de tiempo requerida. En general, se supone que cualquier objeto que abarque el tamaño del dominio se extiende hasta el infinito. Los únicos reflejos que se originarán de su terminación en los límites de truncamiento del modelo se deben a las imperfecciones de los ABC y, en general, son de una amplitud muy pequeña en comparación con los reflejos del objetivo dentro del modelo.

5.2. El software *gprMax*

El *gprMax* es un software libre que actualmente se encuentra en desarrollo. Permite simular la propagación de ondas electromagnéticas provenientes de georadar, denominado generalmente por los especialistas por sus siglas en inglés: de *Ground Penetrating Radar* (GPR). Esto lo hace mediante las ecuaciones de Maxwell en 3D usando el método de las Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD). Aunque fue diseñado con este fin, puede ser utilizado para otras aplicaciones de ondas.

El *gprMax* se ha lanzado actualmente bajo la Licencia Pública General GNU v3 o superior. Según indican sus creadores este software está escrito principalmente en *Python 3*, con partes críticas para el rendimiento escritas en *Cython*. Incluye un solucionador basado en CPU paralelo a *OpenMP* y un solucionador basado en GPU escrito usando el modelo de programación NVIDIA CUDA (<http://www.gprmax.com/>).

5.2.1. Instalación del programa *gprMax*

El programa cuenta con una página en internet (<http://www.gprmax.com/>), donde se puede conocer todo lo necesario para su uso, como las noticias relevantes, proyectos en los que ha sido usado e incluso lo necesario para su descarga e instalación, así como su posterior uso.

En cuanto a la instalación del software, hay que seguir 3 pasos, siempre teniendo en cuenta que el sistema operativo del ordenador con el que se está trabajando es Windows:

1. Instalación de *Python*

Se descarga e instala Miniconda, una versión reducida de Anaconda, que es un distribuidor de *Python*, así como de sus paquetes. El que se descargó en este caso fue la versión de Miniconda para Python 3.6. Tras instalar esto, habrá que ejecutar unos comandos para comprobar que se ha instalado correctamente:

```
$ conda update conda
$ conda install git
$ git clone https://github.com/gprMax/gprMax.git
$ cd gprMax
$ conda env create -f conda_env.yml
```

Si todo esto se ejecuta correctamente, se podrá continuar con la instalación.

2. Instalación C compiler

Para este caso simplemente se ha descargado *Microsoft Visual C++ 2015 Build Tools* y posteriormente se ha instalado.

3. Construir e instalar *gprMax*

Por último, se abre la opción *Command Prompt*, lo que permite navegar por el nivel máximo del directorio de *gprMax*, aunque todavía no estará activado el programa *gprMax* para conda, sino que habrá que introducir la opción *actíivate gprMax*. Una vez activado, se procede a su instalación total con los comandos:

```
(gprMax)$ python setup.py build
```

```
(gprMax)$ python setup.py install
```

Con todo esto realizado, ya estará el software listo para ser utilizado.

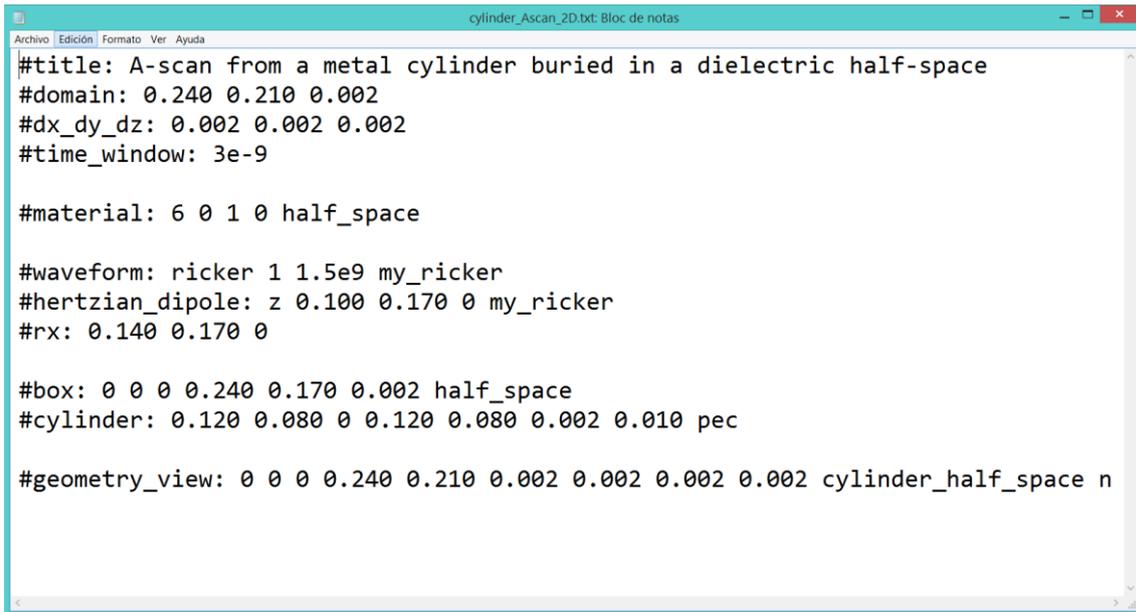
5.2.2. Ejecutar *gprMax*

Para poder ejecutar el software *gprMax*, lo primero que se debe hacer es tener claros los comandos necesarios para que se construya un fichero de entrada (*input file*) con lo que se desea calcular. Para conocer estos comandos, existe la guía del usuario de *gprMax*, un documento realizado por Craig Warren y Antonis Giannopoulos de la Universidad de Edimburgo, donde se explica todo lo necesario para la utilización del programa. En este caso, dichos comandos y sus correspondientes explicaciones se encuentran en el capítulo 4 de la guía del usuario de *gprMax* “*Input file commands*”.

Un *input file* es un texto en ASCII, el cual puede realizarse en cualquier editor de texto. En el caso de este trabajo, se han realizado con el software de Windows Bloc de Notas. En este *input file* se pondrán todos los comandos que sean necesarios para que *gprMax* lo lea correctamente, comenzados con #, ya que si la línea comienza de otra forma, el programa ignorará ese comando. Además, hay que tener en cuenta que cada comando se escribirá en una línea diferente. La escritura será:

```
#command_name: parameter1 parameter2 parameter3...
```

Si no se llevan a cabo estas normas de escritura del fichero, en el programa aparecerá un mensaje de error y no aparecerá ningún tipo de resultado. En la Figura 5.3 se puede ver un ejemplo de un *input file* descargado junto a *gprMax*, que proporciona el Manual de Usuario del *gprMax* y con el cual se ha podido aprender a realizar este tipo de archivos.



```

cylinder_Ascan_2D.txt: 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

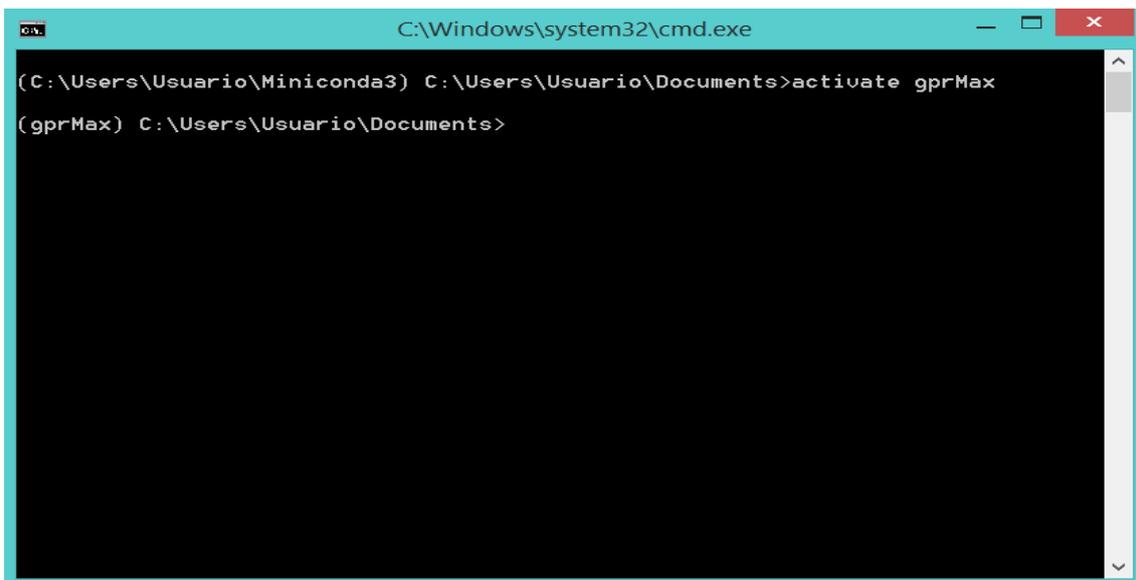
#geometry_view: 0 0 0 0.240 0.210 0.002 0.002 0.002 0.002 cylinder_half_space n

```

Figura 5.3. Imagen input file en formato ANSI. (Fuente: <http://www.gprmax.com/>)

Una vez realizado el *input file* en Bloc de Notas, el archivo se cambiará de la extensión “.txt” a “.in”, siendo este último el necesario para que lo reconozca el propio programa.

Cuando ya se tenga el archivo de entrada, se puede proceder a su ejecución. Para ello, lo primero será abrir el programa *Anaconda Prompt* y activar el software, con el comando *activate gprMax* (Figura 5.4).



```

C:\Windows\system32\cmd.exe
(C:\Users\Usuario\Miniconda3) C:\Users\Usuario\Documents>activate gprMax
(gprMax) C:\Users\Usuario\Documents>

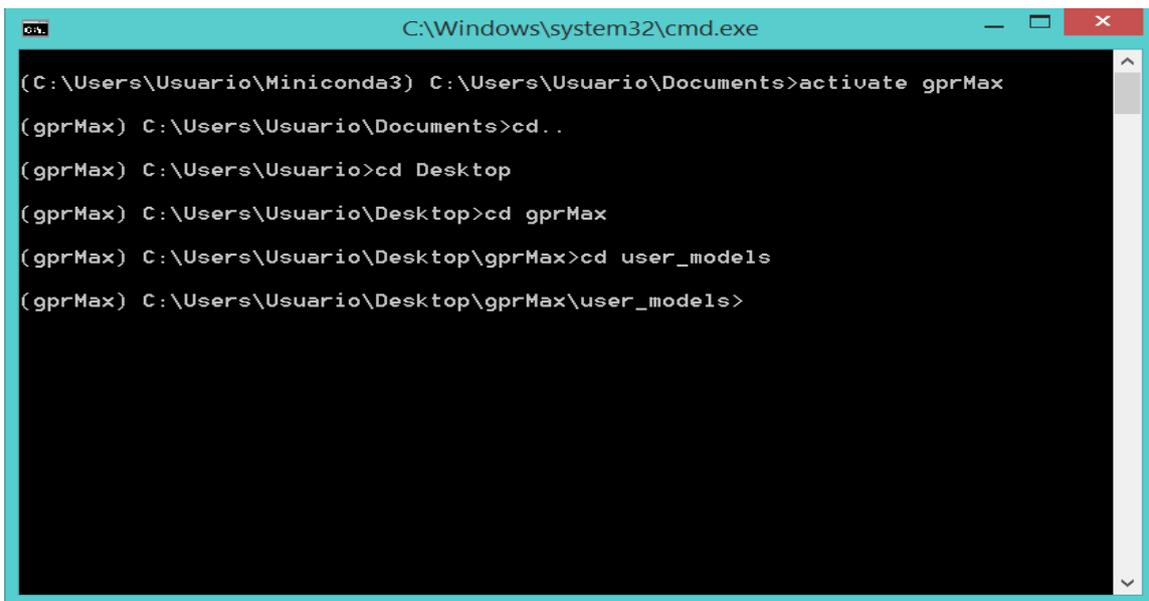
```

Figura 5.4. Imagen del programa Anaconda.

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, la carpeta se llamaba *gprMax* y se encontraba en el escritorio, dentro de la carpeta *user_models*, por lo tanto se han usado los siguientes comandos para llegar hasta el lugar de destino (Figura 5.5).

```
(gprMax) $ cd..
(gprMax) $ cd Desktop
(gprMax) $ cd gprMax
(gprMax) $ cd user_models
```



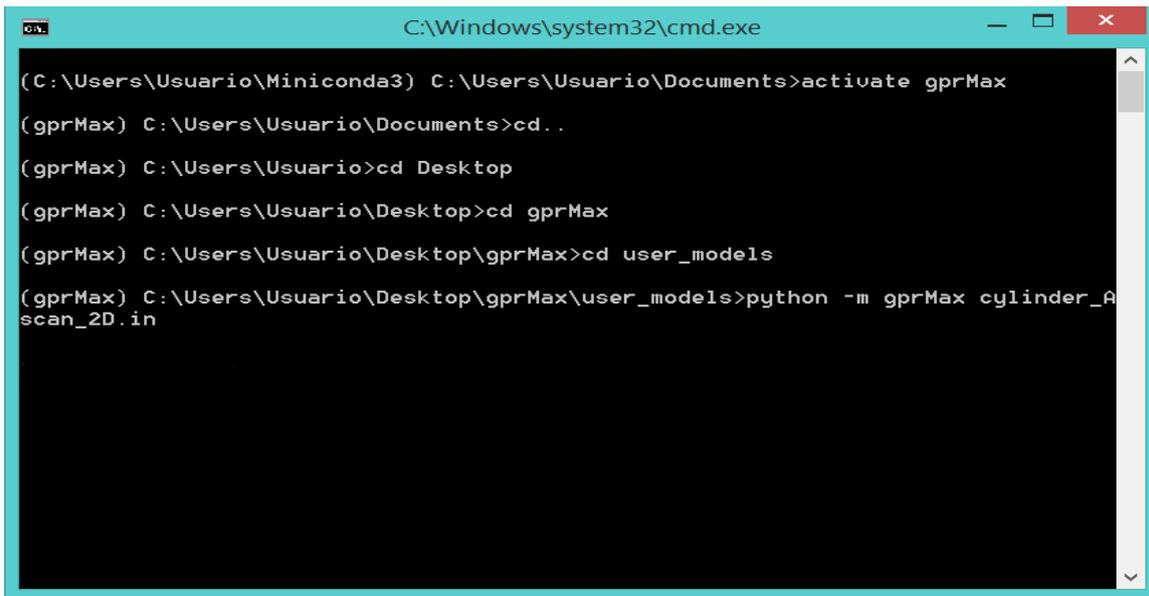
The screenshot shows a Windows command prompt window titled "C:\Windows\system32\cmd.exe". The prompt is at the location "C:\Users\Usuario\Documents". The user enters the following commands:

```
(C:\Users\Usuario\Miniconda3) C:\Users\Usuario\Documents>activate gprMax
(gprMax) C:\Users\Usuario\Documents>cd..
(gprMax) C:\Users\Usuario>cd Desktop
(gprMax) C:\Users\Usuario\Desktop>cd gprMax
(gprMax) C:\Users\Usuario\Desktop\gprMax>cd user_models
(gprMax) C:\Users\Usuario\Desktop\gprMax\user_models>
```

Figura 5.5. Visualización de la pantalla del programa Anaconda.

Una vez en la carpeta, se ejecutará en *Python* el programa *gprMax* y se realizarán las órdenes indicadas en el *input file* del ejemplo, con el comando (Figura 5.6):

```
(gprMax) $ python -m gprMax name_of_input_file
```



```
C:\Windows\system32\cmd.exe
(C:\Users\Usuario\Miniconda3) C:\Users\Usuario\Documents>activate gprMax
(gprMax) C:\Users\Usuario\Documents>cd .
(gprMax) C:\Users\Usuario>cd Desktop
(gprMax) C:\Users\Usuario\Desktop>cd gprMax
(gprMax) C:\Users\Usuario\Desktop\gprMax>cd user_models
(gprMax) C:\Users\Usuario\Desktop\gprMax\user_models>python -m gprMax cylinder_A
scan_2D.in
```

Figura 5.6. Programa Anaconda ejecutando un archivo .in

Con todo esto, le damos a *enter* y el programa hará los cálculos necesarios. Al finalizar la simulación se podrá ver que en la carpeta aparece un archivo nuevo, llamado del mismo modo que el que se acaba de ejecutar, pero con la extensión “.out”.

5.2.3. Obtención de gráficas e imágenes

Una vez se tiene todo programado, la obtención de las imágenes es un paso muy sencillo, ya que lo único que se necesita es el archivo “.out” que se ha obtenido en el paso anterior.

Este es un archivo *output*, es decir, un archivo de salida que está diseñado para almacenar y organizar grandes cantidades de datos numéricos, con un formato HDF5 ampliamente compatible.

Para introducirlo en *gprMax* no es necesario volver a hacer todos los pasos descritos en el punto anterior, ya que una vez se está en la carpeta *gprMax* la reconoce todo el tiempo, hasta que quieras que cambie, lo cual se volverá a hacer manualmente, o por otra parte hasta que se cierre el programa y se vuelva a abrir.

Por todo esto, solo habrá que ejecutar en *Python* por medio del comando *tools.plot* el archivo “.out” con el comando:

```
(gprMax) $ python -m tools.plot_Ascan name_of_output_file
```

En la Figura 5.7 se puede ver cómo quedaría el comando completo del archivo de ejemplo del cilindro que se está usando.

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
| 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: 0%| 0.00/75.6K [00:
Writing geometry view file 1/1, cylinder_half_space.vti: 100%|#| 75.6K/75.6K [00
:00<00:00, 868Kbyte/s]

Output file: C:\Users\Usuario\Desktop\gprMax\user_models\cylinder_Ascan_2D.out

Running simulation, model 1/1: 100%|#####| 637/637 [00:00<00:00, 1091.85it/s]
Memory (RAM) used: ~39.5MB
Solving time [HH:MM:SS]: 0:00:00.585058

=== Simulation completed in [HH:MM:SS]: 0:00:01.729380 =====

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

Figura 5.7. Programa Anaconda ejecutando un archivo .out

Tras ejecutar este archivo, directamente aparece otra pantalla con las gráficas resultantes dibujadas, las cuales se pueden ver en la Figura 5.8. 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.

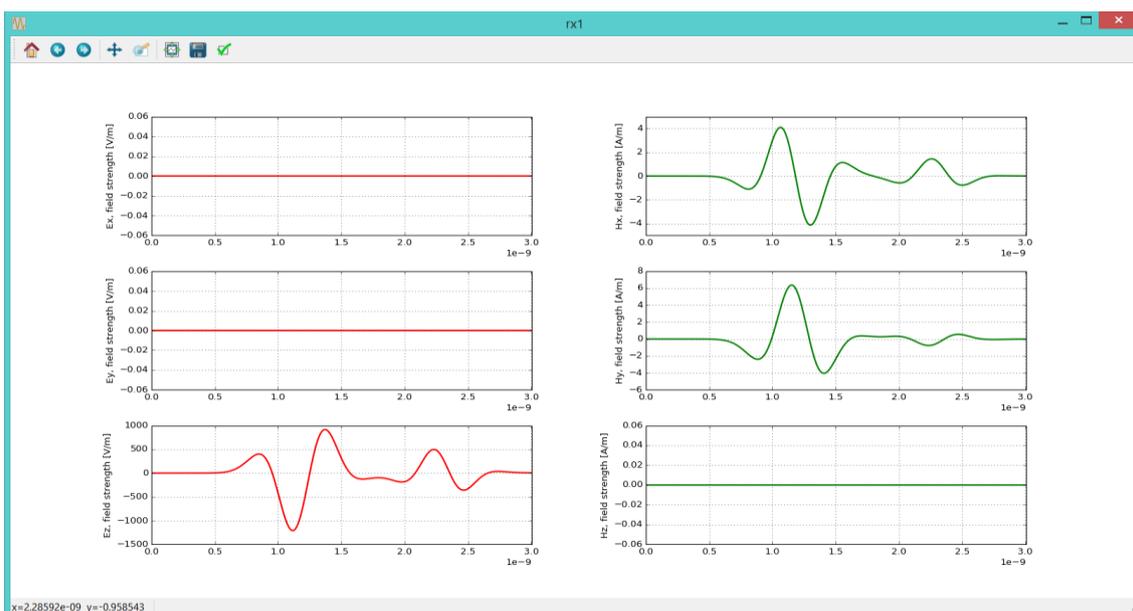


Figura 5.8. Resultado del modelado numérico de la propagación de las ondas electromagnéticas por medio del procedimiento matemático FDTD, gracias al software gprMax.

De esta forma se obtienen las imágenes de las gráficas resultantes, pero también se pueden obtener las imágenes de la forma modelada en *gprMax*. Para ello se debe usar un software libre llamado *Paraview*.

Al igual que *gprMax*, el software *Paraview* también dispone de una guía de ayuda para el uso del programa, aunque en este caso se va a usar para cosas muy básicas. *Paraview* 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. 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:

1. 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 materiales del archivo. Para su instalación habrá que ir a la barra Macros → *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.
2. A continuación se abrirá el archivo `.vti` que se desea desde el menú “Abrir archivo”.
3. 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.
4. Por último habrá que dar al botón del acceso directo *gprMax_info*, que se ha explicado en el paso 1 como instalar. Así aparecerán todos los materiales del modelo en el explorador de la izquierda (*Pipeline Browser*).

En la Figura 5.9 se puede ver una vista del programa con el ejemplo de *gprMax* de un cubo con un cilindro en medio. En rojo se han marcado los puntos importantes comentados anteriormente. Este programa permite ver las imágenes en 3 dimensiones, pero este ejemplo está realizado en 2.

Es muy importante poder generar este archivo, ya que a través de la imagen que se genera nos permite visualizar la geometría física del modelo que estamos creando.

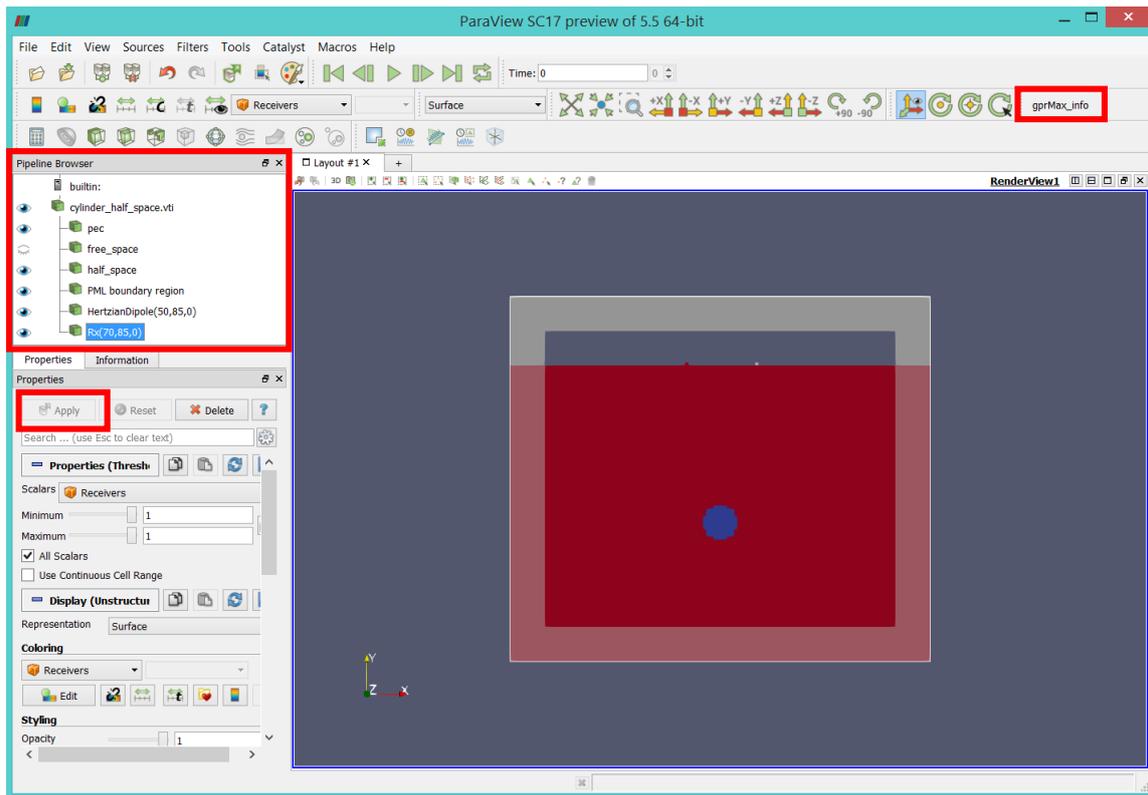


Figura 5.9. Visualización del software Paraview.

5.2.4. Obtención de datos en formato ASCII

El *gprMax* nos proporciona la información de la simulación de la propagación de las ondas electromagnéticas sólo de forma gráfica. Ahora bien, nos permite, por medio de una serie de transformaciones de ficheros, que una vez ya se dispone de las gráficas generadas por *gprMax*, se puedan convertir a Excel para así poder realizar el análisis de los resultados del modelado.

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 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.

Una vez ya instalado, se procede a abrirlo y darle a la pestaña superior izquierda, llamada “*open*”. Una vez salga la ventana de buscar el archivo deseado, habrá que ir a la carpeta donde se encuentre el archivo “.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 5.10). En nuestro caso, los archivos con los que hemos trabajado es la componente Y del campo eléctrico (E_y).

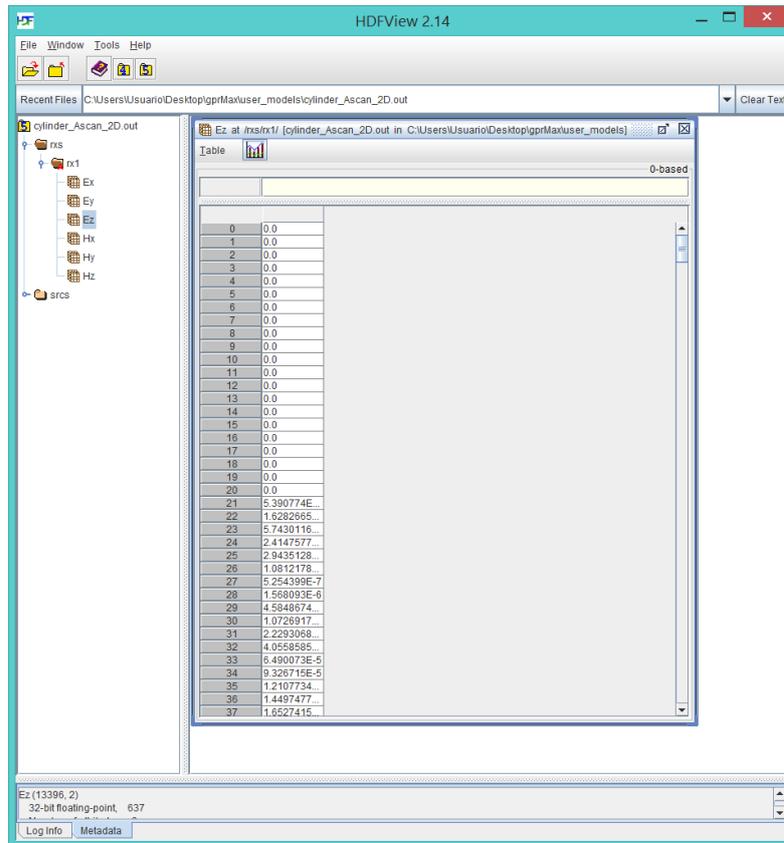


Figura 5.10. Visualización programa HDFView.

Las seis últimas pestañas, llamadas E_x , E_y , E_z , H_x , H_y y H_z 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.

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 representar todas las gráficas que se deseen comparar juntas, facilitando el trabajo de análisis de las señales modeladas. En la Figura 5.11 se puede ver a modo de ejemplo cuál sería el modelado en Excel.

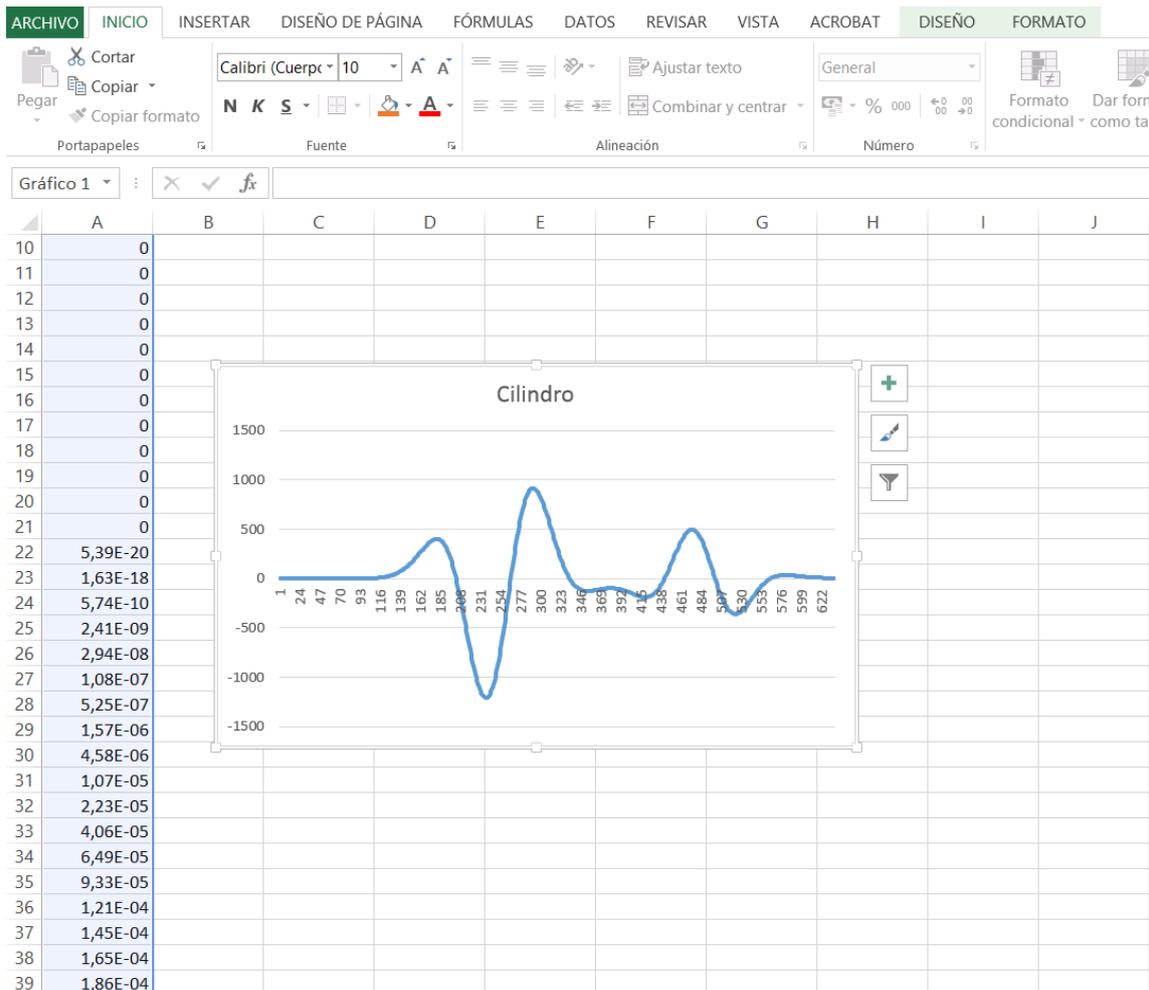


Figura 5.11. Visualización en Excel del modelado final.

5.2.5. Comandos básicos de un *input file*

Como ya se ha comentado, un *input file* es un archivo de entrada. Este es el que contiene la información necesaria para poder ejecutar el modelo en *gprMax*. Por eso lo más importante para que salgan los resultados correctos es conocer los comandos que se deben utilizar.

Muchos de los comandos que se usan en *gprMax* son opcionales, sin embargo, existen algunos que son esenciales y necesarios para poder construir y posteriormente ejecutar el modelo.

Los tipos de comandos que existen se clasifican en:

- Esenciales: son necesarios siempre.
- Generales: permiten controlar un poco más el modelo.
- Materiales: permiten introducir las características de los materiales.
- Construcción de objetos: permiten construir las formas geométricas necesarias.
- Fuente y salida: permiten introducir la antena y la señal de onda.

Sin embargo, en este estudio no se van a utilizar todos, sino que los comandos básicos y que van a estar en casi todos los archivos son:

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

```
#title: str1
```

Donde *str1* será el título correspondiente escrito.

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

```
#domain: f1 f2 f3
```

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

3. Discretización. También es uno de los comandos esenciales. Su escritura es:

```
#dx_dy_dz: f1 f2 f3
```

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

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

```
#time_window: f1
```

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

5. 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".

6. 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:

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

```
#material: f1 f2 f3 f4 str1
```

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

Sin embargo, el programa ya tiene guardados dos materiales, para los cuales no es necesario incluirlos, solamente poner su indicador.

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

Para la realización de la geometría, hay que tener en cuenta que el sistema de coordenadas establecido por el software *gprMax* es el de la Figura 5.12.

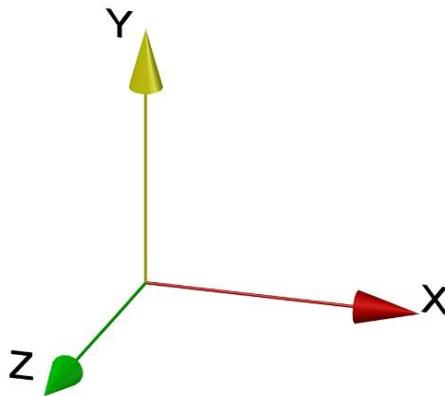


Figura 5.12. Sistema de coordenadas.

6. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Teniendo los conocimientos teóricos necesarios, como se ha visto en los capítulos anteriores, se puede proceder al desarrollo de la investigación, teniendo en cuenta que uno de los objetivos clave de este estudio era analizar el comportamiento del hormigón de diferentes composiciones y diferentes contenidos de agua.

No obstante, previamente a la modelización numérica de los casos de estudio es necesario realizar la calibración de la antena que se va a emplear para generar las señales. Esta calibración se aborda en el primer punto del programa experimental. Una vez calibrada la señal generada por la antena y comprobado cuál es su comportamiento al viajar por el aire y por el interior del hormigón, se puede proceder a modelar su comportamiento para diferentes composiciones de hormigón y para diferentes contenidos de agua. Todo ello se trabaja en el segundo apartado de este capítulo.

Por último, en el tercer apartado se realiza una comparación entre registros reales de georradar obtenidos en probetas de hormigón y los obtenidos con el modelo numérico. Esto nos permite establecer cuáles son las propiedades dieléctricas de un diseño experimental y también corroborar la validez del método desarrollado a lo largo de todo este trabajo.

6.1. Calibración de la antena de 2 GHz

El software *gprMax* cuenta con módulos en los que están pre-programados las características de emisión de algunas antenas comerciales, como por ejemplo el modelo 5100 de 1,6 GHz de la marca GSSI. Sin embargo, en este estudio se trabaja con una antena, cuyas características no están definidas en el programa. Es por ello, que el primer paso del estudio consiste en modelar el comportamiento de la antena para que sea lo más realista posible, por medio de su comparación con emisiones reales al aire de la antena.

La antena con la que se trabaja en todo el estudio es la antena de 2 GHz de frecuencia central de la marca GSSI.

6.1.1. Distancia de separación entre antena emisora y receptora

En primer lugar, se ha realizado la medición de la antena emitiendo el aire. Esta primera medición tiene el objetivo de conocer la distancia de separación entre el emisor y el receptor de la propia antena real. La antena de 2 GHz de acuerdo a la información disponible en la web de GSSI, marca comercial que las fabrica y distribuye, cuenta con unas características determinadas (<https://www.geophysical.com/antennas>), ahora bien, no proporciona una información clave como es la distancia de separación entre la antena emisora y receptora y las propiedades de los materiales que hay entre ambas.

Según se indica en la web (<https://www.geophysical.com/antennas>) la Palm Antenna 2000 MHz ofrece a los usuarios la posibilidad de llegar a zonas más estrechas de lo normal, las cuales antes eran inaccesibles, como esquinas, paredes y alrededor de obstrucciones debido a sus pequeñas dimensiones. La Palm Antenna es compatible con las unidades de control SIR 4000 y SIR 30. Sus principales especificaciones aparecen en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Especificaciones de la antena de 2 GHz (Fuente: <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

No obstante, en las especificaciones de la antena no se detalla cuál es la distancia entre la antena emisora y la receptora. Este parámetro es necesario conocerlo para realizar un correcto modelado de la señal electromagnética que se generará y es por ello que el primer paso en cualquier modelización numérica será aproximar lo más posible la señal modelada a la señal que se registra con la antena.

Para ello, previamente a este estudio, fueron realizadas pruebas reales con una antena de 2 GHz y por medio de la comparación entre las señales reales y las modelas se obtendrá cuál es la distancia de separación.

Dadas las dimensiones de la antena, el emisor y el receptor estarán separados en el entorno entre los 4 y los 5,5 cm. Es por ello que se ha programado, de la forma ya explicada en el capítulo anterior, una *box* en la que el material es aire (*free_space*). Se genera una señal para cada distancia de separación, aumentando la distancia entre emisor y receptor 0,25 cm. Para ello, los datos que irán variando en el código de programación será la coordenada X, que está marcado en rojo en la Figura 6.2.

El modelo resultante del software *Paraview* se puede ver en la Figura 6.1.

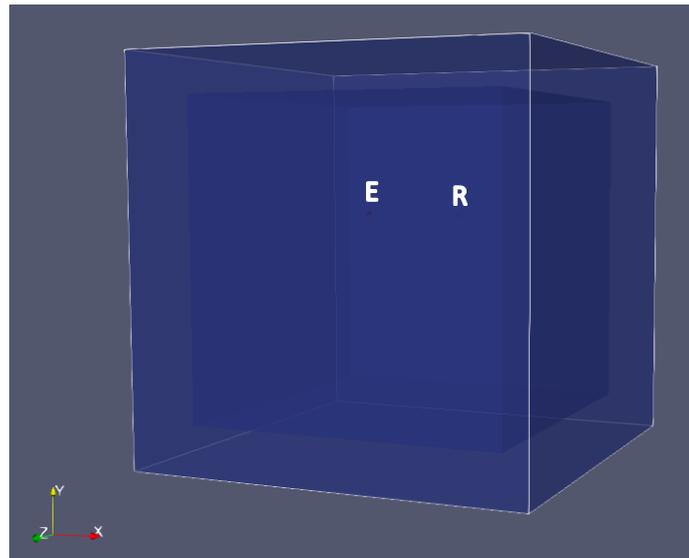


Figura 6.1. Imagen del modelo de emisión al aire visualizado en Paraview.

En este caso lo importante no es la medida de la *box* de aire (*free_space*) ya que en realidad como las ondas no se van a reflejar va a actuar como un subespacio infinito. Sin embargo el programa no reconoce esto y se debe dar unas dimensiones para que el estudio sea correcto, es decir, necesitamos siempre establecer unos límites físicos de hasta dónde se ha de realizar el cálculo matemático.

En esta primera prueba los pasos importantes son los de la antena. Para eso, se van a añadir al modelo los comandos necesarios sobre la misma. Estos son:

- `#waveform: ricker 1 2e9 youmi_ricker`

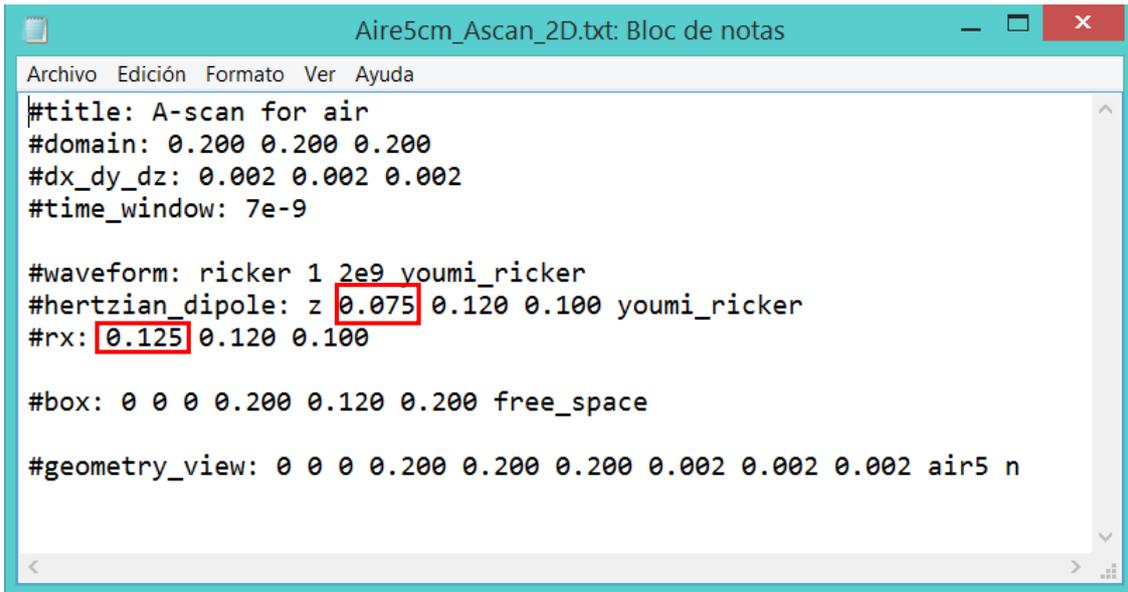
Este comando especifica la forma de la onda que se va a utilizar en el modelo, donde *ricker* es un tipo de onda, el mismo que el de la antena real. Por otra parte, el *1* indica la escala de la máxima amplitud de onda y el *2e9* la frecuencia de la onda, es decir, que la antena es de 2 GHz. Por último, *youmi_ricker* es un identificativo para esta antena.

- `#hertzian_dipole: z 0.075 0.120 0.100 youmi_ricker`

Este comando indica la posición del emisor de la antena. El primer valor indica la polarización. Los valores numéricos son las coordenadas (*X, Y, Z*) del emisor. El último es el mismo identificativo, para saber que en todos los comandos se está haciendo referencia a la misma antena.

- `#rx: 0.125 0.120 0.100`

Este comando permite introducir los valores del receptor. Los tres valores existentes son las coordenadas (*X, Y, Z*) de dicho receptor. En este caso el identificativo es opcional. Finalmente, en la Figura 6.2 se presenta un ejemplo del código generado para una distancia de separación entre emisor y receptor de 5 cm.



```

Archivo Edición Formato Ver Ayuda
#title: A-scan for air
#domain: 0.200 0.200 0.200
#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 7e-9

#waveform: ricker 1 2e9 youmi_ricker
#hertzian_dipole: z 0.075 0.120 0.100 youmi_ricker
#rx: 0.125 0.120 0.100

#box: 0 0 0 0.200 0.120 0.200 free_space

#geometry_view: 0 0 0 0.200 0.200 0.200 0.002 0.002 0.002 air5 n

```

Figura 6.2. Programación de la antena de 2 GHz emitiendo al aire.

Como se ve en la Figura 6.2 se ha diseñado un tamaño de dominio y de ventana suficientemente grande para que se pueda registrar en espacio y tiempo la propagación entre el emisor y el receptor. Además, se ha tomado el tamaño de discretización lo suficientemente pequeño como para tener una precisión adecuada en la resolución matemática del problema, pero que no implique un tiempo de procesado excesivamente elevado. Estos criterios se han aplicado en el desarrollo de este código y en todos los que a continuación se detallan.

Finalmente, por la comparación entre las señales generadas numéricamente y la registrada de forma experimental se establecerá cuál es la distancia de separación real entre la antena emisora y receptora.

6.1.2. Modelado de reflexiones de la propagación de las ondas

El siguiente paso es comprobar que las señales modeladas al viajar por el aire, en caso de encontrar un medio con diferentes propiedades dieléctricas, tras programar el código necesario, éste es capaz de registrar correctamente la reflexión que se debe producir. Para ello, se ha elegido colocar un reflector metálico de 1 cm de grosor a cierta distancia (Figura 6.3). Como ya se habrá obtenido en el punto anterior la distancia de separación entre el emisor y el receptor de la antena, esta distancia será un dato fijo de aquí en adelante.

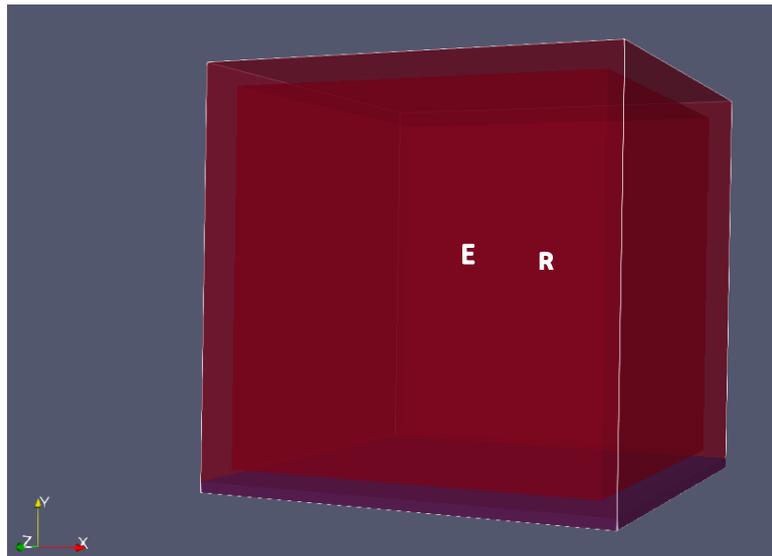


Figura 6.3. Imagen del modelo con emisión al aire y reflexión en metal en Paraview.

Además, también en este apartado se quiere comprobar cuál es la distancia mínima a la que se puede colocar el reflector para poder identificar por separado la onda directa entre emisor y receptor y la onda reflejada en el reflector metálico. Para ello se ha colocado el reflector metálico a cierta distancia y se ha generado una señal (Figura 6.4), posteriormente se ha ido acercando el reflector y modelando la señal sucesivamente.

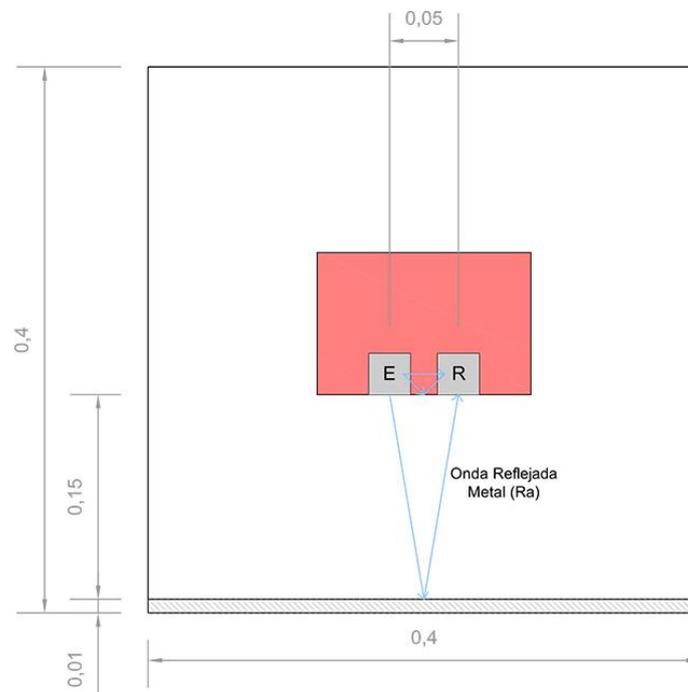
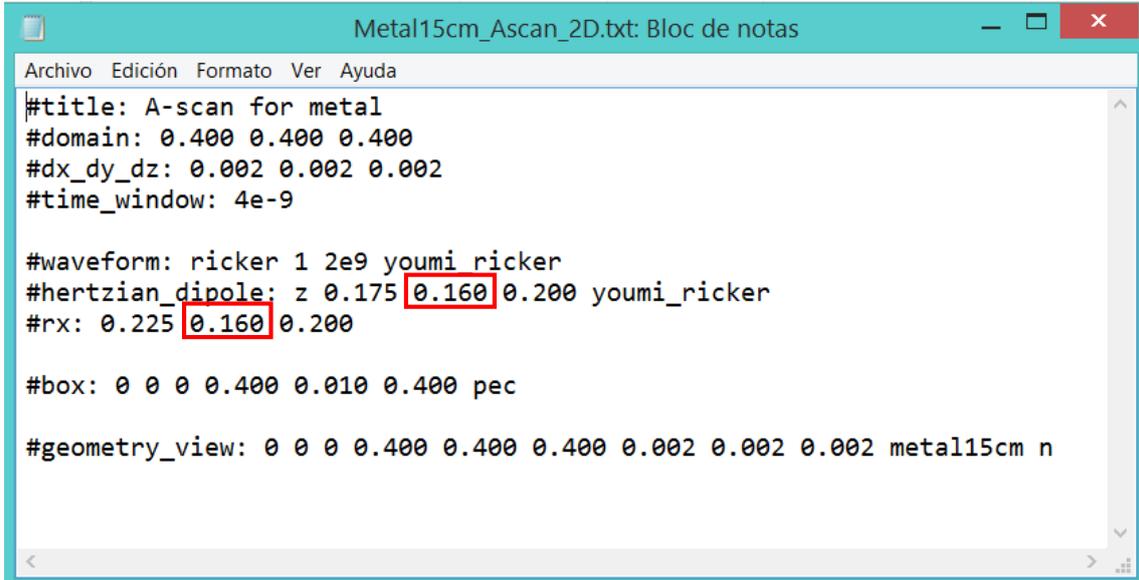


Figura 6.4. Dimensiones del modelo en metros y esquema de trayectoria de propagación de ondas.

Para poder modelar las señales, será necesario añadir el siguiente comando: `#box 0 0 0 0.40 0.01 0.40 pec` en el código y el dato que se debe cambiar a la hora de programar es el del eje Y, encuadrado en rojo en la Figura 6.5.



```

Metal15cm_Ascan_2D.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
#title: A-scan for metal
#domain: 0.400 0.400 0.400
#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 4e-9

#waveform: ricker 1 2e9 youmi ricker
#hertzian_dipole: z 0.175 0.160 0.200 youmi_ricker
#rx: 0.225 0.160 0.200

#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 metal15cm n

```

Figura 6.5. Programación de la antena 2 GHz emitiendo al aire y reflejándose en un reflector de metal.

6.1.3. Modelado de la propagación de las ondas en el hormigón

Para acabar con esta parte relacionada con la calibración de las señales modeladas, se estudiará la propagación de las ondas de la antena de 2 GHz sobre un bloque de hormigón de 40 x 12 x 40 cm, cuyas características dieléctricas genéricas que son permitividad 9 y conductividad 0.

Para ello será necesario añadir en el código el comando: `#material: 9 0 1 0 concrete` para poder definir dichas características del material, así como el comando `#box: 0 0.010 0 0.400 0.130 0.400 concrete` para colocar el bloque de hormigón sobre el que se va a hacer el estudio (Figura 6.6).

Debajo de este se colocará un reflector metálico por medio del comando `#box 0 0 0 0.40 0.01 0.40 pec`, igual que en el estudio anterior, para poder comprobar la reflexión también sobre este material.

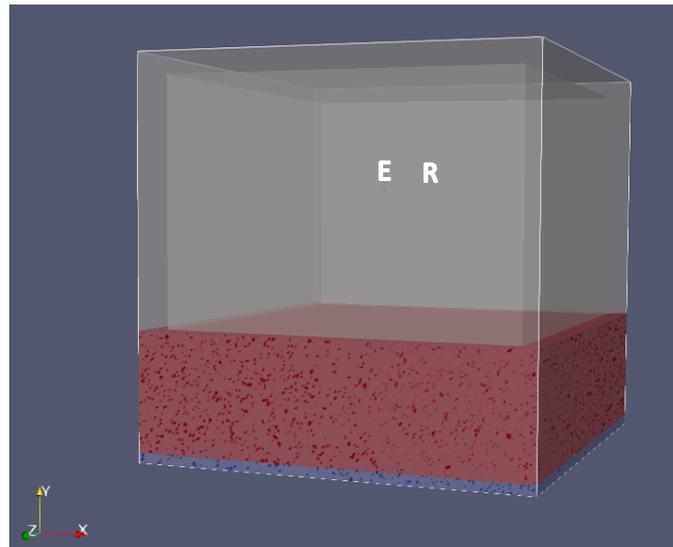


Figura 6.6. Imagen del modelo con emisión a hormigón-metal a cierta distancia de separación en Paraview.

Para ello, primero se colocará la antena pegada al bloque de hormigón, y se generará el modelo numérico. Una vez hecho esto, se irá separando la antena con un intervalo de 2 cm hasta que esté separada 20 cm de la parte más alta del bloque y para cada distancia de separación se creará su correspondiente modelado numérico.

En este caso, las dimensiones sí son importantes, sobre todo en el eje Y (altura del bloque de hormigón), ya que nos va a definir que las ondas resultantes sean de una forma u otra y cómo se produce el solape entre la onda entre emisor y receptor y la reflejada en el hormigón y en el reflector metálico (Figura 6.7).

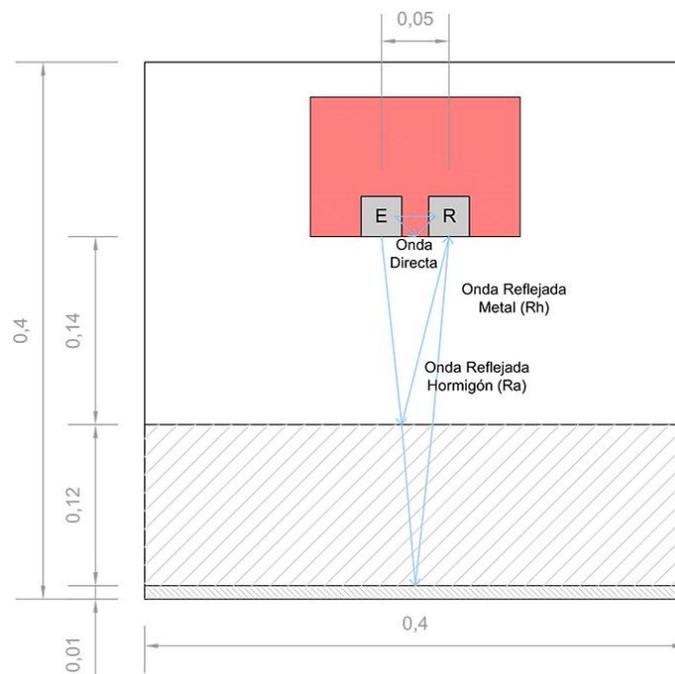
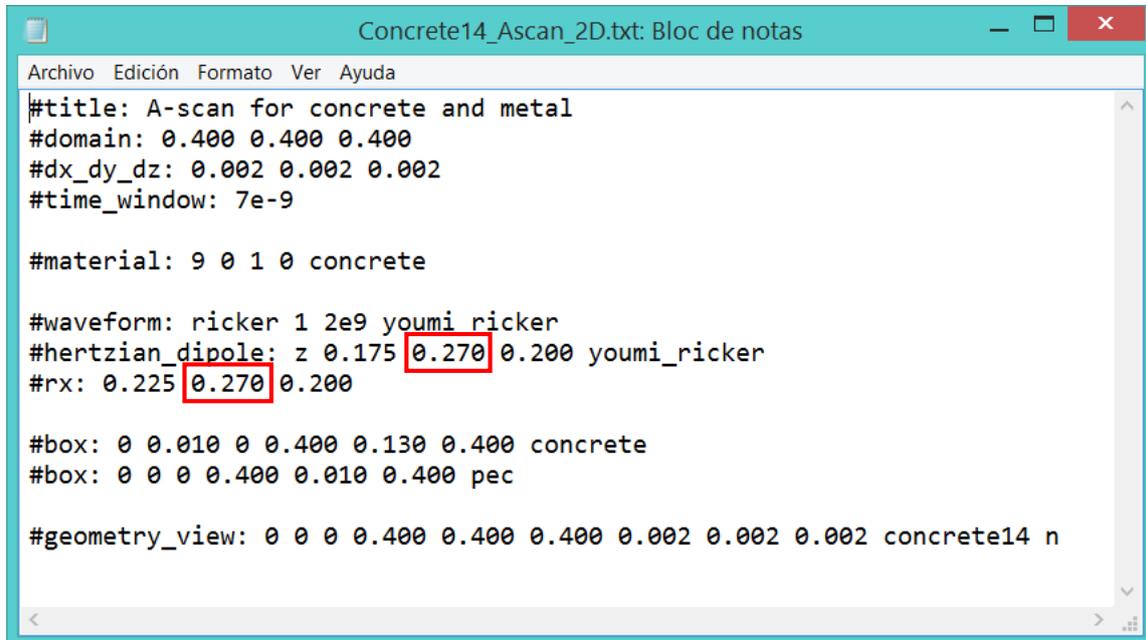


Figura 6.7. Dimensiones del modelo en metros y esquema de propagación de ondas al emitir a cierta distancia del bloque de hormigón.

Para el desarrollo de este modelado, los datos que se cambian son también los del eje Y, marcados en rojo en la Figura 6.8, que serán la altura del bloque de hormigón, 12 cm, más en cada caso la distancia de separación entre la antena y el bloque.



```

Concrete14_Ascan_2D.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
#title: A-scan for concrete and metal
#domain: 0.400 0.400 0.400
#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 7e-9

#material: 9 0 1 0 concrete

#waveform: ricker 1 2e9 youmi ricker
#hertzian_dipole: z 0.175 0.270 0.200 youmi_ricker
#rx: 0.225 0.270 0.200

#box: 0 0.010 0 0.400 0.130 0.400 concrete
#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 concrete14 n

```

Figura 6.8. Programación de la antena de 2 GHz emitiendo a cierta distancia de un bloque de hormigón.

En el ejemplo anterior, la antena se encuentra separada del reflector de hormigón 14 cm. Es por ello que la distancia en el eje Y son 0,27 m, donde 1 cm es del reflector metálico, 12 cm del reflector de hormigón y 14 cm la separación de la antena.

6.2. Efecto de las propiedades del hormigón en las señales de georradar

Como se ha visto en el apartado 4.1 del capítulo 2, la permitividad dieléctrica relativa del hormigón variará dependiendo de diversos factores. En este trabajo se ha diseñado un programa experimental que, en primer lugar, permita establecer como varía la propagación de las ondas electromagnéticas en el hormigón cuando su composición es diferente a una frecuencia de estudio determinada. La frecuencia de estudio es la de la antena comercial de 2 GHz, ya que esta antena es la que la empresa GSSI ha diseñado para emplearla en los estudios del hormigón.

Para ello, se ha tenido en cuenta que el hormigón está completamente seco y por tanto la permitividad relativa de la fase sólida sólo tiene una componente real tal y como describe Laurens et al. (2005). De esta forma se ha estudiado la variación que se produce en un rango de variaciones de la permitividad dieléctrica, en los que además el factor de pérdidas es nulo como consecuencia de que no hay presencia de fase líquida, es decir, la conductividad eléctrica es nula.

En segundo lugar, se ha diseñado un programa experimental que permita establecer qué efecto tiene la presencia de fase líquida en el hormigón, es decir, la presencia de agua. Pero en ese caso la permitividad dieléctrica es un valor complejo y se deberá tener en cuenta su componente real y la imaginaria.

Ahora bien, la permitividad dieléctrica relativa y la conductividad eléctrica definidas en el apartado 2.2 se han definido desde un punto de vista teórico, para poder separar los diferentes fenómenos eléctricos que ocurren. Sin embargo, en el rango de estudio la propagación de las ondas electromagnéticas está afectada por los dos parámetros y no es posible diferenciar sus efectos sobre las ondas. Es por ello que Laurens et al. (2005) definen el parámetro permitividad efectiva (ε_e), parámetro que tiene en cuenta ambos términos:

$$\varepsilon_e = \varepsilon'_e - i\varepsilon''_e = \varepsilon + \frac{\sigma}{i\omega} \quad \text{ec. 6.1}$$

donde ω es la frecuencia angular y i es el número complejo imaginario. Como consecuencia de la ec. 6.1, para cada composición de hormigón dada, si variamos los valores de conductividad, como consecuencia de presencia de fases líquidas, se podrá evaluar el efecto que tiene la presencia de agua en la propagación de las ondas electromagnéticas en el hormigón.

6.2.1. Composición del hormigón

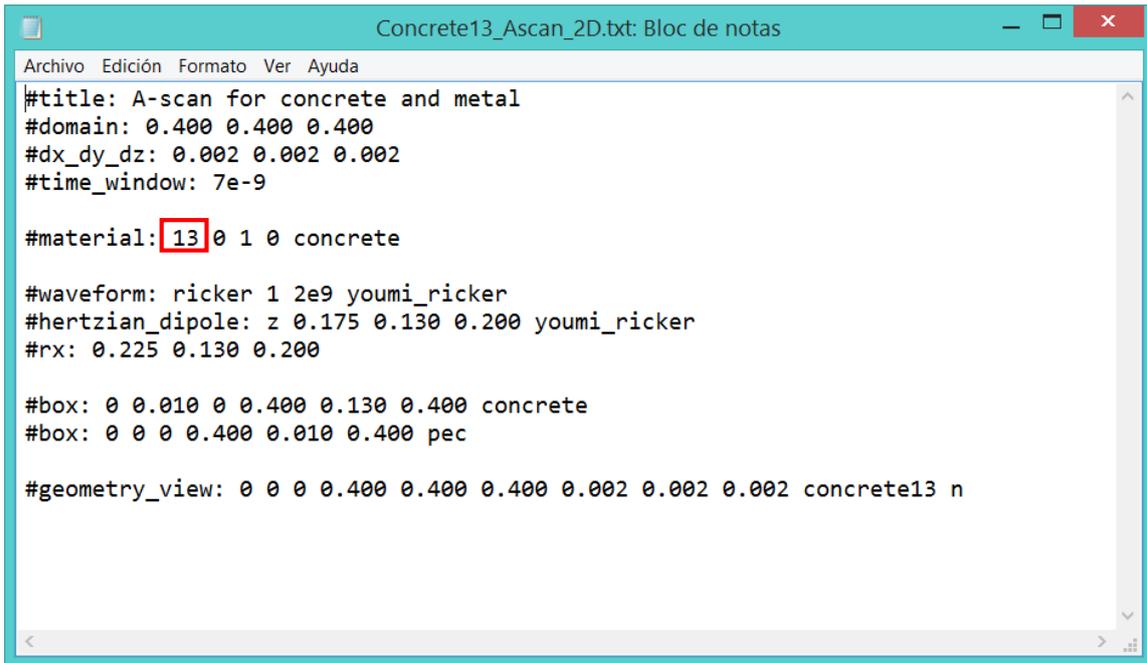
Para analizar el efecto que producen las diferencias en la composición del hormigón se ha diseñado un experimento que permitirá analizar la variación que se produce en la propagación de ondas electromagnéticas en un amplio rango de permitividades dieléctricas reales, que cubran un amplio espectro de posibilidades de composición del hormigón: permitividad dieléctrica de 4 a 15.

Atendiendo a todo ello, se ha diseñado un experimento que nos permita analizar cuál es el efecto que tiene la variación de la permitividad dieléctrica en las señales. Para este caso se ha programado el archivo *input* necesario que cumpliera con los siguientes requisitos:

1. El dominio será de 40 x 40 x 40 cm (*#domain: 0.400 0.400 0.400*).
2. La discretización de 0,002 (*#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002*).
3. El tiempo de propagación programado será de 7 ns (*#time_window: 7e-9*).
4. El material será la parte más importante y la que se cambiará en cada una de las partes del estudio. Como se ha visto en el apartado 5.2.5, el primero de los números de la programación es la permitividad. Este es el dato que se cambiará, variando entre 4 y 15 (*#material: X 0 1 0 concrete*).
5. La antena será la misma que para todo el resto del estudio, es decir, una antena de 2 GHz programada propiamente (*#waveform: ricker 1 2e9 youmi_ricker*).
6. La distancia entre emisor y receptor de la antena será 5 cm, como se calculó en el apartado 6.1.1 (*#hertzian_dipole: z 0.175 0.130 0.200 youmi_ricker y #rx: 0.225 0.130 0.200*).
7. El bloque de hormigón será de dimensiones 40 x 12 x 40 cm (*#box: 0 0.010 0 0.400 0.130 0.400 concrete*) y el reflector metálico de dimensiones 40 x 1 x 40 cm (*#box: 0 0 0 0.400 0.010 0.400 pec*).

Una vez establecidas las principales características del experimento, se modelará la respuesta electromagnética al viajar las ondas por el interior del material por medio del *gprMax* para los distintos casos de permitividad dieléctrica, que variará entre 4 y 15. Se ha generado un modelo de respuesta cada 1 punto de variación de la permitividad (Figura 6.9).

En este caso, no se hace ninguna variación de la antena, sino que en todos los casos se va a estudiar con el georradar pegado al bloque de hormigón, es decir, siendo la distancia 0. Además, también se deja el reflector de metal bajo el de hormigón, con lo que llegará una señal cuando refleje sobre él. Es por ello que la antena se sitúa a 13 cm en el eje Y, 1 cm del reflector metálico y 12 cm del hormigón.



```

Concrete13_Ascan_2D.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
#title: A-scan for concrete and metal
#domain: 0.400 0.400 0.400
#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 7e-9

#material: 13 0 1 0 concrete

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

#box: 0 0.010 0 0.400 0.130 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 concrete13 n

```

Figura 6.9. Programación del modelado para evaluar la diferencia de propagación en hormigón de diferentes composiciones.

6.2.2. Contenido de agua

Para poder analizar el efecto que tiene la presencia de agua en el hormigón es necesario tener en cuenta que ésta afectará a la conductividad eléctrica. Como se ha visto en el apartado 4.2 del capítulo 2, la resistividad puede variar de $10^4 \Omega \cdot m$ a $10^9 \Omega \cdot m$ dependiendo de cómo se ha realizado el curado (al aire o al horno). O bien, para una frecuencia de estudio de 1,5 GHz, ésta varía desde $10^4 \Omega \cdot m$ en el hormigón seco hasta $10^1 \Omega \cdot m$ en el hormigón saturado.

Por todo ello, en el diseño experimental realizado se analiza la variación en el rango de permitividades típico del hormigón según Laurens et al. (2002), cual es el efecto en las señales de georradar la variación de la conductividad considerando todos los casos posibles, es decir, de $10^{-1} S/m$ hasta $10^{-9} S/m$.

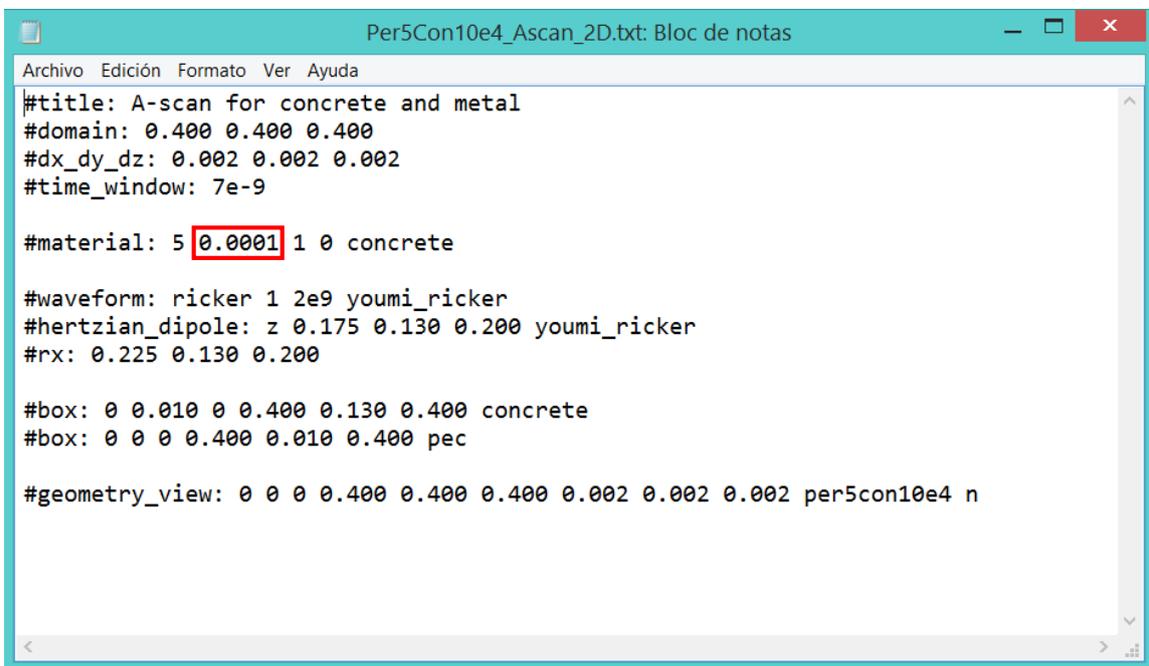
Para ello, la programación necesaria en el archivo *input* será la siguiente:

1. El dominio será de 40 x 40 x 40 cm (*#domain: 0.400 0.400 0.400*).
2. La discretización de 0,002 (*#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002*).
3. El tiempo de propagación programado será de 7 ns (*#time_window: 7e-9*).
4. Al igual que en el apartado anterior, el material será la parte que más importe y la que se cambiará en cada una de las partes del estudio. Como se ha visto en el apartado 5.2.5, el segundo de los números de la programación es la conductividad. Este es el dato que se cambiará, variando entre 10^{-1} y 10^{-9} S/m. Estos datos se van a comprobar para la permitividad entre 4,5 y 8,5 (cada 0,5 puntos) (*#material: P X 1 0 concrete*).

5. La antena será la misma que para todo el resto del estudio, es decir, una antena de 2 GHz programada propiamente (`#waveform: ricker 1 2e9 youmi_ricker`).
6. La distancia entre emisor y receptor de la antena será 5 cm, como se calculó en el apartado 6.1.1 (`#hertzian_dipole: z 0.175 0.130 0.200 youmi_ricker` y `#rx: 0.225 0.130 0.200`).
7. El bloque de hormigón será de dimensiones 40 x 12 x 40 cm (`#box: 0 0.010 0 0.400 0.130 0.400 concrete`) y el reflector metálico de dimensiones 40 x 1 x 40 cm (`#box: 0 0 0 0.400 0.010 0.400 pec`).

Con todas las características determinadas, se procederá a modelar la respuesta electromagnética para esta parte del experimento. En este caso la onda se ha programado en *gprMax* para que vaya por el hormigón con diferentes conductividades, que irán desde los 10^{-1} a los 10^{-9} S/m. Además, se han calculado todos los casos para permitividades entre los 4,5 y 8,5 (con la variación de medio punto). Esto ha dado lugar a 81 resultados de modelado numérico de la propagación de las ondas electromagnéticas en hormigón. En la Figura 6.10 se puede ver un ejemplo de una de dichas programaciones.

Con respecto a la antena, al igual que en el apartado 6.2.1 no se hace ninguna variación, también se dejará pegada al bloque de hormigón (distancia 0) por lo que volverá a estar a 13 cm en el eje Y.



```

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

#material: 5 0.0001 1 0 concrete

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

#box: 0 0.010 0 0.400 0.130 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 per5con10e4 n

```

Figura 6.10. Programación del modelado para evaluar el efecto de la variación del contenido de agua.

6.3. Descripción del estudio experimental de registros de georradar

Con objeto de poder comparar los modelos numéricos que se han generado y establecer la bondad del método desarrollado, las señales se van a comparar con registros reales de georradar adquiridos con una antena de 2 GHz de la marca GSSI.

6.3.1. Fabricación de las probetas

Los modelos numéricos se van a comparar con mediciones reales realizadas con anterioridad en un programa experimental desarrollado por el grupo de investigación en el marco del proyecto de la investigación “Análisis de la durabilidad del hormigón por medio de la técnica no destructiva del georradar”, dentro de la convocatoria de Primeros Proyectos de Investigación PAID-06-12.

El primer paso para la realización del estudio fue la fabricación de probetas de hormigón en masa, de dimensiones 200 x 200 x 120 mm (ancho, largo y alto). Para su fabricación se utilizó cemento CEM I 42,5 R/SR y una relación agua-cemento de 0,65.

La antena que se empleó para la toma de datos fue de 2 GHz con un tamaño físico de 90 x 90 mm, colocándola en el centro de la probeta y por lo tanto el cono de radiación quedaba dentro de la probeta.

Para la fabricación de las probetas se llevó a cabo con una previa construcción de moldes específicos del tamaño requerido, con paneles de madera unidos mediante tornillería y acabado interior de melanina, lo que significa que 5 de las 6 caras de la probeta tenían un acabado liso. Los pasos para el proceso de elaboración de las probetas es:

- Preparación y llenado de los moldes.
- Compactado del hormigón.
- Nivelación del hormigón.
- Curado del hormigón.

Para todo esto se tuvo en cuenta la norma UNE-EN 12390-2 (2009) (Figura 6.11) y para más detalles sobre el proceso de fabricación y curado se puede consultar Fernández-Castilla (2015).



Figura 6.11. Curado del hormigón.

Tras la fabricación de las probetas, éstas se cubrieron con un film de plástico, lo que evitaba la evaporación de agua. Pasados dos días, se desmoldaron e introdujeron en una cámara de curado húmedo durante 28 días, con el objetivo de estabilizar la hidratación, según normativa para ensayos de resistencia UNE-EN 12390-2 (2009).

Para la realización de las pruebas de adquisición, las probetas tuvieron que pasar previamente por un proceso de secado, introduciéndolas en un horno a 105°C, como se puede ver en la Figura 6.12. Para que su secado fuera correcto, se comprobó la masa regularmente, hasta que la pérdida de la misma fue menor al 0,1%, lo que determinó que estaban completamente secas.



Figura 6.12. Horno de secado del Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Técnica Superior en Ingeniería de Edificación.

6.3.2. Adquisición de registros con georradar

Para la adquisición de los registros, el equipo empleado fue de la marca *Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI)*, en concreto el modelo SIR-3000. Dicho equipo tiene una memoria interna de 256 Mb para el almacenamiento de información, teniendo

la posibilidad de introducir una tarjeta CF de hasta un 1Gb, un procesador de 32 bits Intel StrongArm RISC a 206 MHz, pantalla de 8,4 pulgadas y TFT de resolución 800 x 600 a color con 64000 colores. La antena empleada para realizar la adquisición de registros fue una antena de 2 GHz de frecuencia central, correspondiente con la ya citada en el capítulo 6.1.1.

En el momento en el que se realizó el estudio el equipo era del Laboratorio de Diagnóstico Estructural del Instituto Tecnológico de la Construcción (AIDICO). Este equipo se puede ver en la Figura 6.13.



Figura 6.13. Equipo de georadar modelo SIR-3000 y antena de 2 GHz montada con odómetro de GSSI.

Lo primero que hay que hacer para la toma de datos de georadar es montar el equipo de georadar. Con el fin de normalizar las amplitudes de los registros posteriores, fue necesario situar la antena primero emitiendo al aire.

Después, se tuvo que preparar el dispositivo para la toma de mediciones con el georadar. En primer lugar, se tuvo que preparar una base plana y estable, en la que se colocó un tablero de madera con acabado de melamina y sobre este una capa de papel de aluminio, para que la reflexión sea lo mayor posible. Esto se puede ver en la Figura 6.14.



Figura 6.14. Dispositivo de la adquisición de registros de georadar.

7. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Una vez obtenido por medio del programa *gprMax* las modelizaciones numéricas sobre los distintos casos de estudio propuestos, posteriormente se ha realizado la transformación de formato de archivos necesaria por medio de *HDFview* para poder trabajar con Excel y con ello interpretar los resultados obtenidos.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los casos de estudio diseñados en el programa experimental (véase capítulo 6), junto con la interpretación de los mismos.

7.1. Efecto de los parámetros electromagnéticos en la propagación de las ondas de georradar

A continuación, en la Figura 7.1 se presenta la traza modelada registrada cuando se realiza una medición colocando la antena sobre la probeta de hormigón seca por medio de una antena de 2 GHz.

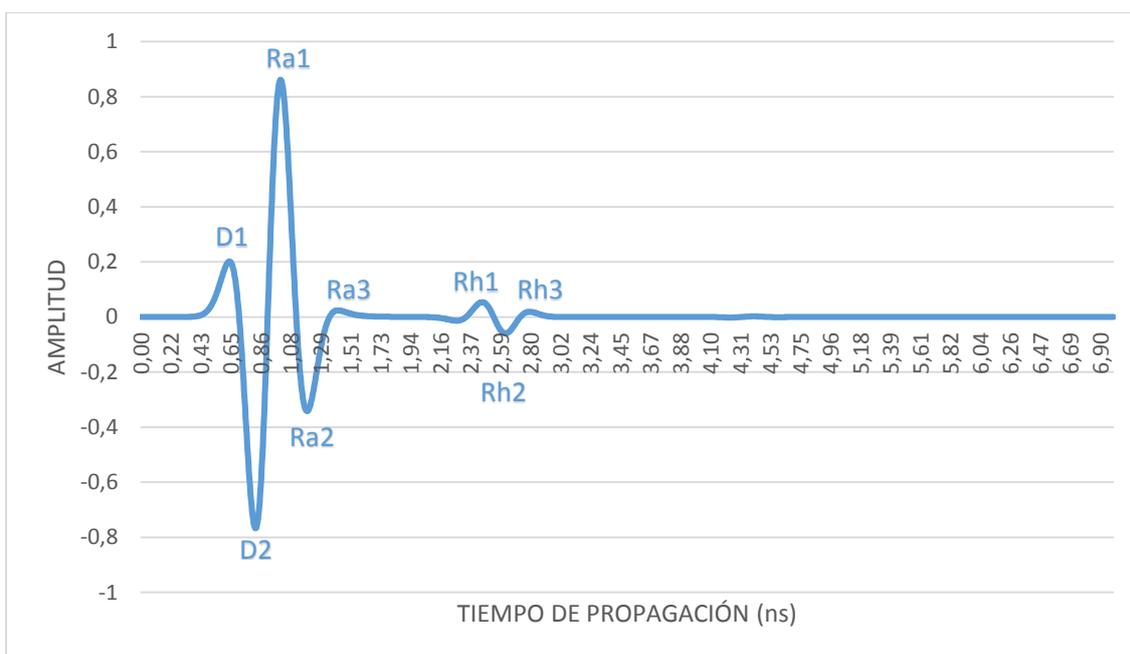


Figura 7.1. Modelado numérico de la respuesta electromagnética de emisión al hormigón con una antena de 2 GHz.

Todas las trazas registradas siguen un mismo patrón, en el que se pueden identificar las siguientes señales: la onda directa más la del aire y la onda reflejada.

La onda directa se propaga por el aire entre el emisor y el receptor. La onda del aire es la emitida por la antena que se refleja directamente sobre la superficie de la probeta, recibiendo esta reflexión junto con la directa debido al corto trayecto que ha

de recorrer. La última onda, llamada onda reflejada, 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 7.2.

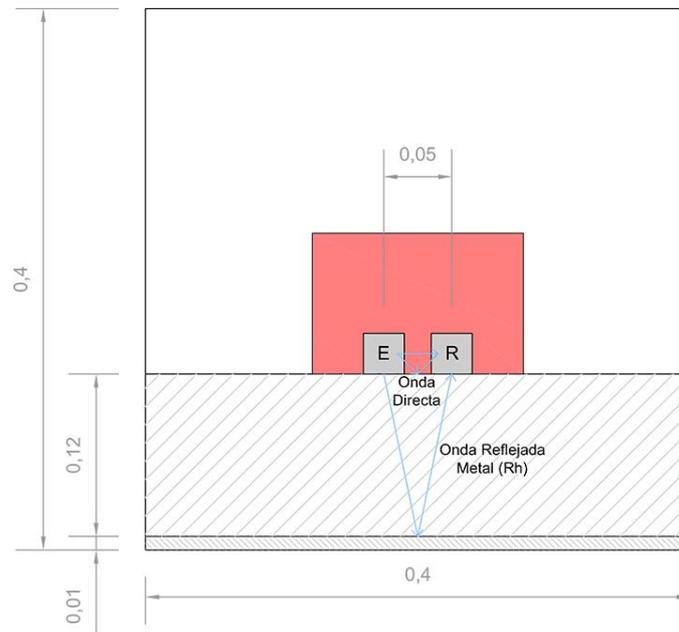


Figura 7.2. Esquema de las ondas directa y reflejada en el hormigón y en el reflector metálico.

Una vez identificada la onda directa y la reflejada en las trazas, se pueden identificar los puntos característicos de la cada una de las reflexiones. Se denominó $D1$ y $D2$ a los máximos que componen la onda directa. $Ra1$, $Ra2$ y $Ra3$ son los máximos de la reflexión como consecuencia del cambio de propiedades dieléctricas entre el aire y el hormigón. Por último, está la onda que viaja por el interior del hormigón y se refleja como consecuencia del cambio de propiedades del entre el hormigón y el metal y sus máximos son $Rh1$, $Rh2$ y $Rh3$.

Sin embargo, como tienen registrado algunos autores como Martínez-Sala et al. (2012a), es complicado establecer cuál de los máximos y mínimos que componen una onda es el que se debe elegir como representativo del tiempo de llegada inicial de la onda, y hay diversos criterios que se pueden establecer.

Es por ello que, teniendo todos los máximos, se pueden calcular todos los intervalos de tiempo posibles entre ellos, y así calcular la velocidad de propagación de las ondas para cada uno de estos intervalos, mediante la expresión:

$$v = \frac{2 \cdot d}{\Delta t} \quad \text{ec 7.1}$$

donde d es la semidistancia que recorre la onda reflejada y t el tiempo que tarda en recorrer dicho espacio.

Además, por medio del cálculo de la Transformada de Fourier se puede calcular el espectro de frecuencias, es decir, pasar de la ecuación de onda generada en el dominio del tiempo a obtener la ecuación de onda en el dominio de las frecuencias. Para ello se ha trabajado con el módulo de Excel “Análisis de Datos” y la función “Análisis de Fourier”. Para cada uno de los modelos numéricos se calcula el espectro correspondiente y se analizan los resultados.

7.2. Calibración de la antena de 2 GHz

7.2.1. Distancia de separación entre antena emisora y receptora

Resultados

En primer lugar, se ha procedido a la comparación entre la señal real de la emisión en el aire y las que se han modelado por medio de *gprMax*. Dado el gran volumen de datos con los que se trabajó, todas las señales modeladas numéricamente, así como las tablas resultantes de su análisis completas se adjuntan en el Anexo 3. Calibración de la antena.

En la Figura 7.3 se puede ver la señal correspondiente a la emisión de la antena directamente en el aire obtenida de forma experimental con una antena de 2 GHz de la marca comercial GSSI. Se puede observar que está formada por tres máximos (*D1*, *D2* y *D3*). Estos máximos corresponden con la onda directa, es decir, la señal que emite el emisor y recibe el receptor al recorrer la distancia más corta entre ambos que transcurre por el interior de la antena. De aquí en adelante a esta primera señal se le ha denominado onda directa.

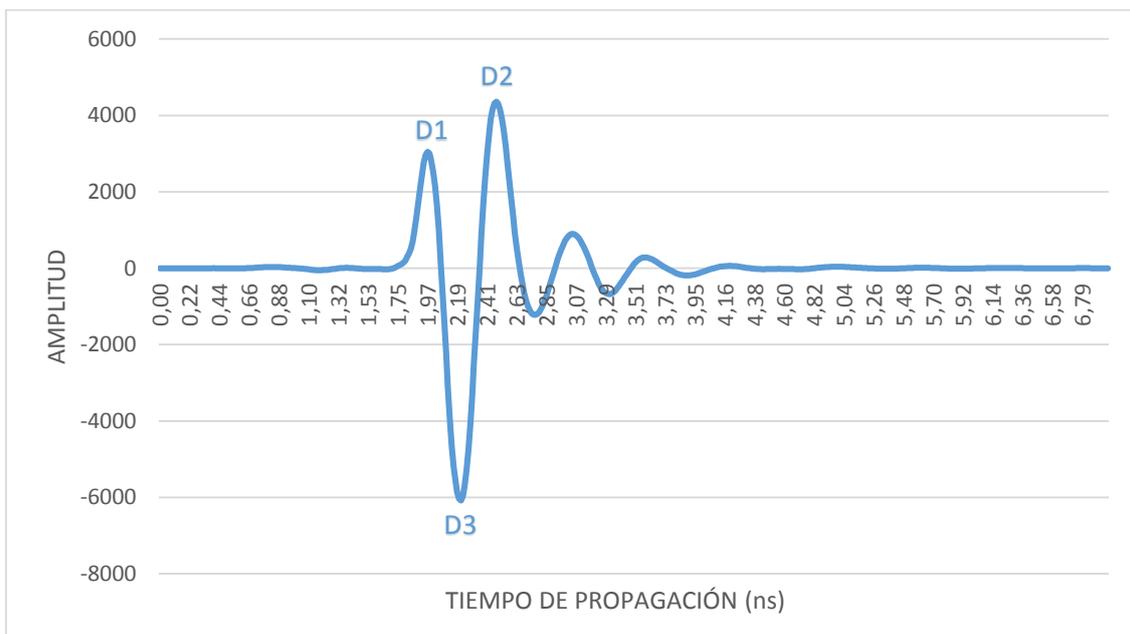


Figura 7.3. Señal experimental de la antena de 2 GHz de GSSI emitiendo al aire.

Para realizar esta comparación entre la señal experimental y la obtenida con el modelado numérico que se ha realizado, antes se ha tenido que normalizar, ya que el rango no era el mismo. Esto significa que, aunque en ambos el tiempo de propagación de la señal es de 7 ns, los *samples* (número de puntos que componen la señal, véase apartado 4.3.1) no son los mismos. En el caso de la medición experimental, la ventana

de medición de 7 ns estaba representada por 512 *samples*, mientras que nuestra modelización numérica lo estaba por medio de 1818 *samples*.

En la Figura 7.4 se puede ver una comparación de todas las gráficas, una vez normalizadas, que se han obtenido al modelar numéricamente con distintas distancias de separación entre emisor y receptor y la de la propagación en el aire de la medida experimental. Para averiguar cuál es la distancia real entre la antena emisora y la receptora, se ha hecho coincidir el máximo $D3$ de todos los modelos numéricos que se generaron. Con esto se puede ver que las más próximas estaban entre 4,75 y 5,25 cm.

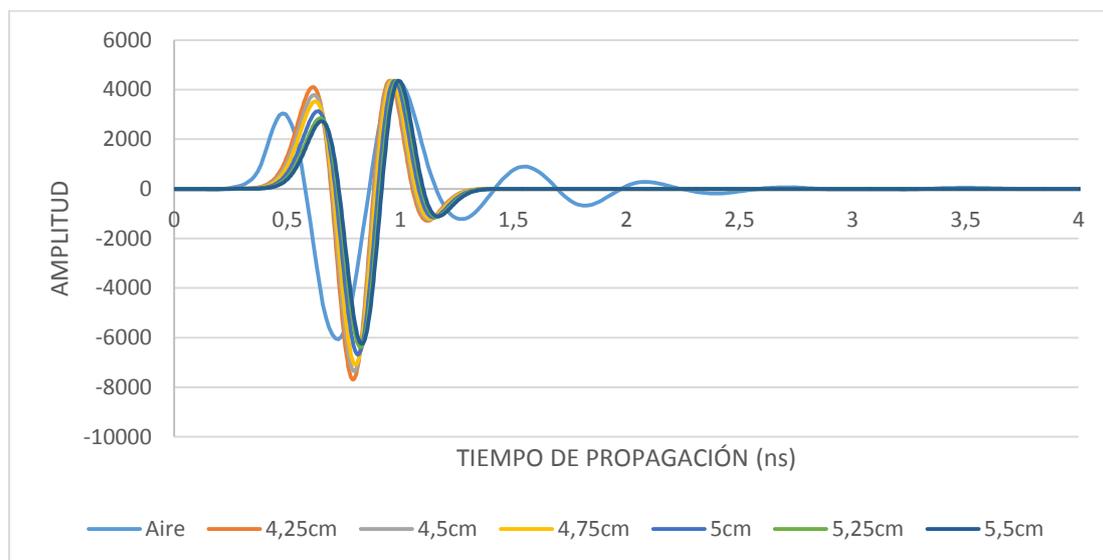


Figura 7.4. Comparación entre el modelado numérico de la respuesta electromagnética de emisión al aire con una antena de 2 GHz con diferentes separaciones entre emisor y receptor y la medida experimental.

Se aislaron los modelos numéricos más próximos (Figura 7.5) para hacer una comparación más exacta, de lo que se pudo determinar, comparando las amplitudes de $D1$ y $D2$, que la gráfica más parecida a la medición experimental es cuando el emisor y el receptor se encuentran separados 5 cm.

Esta conclusión se obtiene a partir del hecho de que, aunque los tiempos de llegada de los máximos $D1$ y $D2$ están retrasados respecto a la señal experimental, los valores de amplitudes más próximos al experimental de estos dos máximos son los de la separación de 5 cm. El hecho de que los tiempos de propagación se vean retrasados se debe a que al modelar se supone que el espacio entre emisor y receptor es el aire. No obstante, esto no es así puesto que el espacio está relleno de una serie de materiales cuyas propiedades el fabricante no nos facilita.

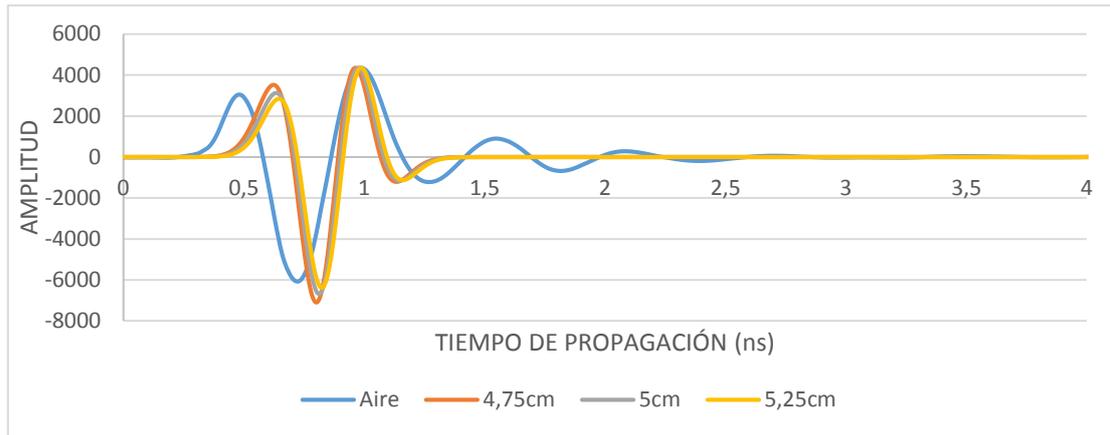


Figura 7.5. Comparación entre el modelado numérico de la respuesta electromagnética de emisión al aire con una antena de 2 GHz con diferentes separaciones (4,75 - 5,25 cm) entre emisor y receptor y la medida experimental.

Este resultado es muy interesante porque de aquí en adelante, toda la programación del modelado numérico que se realizó estaba basado en que la distancia entre el emisor y el receptor para esta antena es de 5 cm, siendo, por tanto, más real la programación de los siguientes estudios.

Análisis e interpretación de resultados

Con objeto de poder analizar en detalle los resultados obtenidos, se realizó la medición de los parámetros de onda de cada uno de los máximos que componían la señal (Figura 7.3). Los datos medidos en cada una de las señales modeladas son las amplitudes relativas (A), $samples$ (s) y tiempos dobles de llegada de la señal en ns (t). Con todos estos valores se preparó una tabla comparativa, para así poder ver cómo evolucionan los diferentes máximos que componían la señal dependiendo de la separación entre emisor y receptor de la antena, en relación a la amplitud recibida y el tiempo de llegada (ns) de cada uno de los máximos.

Tabla 7.1. Comparativa de máximos que componen la onda directa para diferentes separaciones entre emisor y receptor.

d (cm)	D1			D2			D3		
	A	s	t (ns)	A	s	t (ns)	A	s	t (ns)
4,25	4106,94	160	0,61	-7692,59	206	0,79	4359	248	0,95
4,50	3784,75	162	0,62	-7361,61	208	0,80	4359	250	0,96
4,75	3526,72	163	0,62	-7095,10	209	0,80	4359	251	0,96
5,00	3131,41	166	0,64	-6684,00	212	0,81	4359	254	0,97
5,25	2846,33	169	0,65	-6384,56	215	0,82	4359	257	0,99
5,50	2729,61	170	0,65	-6255,83	216	0,83	4359	260	0,99

A partir de los datos de la tabla anterior, se pueden observar una serie de patrones de comportamiento. En primer lugar, se puede apreciar que conforme la distancia de separación entre emisor y receptor es mayor, la amplitud de la onda se va haciendo menor. No obstante, esto no sucede para todos los máximos, ya que el $D3$ permanece invariable, debido a que se ha utilizado para normalizar. Esto se debe a que la onda recibida está compuesta por dos señales. En primer lugar, está la onda del aire, es decir, la onda que se propaga directamente entre el emisor y receptor. Lógicamente, cuanto más separadas estén las antenas mayor será la pérdida de energía en su trayectoria. La segunda onda que compone esta señal es la reflejada al salir de la carcasa de la antena y viajar por la interfaz entre la antena y el aire. Se comprobó en la realización del modelado numérico cómo, para esta señal, la variación de la amplitud no se ve afectada como consecuencia de la separación de las antenas. A la suma de ambas señales es la que hemos denominado onda directa.

Por otra parte, el tiempo y los *samples* van aumentando proporcionalmente a la separación comentada. Esto se debe a que cuanto mayor sea la separación, mayor es el tiempo que tarda la onda en llegar a su destino.

Por último, y con objeto de estimar el mejor patrón de comportamiento que describe la disminución de las amplitudes como consecuencia de la separación entre el emisor y el receptor, se calculó cuál es el mejor ajuste matemático que lo representa. Como se puede observar en la Figura 7.6, la amplitud del máximo $D1$ disminuye significativamente con la distancia. De acuerdo con la teoría las amplitudes descienden de forma exponencial en relación a la distancia para una longitud de onda dada. No obstante, dado el pequeño rango del análisis de valores, para este pequeño tramo de distancias la función que mejor representa su comportamiento es una función lineal como se traduce del elevado coeficiente de correlación ajustado obtenido ($R^2 = 0,98$). De igual forma, se observa como para el caso del máximo $D2$ también el descenso de la amplitud es lineal (Figura 7.6b) si sólo se analiza este pequeño tramo de distancias, ahora bien, en este caso el gradiente de descenso de la amplitud es ligeramente superior, como se deduce de la pendiente obtenida. Por último, y como era de esperar la amplitud del máximo $D3$ es constante, ya que todas las señales se han normalizado respecto al valor que tenía este máximo en la medición experimental.

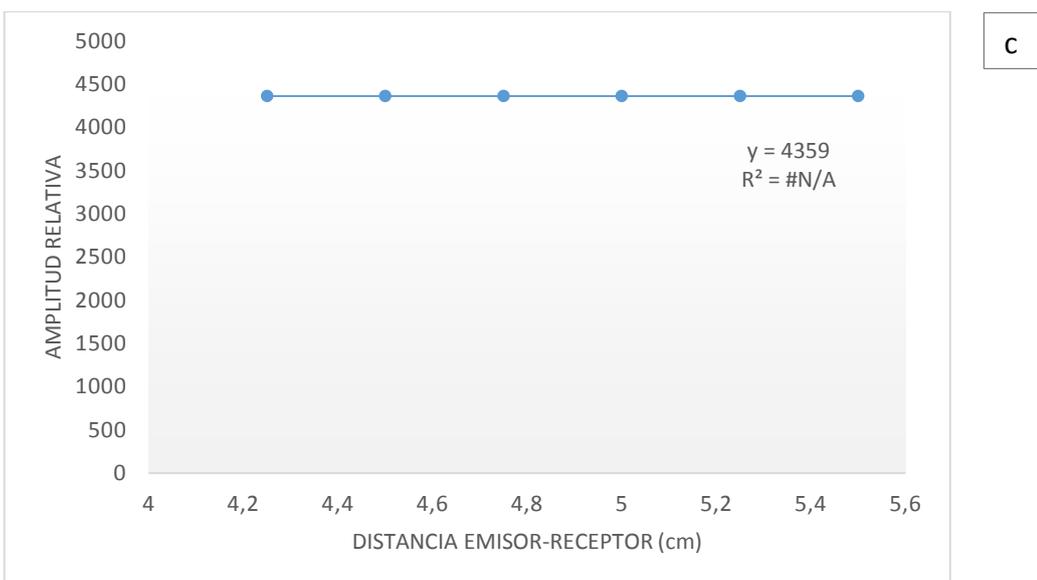
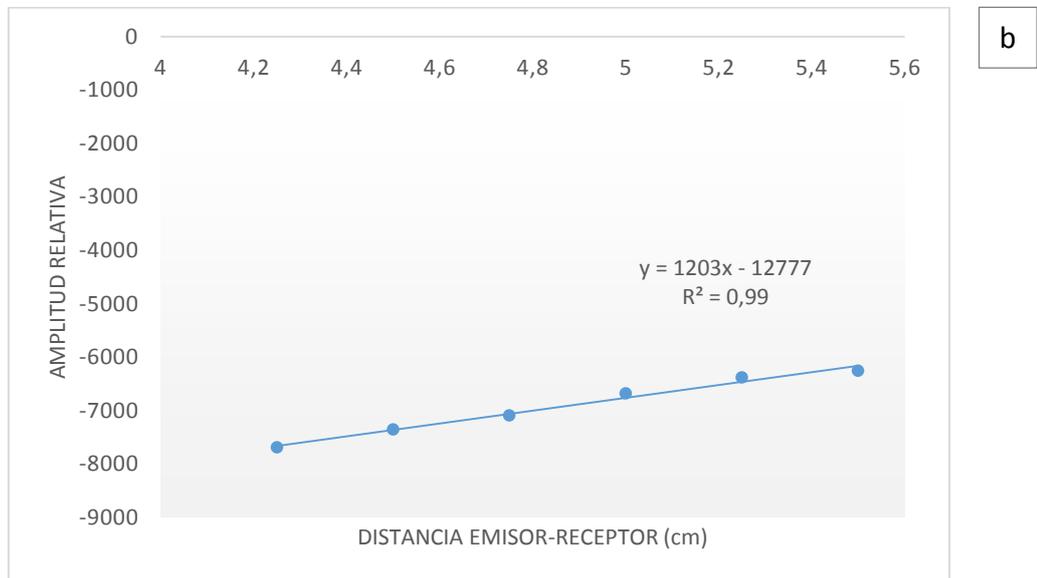
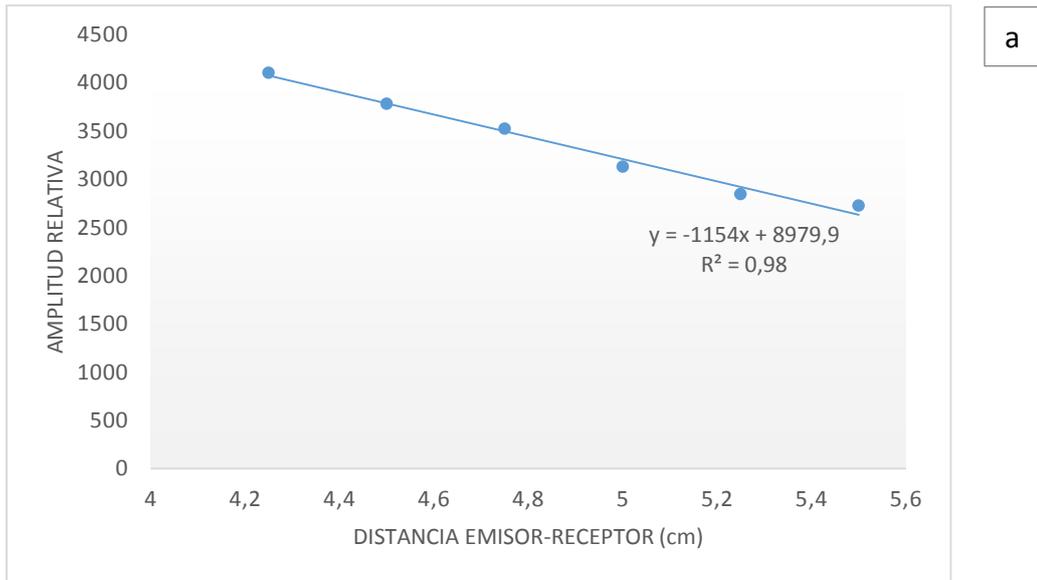


Figura 7.6. Variación de las amplitudes relativas con la distancia de separación entre el emisor y receptor (a) D1, (b) D2 y (c) D3.

7.2.2. Modelado de reflexiones de la propagación de las ondas

Resultados

Una vez modelada la señal cuando la antena emite al aire y la distancia de separación entre emisor y receptor se ajustó, el siguiente paso era la modelización numérica de las reflexiones y para ello se empleó un reflector metálico. Dado el gran volumen de datos con los que se trabajó, todas las señales modeladas numéricamente, así como las tablas resultantes de su análisis completas se adjuntan en el Anexo 3. Calibración de la antena.

Una vez programado, se ejecutó en *gprMax*, y tras el procesado de los archivos tal y como se ha detallado en el apartado 5.2.2 se obtuvo el modelado numérico de la señal resultante (Figura 7.7). Aquí se puede ver cómo aparece una primera onda directa. Esta señal, igual que en el caso anterior (véase apartado 7.2.1), es la onda directa y presenta tres máximos característicos (*D1*, *D2* y *D3*). Pero, además, como se observa en la Figura 7.7 aparece una segunda reflexión. En este caso se trata de la reflexión de energía que se produce cuando la onda al viajar por el aire se encuentra con un material, como es la placa metálica que se colocó, cuyas propiedades dieléctricas son diferentes. Esta onda, que denominaremos a partir de ahora onda reflejada, también está compuesta por una serie de máximos (*R1*, *R2* y *R3*).

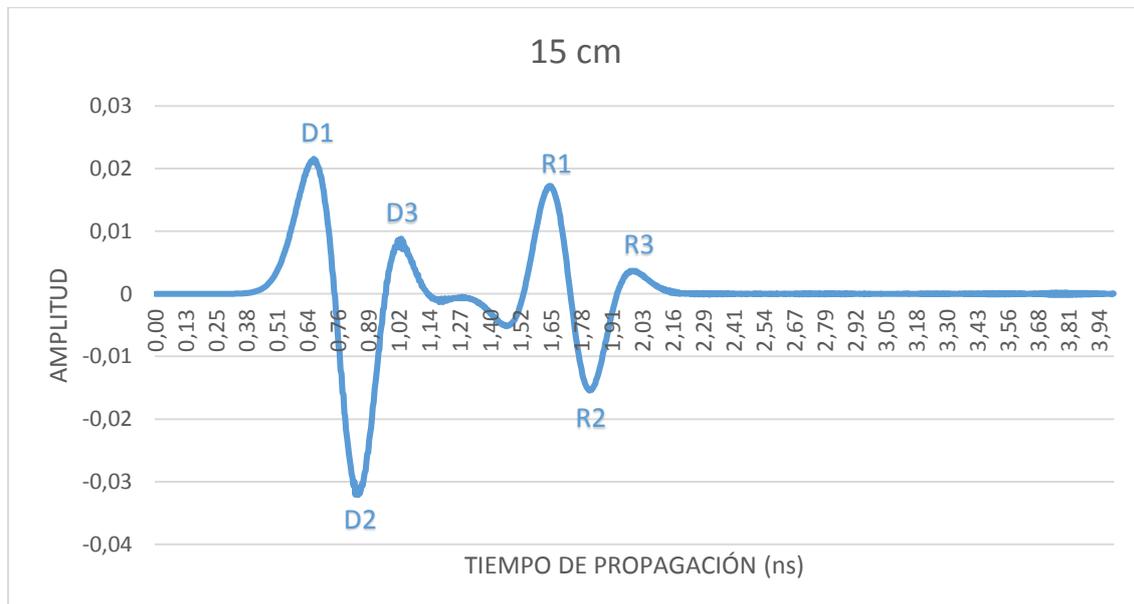


Figura 7.7. Modelado numérico de la reflexión producida cuando se coloca un reflector metálico a una distancia de 15 cm de separación de la antena de 2 GHz.

Tal y como se detalla en el programa experimental, para una mejor comprensión de cómo se produce la propagación de las ondas, se modeló la señal para distintas distancias de separación entre la antena y el reflector metálico (entre 4 cm y 30 cm). Se puede apreciar que cuando la antena está más separada del reflector metálico, las ondas directa y reflejada también lo estaban entre ellas, diferenciándose claramente (Figura 7.8).

Sin embargo, cuando la antena está muy próxima, estas ondas se superponen, no teniendo claro cuál es cada una y, por lo tanto, algunas de ellas no aportan información que podamos identificar en este estudio. Esto se puede ver en la Figura 7.8 y la Figura 7.9. En la primera, donde la separación es mayor, se identifican claramente las dos señales y los máximos que las componen. Sin embargo, en la segunda figura la antena está muy cercana al reflector, y comienza a ser difícil distinguir cuáles son las ondas directas y cuales las reflejadas.

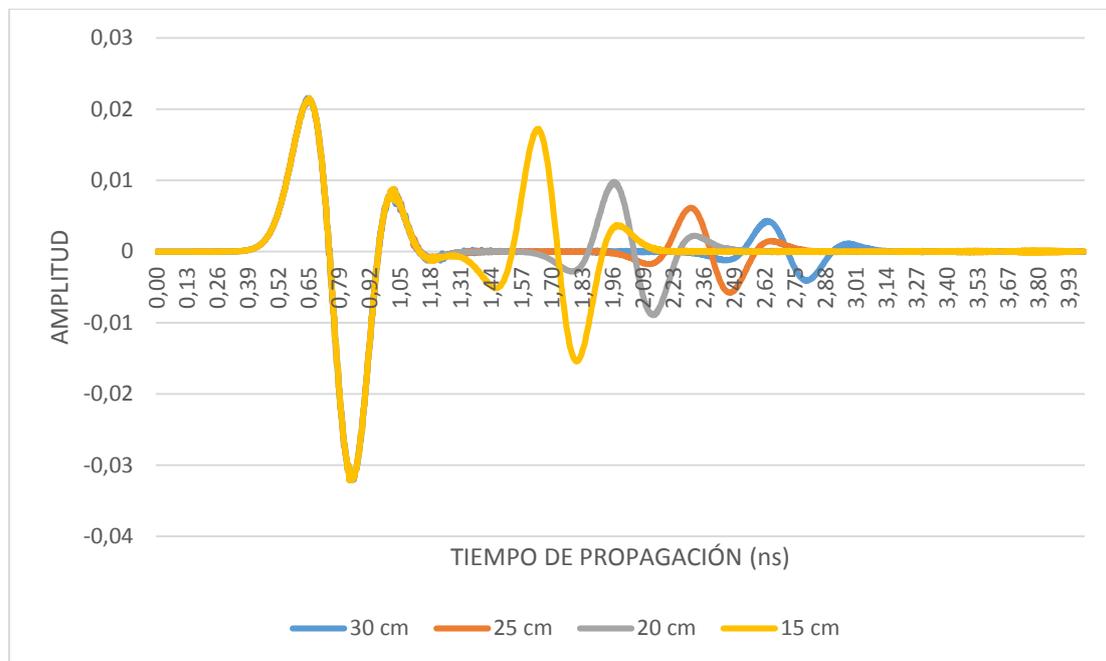


Figura 7.8. Modelado numérico de la reflexión producida cuando se coloca un reflector metálico a diferentes distancias (15 a 30 cm) de separación de la antena de 2 GHz.

En la Figura 7.9 se observan varios fenómenos como consecuencia del solape que se produce entre la onda directa y la reflejada. En primer lugar, de los 3 máximos de la onda directa en la señal sólo se identifican los 2 primeros. Además, con respecto a la onda reflejada, se comprueba como la amplitud de los dos primeros máximos ($R1$ y $R2$) presentan un aumento muy llamativo.

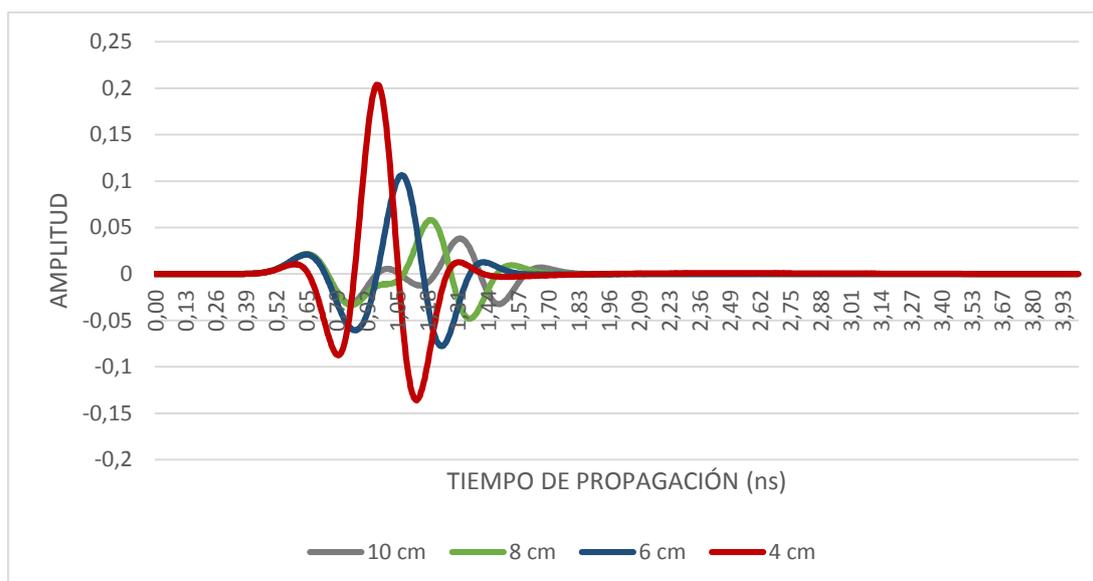


Figura 7.9. Modelado numérico de la reflexión producida cuando se coloca un reflector metálico a diferentes distancias (4 a 10 cm) de separación de la antena de 2 GHz.

Análisis e interpretación de resultados

De igual forma que en el caso anterior, para interpretar los modelos numéricos generados se han medido las A , s y t (ns) de cada uno de ellos y de cada uno de los máximos de las ondas registradas y se presentan en las siguientes tablas resumen (Tabla 7.2 y Tabla 7.3).

Tabla 7.2. Comparativa de máximos que componen la onda directa para diferentes separaciones de la antena de 2 GHz con respecto al reflector metálico.

d (cm)	D1			D2			D3		
	A	s	t (ns)	A	s	t (ns)	A	s	t (ns)
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	2,15E-02	171	0,65	-3,38E-02	223	0,86	-	-	-
10	2,16E-02	173	0,66	-3,23E-02	220	0,84	5,64E-03	263	1,01
15	2,16E-02	173	0,66	-3,21E-02	221	0,85	8,83E-03	268	1,03
20	2,16E-02	173	0,66	-3,21E-02	221	0,85	8,44E-03	264	1,01
25	2,16E-02	173	0,66	-3,21E-02	221	0,85	8,66E-03	268	1,03
30	2,15E-02	171	0,65	-3,21E-02	223	0,86	8,67E-03	269	1,03

Tabla 7.3. Comparativa de máximos que componen la onda reflejada para diferentes separaciones de la antena de 2 GHz con respecto al reflector metálico.

d (cm)	R1			R2			R3		
	A	s	t (ns)	A	s	t (ns)	A	s	t (ns)
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	5,82E-02	313	1,2	-4,81E-02	356	1,37	9,49E-03	402	1,54
10	3,84E-02	345	1,32	-3,25E-02	389	1,49	7,08E-03	436	1,61
15	1,72E-02	430	1,65	-1,54E-02	472	1,81	3,69E-03	516	1,98
20	9,80E-03	514	1,97	-8,94E-03	558	2,14	2,22E-03	603	2,32
25	6,16E-03	600	2,31	-5,80E-03	644	2,48	1,52E-03	692	2,66
30	4,33E-03	685	2,63	-4,11E-03	729	2,8	1,15E-03	776	2,98

Como se puede ver, en la Figura 7.9, para una distancia inferior a los 6 cm resultaba complicado diferenciar cada uno de los máximos, ya que como se ha comentado, al estar tan próximos las ondas directa y reflejada se superponen y no se sabe cuál es la amplitud que corresponde a cada uno de los máximos que la componen.

Tal y como era de esperar, las amplitudes de los máximos de las ondas directas no variaban, ya que en ningún momento varían las condiciones y características de la antena (Tabla 7.2). No obstante, al ir separando el reflector metálico, las amplitudes de la reflejada en todos los máximos disminuyen significativamente.

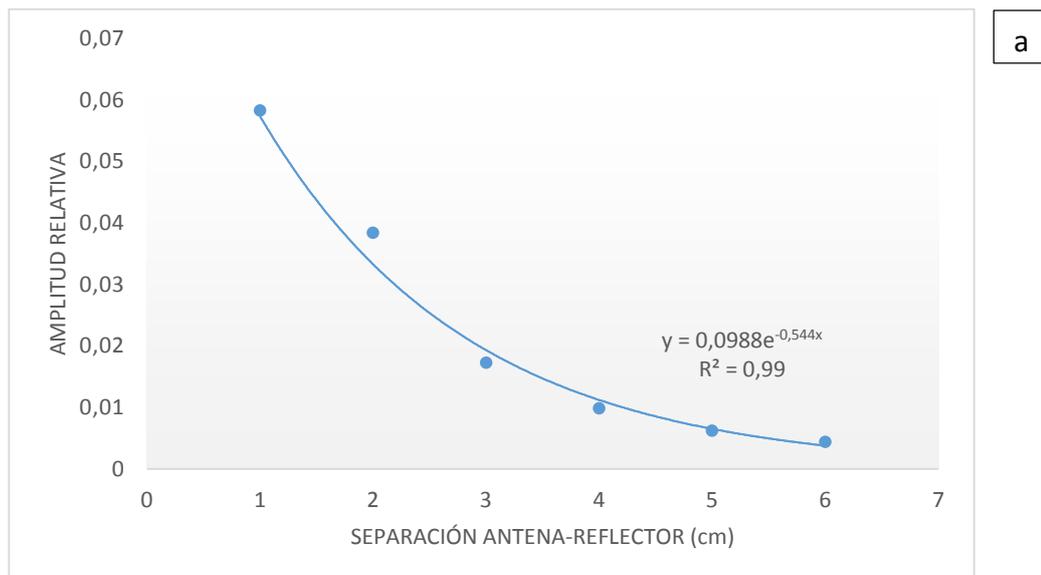
Al igual que en el caso anterior, se estimó el patrón de comportamiento de las amplitudes cuando la antena se separa del reflector metálico, calculándose cuál es el ajuste matemático que lo representa. En la Figura 7.10a se puede ver la amplitud del máximo R1, donde se puede observar que la disminución de amplitudes siempre era una exponencial dependiente de la distancia que recorre la onda, teniendo un elevado coeficiente de correlación, que coincide con el caso de la onda emitiendo al aire ($R^2=0,99$). El máximo R2 (Figura 7.10b) se puede apreciar que es prácticamente igual que el primero, siendo ligeramente superior su gradiente de descenso de la amplitud ($R^2=0,99$). Lo mismo sucedía para R3, como se puede ver en la Figura 7.10c, siendo este $R^2=0,98$.

Con respecto a los tiempos de llegada de la onda directa, dado que las características de la antena no variaban, y el medio tampoco, éstos no variaban (Tabla 7.2). Ahora bien, conforme la antena se acercaba al reflector metálico, los tiempos de llegada de la onda reflejada eran menores e incluso ambas ondas se solapaban. El problema surgió cuando hubo que definir exactamente, cuál era el máximo representativo de la llegada de la señal: R1, R2 y/o R3.

Para poder establecer cuál de ellos es el más adecuado, gracias al modelado numérico generado en este estudio lo podemos estimar. Para ello, sabiendo que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el aire es $v = 30 \text{ cm/ns}$ y que el espacio que viaja la onda en cada uno de los casos es la distancia (d), es la distancia de separación entre antena y reflector, se puede saber 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:

$$\Delta t_D^R = \frac{2 \cdot d}{v} \quad \text{ec. 7.2}$$

Asimismo, a partir de los tiempos de llegada de cada uno de los máximos que componen la onda directa y la reflejada (Tabla 7.2 y Tabla 7.3), también se puede medir en el modelo numérico creado cual es el incremento de tiempo entre cada una de todas las combinaciones de los máximos.



a

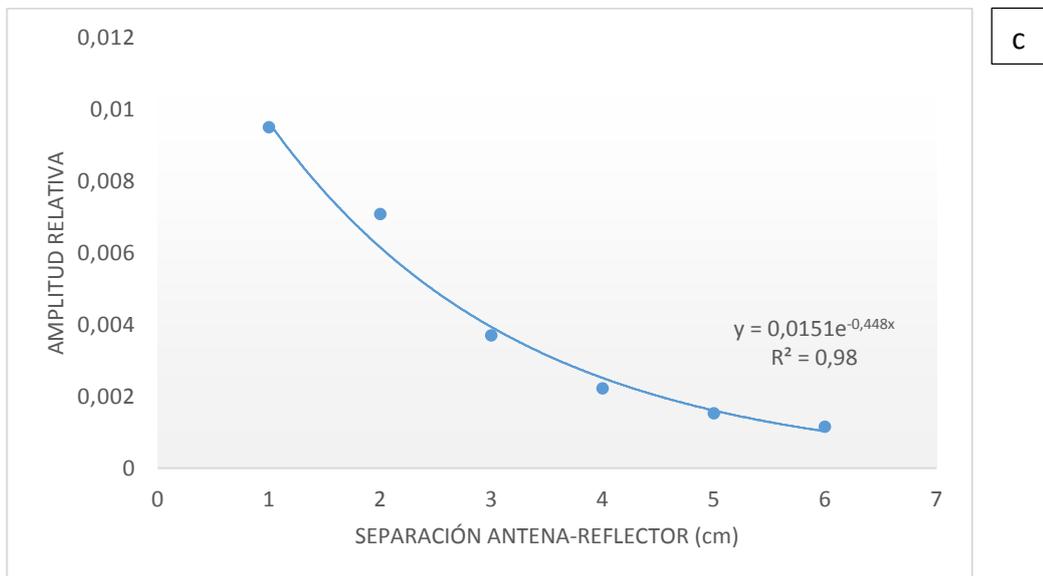
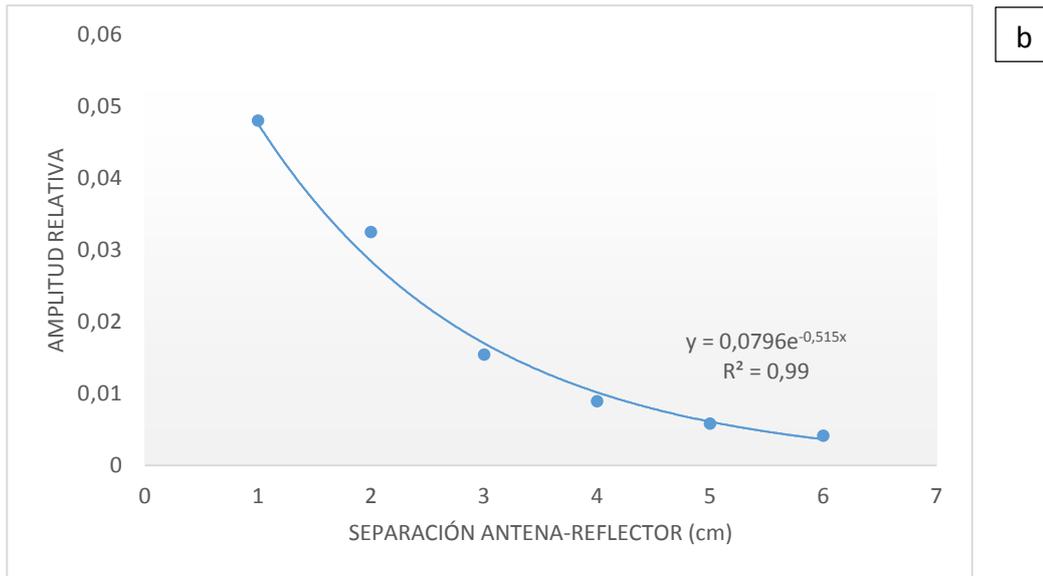


Figura 7.10. Variación de las amplitudes relativas con la distancia de separación entre la antena y el receptor (a) R1, (b) R2 y (c) R3.

En la Tabla 7.4 se presenta cual es el incremento del tiempo de llegada según las diferentes combinaciones de máximos a partir de las mediciones de las señales modeladas. Así mismo, dado que la velocidad y la distancia son conocidas, estos valores se comparan con los valores teóricos.

Tabla 7.4. Valores promedio de la variación del tiempo de llegada en ns de la antena de 2 GHz con respecto al reflector metálico.

		Δt_D^R (ns)								
		Medido en modelos numéricos para distintas combinaciones máximos								
d (cm)	Δt_D^R Teórico (ns)	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
4	0,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	0,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0,53	0,55	0,35	-	0,71	0,51	-	0,89	0,69	-
10	0,67	0,66	0,48	0,32	0,83	0,65	0,48	1,01	0,83	0,67
15	1,00	0,99	0,80	0,62	1,15	0,97	0,78	1,32	1,13	0,95
20	1,33	1,31	1,13	0,96	1,48	1,30	1,13	1,65	1,47	1,30
25	1,67	1,64	1,46	1,28	1,81	1,63	1,45	2,00	1,81	1,63
30	2,00	1,98	1,78	1,60	2,15	1,95	1,77	2,33	2,13	1,95

Con todo esto, se puede llegar a la conclusión de que el estudio es correcto, ya que el incremento de tiempo R1-D1 de todas las ondas medidas en *gprMax* se acercaban considerablemente al tiempo teórico. Del resto de combinaciones de máximos, se observa que las combinaciones R2-D2 y R3-D3 también se encontraban muy próximos a los valores teóricos.

De hecho, al comparar los valores teóricos y los de los modelos para estos 3 casos, se comprueba que son equivalentes, tal y como se observa en la Figura 7.11, ya que la función de ajuste entre ellos es una recta con una pendiente de 1 y con un coeficiente de correlación del $R^2 = 0,99$.

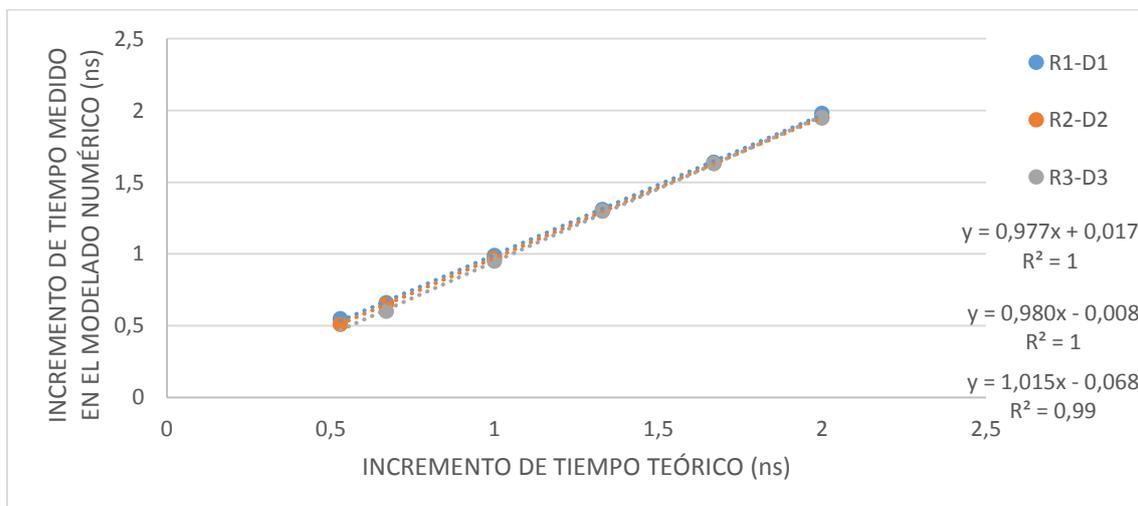


Figura 7.11. Ajuste entre incrementos de tiempo de llegada para las combinaciones de R1-D1, R2-D2 Y R3-D3 modelados y teóricos al emitir al aire y reflejarse en el metal.

Es importante tener esto cuenta puesto que como se observa en la Figura 7.7 el máximo $R1$ tiene una amplitud muy pequeña y dependiendo de la distancia a la que se produzca la reflexión es posible que no se pueda identificar y que sea necesario emplear combinaciones de máximos alternativas.

7.2.3. Modelado de la propagación de las ondas en el hormigón

Resultados

Por ultimo en este apartado, se realizan las comparaciones de la calibración de la propagación de ondas electromagnéticas sobre el bloque de hormigón. Dado el gran volumen de datos con los que se trabajó, todas las señales modeladas numéricamente, así como las tablas resultantes de su análisis completas se adjuntan en el Anexo 3. Calibración de la antena.

En la Figura 7.12 se puede ver la señal característica resultante de su ejecución en el programa *gprMax* al colocar la antena a 14 cm de distancia del bloque de hormigón y bajo el bloque un reflector metálico. Como se observa en la señal modelada nos encontramos con tres ondas y cada una de ellas consta de una serie de máximos. La primera es la onda directa y su registro se ha justificado en los casos anteriores estudiados. Los máximos que la componen son el $D1$, $D2$ y $D3$. A continuación, se recibe la reflexión como consecuencia de la interfaz aire-hormigón, debido al cambio de propiedades dieléctricas que hay entre ambos. En este caso sus máximos se han denominado $Ra1$, $Ra2$ y $Ra3$. Por último, se registra la reflexión de energía que se produce al viajar la onda por el hormigón y encontrarse un contraste dieléctrico como consecuencia de la colocación del reflector metálico debajo del hormigón. A los máximos que componen esta señal le denominamos $Rh1$, $Rh2$ y $Rh3$. Evidentemente, como consecuencia del viaje de la onda por el interior del hormigón, la reflexión en el metal es de mucha menor energía y por tanto las amplitudes de sus máximos son menores.

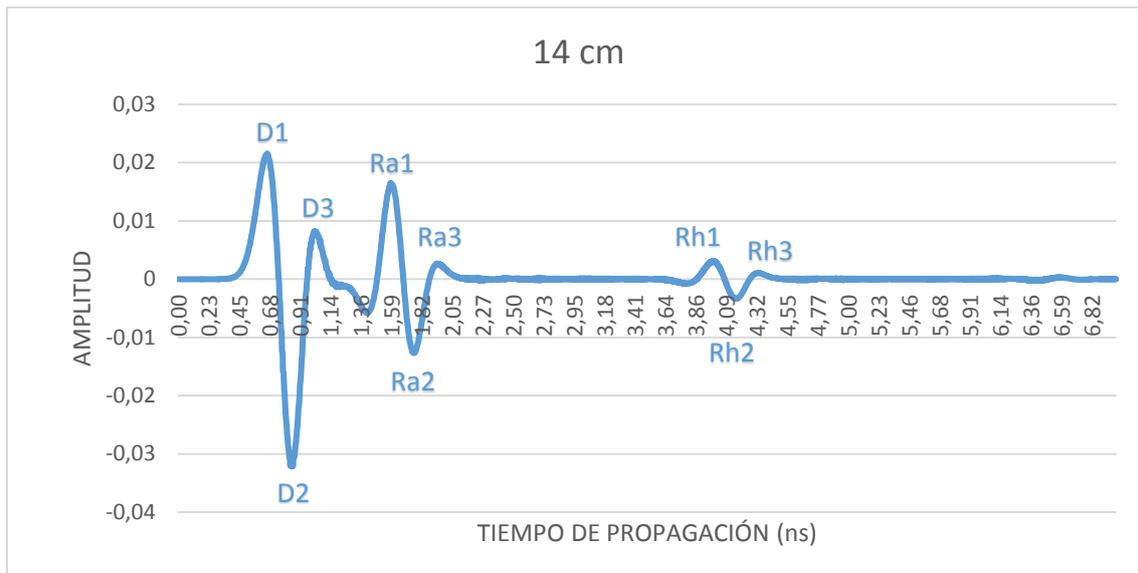


Figura 7.12. Modelado numérico de la señal con la antena separada 14 cm de la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base del hormigón.

No obstante, estas reflexiones, sus tiempos de llegada y amplitudes se van modificando conforme se va separando la antena del bloque de hormigón. En la Figura 7.13 se puede ver la comparación del modelado numérico de las ondas obtenidas cuando la antena está pegada y a 2 cm del bloque de hormigón. Se puede observar que cuando la antena está completamente pegada las amplitudes son mayores que en el resto de los casos. Esto es debido a que la onda directa y la reflejada en el hormigón producen una interferencia constructiva, dando lugar a un aumento significativo de sus amplitudes. Conforme se separa la antena, estas dos señales se van separando y vemos como en las siguientes figuras se va produciendo este solape.

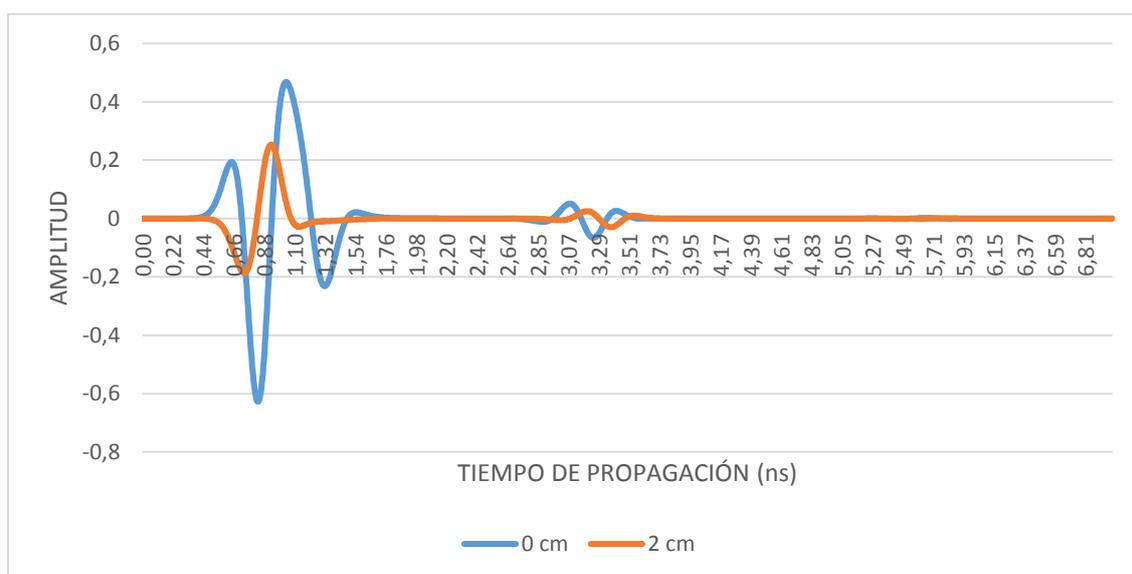


Figura 7.13. Modelado numérico de la señal con la antena pegada al bloque de hormigón y cuando está separada 2 cm de la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base del hormigón.

En la Figura 7.14 se ha hecho la comparación entre los valores 4 y 8 cm de separación de la antena del bloque de hormigón, con una diferencia de 0,5 cm entre cada uno. Se puede observar que conforme la separación de la antena es más grande, las amplitudes van disminuyendo y el tiempo en el que llega va aumentando. Esto es lógico, ya que conforme mayor es la distancia menor es la energía de la onda que se recibe y por tanto la amplitud de la señal debe disminuir. Además, en estos valores se puede apreciar que no se distingue $D3$, ya que la señal se une con la de $Ra1$.

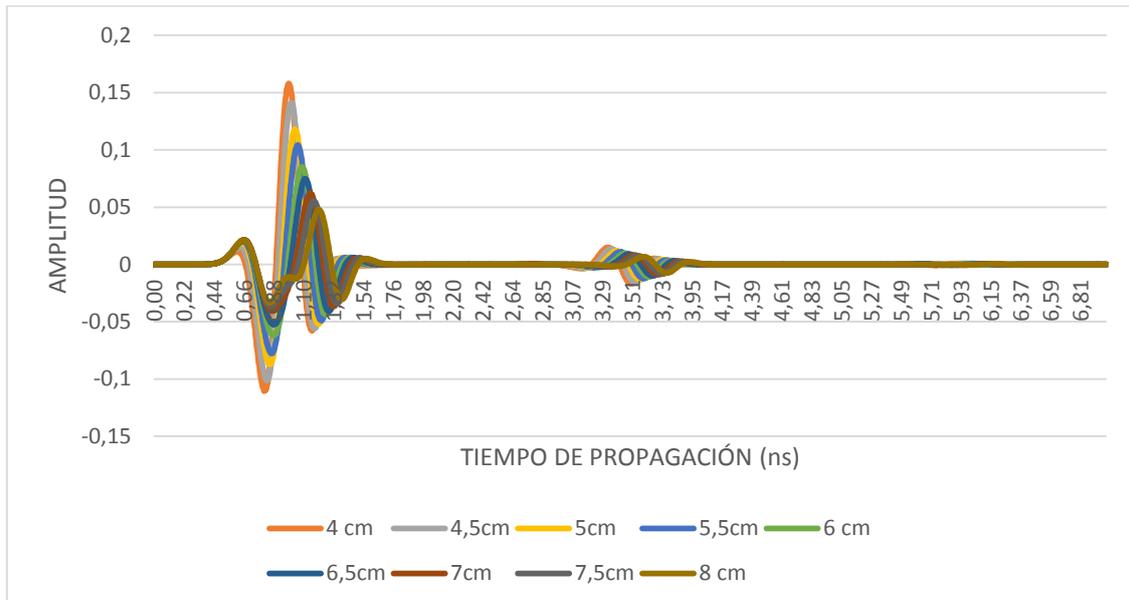


Figura 7.14. Modelado numérico de la señal con la antena separada entre 4 y 8 cm de la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base del hormigón.

Por último, se compara para diferentes distancias de separación antena-hormigón desde 10 a 20 cm (Figura 7.15). Lo primero que se puede observar es que en estos casos sí se identificaban los tres máximos de todas las ondas, no solapándose entre sí. Además, la onda directa ($D1$, $D2$ y $D3$), tal y como era de esperar, al no solaparse la señal con la reflejada los máximos no varían. Esto demuestra que el modelado numérico realizado es correcto, ya que esa onda es de la antena y no tiene por qué variar. Por otra parte, al igual que en la figura anterior, las amplitudes van disminuyendo conforme la antena estaba más separada, así como los tiempos van aumentando de las dos siguientes reflexiones.

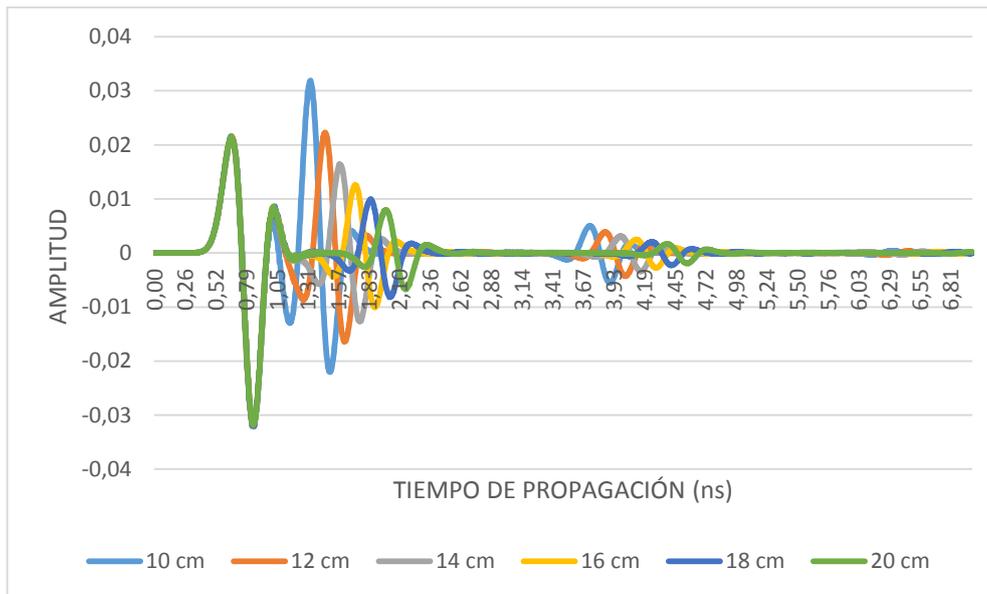


Figura 7.15. Modelado numérico de la señal con la antena separada entre 10 y 20 cm de la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base del hormigón.

Análisis e interpretación de resultados

De igual forma que en el caso anterior, para interpretar los modelos numéricos generados se han medido las A , s y t (ns) de cada uno de ellos y de cada uno de los máximos de las ondas registradas. Estos valores se presentan en la siguiente tabla resumen (Tabla 7.5). Los pasos a seguir en este caso son exactamente los mismos que en el apartado anterior, es decir, se ha hecho un cuadro resumen de los máximos y los mínimos de cada uno de los modelos numéricos obtenidos por medio del programa *gprMax*, tanto de la onda directa como de las dos reflexiones.

Lo primero que se aprecia al medir los parámetros de los máximos es que nos encontramos con un patrón de comportamiento distinto si la onda directa se solapa o no con la reflejada. Este solape se producía si la antena estaba separada como máximo 8 cm.

Cuando las dos señales no están solapadas, en cuanto a la onda directa se puede ver que la amplitud de sus máximos es constante sea cual sea la distancia. Ahora bien, cuando se produce el solape se comprueba que $D2$ tenía su mínimo cuando la distancia es 5 cm. Esto es debido a que antes las ondas se solapan con las reflejadas, no dando valores reales. Desde ese punto, la amplitud va ascendiendo conforme aumenta la distancia. Por último y como ya se ha comentado, $D3$ no se puede distinguir hasta que la distancia no es de 8 cm. De ahí en adelante se puede ver que es constante, excepto en 8 cm, ya que todavía se ve afectada por la reflejada.

Tabla 7.5. Comparativa de máximos que componen la onda directa para diferentes separaciones de la antena de 2 GHz con respecto al reflector de hormigón.

<i>d</i> (cm)	<i>D1</i>			<i>D2</i>			<i>D3</i>		
	<i>A</i>	<i>s</i>	<i>t</i> (ns)	<i>A</i>	<i>s</i>	<i>t</i> (ns)	<i>A</i>	<i>s</i>	<i>t</i> (ns)
0	1,94E-01	168	0,64	-6,28E-01	217	0,83	4,68E-01	270	1,04
2	-	-	-	-1,87E-01	192	0,74	-	-	-
4	1,16E-02	160	0,61	-1,10E-01	211	0,81	-	-	-
4,5	1,51E-02	164	0,63	-1,01E-01	217	0,83	-	-	-
5	1,88E-02	169	0,65	-8,73E-02	222	0,85	-	-	-
5,5	2,00E-02	170	0,65	-7,77E-02	226	0,87	-	-	-
6	2,11E-02	171	0,65	-6,22E-02	229	0,88	-	-	-
6,5	2,13E-02	173	0,66	-5,24E-02	228	0,87	-	-	-
7	2,14E-02	175	0,67	-4,08E-02	225	0,86	-	-	-
7,5	2,15E-02	172	0,66	-3,64E-02	226	0,87	-	-	-
8	2,14E-02	172	0,66	-3,36E-02	220	0,84	-1,09E-02	259	0,99
10	2,16E-02	173	0,66	-3,20E-02	221	0,85	6,20E-03	264	1,01
12	2,16E-02	173	0,66	-3,21E-02	218	0,84	8,38E-03	265	1,02
14	2,16E-02	173	0,66	-3,22E-02	221	0,85	8,23E-03	264	1,01
16	2,16E-02	173	0,66	-3,19E-02	220	0,84	8,28E-03	265	1,02
18	2,15E-02	171	0,65	-3,21E-02	223	0,86	8,67E-03	269	1,03
20	2,14E-02	171	0,65	-3,19E-02	221	0,85	8,64E-03	266	1,02

En este caso tampoco fue posible tomar lectura de los parámetros de algunas de las señales modeladas, ya que cuando la antena está muy junta (entre 2 y 7,5 cm) el máximo *D3* de la onda directa se junta con el máximo *Ra1* de la reflejada en el hormigón.

En cuanto a las ondas reflejadas en el hormigón y en el reflector metálico, se puede ver como las amplitudes son menores conforme la distancia de separación de la antena iba aumentando, es decir, que el modelo numérico generado se obtuvo correctamente y las señales se atenúan con la distancia como era de esperar (

Tabla 7.6 y Tabla 7.7).

Tabla 7.6. Comparativa de máximos que componen la onda reflejada en el hormigón para diferentes separaciones de la antena de 2 GHz con respecto al reflector de hormigón.

<i>d</i> (cm)	<i>Ra1</i>			<i>Ra2</i>			<i>Ra3</i>		
	<i>A</i>	<i>s</i>	<i>t</i> (ns)	<i>A</i>	<i>s</i>	<i>t</i> (ns)	<i>A</i>	<i>s</i>	<i>t</i> (ns)
0	4,68E-01	270	1,04	-2,31E-01	342	1,31	2,13E-02	401	1,54
2	2,53E-01	242	0,93	-2,83E-02	294	1,13	-	-	-
4	1,58E-01	258	0,99	-5,81E-02	302	1,16	4,62E-03	350	1,34
4,5	1,41E-01	263	1,01	-5,61E-02	307	1,18	5,40E-03	355	1,36
5	1,18E-01	270	1,04	-5,21E-02	315	1,21	5,92E-03	362	1,39
5,5	1,04E-01	276	1,06	-4,90E-02	321	1,23	6,06E-03	367	1,41
6	8,49E-02	283	1,09	-4,40E-02	329	1,26	6,11E-03	375	1,44
6,5	7,45E-02	288	1,11	-4,09E-02	334	1,28	6,01E-03	381	1,46
7	6,24E-02	299	1,15	-3,33E-02	350	1,34	5,74E-03	393	1,51
7,5	5,55E-02	306	1,18	-3,41E-02	350	1,34	5,49E-03	396	1,52
8	4,81E-02	315	1,21	-3,07E-02	359	1,38	5,17E-03	405	1,56
10	3,19E-02	348	1,34	-2,20E-02	392	1,51	4,17E-03	437	1,68
12	2,23E-02	380	1,46	-1,65E-02	423	1,63	3,30E-03	472	1,81
14	1,64E-02	412	1,58	-1,27E-02	458	1,76	2,69E-03	504	1,94
16	1,26E-02	448	1,72	-1,01E-02	492	1,89	2,18E-03	539	2,07
18	9,97E-03	482	1,85	-8,18E-03	525	2,02	1,81E-03	574	2,21
20	7,98E-03	517	1,99	-6,72E-03	558	2,14	1,56E-03	603	2,32

Tabla 7.7. Comparativa de máximos que componen la onda reflejada en el reflector metálico para diferentes separaciones de la antena de 2 GHz con respecto al reflector de hormigón.

<i>d</i> (cm)	Rh1			Rh2			Rh3		
	<i>A</i>	<i>s</i>	<i>t</i> (ns)	<i>A</i>	<i>s</i>	<i>t</i> (ns)	<i>A</i>	<i>s</i>	<i>t</i> (ns)
0	5,15E-02	801	3,08	-6,61E-02	846	3,26	2,63E-02	889	3,42
2	2,54E-02	835	3,21	-2,99E-02	879	3,38	9,99E-03	924	3,56
4	1,49E-02	868	3,34	-1,69E-02	911	3,51	5,29E-03	955	3,68
4,5	1,35E-02	875	3,37	-1,53E-02	919	3,54	4,75E-03	963	3,71
5	1,19E-02	883	3,4	-1,33E-02	929	3,58	4,11E-03	971	3,74
5,5	1,10E-02	892	3,43	-1,22E-02	935	3,6	3,79E-03	979	3,77
6	9,78E-03	901	3,47	-1,08E-02	945	3,64	3,38E-03	990	3,81
6,5	9,11E-03	908	3,49	-1,01E-02	952	3,66	3,13E-03	997	3,84
7	8,14E-03	917	3,53	-8,96E-03	963	3,71	2,83E-03	1006	3,87
7,5	7,56E-03	925	3,56	-8,38E-03	969	3,73	2,60E-03	1012	3,89
8	6,78E-03	935	3,6	-7,58E-03	979	3,77	2,34E-03	1024	3,94
10	5,03E-03	968	3,73	-5,58E-03	1013	3,9	1,74E-03	1057	4,07
12	3,90E-03	1003	3,86	-4,32E-03	1047	4,03	1,41E-03	1090	4,2
14	3,13E-03	1038	4	-3,41E-03	1081	4,16	1,08E-03	1125	4,33
16	2,49E-03	1071	4,12	-2,76E-03	1116	4,3	8,91E-04	1159	4,46
18	2,08E-03	1108	4,26	-2,31E-03	1151	4,43	7,67E-04	1194	4,6
20	1,72E-03	1141	4,39	-1,96E-03	1184	4,56	6,83E-04	1229	4,73

En cuanto al análisis de velocidades, a continuación se han realizado los mismos cálculos que en la emisión con metal (capítulo 7.2.2). La velocidad de propagación de la onda electromagnética es constante y considerando que el hormigón es un material de baja pérdida con una permitividad relativa de valor 9, la velocidad se puede obtener como:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{30}{\sqrt{9}} = 10 \text{ cm/ns} \quad \text{ec. 7.3}$$

Por tanto, el tiempo de propagación entre la onda reflejada en la superficie del hormigón y la reflejada en el metal situado en la base del hormigón se puede obtener como:

$$t = \frac{2h}{v} = \frac{2 \cdot 12}{10} = 2,4 \text{ ns} \quad \text{ec. 7.4}$$

Estos valores teóricos nos sirvieron para poder compararlos con los obtenidos de los modelos numéricos. En primer lugar, se calculó el incremento de tiempo teórico a

esperar, columna 2 (Tabla 7.8), y posteriormente se calculó con todas las posibles combinaciones de máximos para ver con cuál de ellos el cálculo se ajustaba más al teórico.

Tabla 7.8. Comparación de incrementos de tiempos teóricos y los obtenidos del modelado numérico para todas las combinaciones de máximos entre la onda reflejada en el metal y la reflejada en el hormigón.

		Δt_D^R (ns)								
		Medido en modelos numéricos para distintas combinaciones máximos								
d (cm)	Δt_D^R Teórico (ns)	Rh1-Ra1	Rh1-Ra2	Rh1-Ra3	Rh2-Ra1	Rh2-Ra2	Rh2-Ra3	Rh3-Ra1	Rh3-Ra2	Rh3-Ra3
0	2,40	2,04	1,77	1,54	2,22	1,94	1,71	2,38	2,11	1,88
2	2,40	2,28	2,08	-	2,45	2,25	-	2,63	2,43	-
4	2,40	2,35	2,18	1,99	2,51	2,34	2,16	2,68	2,51	2,33
4,5	2,40	2,36	2,19	2,00	2,53	2,36	2,17	2,70	2,53	2,34
5	2,40	2,36	2,19	2,01	2,54	2,36	2,18	2,70	2,53	2,34
5,5	2,40	2,37	2,20	2,02	2,54	2,36	2,19	2,71	2,53	2,36
6	2,40	2,38	2,20	2,03	2,55	2,37	2,19	2,72	2,55	2,37
6,5	2,40	2,39	2,21	2,03	2,56	2,38	2,20	2,73	2,55	2,37
7	2,40	2,38	2,18	2,02	2,56	2,36	2,19	2,72	2,53	2,36
7,5	2,40	2,38	2,21	2,04	2,55	2,38	2,21	2,72	2,55	2,37
8	2,40	2,39	2,22	2,04	2,56	2,39	2,21	2,73	2,56	2,38
10	2,40	2,39	2,22	2,04	2,56	2,39	2,22	2,73	2,56	2,39
12	2,40	2,40	2,23	2,04	2,57	2,40	2,21	2,73	2,57	2,38
14	2,40	2,41	2,23	2,06	2,58	2,40	2,22	2,75	2,57	2,39
16	2,40	2,40	2,23	2,05	2,57	2,40	2,22	2,74	2,57	2,39
18	2,40	2,41	2,24	2,06	2,58	2,41	2,22	2,74	2,58	2,39
20	2,40	2,40	2,24	2,07	2,57	2,41	2,24	2,74	2,58	2,41

Como se observa en la Tabla 7.8, las combinaciones de máximos que se pueden emplear de forma fiable para estudiar la propagación por el interior del hormigón son Rh1-Ra1, Rh2-Ra2 y Rh3-Ra3. Ahora bien, esto sólo es suficientemente fiable mientras no se produzca el solape entre la onda directa y la reflejada del hormigón, porque en ese caso los tiempos de llegada se ven alterados y no se pueden considerar representativos con fiabilidad.

Tabla 7.9. Comparación de incrementos de tiempos teóricos y los obtenidos del modelado numérico para todas las combinaciones de máximos entre la onda directa y la reflejada en el hormigón.

		Δt_D^R (ns)								
		Medido en modelos numéricos para distintas combinaciones máximos								
d (cm)	Δt_D^R Teórico (ns)	Ra1-D1	Ra1-D2	Ra1-D3	Ra2-D1	Ra2-D2	Ra2-D3	Ra3-D1	Ra3-D2	Ra3-D3
0	0,00	0,39	0,20	0,00	0,67	0,48	0,28	0,90	0,71	0,50
2	0,13	-	0,19	-	-	0,39	-	-	-	-
4	0,27	0,38	0,18	-	0,55	0,35	-	0,73	0,54	-
4,5	0,30	0,38	0,18	-	0,55	0,35	-	0,74	0,53	-
5	0,33	0,39	0,18	-	0,56	0,36	-	0,74	0,54	-
5,5	0,37	0,41	0,19	-	0,58	0,37	-	0,76	0,54	-
6	0,40	0,43	0,21	-	0,61	0,39	-	0,79	0,56	-
6,5	0,43	0,44	0,23	-	0,62	0,41	-	0,80	0,59	-
7	0,47	0,48	0,28	-	0,67	0,48	-	0,84	0,65	-
7,5	0,50	0,52	0,31	-	0,69	0,48	-	0,86	0,65	-
8	0,53	0,55	0,37	0,22	0,72	0,54	0,39	0,90	0,71	0,56
10	0,67	0,67	0,49	0,32	0,84	0,66	0,49	1,02	0,83	0,67
12	0,80	0,80	0,62	0,44	0,96	0,79	0,61	1,15	0,98	0,80
14	0,93	0,92	0,74	0,57	1,10	0,91	0,75	1,27	1,09	0,92
16	1,07	1,06	0,88	0,70	1,23	1,05	0,87	1,41	1,23	1,06
18	1,20	1,20	1,00	0,82	1,36	1,16	0,99	1,55	1,35	1,17
20	1,33	1,33	1,14	0,97	1,49	1,30	1,12	1,66	1,47	1,30

De igual forma que en el caso anterior, en el caso de estudiar la diferencia de tiempos entre la directa y la primera reflexión, se comprobó que las combinaciones de máximos Ra1-D1, Ra2-D2 y Ra3-D3, son las que más se ajustan a los valores teóricos esperados. No obstante, para distancias por debajo de los 8 cm, los valores obtenidos, incluso para estos máximos, tienen menor grado de aproximación a los teóricos.

Es por ello, que se considera interesante, analizar los resultados sin tener en cuenta la reflexión intermedia (Ra) y sólo los incrementos de tiempo entre la directa y el metal. Se trata del caso en el que la onda se propaga por el aire y el hormigón y la expresión utilizada para calcular el tiempo de propagación teórico es:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot d}{30} + \frac{2 \cdot h}{10} = \frac{2 \cdot d}{30} + 2,4 \quad \text{ec 7.5}$$

Tabla 7.10. Comparación de incrementos de tiempos teóricos y los obtenidos del modelado numérico para todas las combinaciones de máximos entre la onda directa y la reflejada en el metal.

		Δt_D^R (ns)								
		Medido en modelos numéricos para distintas combinaciones máximos								
d (cm)	Δt_D^R Teórico (ns)	Rh1-D1	Rh1-D2	Rh1-D3	Rh2-D1	Rh2-D2	Rh2-D3	Rh3-D1	Rh3-D2	Rh3-D3
0	2,40	2,44	2,25	2,04	2,61	2,42	2,22	2,78	2,59	2,38
2	2,53	-	2,48	-	-	2,65	-	-	2,82	-
4	2,67	2,73	2,53	-	2,89	2,70	-	3,06	2,86	-
4,5	2,70	2,74	2,53	-	2,91	2,70	-	3,08	2,87	-
5	2,73	2,75	2,55	-	2,93	2,72	-	3,09	2,88	-
5,5	2,77	2,78	2,56	-	2,95	2,73	-	3,11	2,90	-
6	2,80	2,81	2,59	-	2,98	2,76	-	3,15	2,93	-
6,5	2,83	2,83	2,62	-	3,00	2,79	-	3,17	2,96	-
7	2,87	2,86	2,66	-	3,03	2,84	-	3,20	3,01	-
7,5	2,90	2,90	2,69	-	3,07	2,86	-	3,23	3,03	-
8	2,93	2,94	2,75	2,60	3,11	2,92	2,77	3,28	3,10	2,95
10	3,07	3,06	2,88	2,71	3,23	3,05	2,88	3,40	3,22	3,05
12	3,20	3,20	3,02	2,84	3,37	3,19	3,01	3,53	3,36	3,18
14	3,33	3,33	3,15	2,98	3,50	3,31	3,15	3,67	3,48	3,32
16	3,47	3,46	3,28	3,10	3,63	3,45	3,28	3,80	3,62	3,44
18	3,60	3,61	3,41	3,23	3,77	3,57	3,40	3,94	3,74	3,56
20	3,73	3,73	3,54	3,37	3,90	3,71	3,53	4,07	3,88	3,71

Una vez más, en la Tabla 7.10 se comprueba que las combinaciones de máximos *Rh1-D1*, *Rh2-D2* y *Rh3-D3*, son las que más se ajustan a los valores teóricos esperados. Además, en este caso se observa como incluso para los valores de distancia de separaciones menores de 8 cm, los valores están muy próximos a los teóricos.

En conclusión, en dicha tabla se puede observar como los tiempos de propagación experimentales coinciden con los que deberían ser reales para las siguientes combinaciones de máximos. Es por ello que se puede admitir que el estudio es correcto y además nos ha aportado una información relevante sobre las señales, sus máximos y los solapes que se producían y alteraban sus parámetros.

7.3. Efecto de las propiedades del hormigón en las señales de georradar

Los pasos a seguir en la realización del estudio dependiendo de las propiedades del material, en este caso hormigón, son los mismos que los de la calibración de la antena. A continuación, se van a explicar por pasos para poder ver las conclusiones a las que se llegaron, partiendo en primer lugar de la descripción de los resultados obtenidos y a continuación la realización de su análisis e interpretación.

7.3.1. Composición del hormigón

Resultados

La variación en la composición del hormigón da lugar a una variación de la permitividad dieléctrica. Es por eso que el primer paso en el estudio de las propiedades de los materiales es la variación de la permitividad relativa, la cual se ha ido variando en torno a los datos reales de un hormigón típico. En el apartado 2.4.1 ya se ha explicado cómo puede afectar la variación de este parámetro en el hormigón y los rangos de variación típicos. Dado el gran volumen de datos con los que se trabajó, todas las señales modeladas numéricamente, así como las tablas resultantes de su análisis completas se adjuntan en el Anexo 4. Efecto de la composición del hormigón en las señales de georradar.

En la Figura 7.16 se puede ver el modelo numérico resultante de la programación con el software *gprMax*, en el que la antena estaba colocada sobre el bloque de hormigón y éste tendría una permitividad relativa de 13. Se puede ver que la señal modelada dispone de tres ondas, cada una formada por tres máximos. En primer lugar se observaba la existencia de la onda directa, en la cual se podían apreciar perfectamente sus tres máximos ($D1$, $D2$ y $D3$). Después la reflejada en el hormigón, siendo sus máximos $Ra1$, $Ra2$ y $Ra3$. Se aprecia como la onda directa está condicionada por la reflejada en el hormigón al solaparse dos de sus máximos, $D3$ y $Ra1$, con lo que sus valores no se saben seguro si son sus valores independientes, algo que se comprobará más tarde. En la reflexión que ocurría como consecuencia del contraste de propiedades entre el hormigón y el reflector metálico también aparecían 3 máximos ($Rh1$, $Rh2$ y $Rh3$), siendo estos los de amplitudes más pequeñas, ya que el recorrido por el interior del medio hacía que se atenuaran.

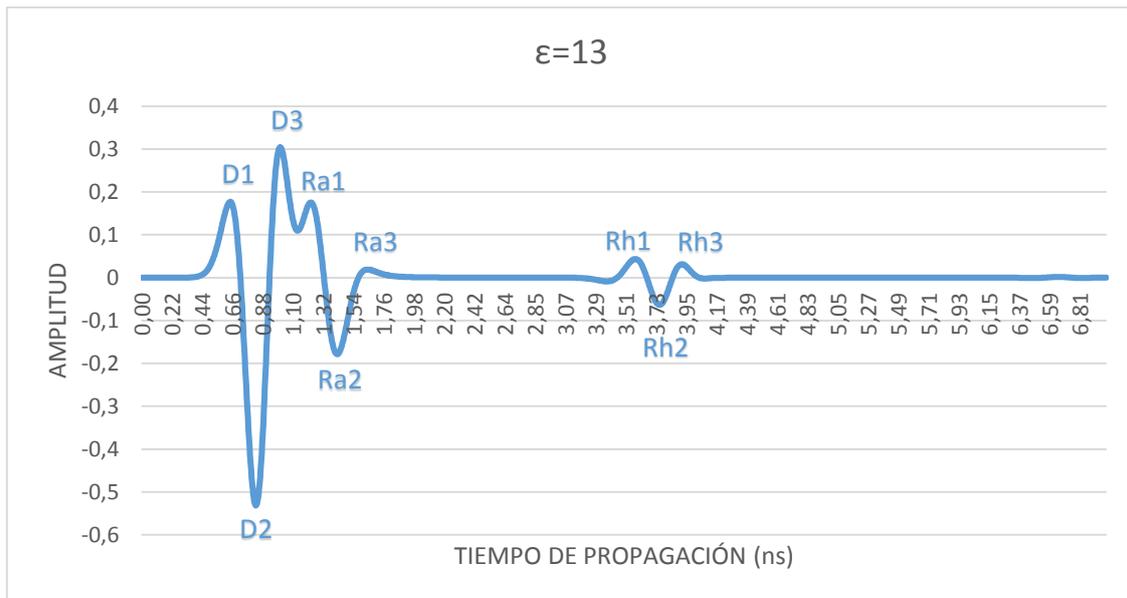


Figura 7.16. Modelado numérico de la señal con la antena sobre la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base del hormigón, siendo la permitividad del hormigón 13.

En las Figura 7.17 y Figura 7.18 se puede observar que no todos los modelos numéricos que se generaron tenían tres máximos en cada una de sus ondas, sino que cuanto menor era su permitividad relativa, más se juntaban la onda directa y la reflejada en el hormigón y acababan combinándose. Es por ello que se ha dividido en dos su representación gráfica, en la primera de ellas (Figura 7.17) la permitividad es baja, y no se aprecian los 3 máximos en todos los modelos, sino que *D3* es inexistente por estar solapado con *Ra1*. Por otra parte, con los valores de permitividad más altos, entre 10 y 15, como se observa en la Figura 7.18, sí se distinguían todos los máximos de las señales.

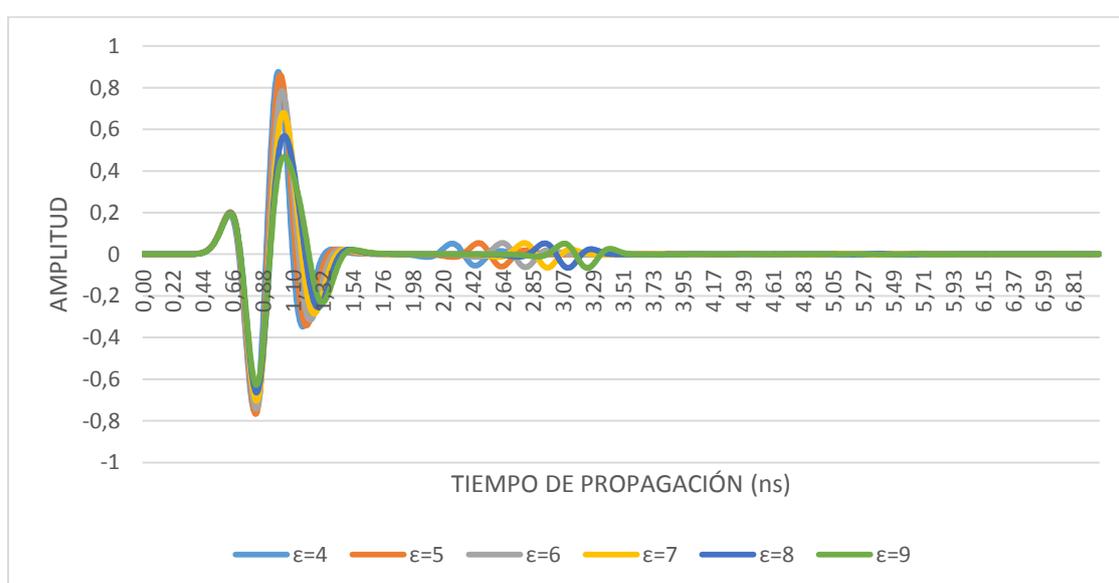


Figura 7.17. Modelado numérico de la señal con la antena de 2 GHz situada sobre la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base, variando la permitividad del hormigón entre 4 y 9.

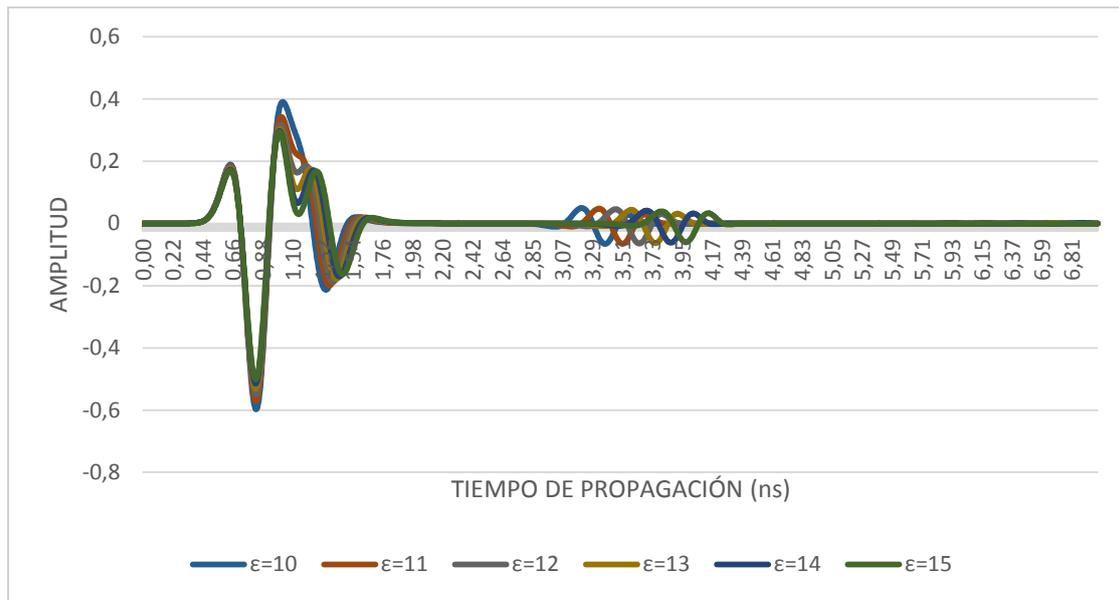


Figura 7.18. Modelado numérico de la señal con la antena de 2 GHz situada sobre la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base, variando la permitividad del hormigón entre 10 y 15.

Análisis e interpretación de resultados

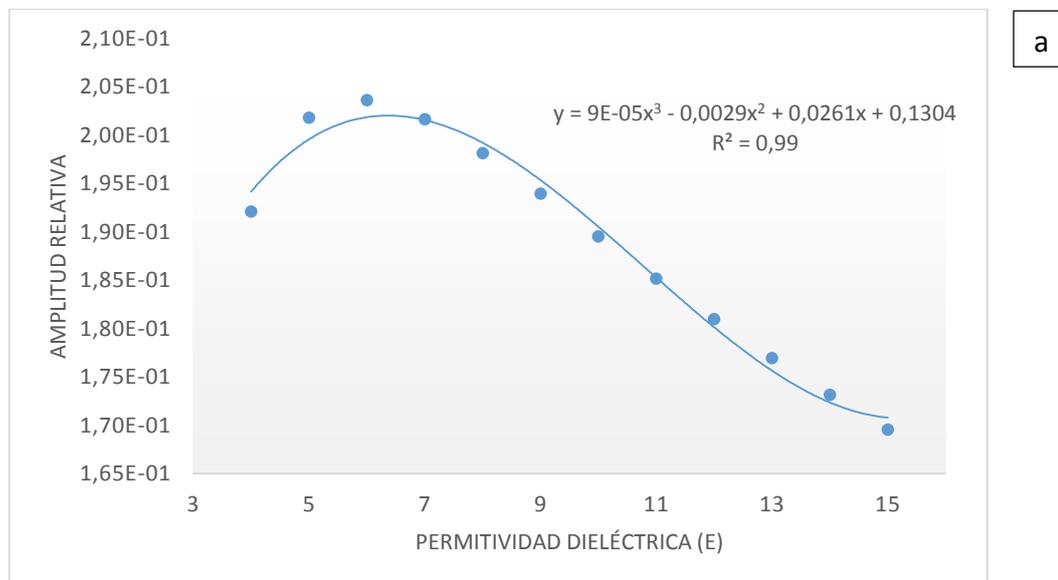
Al igual que en el apartado anterior, se realizó una tabla resumen de las diferentes amplitudes de los máximos y los mínimos de las ondas tanto directa como reflejadas en el hormigón y en el metal, indicando en qué *sample* ocurrían así como el tiempo correspondiente de llegada. Como se ha podido observar en la figura anterior y ya se ha comentado, no todos los modelos numéricos presentaban todos los máximos, sino que *D3*, en la onda directa, se superponía con *Ra1*. En la Tabla 7.11 se puede observar dicho resumen correspondiente con la onda directa.

Al estudiar el patrón de comportamiento de las amplitudes en relación a la onda directa, se puede observar como la amplitud *D1* tenía su máximo valor cuando la permitividad era 6, teniendo una disminución significativa conforme va aumentando la permitividad eléctrica (Figura 7.19a). Sin embargo, los tiempos de llegada de este máximo no se veían afectados por el cambio de permitividad. Esto también ocurría exactamente igual con el máximo *D2* (Figura 7.19b). Como ya se ha comentado, *D3* no se identificaba en la mayoría de los modelos, es por ello que no se pudo representar. Por debajo de una permitividad de 6, las amplitudes disminuían como consecuencia de la interferencia entre la reflejada en el hormigón y la directa.

Tabla 7.11. Comparativa de máximos que componen la onda directa para diferentes valores de permitividad.

ϵ	D1			D2			D3		
	A	s	t (ns)	A	s	t (ns)	A	s	t (ns)
4	1,92E-01	166	0,64	-7,54E-01	214	0,82	-	-	-
5	2,02E-01	167	0,64	-7,68E-01	215	0,82	-	-	-
6	2,04E-01	167	0,64	-7,43E-01	217	0,83	-	-	-
7	2,02E-01	167	0,64	-7,04E-01	217	0,83	-	-	-
8	1,98E-01	168	0,64	-6,64E-01	217	0,83	-	-	-
9	1,94E-01	168	0,64	-6,28E-01	217	0,83	-	-	-
10	1,90E-01	168	0,64	-5,98E-01	217	0,83	-	-	-
11	1,85E-01	168	0,64	-5,72E-01	216	0,83	-	-	-
12	1,81E-01	168	0,64	-5,50E-01	216	0,83	3,17E-01	263	1,01
13	1,77E-01	168	0,64	-5,32E-01	216	0,83	3,04E-01	262	1,01
14	1,73E-01	168	0,64	-5,15E-01	216	0,83	2,98E-01	261	1,00
15	1,70E-01	168	0,64	-5,01E-01	216	0,83	2,94E-01	261	1,00

En las Figura 7.19 a y b, se presentan las ecuaciones de ajuste entre la variación de la permitividad dieléctrica y las amplitudes y como se observa en estas figuras los mejores ajustes son funciones polinómicas de 3er grado, como se deducen de sus altos coeficientes de correlación.



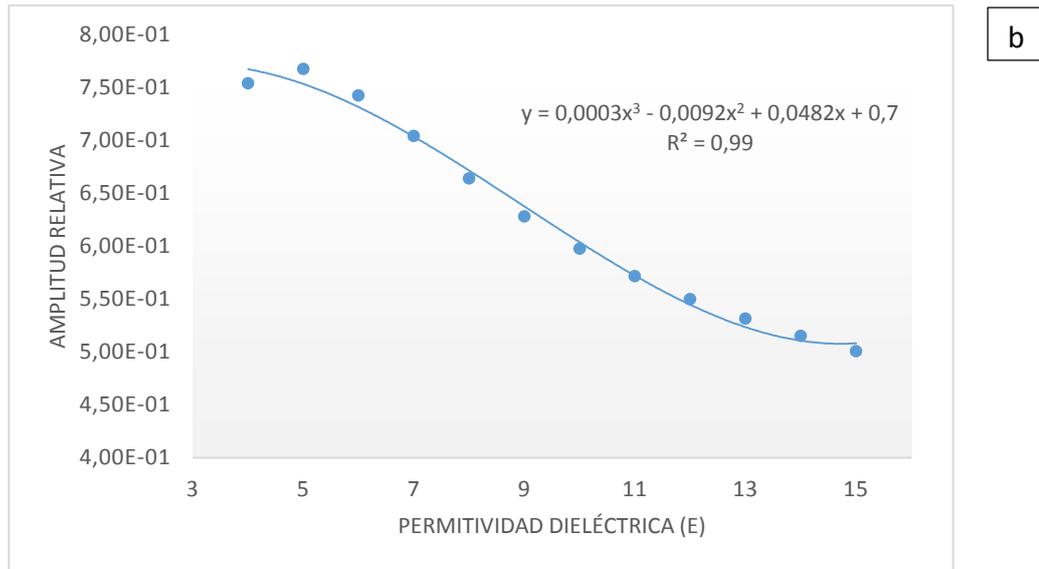


Figura 7.19. Variación de las amplitudes relativas con la variación de la permitividad dieléctrica (a) D1 y (b) D2.

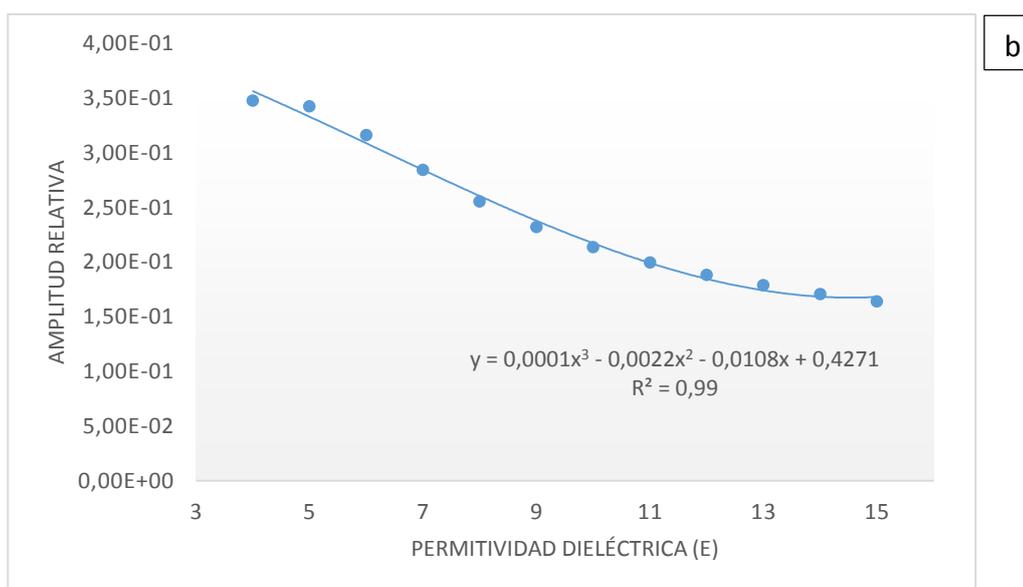
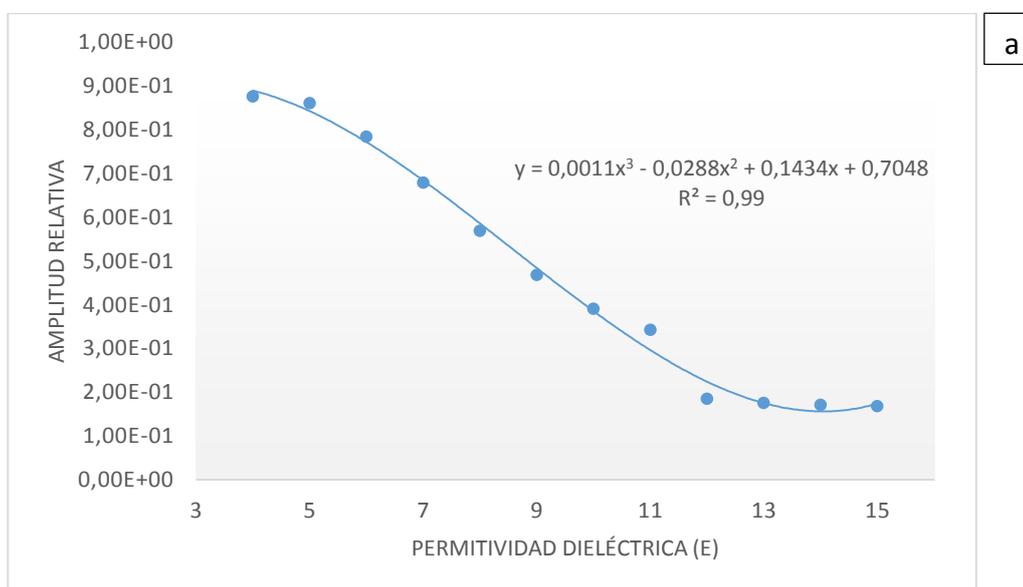
A continuación, la Tabla 7.12 muestra las diferentes amplitudes, *samples* y tiempos de llegada para cada una de las permitividades de la onda reflejada en el hormigón.

Tabla 7.12. Comparativa de máximos que componen la onda reflejada en el hormigón para diferentes valores de permitividad.

ϵ	Ra1			Ra2			Ra3		
	A	s	t (ns)	A	s	t (ns)	A	s	t (ns)
4	8,76E-01	258	0,99	-3,48E-01	305	1,17	2,31E-02	361	1,39
5	8,61E-01	262	1,01	-3,42E-01	312	1,2	2,38E-02	370	1,42
6	7,84E-01	266	1,02	-3,16E-01	319	1,23	2,35E-02	378	1,45
7	6,79E-01	268	1,03	-2,84E-01	326	1,25	2,28E-02	386	1,48
8	5,69E-01	270	1,04	-2,55E-01	334	1,28	2,20E-02	394	1,51
9	4,68E-01	270	1,04	-2,32E-01	342	1,31	2,12E-02	399	1,53
10	3,91E-01	267	1,02	-2,14E-01	349	1,34	2,06E-02	408	1,57
11	3,43E-01	265	1,02	-2,00E-01	356	1,37	2,00E-02	414	1,59
12	1,85E-01	312	1,27	-1,88E-01	363	1,39	1,94E-02	420	1,61
13	1,75E-01	319	1,23	-1,79E-01	369	1,42	1,89E-02	426	1,64
14	1,71E-01	326	1,25	-1,71E-01	375	1,44	1,85E-02	432	1,66
15	1,68E-01	331	1,27	-1,64E-01	381	1,46	1,81E-02	438	1,68

En cuanto a la onda reflejada en el hormigón, se puede observar que hay un descenso considerable de las amplitudes conforme va aumentando la permitividad, al igual que ocurría en la onda directa. Sin embargo, en este caso también varían los tiempos de llegada, aumentando conforme aumenta ϵ . Se puede ver un gran salto en las amplitudes de *Ra1* cuando pasa la permitividad de 11 a 12. Este es el momento en el que se puede diferenciar *D3* y *Ra1* (Figura 7.20a). En cuanto a *Ra2* y *Ra3* (Figura 7.20 b y c), actuaban de la misma forma que en el caso de la directa.

En este caso, las ecuaciones de ajuste entre la variación de la permitividad dieléctrica y las amplitudes que mejor representaban el comportamiento de la amplitud eran también funciones polinómicas de 3er grado, como se puede ver en las Figura 7.20 a, b y c.



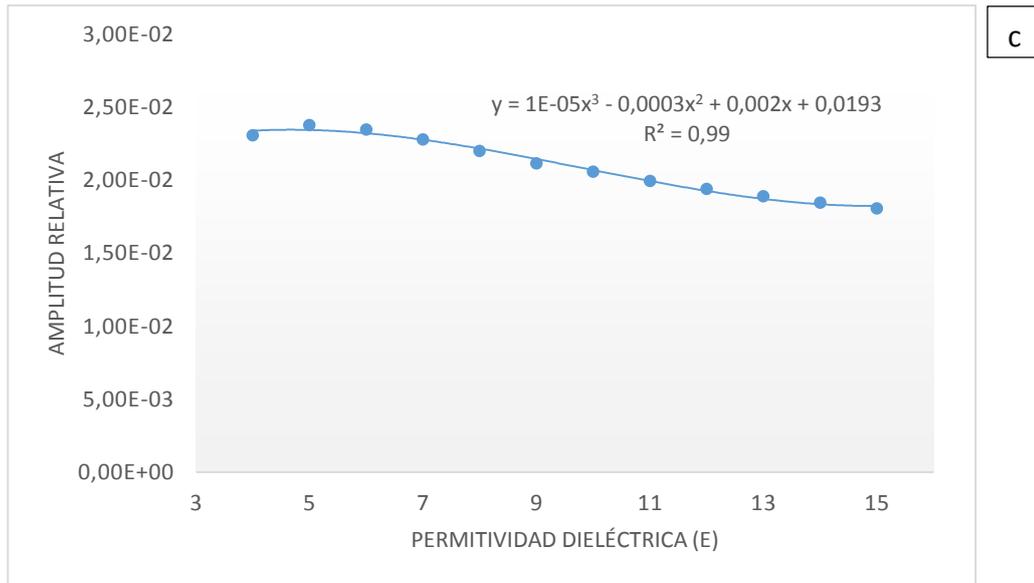


Figura 7.20. Variación de las amplitudes relativas con la variación de la permitividad dieléctrica (a) Ra1, (b) Ra2 y (c) Ra3.

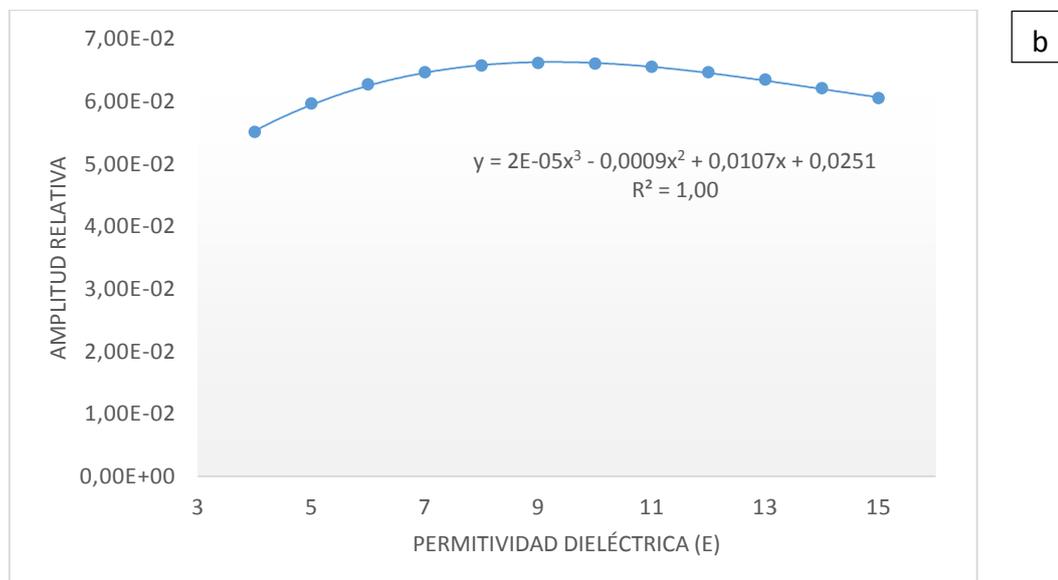
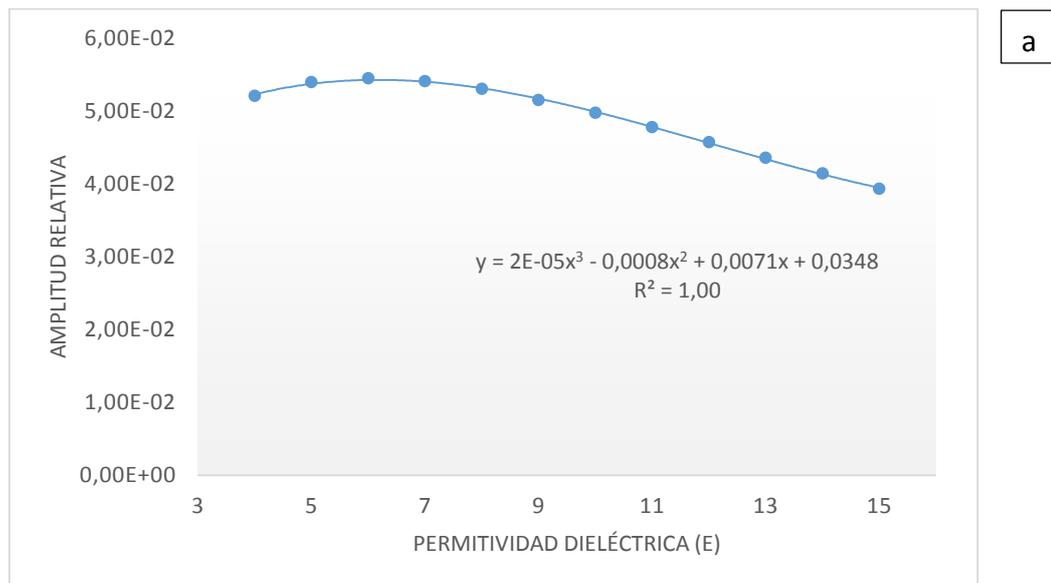
A continuación, en la Tabla 7.13 se muestran los máximos de la reflejada en el metal, con sus máximas amplitudes, así como el tiempo de llegada y sus *samples*.

Tabla 7.13. Comparativa de máximos que componen la onda reflejada en el reflector metálico para diferentes valores de permitividad.

ϵ	Rh1			Rh2			Rh3		
	A	s	t (ns)	A	s	t (ns)	A	s	t (ns)
4	5,20E-02	589	2,27	-5,51E-02	632	2,43	1,64E-02	678	2,61
5	5,39E-02	639	2,46	-5,97E-02	682	2,62	1,89E-02	727	2,8
6	5,45E-02	684	2,63	-6,27E-02	728	2,8	2,11E-02	772	2,97
7	5,41E-02	726	2,79	-6,46E-02	770	2,96	2,30E-02	814	3,13
8	5,30E-02	765	2,94	-6,57E-02	809	3,11	2,47E-02	852	3,28
9	5,15E-02	801	3,08	-6,61E-02	846	3,26	2,63E-02	889	3,42
10	4,97E-02	836	3,22	-6,60E-02	881	3,39	2,77E-02	923	3,55
11	4,78E-02	869	3,34	-6,55E-02	914	3,52	2,90E-02	956	3,68
12	4,57E-02	901	3,47	-6,46E-02	946	3,64	3,02E-02	988	3,8
13	4,36E-02	931	3,58	-6,35E-02	976	3,76	3,13E-02	1018	3,92
14	4,14E-02	960	3,69	-6,21E-02	1006	3,87	3,23E-02	1048	4,03
15	3,93E-02	988	3,8	-6,05E-02	1034	3,98	3,31E-02	1077	4,15

Por último, en la onda reflejada en el metal se puede ver como la amplitud $Rh1$ va disminuyendo conforme aumenta la permitividad, al contrario que $Rh2$ y $Rh3$, que aumentan.

Lo mismo sucedía en la onda reflejada en el hormigón, ya que como se puede ver en las Figura 7.21 a, b y c, las ecuaciones de ajuste entre la variación de la permitividad dieléctrica y las amplitudes que mejor representaban el comportamiento son como funciones polinómicas de 3er grado, como se deducen de sus altos coeficientes de correlación que se obtuvieron.



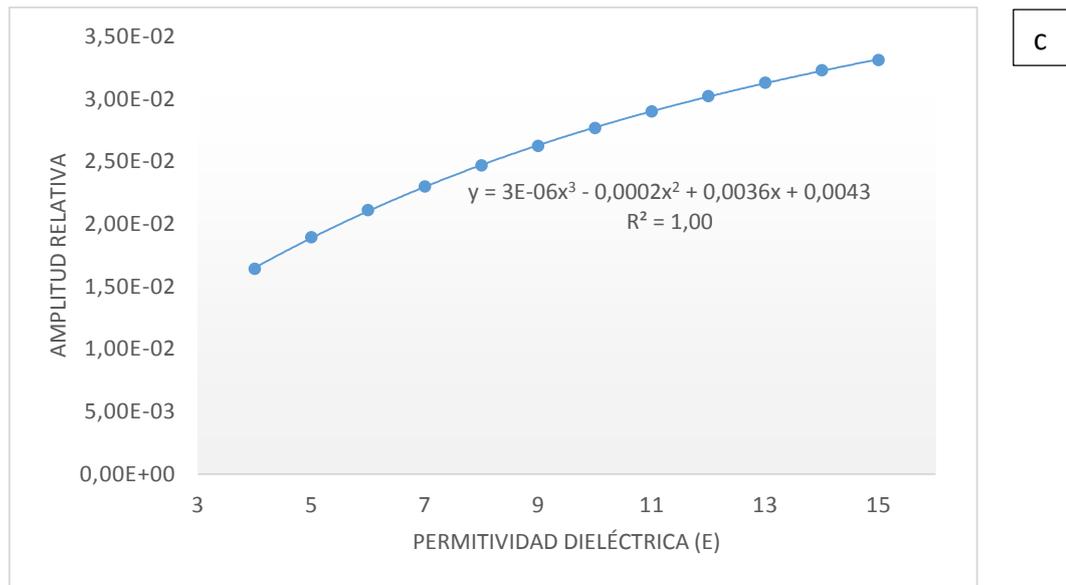


Figura 7.21. Variación de las amplitudes relativas con la variación de la permitividad dieléctrica (a) Rh1, (b) Rh2 y (c) Rh3.

Sabiendo que la velocidad de propagación del hormigón y que el espacio que viaja la onda es dos veces el espesor del bloque de hormigón, se obtiene el tiempo de propagación para cada permitividad considerada. Esto nos sirve para comprobar cuál es la combinación de máximos más adecuada para poder medir en las señales los tiempos de llegada y poder posteriormente calcular la permitividad dieléctrica en el caso de tener registros experimentales.

En las Tablas 7.14 y 7.15 se pueden ver en negrita marcados cuales son los valores más próximos a los valores teóricos esperados, y por lo tanto las propiedades que podrían ser más representativas del medio a estudio.

En la Tabla 7.14 se observa que en el caso de que se puedan identificar todos los máximos la mejor combinación es la *Rh3-Ra1*. Ahora bien, como se ha visto anteriormente hay casos en los que la *Ra1* se encuentra solapada con la *D3* y por tanto no es sencillo identificarla y es necesario buscar otras alternativas.

Tabla 7.14. Comparación de incrementos de tiempos teóricos y los obtenidos del modelado numérico para todas las combinaciones de máximos entre la onda reflejada en el metal y la reflejada en el hormigón.

Valores teóricos interior hormigón			Δt_D^R (ns)								
			<i>Medido en modelos numéricos para distintas combinaciones máximos</i>								
ε	v	Δt	Rh1-Ra1	Rh1-Ra2	Rh1-Ra3	Rh2-Ra1	Rh2-Ra2	Rh2-Ra3	Rh3-Ra1	Rh3-Ra2	Rh3-Ra3
4	15,00	1,60	1,27	1,09	0,88	1,44	1,26	1,04	1,62	1,44	1,22
5	13,42	1,79	1,45	1,26	1,04	1,62	1,42	1,20	1,79	1,60	1,37
6	12,25	1,96	1,61	1,41	1,18	1,78	1,57	1,35	1,95	1,74	1,52
7	11,34	2,12	1,76	1,54	1,31	1,93	1,71	1,48	2,10	1,88	1,65
8	10,61	2,26	1,91	1,66	1,43	2,08	1,83	1,60	2,24	1,99	1,76
9	10,00	2,40	2,04	1,77	1,55	2,22	1,94	1,72	2,38	2,11	1,89
10	9,49	2,53	2,19	1,88	1,65	2,36	2,05	1,82	2,53	2,21	1,98
11	9,05	2,65	2,33	1,98	1,75	2,50	2,15	1,93	2,66	2,31	2,09
12	8,66	2,77	2,27	2,07	1,85	2,44	2,24	2,03	2,60	2,41	2,19
13	8,32	2,88	2,36	2,16	1,94	2,53	2,34	2,12	2,69	2,50	2,28
14	8,02	2,99	2,44	2,25	2,03	2,62	2,43	2,21	2,78	2,59	2,37
15	7,75	3,10	2,53	2,34	2,12	2,71	2,51	2,29	2,87	2,68	2,46

En la Tabla 7.15 se presentan los incrementos de tiempo que se calcularon teniendo en cuenta la onda directa y la reflejada en el metal. Las combinaciones de máximos *Rh1-D1*, *Rh2-D2* y *Rh3-D3* de la onda reflejada con respecto a la onda directa son las que más se ajustan a los valores teóricos esperados.

Tabla 7.15. Comparación de incrementos de tiempos teóricos y los obtenidos del modelado numérico para todas las combinaciones de máximos entre la onda directa y la reflejada en el metal.

Valores teóricos			Δt_D^R (ns)								
Interior hormigón			Medido en modelos numéricos para distintas combinaciones máximos								
ε	ν	Δt	Rh1-D1	Rh1-D2	Rh1-D3	Rh2-D1	Rh2-D2	Rh2-D3	Rh3-D1	Rh3-D2	Rh3-D3
4	15,00	1,60	1,63	1,44	-	1,79	1,61	-	1,97	1,79	-
5	13,42	1,79	1,82	1,63	-	1,98	1,80	-	2,16	1,97	-
6	12,25	1,96	1,99	1,80	-	2,16	1,97	-	2,33	2,14	-
7	11,34	2,12	2,15	1,96	-	2,32	2,13	-	2,49	2,30	-
8	10,61	2,26	2,30	2,11	-	2,47	2,28	-	2,63	2,44	-
9	10,00	2,40	2,44	2,25	-	2,61	2,42	-	2,78	2,59	-
10	9,49	2,53	2,57	2,38	-	2,75	2,56	-	2,91	2,72	-
11	9,05	2,65	2,70	2,51	-	2,87	2,69	-	3,03	2,85	-
12	8,66	2,77	2,82	2,64	2,46	3,00	2,81	2,63	3,16	2,97	2,79
13	8,32	2,88	2,94	2,75	2,58	3,11	2,93	2,75	3,27	3,09	2,91
14	8,02	2,99	3,05	2,86	2,69	3,23	3,04	2,87	3,39	3,20	3,03
15	7,75	3,10	3,16	2,97	2,80	3,33	3,15	2,98	3,50	3,32	3,14

Con objeto de estudiar el grado de ajuste entre estas combinaciones de máximos se calcularon las ecuaciones que mejor representaban el comportamiento entre los valores teóricos y los de las combinaciones de máximos *Rh1-D1*, *Rh2-D2* y *Rh3-D3*. No obstante, es importante resaltar que de las 3 combinaciones de máximos la más sencilla de obtener será la *Rh2-D2*. Esto es debido a que la combinación *Rh1-D1*, en algunos casos la *Rh1* es muy pequeña por verse muy atenuada y no es posible registrarla y como ya se ha comentado la combinación con *D3* no siempre es posible obtenerla por encontrarse este máximo solapado con la *Ra1*.

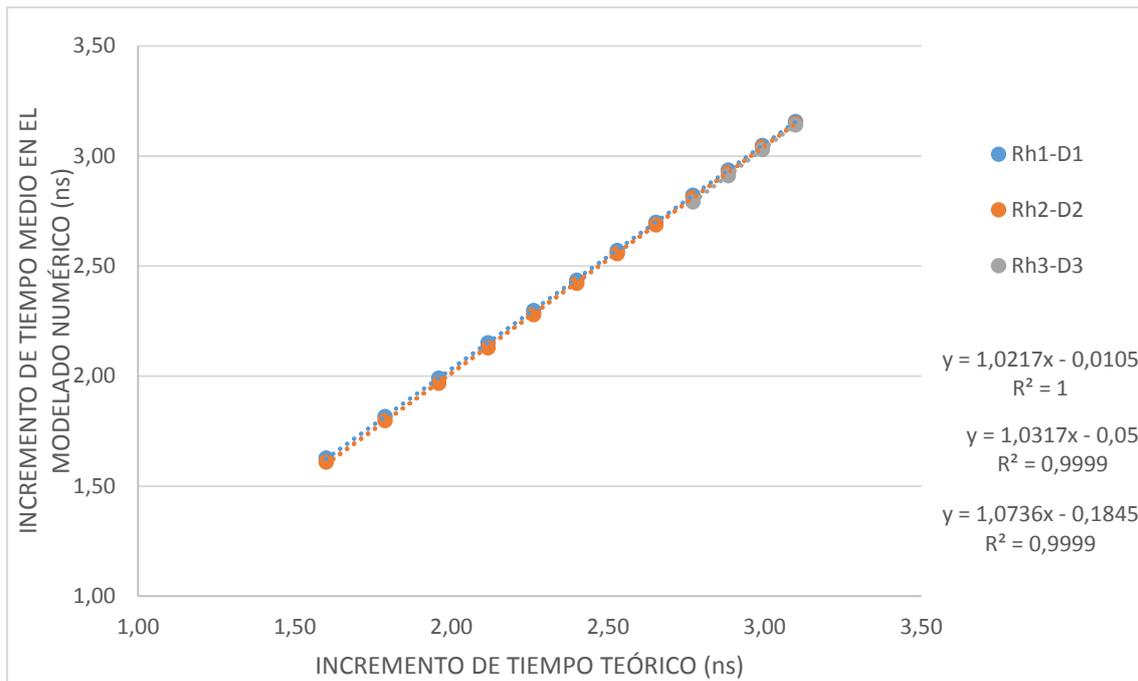


Figura 7.22. Ajuste entre incrementos de tiempo de llegada para las combinaciones de Rh1-D1, Rh2-D2 Y Rh3-D3 modelados y teóricos al emitir al bloque de hormigón y reflejarse en el metal.

Tal y como se observa en la Figura 7.22 el grado de correlación es muy alto, ya que tanto la pendiente como el coeficiente de correlación se encontraban muy próximos a la unidad.

Estos resultados son muy interesantes, puesto que la información que nos está proporcionando es cuáles son las combinaciones de máximos que deberemos medir en los registros experimentales para poder posteriormente calcular las propiedades dieléctricas en hormigones de diferentes composiciones.

7.3.2. Contenido de agua

Resultados

Una vez estudiada la variación que se produce como consecuencia de las diferentes composiciones de hormigón, el otro parámetro del hormigón que se estudió era el efecto de la presencia del agua, cuya consecuencia es un aumento de la permitividad dieléctrica y de la conductividad. En el apartado 2.4.2 se ha explicado cómo puede afectar la variación de este parámetro en el hormigón. Dado el gran volumen de datos con los que se trabajó, todas las señales modeladas numéricamente, así como las tablas resultantes de su análisis completas se adjuntan en el Anexo 5. Efecto del contenido de agua en las señales de georradar.

Para la realización de dicho estudio, se crearon los modelos necesarios en los cuales la antena siempre estaba apoyada sobre el bloque de hormigón. Por otra parte, se crearon los modelos necesarios en los que variaba la permitividad entre 4,5 y 8,5, cada 0,5 y conductividad entre 10^{-1} y 10^{-9} S/m, con todas sus posibles combinaciones, lo que dio lugar al estudio de 81 señales modeladas numéricamente. En la Figura 7.23 se puede ver un ejemplo en el que la permitividad dieléctrica era igual a 5 y la conductividad igual a 10^{-4} S/m. Como se puede observar, también se registraron los máximos de la onda directa y la onda reflejada, superponiéndose dos de ellos (*D3* y *Ra1*). Aunque el máximo *Ra3* se puede apreciar, es muy sutil, por lo que en el estudio no tendría validez y se descartó su estudio.

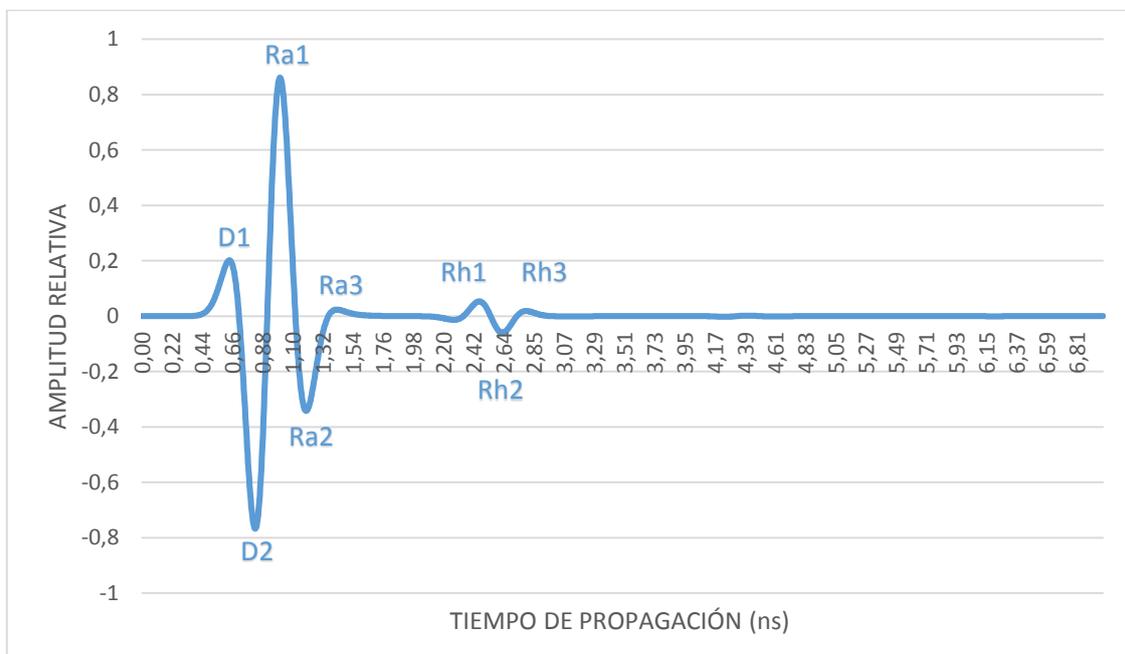


Figura 7.23. Modelado numérico de las señales con la antena de 2 GHz situada sobre la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base, con permitividad 5 y conductividad 10^{-4} S/m.

Sin embargo, cuando se comparaban los modelos numéricos en los que la permitividad era la misma y era la conductividad la que variaba, como por ejemplo en la Figura 7.24 donde ϵ es 5 en todos los modelos y σ va disminuyendo, se observó que para valores de conductividad entre 10^{-2} y 10^{-9} S/m las señales registradas eran exactamente las mismas. Esto ocurría para todos los casos de permitividad estudiados.

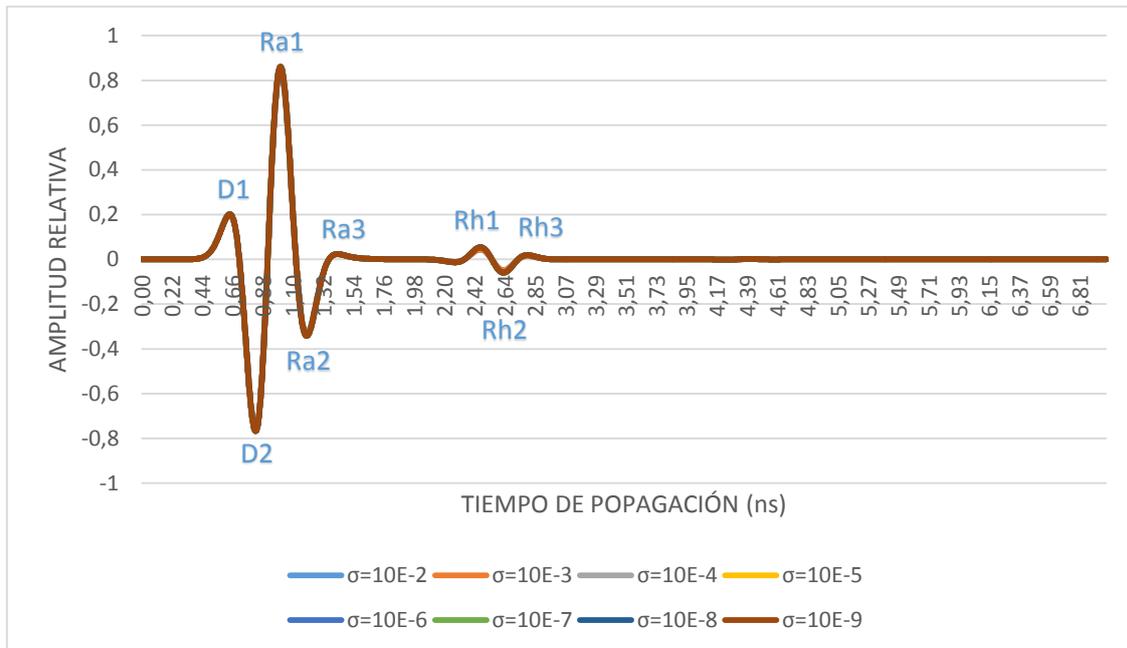


Figura 7.24. Modelado numérico de las señales con la antena de 2 GHz situada sobre la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base, con permitividad 5 y variación de conductividad entre 10^{-2} y 10^{-9} S/m.

Análisis e interpretación de resultados

Tal y como se desprende de los resultados anteriormente mencionados, para todos los casos de conductividad entre 10^{-2} y 10^{-9} S/m, las señales registradas eran las mismas. Las únicas diferencias significativas se registraron entre las conductividades de 10^{-1} y 10^{-2} S/m. En la Figura 7.25 se presentan ambas señales y como se puede observar las diferencias entre ambas son muy pequeñas.

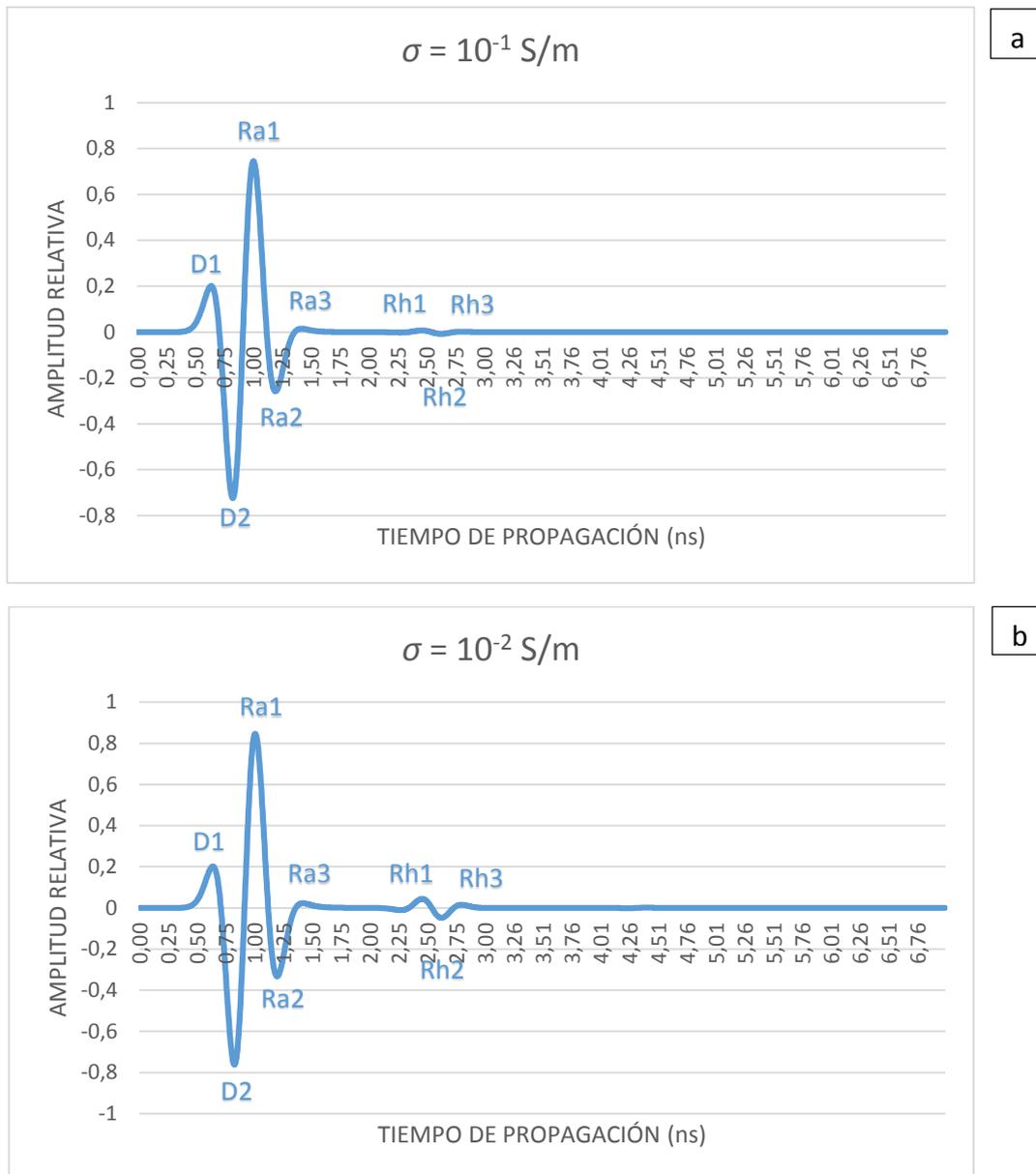


Figura 7.25. Modelado numérico de las señales con la antena de 2 GHz situada sobre la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base, con permitividad 5 y conductividad entre 10^{-1} (a) y 10^{-2} S/m (b).

Para una mejor interpretación de estas diferencias, dado lo pequeñas que eran se midieron los tiempos de llegada (t), los *samples* (s) y las amplitudes de cada uno de los máximos. A modo de ejemplo en la Tabla 7.16 se presentan los valores obtenidos. Por una parte, se comprueba que independientemente de la conductividad aplicada los tiempos de llegada eran los mismos para cada uno de los máximos. Por otra, se corroboró que efectivamente a partir de una conductividad de 10^{-2} S/m o menor todos los parámetros obtenidos obtenían el mismo valor.

Tabla 7.16. Samples, tiempos de llegada (ns) y amplitudes de los modelos numéricos con diferente conductividad y permitividad 5.

Pico	Sample	Tiempo (ns)	σ (S/m)								
			10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
D1	167	0,64	0,201	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202
D2	215	0,83	-0,724	-0,762	-0,762	-0,768	-0,768	-0,768	-0,768	-0,768	-0,768
Ra1	262	1,01	0,745	0,847	0,847	0,861	0,861	0,861	0,861	0,861	0,861
Ra2	312	1,20	-0,259	-0,333	-0,333	-0,342	-0,342	-0,342	-0,342	-0,342	-0,342
Rh1	641	2,47	0,007	0,044	0,044	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054
Rh2	682	2,63	-0,008	-0,049	-0,049	-0,060	-0,060	-0,060	-0,060	-0,060	-0,060
Rh3	727	2,80	0,002	0,015	0,015	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019

Con la creación de tablas como la Tabla 7.16 para cada uno de los modelos de diferentes permitividades y conductividades, se pudo profundizar más en el análisis y generar la Tabla 7.17, en la que se resumen los tiempos de propagación de cada uno de los máximos.

Tabla 7.17. Cuadro resumen de los tiempos de propagación en ns en cada uno de los máximos para permitividades entre 4,5 y 8,5.

Pico	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5
D1	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
D2	0,83	0,83	0,83	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
Ra1	1,00	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04
Ra2	1,19	1,20	1,21	1,23	1,24	1,26	1,27	1,28	1,30
Rh1	2,37	2,47	2,56	2,63	2,72	2,80	2,87	2,95	3,02
Rh2	2,53	2,63	2,72	2,80	2,88	2,96	3,04	3,11	3,19
Rh3	2,71	2,80	2,89	2,97	3,05	3,13	3,21	3,28	3,35

Como se puede observar, los tiempos de los máximos de la onda directa (D1 y D2) no se veían afectados, ya sea cambiando su permitividad y su conductividad, como era de esperar. Esto es debido a que la onda directa no tiene cambios ya que la antena era la misma y en todos los casos estaba sobre el bloque de hormigón, lo que hace que la propagación fuera la misma.

Sin embargo, los tiempos de las dos reflejadas lógicamente se retrasaban como consecuencia de que la permitividad dieléctrica aumentaba. Los tiempos de llegada de la reflexión del hormigón (Ra1 y Ra2) puede observarse que conforme aumentaba la permitividad también aumenta, pero sutilmente. Sin embargo, los tiempos de

propagación de la reflexión del metal se puede ver cómo conforme aumentaba ϵ , estos tiempos aumentan en mayor medida. Además, se puede observar que el aumento era proporcional de unos picos con otros. Esto es debido a que cuanto mayor es la permitividad dieléctrica más capacidad de polarización tiene el medio. Por lo tanto, la velocidad de propagación será menor y tardará más tiempo la señal en recorrer el mismo espacio, tal y como también se comprobó en el apartado anterior.

No obstante, a todo lo comentado anteriormente, si se tiene en cuenta cada permitividad dieléctrica en sí mismas, se comprueba que si se variaba la conductividad los tiempos de llegada de los máximos no variaban. Los parámetros que variaban eran las amplitudes. En la Tabla 7.18 se presentan las amplitudes y el porcentaje de variación que suponía para cada permitividad estudiada variar la conductividad de 10^{-2} S/m a 10^{-1} S/m, denominado factor de pérdida. Este factor nos da la proporción de amplitudes en tanto por ciento que disminuía la amplitud para cada uno de los máximos al aumentar la conductividad.

Tabla 7.18. Factor de pérdida de amplitud al aumentar la conductividad a 10^{-1} S/m.

ϵ	D1	D2	Ra1	Ra2	Rh1	Rh2	Rh3
4,5	-0,15	-3,75	-11,19	-8,16	-3,64	-3,99	-1,26
5	-0,15	-3,78	-10,20	-7,41	-3,67	-4,10	-1,33
5,5	-0,18	-3,63	-9,07	-6,76	-3,67	-4,18	-1,39
6	-0,27	-3,30	-7,85	-6,20	-3,65	-4,24	-1,45
6,5	-0,32	-2,98	-6,65	-5,74	-3,61	-4,28	-1,51
7	-0,36	-2,63	-5,42	-5,37	-3,57	-4,30	-1,56
7,5	-0,38	-2,29	-4,22	-5,07	-3,51	-4,31	-1,60
8	-0,38	-1,97	-3,00	-4,77	-3,44	-4,30	-1,64
8,5	-0,40	-1,68	-1,84	-4,65	-3,37	-4,28	-1,68

Como se puede ver en la Tabla 7.18, todos los valores son negativos ya que al aumentar la conductividad las amplitudes disminuyen y el porcentaje de disminución de las amplitudes con respecto a la conductividad 10^{-2} S/m depende de cada máximo. En primer lugar, el máximo D1 se puede ver que la variación del porcentaje de su amplitud es apenas imperceptible. En el caso de Rh1 y Rh2 la variación (en valor absoluto) va aumentando a medida que aumenta la permitividad, pero de forma poco significativa. En el resto de máximos (D2, Ra1, Ra2 y Rh1) estas variaciones porcentuales, en valor absoluto, van disminuyendo a medida que se aumenta la permitividad, siendo esta variación en Rh1 apenas significativa. La Figura 7.26 muestra el ajuste comparativo en el que se puede ver la evolución del factor de pérdida para cada máximo.

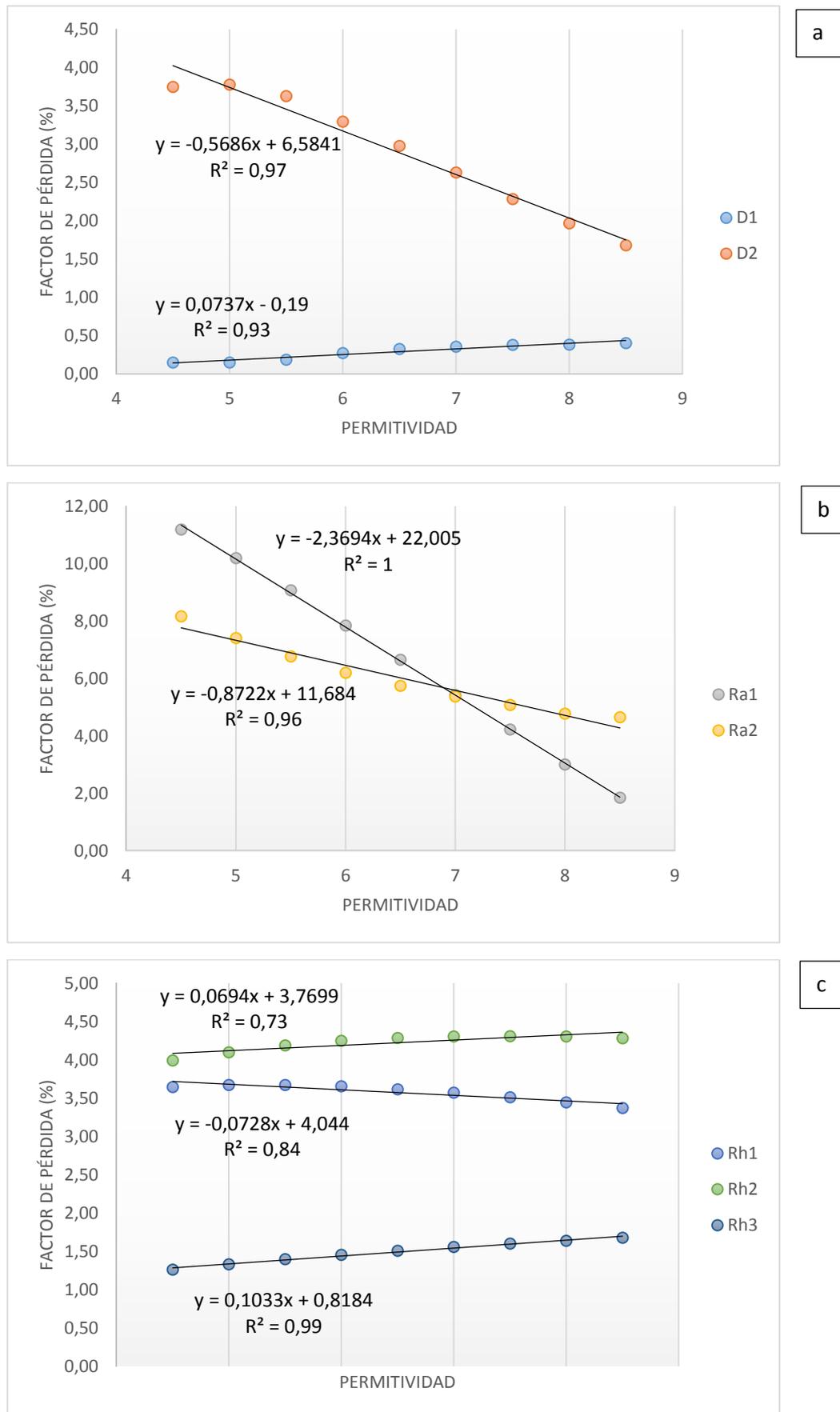


Figura 7.26. Evolución del factor de pérdida (%), con una conductividad de 10^{-1} S/m y variando la permitividad, para los máximos de onda directa (a), reflejada en el hormigón (b) y en el reflector metálico (c).

Como se detalló en el apartado 2.4.2, Klysz et al. (2008) establecían que la conductividad varía de 10^{-4} S/m en el hormigón seco hasta 10^{-1} S/m en el hormigón saturado y que aumenta de forma lineal con el contenido de agua. Es por ello que como conclusión significativa de este trabajo.

Se pudo establecer que si la presencia de fase líquida en el hormigón, sólo si era superior al 75 % se deberá tener en cuenta el efecto de la conductividad en las señales de georradar y el descenso de amplitud derivado.

Asimismo, es importante resaltar que la variación de la permitividad dieléctrica del hormigón como consecuencia de sus componentes va a ser muy pequeña. No obstante, en el momento en el que se tenga presencia de fase líquida su permitividad dieléctrica aumentará significativamente, pudiendo llegar a los rangos evaluados en el apartado anterior. Las consecuencias de un aumento de permitividad, ya sea por la diferencia de composición o la presencia de fase líquida ya se han evaluado en el apartado anterior.

7.4. Comparación con estudio experimental: determinación de las propiedades dieléctricas

Con el objetivo de valorar la bondad de los modelos numéricos generados y para poder comprobar su aplicación en casos reales, por medio de los resultados obtenidos en los apartados anteriores, el siguiente paso fue determinar las propiedades dieléctricas de un caso real. Para ello, se emplearon los registros de un trabajo experimental previo.

Resultados de las mediciones experimentales

En la Figura 7.27 se presenta la señal típica registrada cuando el hormigón fabricado se encontraba completamente seco en el horno, pero se desconocían sus propiedades dieléctricas.



Figura 7.27. Señal registrada cuando el hormigón fabricado se encontraba completamente seco en el horno.

Como se puede ver en la Figura 7.27, esta señal registra todas las ondas que se analizaron a lo largo de este estudio. En primer lugar la onda directa ($D1$ y $D2$) seguida de la onda reflejada en el bloque de hormigón ($Ra1$, $Ra2$ y $Ra3$). En los modelos que se han estudiado, dichas ondas aparecen como ondas perfectas, ya que es lo que debería suceder si el medio fuera completamente homogéneo. Sin embargo, el hormigón es un medio heterogéneo, y por eso estas ondas se pueden ver con algunas perturbaciones. Lo mismo pasa con la onda reflejada en el metal ($Rh1$, $Rh2$ y $Rh3$), ya que en realidad la antena emitía ondas en todas direcciones, y por eso a la antena receptora llegaban tantos máximos.

Determinación de las propiedades dieléctricas del hormigón

Como se ha visto en el apartado anterior, la presencia de agua sólo afectaba a las amplitudes de las señales cuando presentaban una conductividad mayor de 10^{-2} S/m y estos eran los únicos parámetros que se veían afectados. En este caso al tratarse de probetas que estaban completamente secas podemos decir que su conductividad era menor a 10^{-4} S/m y por tanto el único parámetro a determinar era la permitividad dieléctrica, gracias al estudio previamente realizado en este estudio.

Para ello, lo primero que fue necesario determinar fueron los tiempos de llegada de cada uno de los máximos de la señal experimental. En la Tabla 7.19 se presentan los valores obtenidos, en *samples* (s) y tiempo (ns) de los máximos que componían el registro.

Tabla 7.19. Tiempos de llegada en ns y en samples de los máximos de la señal experimental.

Pico	Sample	Tiempo (ns)
D1	147	2,01
D2	168	2,30
Ra1	191	2,61
Ra2	213	2,91
Rh1	304	4,16
Rh2	321	4,39
Rh3	339	4,63

Pico	Δt (ns)	V (cm/ns)
Rh2-D2	-2,09	-11,47

Tal y como se ha visto en el apartado 7.2.3, la mejor combinación de máximos para obtener la permitividad dieléctrica era el Rh2-D2. En este caso, la diferencia de tiempos de llegada con estos máximos es de 2,09 ns y eso daba lugar a una velocidad de propagación de 11,47 cm/ns.

Por lo tanto, a continuación, fue necesario generar los modelos numéricos con las dimensiones de las probetas experimentales y que partieran de una conductividad de 10^{-4} S/m e ir poco a poco aproximándonos por medio de iteraciones variando la permitividad hasta obtener un incremento de tiempos entre Rh2-D2 de 2,09 ns.

Para ello, se generaron los modelos numéricos con una permitividad de 5, 6, 6.75, 6.8, 6.85, 6.90 y 7 y se obtuvieron los siguientes tiempos de llegada para cada uno de los máximos que componían las señales (Tabla 7.20). Dado el gran volumen de datos

con los que se trabajó, todas las señales modeladas numéricamente, así como las tablas resultantes de su análisis completas se adjuntan en el Anexo 6. Determinación de las propiedades dieléctricas de un diseño experimental.

Tabla 7.20. Tiempos de llegada en ns y en samples de los máximos de las señales experimentales para valores de permitividad entre 5 y 7.

$\epsilon = 5$			$\epsilon = 6$		
Pico	Samples	Tiempo (ns)	Pico	Samples	Tiempo (ns)
<i>D1</i>	168	0,647	<i>D1</i>	168	0,647
<i>D2</i>	216	0,832	<i>D2</i>	218	0,839
<i>Ra1</i>	263	1,013	<i>Ra1</i>	267	1,028
<i>Ra2</i>	313	1,205	<i>Ra2</i>	320	1,232
<i>Rh1</i>	640	2,464	<i>Rh1</i>	687	2,645
<i>Rh2</i>	684	2,634	<i>Rh2</i>	728	2,803
<i>Rh3</i>	728	2,803	<i>Rh3</i>	774	2,980
$\epsilon = 6,75$			$\epsilon = 6,8$		
Pico	Samples	Tiempo (ns)	Pico	Samples	Tiempo (ns)
<i>D1</i>	168	0,647	<i>D1</i>	168	0,647
<i>D2</i>	218	0,839	<i>D2</i>	216	0,832
<i>Ra1</i>	269	1,036	<i>Ra1</i>	269	1,036
<i>Ra2</i>	326	1,255	<i>Ra2</i>	326	1,255
<i>Rh1</i>	717	2,761	<i>Rh1</i>	719	2,768
<i>Rh2</i>	761	2,930	<i>Rh2</i>	763	2,938
<i>Rh3</i>	805	3,100	<i>Rh3</i>	807	3,107
$\epsilon = 6,85$			$\epsilon = 6,90$		
Pico	Samples	Tiempo (ns)	Pico	Samples	Tiempo (ns)
<i>D1</i>	168	0,647	<i>D1</i>	168	0,647
<i>D2</i>	216	0,832	<i>D2</i>	218	0,839
<i>Ra1</i>	269	1,036	<i>Ra1</i>	269	1,036
<i>Ra2</i>	326	1,255	<i>Ra2</i>	327	1,259
<i>Rh1</i>	721	2,776	<i>Rh1</i>	723	2,784
<i>Rh2</i>	765	2,946	<i>Rh2</i>	767	2,953
<i>Rh3</i>	809	3,115	<i>Rh3</i>	811	3,123

$\epsilon = 6,95$			$\epsilon = 7$		
Pico	Samples	Tiempo (ns)	Pico	Samples	Tiempo (ns)
<i>D1</i>	168	0,647	<i>D1</i>	168	0,647
<i>D2</i>	218	0,839	<i>D2</i>	218	0,839
<i>Ra1</i>	269	1,036	<i>Ra1</i>	269	1,036
<i>Ra2</i>	327	1,259	<i>Ra2</i>	327	1,259
<i>Rh1</i>	725	2,792	<i>Rh1</i>	728	2,803
<i>Rh2</i>	769	2,961	<i>Rh2</i>	771	2,969
<i>Rh3</i>	813	3,130	<i>Rh3</i>	815	3,138

A partir de los tiempos de llegada se calcularon los incrementos de llegada entre los máximos *Rh2-D2* y tal y como se observa en la Tabla 7.21 se comprueba como la permitividad de 6,85 es la que obtiene unos valores más ajustados con los valores experimentales de tiempos de llegada y velocidades de propagación.

Tabla 7.21. Incrementos de tiempos de llegada entre los máximos *Rh2-D2* y velocidades de propagación.

Teórico	Modelo numérico	
	Δt (ns)	v (cm/ns)
ϵ		
5,00	1,789	13,42
6,00	1,96	12,25
6,75	2,078	11,55
6,80	2,086	11,50
6,85	2,094	11,46
6,90	2,101	11,42
6,95	2,109	11,38
7,00	2,117	11,34

Este resultado es muy interesante y novedoso puesto que a partir de todo el trabajo presentado en este documento se ha podido establecer un algoritmo de trabajo para poder determinar las propiedades dieléctricas de unas mediciones experimentales por medio de georradar.

7.5. Análisis espectral: Evolución de frecuencias

En este apartado se presentan los resultados de los cálculos de los espectros por medio de la *Fast Fourier Transform* (FTT) para las diferentes composiciones de hormigón y contenidos de agua y la evolución de la frecuencia central de radiación para cada uno de estos escenarios. Dado el gran volumen de datos con los que se trabajó, todos los espectros calculados se adjuntan en el Anexo 7. Análisis espectral de los modelos numéricos.

7.5.1. Evolución de la frecuencia central dependiendo de la variación de la composición del hormigón

La frecuencia central de radiación de la antena son 2 GHz, para el caso del pulso teórico empleado en la programación (pulso de Ricker), la frecuencia central en el aire se localiza en los 2,6 GHz. Ahora bien, cuando se emite la radiación en un medio y ésta viaja por su interior la frecuencia central se ve modificada y no sólo eso sino que se van modificando tanto la frecuencia central como la amplitud de sus máximos.

Como se observa en la Figura 7.28, conforme la permitividad dieléctrica iba aumentando el máximo de frecuencia central iba disminuyendo progresivamente, pasando de estar en torno a 2,6 GHz para una permitividad de 4 a una de 2,3 GHz para una permitividad de 7. De aquí en adelante a cada uno de los espectros generados para cada permitividad dieléctrica se identificará por medio de las siglas del operador matemático empleado (FFT) y el valor de la permitividad dieléctrica.

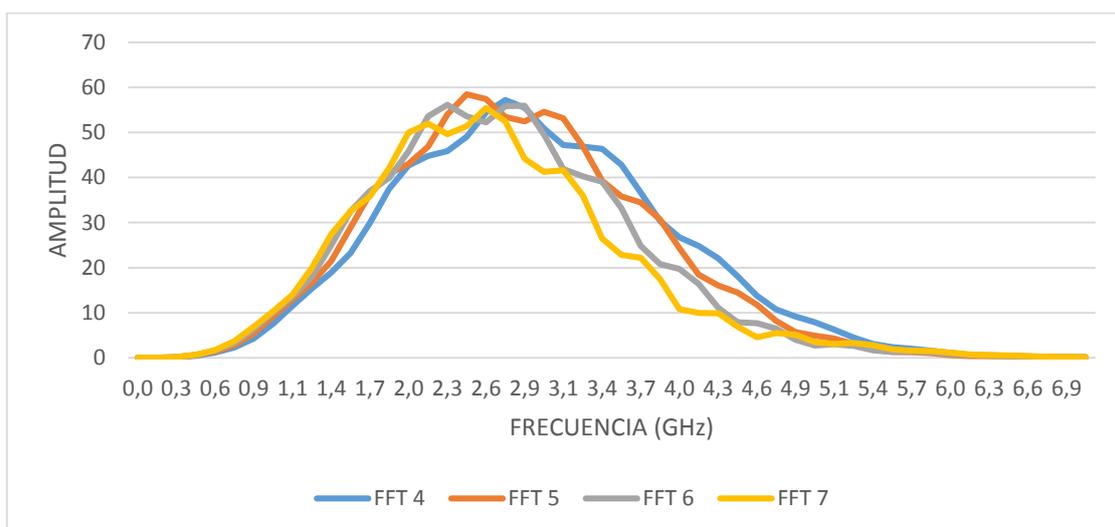


Figura 7.28. Cálculo del espectro de frecuencia de la emisión al bloque de hormigón con la antena de 2 GHz, para un hormigón con permitividad entre 4 y 7.

Además, no sólo esto, sino que conforme iba aumentando la permitividad de 8 a 11, la amplitud del máximo central va disminuyendo, pasando de estar anteriormente en el 60 % de amplitud a estar en el entorno del 50 %. Asimismo, aparece otro fenómeno y es que se distingue un lóbulo nuevo de altas frecuencias centrado en las 3,9 GHz de frecuencia (Figura 7.29) y sigue desplazándose hacia las bajas frecuencias el máximo central, llegando en el caso de la permitividad 11 a estar centrado en los 2 GHz.

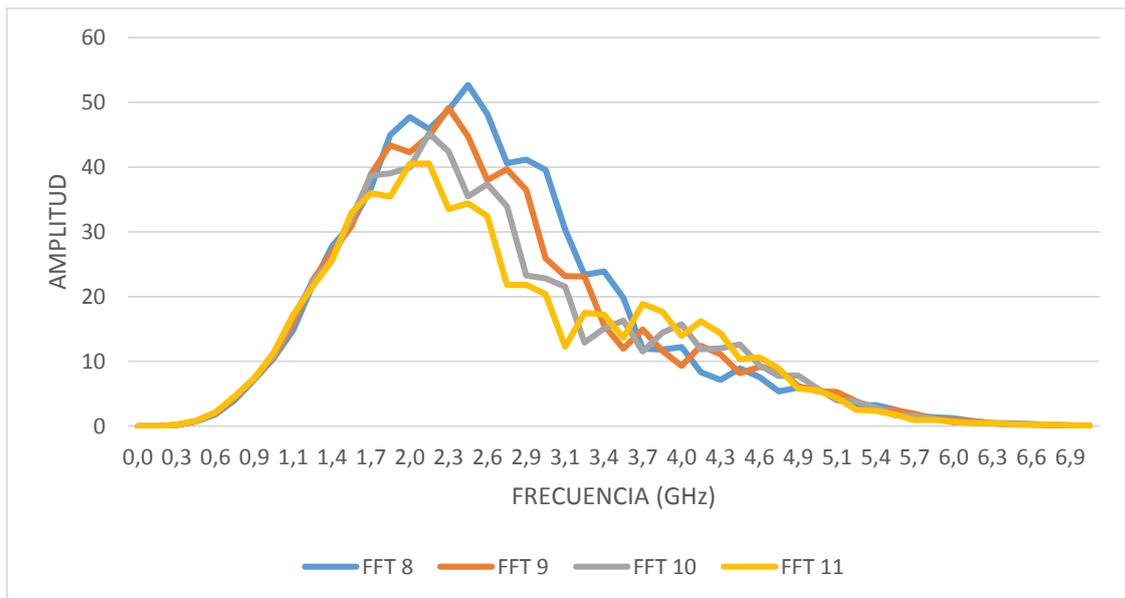


Figura 7.29. Cálculo del espectro de frecuencia de la emisión al bloque de hormigón con la antena de 2 GHz, para un hormigón con permitividad entre 8 y 11.

Si todavía aumentáramos más la permitividad, entre 12 y 15, continuaba disminuyendo la amplitud del máximo central hasta llegar a valores en torno al 30 % para una permitividad de 15, así como la frecuencia central que empezó en 2,6 GHz para una permitividad de 4 ahora está en torno a 1,5 GHz.

Por otro lado, en cuanto al lóbulo aparecido ya en las frecuencias anteriores, se puede ver en la Figura 7.30 como ha aumentado considerablemente. Además, se puede observar que cuanto mayor es la permitividad más aumenta la amplitud del máximo de esta nueva onda, llegando a ser iguales ambos máximos para una permitividad de 15. La aparición de este lóbulo coincide con la aparición del máximo $D3$ de la onda directa, donde, como se puede ver en el capítulo 7.3.1 no era visible hasta que la permitividad era 12.

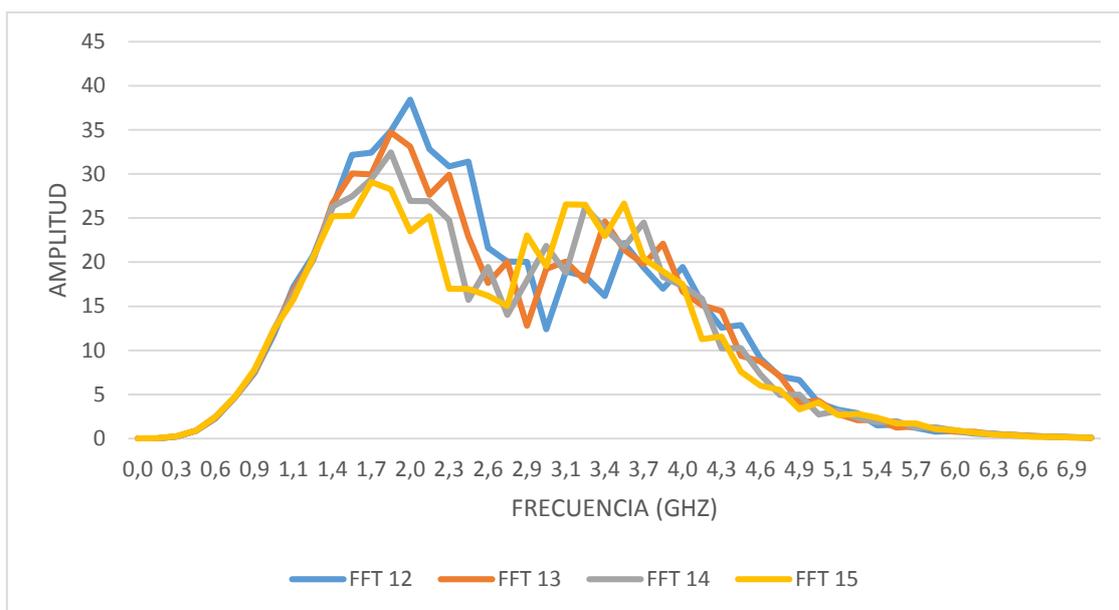


Figura 7.30. Cálculo del espectro de frecuencia de la emisión al bloque de hormigón con la antena de 2 GHz, para un hormigón con permitividad entre 12 y 15.

7.5.2. Evolución de la frecuencia central dependiendo de la variación de contenido de humedad

Como ya se ha visto en el capítulo 7.3.2, para valores de conductividad que variaban desde 10^{-2} hasta 10^{-9} S/m los valores de las señales eran exactamente iguales. Es por ello que con el cálculo del espectro sucedía lo mismo y como se puede ver en la Figura 7.31 lo que se hizo fue calcular los valores cuando la conductividad variaba entre 10^{-1} y 10^{-2} S/m.

De aquí en adelante a cada uno de los espectros generados para cada conductividad se identificará por medio de las siglas del operador matemático empleado (FFT) y el valor de la conductividad.

En esta figura, en la que la permitividad es 4,5, se puede ver la comparación entre dichos valores de conductividad, observándose que la máxima amplitud disminuye de 60 para una conductividad de 10^{-2} S/m a 50 para una conductividad de 10^{-1} S/m y para ambos casos su frecuencia central está en torno a 2,6 GHz. Esto es debido a que una permitividad dieléctrica tan baja producía muy pocas diferencias con respecto a la emisión de la radiación al aire.

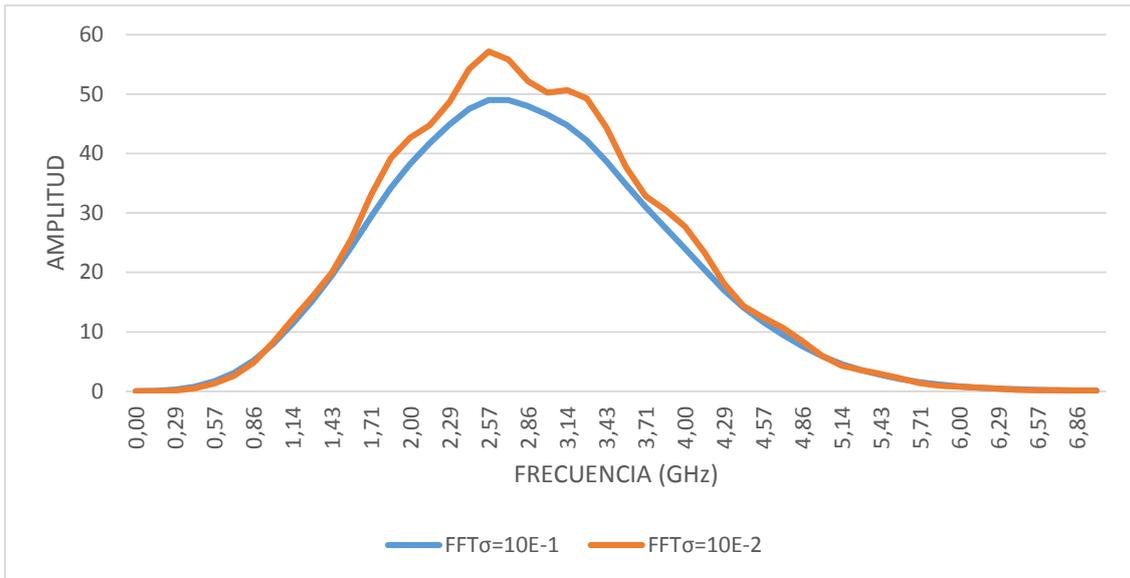


Figura 7.31. Cálculo del espectro de frecuencia de la emisión al bloque de hormigón con la antena de 2 GHz, para un hormigón con permitividad 4,5.

En la Figura 7.32 se puede ver la misma comparación anterior pero para una permitividad de 8. Se puede ver como la relación entre los modelos es prácticamente igual que en la Figura 7.31, pero con algunas pequeñas diferencias.

Por una parte, al aumentar la permitividad se puede observar como la amplitud disminuía, de unos 50 para $\epsilon = 4,5$ a unos 40 para $\epsilon = 8$. Lo mismo ocurría con la frecuencia, pasando de uno 2,6 GHz a unos 2,3 GHz.

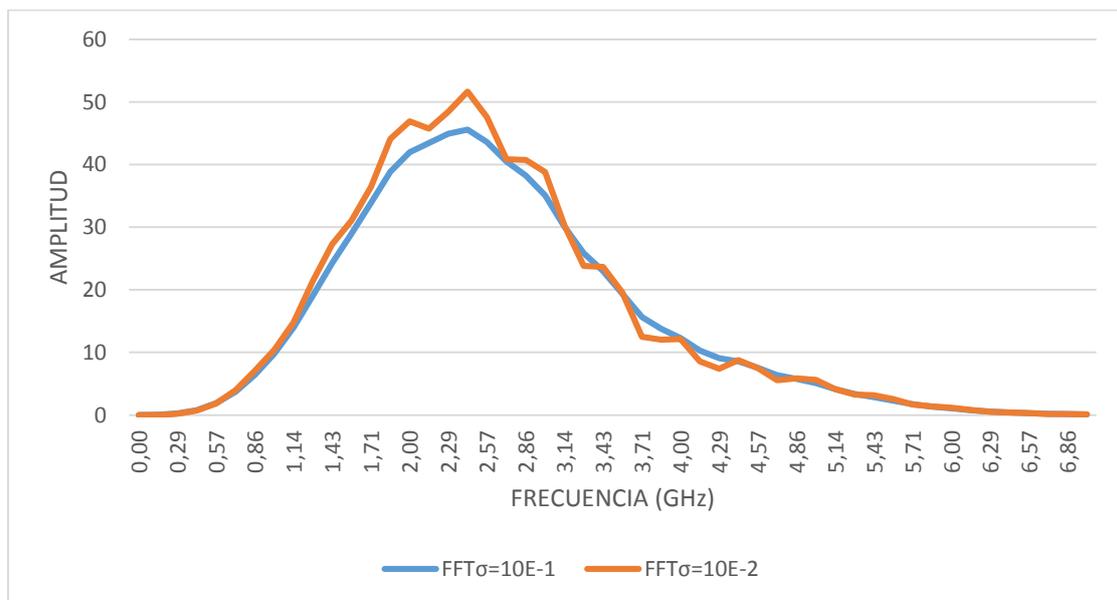


Figura 7.32. Cálculo del espectro de frecuencia de la emisión al bloque de hormigón con la antena de 2 GHz, para un hormigón con permitividad 8.

Con todo esto se puede concluir que la variación de conductividad apenas afecta a las señales, sino que lo que realmente hace cambiar la señal es el cambio de permitividad dieléctrica. Sin embargo, el cambio de permitividad también cambia por el contenido de agua, ya que la composición del hormigón depende en gran parte de la relación agua/cemento y su contenido de agua libre.

8. CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta investigación era el estudio de la propagación de señales electromagnéticas en hormigón de diferentes características mediante la realización de modelados numéricos de dichas señales. Para la realización de estos modelos fue preciso la utilización del software *gprMax*, el cual se basa en el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) para generar dichos modelos. Todo esto permitió comprender mejor la propagación de las ondas electromagnéticas que genera un equipo comercial a través de un medio como es el hormigón.

Con el desarrollo del trabajo presentado en función de los objetivos iniciales se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- En cuanto a la técnica no destructiva del georradar puedo afirmar que gracias a la realización del presente trabajo mi conocimiento ha aumentado en gran medida, ya que ha sido necesario documentarme ampliamente sobre todo lo relacionado con la técnica, su fundamento teórico, métodos de medición, así como las posibilidades que la misma ofrecía en el ámbito de aplicación de estudio.
- Respecto a la situación actual en la que se encuentra la aplicación de la técnica del georradar he podido ver que es una técnica muy nueva que todavía no es muy utilizada en sectores como la edificación y construcción. Sin embargo, es un método muy eficaz e interesante para la caracterización de materiales como el hormigón, que ha sido el material que se ha estudiado en este caso y con un gran potencial futuro de aplicación en el campo de la ingeniería de la construcción.
- También he adquirido los conocimientos en cuanto a los métodos matemáticos que se utilizan actualmente para generar modelos numéricos realistas de propagación de ondas electromagnéticas, como los que aparecen en el presente trabajo. Aprender a programar ha sido una parte importante del desarrollo del trabajo, puesto que con anterioridad era algo totalmente desconocido para mí.
- Por otra parte, uno de los puntos más importantes y a los que más tiempo he dedicado en el estudio ha sido el desarrollo de los modelos numéricos de propagación de ondas electromagnéticas por medio del software *gprMax*, un software que a pesar de ser libre está siendo desarrollado por uno de los grupos investigadores de georradar más importantes y prestigiosos de Europa.

Con respecto a los modelos numéricos generados, los resultados obtenidos y la interpretación realizada para evaluar el comportamiento del hormigón de diferentes composiciones y contenidos de humedad, las principales conclusiones obtenidas son:

- El primer paso realizado fue la calibración de la distancia entre emisor y receptor de la antena modelada. Como se comprobó este primer paso es crucial, puesto que no se dispone de la información sobre la estructura interna de la antena por parte de la casa comercial. El resultado obtenido es muy interesante, puesto que permitió establecer una metodología, corroborada por la comparación con datos experimentales de cuál era el valor de esta distancia.
- En segundo lugar, se realizó un modelado para el estudio de reflexiones de la propagación de las ondas, emitiendo a un reflector metálico. Con esto se pudo comprobar que los modelos numéricos desarrollados encajaban con los valores teóricos, con lo que pudimos concluir que el estudio que se estaba llevando a cabo era correcto y por tanto podíamos continuar con el estudio y aplicarlo al estudio del hormigón.
- A continuación, se llevó a cabo el estudio de la propagación de las ondas electromagnéticas a través del hormigón. En primer lugar, se mantuvo un tipo de hormigón y lo que se estudió fue el cambio de la antena a cierta distancia del bloque de hormigón. El resultado fue una variación de las amplitudes y tiempos de propagación de los máximos que componen la onda, siendo el resultado esperado, ya que cuanto más se aleja la antena del medio más atenuada y retardada llegaba la señal.
- Por otra parte, se continuó con el estudio de la propagación por el hormigón, pero esta vez dependía de la composición del hormigón. Para ello, el valor a cambiar fue la permitividad, dando conclusiones muy interesantes e innovadoras, viendo como este es un factor muy importante, ya que los cambios en las señales eran muy significativos, tanto en tiempos de llegada, amplitudes y espectros.
- Por último, el estudio de la propagación a través del hormigón dependiendo del contenido de humedad concluyó que la variación de esta apenas afecta a la propagación de la onda. Por una parte, sólo en el caso de tener contenidos de fase líquida en el interior del hormigón superior al 75% se encontraron cambios en las amplitudes de las señales. Por otra parte, y como consecuencia de lo anterior, los espectros obtenidos presentaban diferencias poco significativas.

- Todos estos casos de estudio diseñados, programados, calculados y analizados permitieron identificar cuáles eran las señales que componían los registros para cada uno de los casos al viajar la radiación electromagnética por el interior del hormigón e identificar cuáles eran los máximos que componían cada una de las señales y su variación dependiendo de los análisis realizados.
- Todo ello dio lugar a otro de los resultados novedosos del presente trabajo, ya que fue posible establecer un algoritmo de trabajo para determinar las propiedades dieléctricas de unas mediciones realizadas sobre probetas de hormigón fabricadas y adquiridas por un equipo comercial de georradar como consecuencia de la comparación del estudio experimental con modelos numéricos.

9. 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.

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.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., Argluigie 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., Arlguie 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 Intemational, 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*. Aracne Editrice, 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 Sagrado Corazón 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.
- Viriyametanont 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

1. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Representación de señales mediante trazas de amplitud o A-scan (a) y mediante escalas de colores o B-scan (b).	26
Figura 5.1. Ecuaciones de Maxwell.....	34
Figura 5.2. Problema de límites de GPR expresado gráficamente. (Fuente: http://www.gprmax.com/).....	35
Figura 5.3. Imagen input file en formato ANSI. (Fuente: http://www.gprmax.com/)... ..	38
Figura 5.4. Imagen del programa Anaconda.	38
Figura 5.5. Visualización de la pantalla del programa Anaconda.....	39
Figura 5.6. Programa Anaconda ejecutando un archivo .in	40
Figura 5.7. Programa Anaconda ejecutando un archivo .out.....	41
Figura 5.8. Resultado del modelado numérico de la propagación de las ondas electromagnéticas por medio del procedimiento matemático FDTD, gracias al software gprMax.....	41
Figura 5.9. Visualización del software Paraview.	43
Figura 5.10. Visualización programa HDFView.....	44
Figura 5.11. Visualización en Excel del modelado final.....	45
Figura 5.12. Sistema de coordenadas.....	47
Figura 6.1. Imagen del modelo de emisión al aire visualizado en Paraview.....	50
Figura 6.2. Programación de la antena de 2 GHz emitiendo al aire.....	51
Figura 6.3. Imagen del modelo con emisión al aire y reflexión en metal en Paraview. ..	52
Figura 6.4. Dimensiones del modelo en metros y esquema de trayectoria de propagación de ondas.	52
Figura 6.5. Programación de la antena 2 GHz emitiendo al aire y reflejándose en un reflector de metal.....	53
Figura 6.6. Imagen del modelo con emisión a hormigón-metal a cierta distancia de separación en Paraview.....	54
Figura 6.7. Dimensiones del modelo en metros y esquema de propagación de ondas al emitir a cierta distancia del bloque de hormigón.	54
Figura 6.8. Programación de la antena de 2 GHz emitiendo a cierta distancia de un bloque de hormigón.	55
Figura 6.9. Programación del modelado para evaluar la diferencia de propagación en hormigón de diferentes composiciones.....	58

Figura 6.10. Programación del modelado para evaluar el efecto de la variación del contenido de agua.....	59
Figura 6.11. Curado del hormigón.....	61
Figura 6.12. Horno de secado del Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Técnica Superior en Ingeniería de Edificación.....	61
Figura 6.13. Equipo de georradar modelo SIR-3000 y antena de 2 GHz montada con odómetro de GSSI.....	62
Figura 6.14. Dispositivo de la adquisición de registros de georradar.	62
Figura 7.1. Modelado numérico de la respuesta electromagnética de emisión al hormigón con una antena de 2 GHz.....	63
Figura 7.2. Esquema de las ondas directa y reflejada en el hormigón y en el reflector metálico.....	64
Figura 7.3. Señal experimental de la antena de 2 GHz de GSSI emitiendo al aire.....	66
Figura 7.4. Comparación entre el modelado numérico de la respuesta electromagnética de emisión al aire con una antena de 2 GHz con diferentes separaciones entre emisor y receptor y la medida experimental.	67
Figura 7.5. Comparación entre el modelado numérico de la respuesta electromagnética de emisión al aire con una antena de 2 GHz con diferentes separaciones (4,75 - 5,25 cm) entre emisor y receptor y la medida experimental.....	68
Figura 7.6. Variación de las amplitudes relativas con la distancia de separación entre el emisor y receptor (a) D1, (b) D2 y (c) D3.....	70
Figura 7.7. Modelado numérico de la reflexión producida cuando se coloca un reflector metálico a una distancia de 15 cm de separación de la antena de 2 GHz.	71
Figura 7.8. Modelado numérico de la reflexión producida cuando se coloca un reflector metálico a diferentes distancias (15 a 30 cm) de separación de la antena de 2 GHz....	72
Figura 7.9. Modelado numérico de la reflexión producida cuando se coloca un reflector metálico a diferentes distancias (4 a 10 cm) de separación de la antena de 2 GHz.....	73
Figura 7.10. Variación de las amplitudes relativas con la distancia de separación entre la antena y el receptor (a) R1, (b) R2 y (c) R3.....	76
Figura 7.11. Ajuste entre incrementos de tiempo de llegada para las combinaciones de R1-D1, R2-D2 Y R3-D3 modelados y teóricos al emitir al aire y reflejarse en el metal. .	77
Figura 7.12. Modelado numérico de la señal con la antena separada 14 cm de la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base del hormigón.	79

Figura 7.13. Modelado numérico de la señal con la antena pegada al bloque de hormigón y cuando está separada 2 cm de la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base del hormigón.	79
Figura 7.14. Modelado numérico de la señal con la antena separada entre 4 y 8 cm de la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base del hormigón.	80
Figura 7.15. Modelado numérico de la señal con la antena separada entre 10 y 20 cm de la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base del hormigón.	81
Figura 7.16. Modelado numérico de la señal con la antena sobre la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base del hormigón, siendo la permitividad del hormigón 13.	89
Figura 7.17. Modelado numérico de la señal con la antena de 2 GHz situada sobre la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base, variando la permitividad del hormigón entre 4 y 9.	89
Figura 7.18. Modelado numérico de la señal con la antena de 2 GHz situada sobre la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base, variando la permitividad del hormigón entre 10 y 15.	90
Figura 7.19. Variación de las amplitudes relativas con la variación de la permitividad dieléctrica (a) D1 y (b) D2.	92
Figura 7.20. Variación de las amplitudes relativas con la variación de la permitividad dieléctrica (a) Ra1, (b) Ra2 y (c) Ra3.	94
Figura 7.21. Variación de las amplitudes relativas con la variación de la permitividad dieléctrica (a) Rh1, (b) Rh2 y (c) Rh3.	96
Figura 7.22. Ajuste entre incrementos de tiempo de llegada para las combinaciones de Rh1-D1, Rh2-D2 Y Rh3-D3 modelados y teóricos al emitir al bloque de hormigón y reflejarse en el metal.	99
Figura 7.23. Modelado numérico de las señales con la antena de 2 GHz situada sobre la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base, con permitividad 5 y conductividad 10^{-4} S/m.	100
Figura 7.24. Modelado numérico de las señales con la antena de 2 GHz situada sobre la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base, con permitividad 5 y variación de conductividad entre 10^{-2} y 10^{-9} S/m.	101
Figura 7.25. Modelado numérico de las señales con la antena de 2 GHz situada sobre la superficie del hormigón y con un reflector metálico en la base, con permitividad 5 y conductividad entre 10^{-1} (a) y 10^{-2} S/m (b).	102
Figura 7.26. Evolución del factor de pérdida (%) para cada máximo, con una conductividad de 10^{-1} S/m y variando la permitividad.	105



Figura 7.27. Señal registrada cuando el hormigón fabricado se encontraba completamente seco en el horno.	107
Figura 7.28. Cálculo del espectro de frecuencia de la emisión al bloque de hormigón con la antena de 2 GHz, para un hormigón con permitividad entre 4 y 7.	111
Figura 7.29. Cálculo del espectro de frecuencia de la emisión al bloque de hormigón con la antena de 2 GHz, para un hormigón con permitividad entre 8 y 11.	112
Figura 7.30. Cálculo del espectro de frecuencia de la emisión al bloque de hormigón con la antena de 2 GHz, para un hormigón con permitividad entre 12 y 15.	113
Figura 7.31. Cálculo del espectro de frecuencia de la emisión al bloque de hormigón con la antena de 2 GHz, para un hormigón con permitividad 4,5.	114
Figura 7.32. Cálculo del espectro de frecuencia de la emisión al bloque de hormigón con la antena de 2 GHz, para un hormigón con permitividad 8.	114

2. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Influencia de la relación A/C y el tiempo de curado en la resistividad ($\Omega.m$) de pastas de cemento Portland (Neville, 1997).	21
Tabla 6.1. Especificaciones de la antena de 2 GHz (Fuente: https://www.geophysical.com/antennas).	49
Tabla 7.1. Comparativa de máximos que componen la onda directa para diferentes separaciones entre emisor y receptor.	68
Tabla 7.2. Comparativa de máximos que componen la onda directa para diferentes separaciones de la antena de 2 GHz con respecto al reflector metálico.	73
Tabla 7.3. Comparativa de máximos que componen la onda reflejada para diferentes separaciones de la antena de 2 GHz con respecto al reflector metálico.	74
Tabla 7.4. Valores promedio de la variación del tiempo de llegada en ns de la antena de 2 GHz con respecto al reflector metálico.	77
Tabla 7.5. Comparativa de máximos que componen la onda directa para diferentes separaciones de la antena de 2 GHz con respecto al reflector de hormigón.	82
Tabla 7.6. Comparativa de máximos que componen la onda reflejada en el hormigón para diferentes separaciones de la antena de 2 GHz con respecto al reflector de hormigón.	83
Tabla 7.7. Comparativa de máximos que componen la onda reflejada en el reflector metálico para diferentes separaciones de la antena de 2 GHz con respecto al reflector de hormigón.	84
Tabla 7.8. Comparación de incrementos de tiempos teóricos y los obtenidos del modelado numérico para todas las combinaciones de máximos entre la onda reflejada en el metal y la reflejada en el hormigón.	85
Tabla 7.9. Comparación de incrementos de tiempos teóricos y los obtenidos del modelado numérico para todas las combinaciones de máximos entre la onda directa y la reflejada en el hormigón.	86
Tabla 7.10. Comparación de incrementos de tiempos teóricos y los obtenidos del modelado numérico para todas las combinaciones de máximos entre la onda directa y la reflejada en el metal.	87
Tabla 7.11. Comparativa de máximos que componen la onda directa para diferentes valores de permitividad.	91
Tabla 7.12. Comparativa de máximos que componen la onda reflejada en el hormigón para diferentes valores de permitividad.	92



Tabla 7.13. Comparativa de máximos que componen la onda reflejada en el reflector metálico para diferentes valores de permitividad.	94
Tabla 7.14. Comparación de incrementos de tiempos teóricos y los obtenidos del modelado numérico para todas las combinaciones de máximos entre la onda reflejada en el metal y la reflejada en el hormigón.....	97
Tabla 7.15. Comparación de incrementos de tiempos teóricos y los obtenidos del modelado numérico para todas las combinaciones de máximos entre la onda directa y la reflejada en el metal.	98
Tabla 7.16. Samples, tiempos de llegada (ns) y amplitudes de los modelos numéricos con diferente conductividad y permitividad 5.	103
Tabla 7.17. Cuadro resumen de los tiempos de propagación en ns en cada uno de los máximos para permitividades entre 4,5 y 8,5.....	103
Tabla 7.18. Factor de pérdida de amplitud al aumentar la conductividad a 10^{-1} S/m.	104
Tabla 7.19. Tiempos de llegada en ns y en samples de los máximos de la señal experimental.....	108
Tabla 7.20. Tiempos de llegada en ns y en samples de los máximos de las señales experimentales para valores de permitividad entre 5 y 7.	109
Tabla 7.21. Incrementos de tiempos de llegada entre los máximos Rh2-D2 y velocidades de propagación.	110

3. CALIBRACIÓN DE LA ANTENA

Dado el gran volumen de archivos que componen este anexo, éste se adjunta en formato digital por medio de un CD adjunto. Este anexo se incluye en la Carpeta “Anexo 3 – Calibración de la antena”.

En esta carpeta hay 3 archivos en los cuales están los algoritmos de Microsoft Excel para el cálculo de la calibración de la antena. Cada uno de ellos está nombrado con la referencia del capítulo al que corresponde (Capítulo 7.2.1, Capítulo 7.2.2 y Capítulo 7.2.3) y en cada uno de ellos se incluyen los resultados de los modelos numéricos obtenidos, así como las tablas y cálculos que fue necesario realizar para interpretar los resultados.

4. EFECTO DE LA COMPOSICIÓN DEL HORMIGÓN EN LAS SEÑALES DE GEORRADAR

Dado el gran volumen de archivos que componen este anexo, éste se adjunta en formato digital por medio de un CD adjunto. Este anexo se incluye en la Carpeta “Anexo 4 – Efecto de la composición de las señales de georradar”.

En esta carpeta hay 1 archivo en el cual están los algoritmos de Microsoft Excel para el estudio de cómo afecta la composición del hormigón a la toma de datos en las señales de georradar. Este está nombrado con la referencia del capítulo al que corresponde (Capítulo 7.3.1) y en él se incluyen los resultados de los modelos numéricos obtenidos, así como las tablas y cálculos que fue necesario realizar para interpretar los resultados.

5. EFECTO DEL CONTENIDO DE AGUA EN LAS SEÑALES DE GEORRADAR

Dado el gran volumen de archivos que componen este anexo, éste se adjunta en formato digital por medio de un CD adjunto. Este anexo se incluye en la Carpeta “Anexo 5 – Efecto del contenido de agua en las señales de georradar”.

En esta carpeta hay 1 archivo en el cual están los algoritmos de Microsoft Excel para el estudio de cómo afecta el contenido de agua en el hormigón a la toma de datos en las señales de georradar. Este está nombrado con la referencia del capítulo al que corresponde (Capítulo 7.3.2) y en él se incluyen los resultados de los modelos numéricos obtenidos, así como las tablas y cálculos que fue necesario realizar para interpretar los resultados.

6. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DIELECTRICAS DE UN DISEÑO EXPERIMENTAL

Dado el gran volumen de archivos que componen este anexo, éste se adjunta en formato digital por medio de un CD adjunto. Este anexo se incluye en la Carpeta “Anexo 6 – Determinación de las propiedades dieléctricas de un diseño experimental”.

En esta carpeta hay 1 archivo en el cual están los algoritmos de Microsoft Excel que determinan las propiedades dieléctricas de uno de los diseños experimentales. Este está nombrado con la referencia del capítulo al que corresponde (Capítulo 7.4) y en él se incluyen los resultados de los modelos numéricos obtenidos, así como las tablas y cálculos que fue necesario realizar para interpretar los resultados.

7. ANÁLISIS ESPECTRAL DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

Dado el gran volumen de archivos que componen este anexo, éste se adjunta en formato digital por medio de un CD adjunto. Este anexo se incluye en la Carpeta “Anexo 7 – Análisis espectral de los modelos numéricos”.

En esta carpeta hay 2 archivos en los cuales están los algoritmos de Microsoft Excel para el cálculo de los espectros dependiendo de la composición del hormigón y de su contenido de agua. Cada uno de ellos está nombrado con la referencia del capítulo al que corresponde (Capítulo 7.5.1 y Capítulo 7.5.2) y en ellos se incluyen los resultados de los espectros y su procedimiento de cálculo.

8. ARTÍCULO PARA EL CONGRESO INTERNACIONAL “NEAR SURFACE GEOSCIENCE CONFERENCES AND ENHIBITION”

Parte de los resultados obtenidos en este Trabajo Final de Máster ha sido aceptado para su presentación en el Congreso Internacional “*Near Surface Geoscience Conferences and Exhibition*”, organizado por *European Association of Geoscientists and Engineers*, que se celebrará del 9 al 13 de septiembre de 2018 en Oporto (Portugal). La investigación realizada lleva por título “*Parametric study of GPR signals numerical model to analyze hardened concrete response at different antenna positions*” y tiene por autores a Isabel Rodríguez Abad, Rosa María Martínez Sala, Juan Mené Aparicio y Youmana Botella Campello. La publicación que se deriva de la participación en el congreso se adjunta a continuación.

Parametric study of GPR signals numerical model to analyze hardened concrete response at different antenna positions

Authors

Rodríguez-Abad I., Mené-Aparicio J., Martínez-Sala R., Botella Y.

Affiliation

Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n 46022, Valencia, Spain

Abstract:

The purpose of this paper was to apply a numerical model of a 2 GHz central frequency antenna, to understand the behavior of the waves generated with a GPR, when concrete samples were under study at different antenna positions. The GPR numerical model was created based on the FDTD method and GprMax software was used to provide the 2D numerical modeling. Numerical modeling results and their further parametrical analysis were very clarifying. Arrival times, velocity increments and relative amplitudes presented a pattern according to what it was expected, when the antenna was separated from the concrete sample more than 8 cm. Nevertheless, when this distance was closer than 8 cm, due to the signals overlap the concrete reflection arrival times were altered. Despite that, the relative amplitudes for these distances did present an exponential behaviour, in agreement with what it was expected.

Keywords: *GPR, GprMax, concrete, numerical model*

Introduction

Currently, in the realm of civil engineering and architecture, ground-penetrating radar (GPR) technique is applied in a wide range of studies, such as pavements, bridges, tunnels and building analysis and utilities locations, as well as building materials characterization (Pajewski and Benedetto, 2013). Materials electromagnetic properties variations can be recorded by means of GPR. In addition, these properties are closely related to other physical properties (density, water content, etc.). That is why GPR can provide relevant information to evaluate the variations of building materials (Rodríguez-Abad, 2010), in particular concrete, that is our case of study.

Regarding concrete studies, interesting researches have been recently published (Martínez-Sala et al., 2015). Examples of this are the works that estimate the free water content of concrete by means of different wave parameters acquired by GPR (Sbartai et al., 2006); or the ones that determine the range of water penetration in concrete (Rodríguez-Abad et al., 2016).

Reinforced hardened concrete durability depends mainly on free water content and salts that penetrate inward the material. For this reason, our research is focused on the application of GPR technique to evaluate water penetration in concrete, since the electromagnetic waves (EWs) generated by GPR are highly sensitive to the water content of the material they travel through. The analysis of the GPR records can be based on the study of wave parameters: propagation velocity and amplitudes of the signals.

A GPR equipment generates EWs in the range of microwaves. It consists of a central unit, that controls the emission and reception by the emitter and receiver antennas. The emitter generates EWs that travel through the material. These waves will be reflected by any surface that presents a different electric impedance and the receiver antenna acquires those reflections. The problem arises when it is necessary to determine the exact arrival time of the reflections. As some authors highlighted, it is complex to define the maximum of the signal that represents reliably the initial time of the arrival (Yelf and Yelf (2006). Specially, when working with small concrete samples and antennas of high frequency (2 GHz), this problem is critical. As it can be observed in Figure 1, three signals are recorded in a concrete sample in which water has penetrated, regardless if the antenna has been placed over the surface in contact with water or in the opposite.

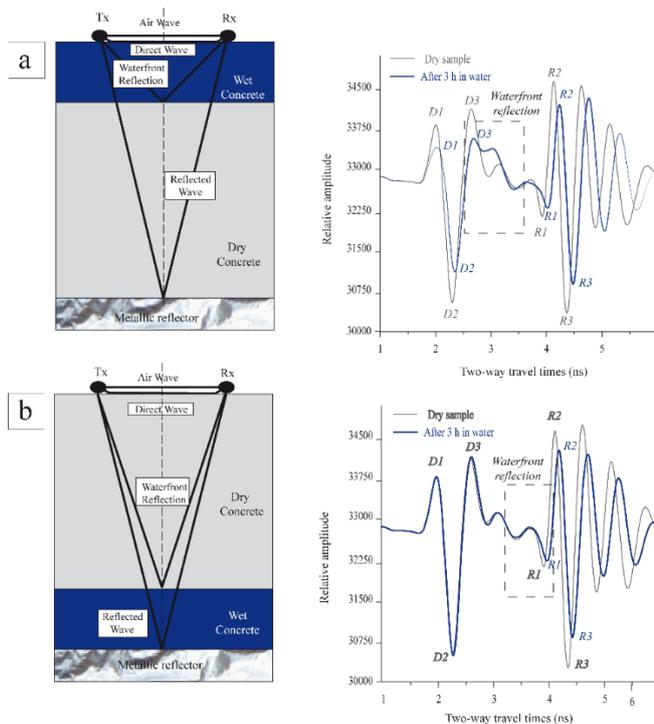


Figure 1 (a) Schematic waves path when the antenna is placed over the surface in contact with water and the recorded signals and (b) over the opposite side.

Firstly, the air wave and direct wave are recorded, but, due to the short path they travel, they are overlapped and it is complex to differentiate them. Then the reflected wave at the waterfront limit between wet and dry concrete is recorded (Figure 1a) and finally the reflection at the interface between dry concrete and a metal reflector. As it can be observed in Figure 1, in all these cases the reflections consist of different positive and negative maximums (D1, D2, ...R2, R3). Therefore, it is difficult to define which one is the most suitable representative of the arrival.

For all these reasons, the purpose of this paper was to apply a numerical model of a 2 GHz central frequency antenna, to understand the behavior of the waves generated with a GPR device, when concrete samples were under study at different antenna positions.

Numerical modelling methodology

The GPR numerical model was created based on the finite-difference-time-domain (FDTD) method (Taflove, 1995). GprMax software (Warren et al., 2016) was used to provide the 2D numerical modeling. Although the characteristics of the modelled commercial 2 GHz central frequency GSSI antenna were not well known, the model proposed was obtained by using comparisons between measurements made first on vacuum and then with concrete materials. According to this preliminary studies the emitter and receiver was separated 5 cm.

The model space (40 x 40 x 40 cm³) was discretized into 2 mm³ cells, allowing enough resolution. The antenna was located in the center of the concrete sample (40 x 40 x 12 cm³), under which a 1 cm wide metallic reflector was placed. The model space, excluding the concrete sample, had the electric properties of free space ($\epsilon_r = 1$, $\sigma = 0$ S/m), while concrete sample properties were the typical parameters found when it is dried after 90 days ($\epsilon_r = 9$, $\sigma \approx 0$ S/m). The output of the numerical model analyzed was the electric field measured over time for a time interval (7 ns) that included the reflection at the bottom of the sample. The antennas were located at different distances from the concrete block that ranged from 0 to 20 cm (Figure 2).

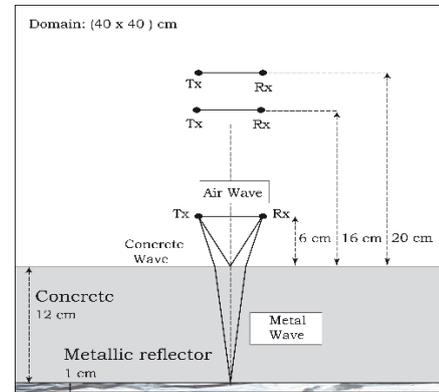


Figure 2 Model of a 12 cm height concrete block. The Tx and Rx antennas were separated 5 cm.

Numerical modeling results

In all the numerical model trace plots obtained, three main signals were identified (Figure 3). Firstly, the called air wave that represented the wave arrival between emitter and receiver, in which 3 maximums could be identified (A1, A2 and A3). Secondly, the named concrete reflection as a consequence of the interface between air and concrete. Likewise, this reflection was made of 3 peaks (C1, C2 and C3). Finally, after travelling the waves through the concrete block, another reflection occurred due to the dielectric contrast between concrete and the metallic reflector (M1, M2 and M3).

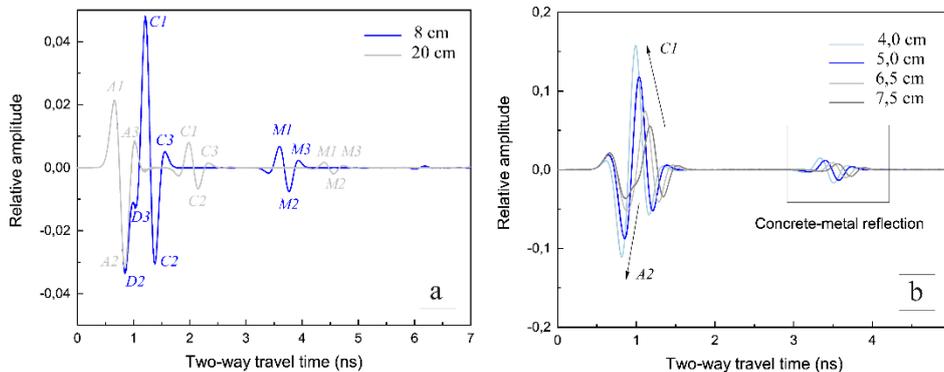


Figure 3 Traces computed when the antenna separation was between 20 and 8 cm (a) and 7,5 and 4 cm (b).

On one hand, when the antenna was located at a distance between 20 and 8 cm, the former 3 main signals and their peaks could be identified perfectly (Figure 3a). On the other hand, the problem arose when the antenna was too close to the concrete block, since an overlap occurred between the air wave and the concrete wave. Indeed, the closer the antennas to the concrete block, the closer the peaks A2 to C1 and, in addition, the 3rd peak of the air wave (A3) could not be distinguished (Figure 3b).

In order to understand the evolution in time and amplitude of the signals and their overlap, a parametrical study was conducted for each peak by means of the measurement of arrival times and the relative amplitudes. After measuring the time arrival of all peaks the propagation velocity (v_i) of the waves in concrete were calculated according to the following expression:

$$v_i = \frac{2 \cdot h}{\Delta t_{M_i}^{C_i}} \quad (\text{eq. 1})$$

where h is the height of the sample and $\Delta t_{M_i}^{C_i}$ the time increments of the arrivals between the concrete interface (C_i) and the metal interface (M_i). As it can be observed in Table 1, when the v_i was calculated with the same number of peaks all these combinations resulted in an accurate velocity determination ($v = 10$ cm/ns). This occurred while the air reflection and concrete reflections were not overlapped (distance (d) range between 20 and 8 cm of separation).

Table 1 Concrete velocity determination from the data obtained by the numerical model

d (cm)	Separated reflections						d (cm)	Overlapped reflections						
	Time increments (ns)			Concrete velocity (cm/ns)				Time increments (ns)			Concrete velocity (cm/ns)			
	$C1-M1$	$C2-M2$	$C3-M3$	$v(1)$	$v(2)$	$v(3)$		$C1-M1$	$C2-M2$	$C3-M3$	$v(1)$	$v(2)$	$v(3)$	
8	2,39	2,39	2,38	10,05	10,05	10,07	0,0	2,05	1,94	1,88	11,72	12,39	12,77	
10	2,39	2,39	2,39	10,05	10,04	10,05	4,0	2,34	2,35	2,34	10,24	10,22	10,24	
12	2,40	2,40	2,38	10,01	9,99	10,09	4,5	2,36	2,36	2,35	10,18	10,17	10,20	
14	2,41	2,40	2,39	9,96	10,01	10,04	5,0	2,37	2,36	2,36	10,14	10,15	10,18	
16	2,40	2,40	2,39	10,01	9,99	10,05	5,5	2,37	2,38	2,36	10,12	10,10	10,15	
18	2,41	2,41	2,39	9,96	9,96	10,05	6,5	2,38	2,38	2,36	10,10	10,09	10,15	
20	2,40	2,41	2,39	9,99	9,96	10,04	7,0	2,38	2,39	2,38	10,09	10,05	10,10	
Average				10,00	10,00	10,06	7,5	2,38	2,39	2,38	10,10	10,04	10,09	
Sta. Dev.				0,04	0,03	0,02	Average			10,14	10,12	10,16	Sta. Dev.	
										0,55	0,79	0,91		

Nevertheless, when the antenna was from 7,5 cm to 4 cm of separation, although the concrete reflection was overlapped with the air reflection, the peaks could be clearly identifiable and the concrete velocity was determined. But, as it is detailed in Table 1, the concrete reflection is somehow affected by the air wave (in particular $A3$) and this resulted in an increase of concrete velocity. Therefore, in this case the arrival time of the peaks should not be considered to calculate accurately the concrete velocity.

Despite this situation, it is important to highlight that if we calculate the theoretical time increments of the arrivals between the air wave (A_i) and the metal interface (M_i), since the properties of the materials are detailed in the numerical model, and we compare them with the ones measured in the obtained traces the agreement is almost perfect, as can be stated from the adjustments plotted in Figure 4a. That is, when the reflections were not overlapped. In case the overlap occurred (Figure 4b) the adjustment correlation is also very high, but the slope of the adjustment is not so close to 1.

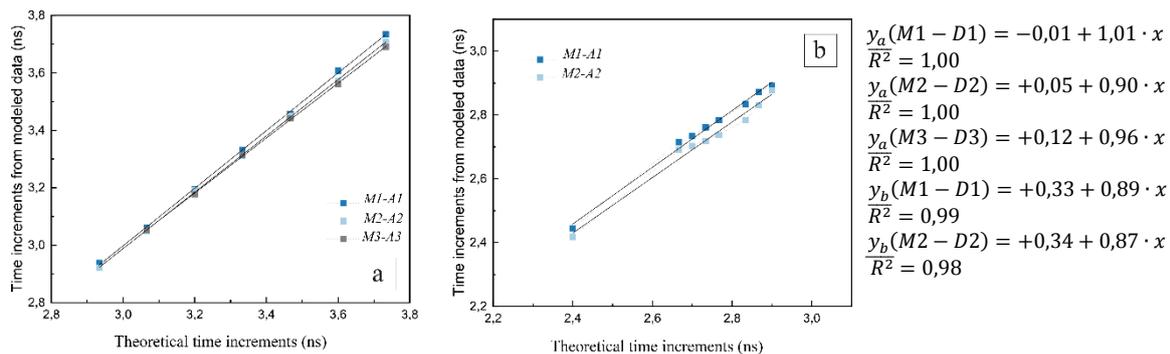


Figure 4 Adjustments between theoretical time increments and the measured on numerical model for distances between 20 and 8 cm (a) and 7,4 and 0 cm (b).

In relation to the relative amplitudes, no different pattern was found when the signals overlapped or not. The only difference was that the peak $A3$ was not possible to be measured when the distance was less than 8 cm. Peak $A1$ remained always constant and for the rest of the peaks, as it was expected, they presented and exponential decrease with a great reliability degree, since it was confirmed by the correlation coefficient obtained.

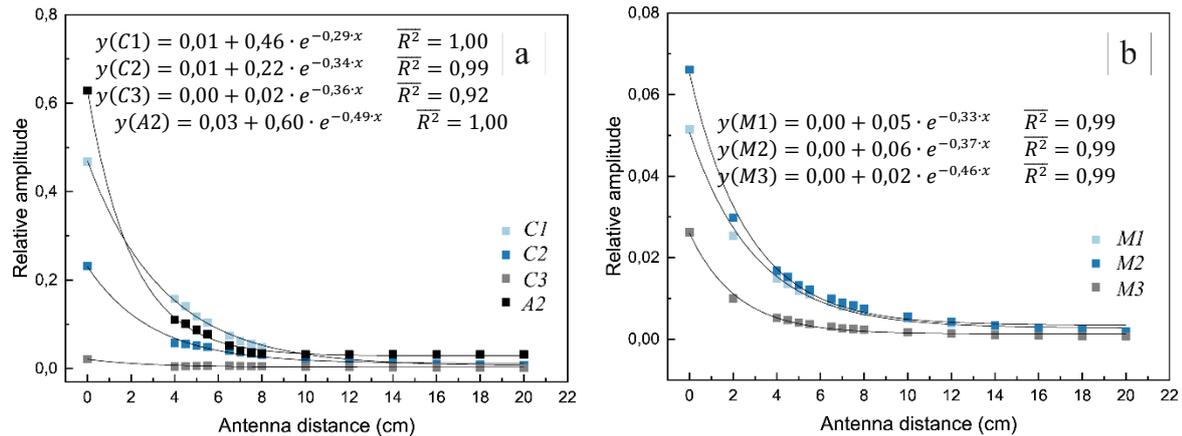


Figure 5 Adjustments between antenna distance and relative amplitudes for the air wave measurable peaks and concrete reflection peaks (a) and for the metal reflection peaks (b).

Conclusions

The work presented in this paper is really helpful for future research, because by means of the numerical modelling it helped us to understand the wave parameters behaviour. The wave parameters (arrival times, velocity increments and relative amplitudes) presented a pattern according to what it was expected, when the antenna was separated from the concrete sample more than 8 cm. Nevertheless, when this distance was closer than 8 cm, due to the signals overlap, the concrete reflection arrival times were altered and therefore could not be employed to calculate concrete velocities. Despite that, the relative amplitudes for these distances did present an exponential behaviour, in agreement with what it was expected.

Acknowledgements

The authors thank the financial support provided by the Generalitat Valenciana (Spain) under the “Proyectos de I+D+I desarrollados por grupos de investigación emergentes” research plan through a project entitled: “Caracterización de materiales de construcción por medio de las técnicas no destructivas del georradar y la termografía de infrarojos (2017-2019)”.

References

- Martínez-Sala, R., Rodríguez-Abad, I., Mené-Aparicio, J. and Fernández, A. [2015] Study of the waterfront advance in hardened concrete by means of energy level increment analysis. *8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*.
- Pajewski, L. and Benedetto, A. [2013] *Proceedings of the First Action's General Meeting (Rome). COST Action TU1208 Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*. Publishing House: Aracne.
- Rodríguez-Abad, I. [2010] Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera. PhD Thesis Universitat Politècnica de València.
- Rodríguez-Abad, I., Klysz, G., Martínez-Sala, R., Balayssac, J.P. and Mené, J. [2016] Waterfront depth analysis in hardened concrete by means of the nondestructive ground penetrating radar. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **9** (1), 91-97.
- Sbartai, Z., Laurens, S., Balayssac, J.P., Ballivy, G. and Arliguie, G. [2006] Effect of concrete moisture on radar signal amplitude. *ACI Materials Journal*, **103** (6), 419- 426.
- Taflove, A. [1995] *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. Artech House.
- Warren, C., Giannopoulos, A., and Giannakis I. [2016]. GprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, **209**, 163-170.
- Yelf, R. and Yelf, D. [2006] Where is the True Time Zero? *Electromagnetic Phenomena*, **7** (1), 158-163.