



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUOLA TÉCNICA SUPERIOR  
INGENIERÍA DE  
EDIFICACIÓN

PROYECTO FIN DE MÁSTER

**COMPARACIÓN DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS EN LA  
INSPECCIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO: GEORRADAR VERSUS  
TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**MÁSTER EN EDIFICACIÓN**

**ESPECIALIDAD DE TECNOLOGÍA**

CURSO ACADÉMICO 2012-2013

Autora: Nuria González Roura

Tutores: Isabel Rodríguez Abad  
Jesús Mené Aparicio

Julio 2013



*Agradezco a mis tutores Isabel Rodríguez y Jesús Mené, la gran ayuda que me han brindado en el desarrollo del trabajo. A José Vicente Fuente que me ha transmitido el conocimiento que tiene en la materia y me ha dado su apoyo personal. Y a Vicent Císcar por dedicarme su tiempo de forma totalmente altruista.*

*Dedico este trabajo a mis padres, por su gran apoyo en los momentos difíciles. A Vicente, Amparo, Paco y Ani. A mi hermano Julio y a Vane por ser el ejemplo para no decaer nunca. Y a mis dos hijas y mis sobrinos, por obligarme a no dejar nunca de sonreír.*

*Y especialmente, a mi marido Vicente, porque incluso en los momentos en los que parecía imposible que este trabajo saliese adelante, siempre ha conseguido ayudarme a volver a encontrar la ilusión y motivación que necesitaba. Y por quererme de verdad.*



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>9</b>
1.1. Descripción del material a estudio: hormigón. Principales patologías .....	11
1.2. Introducción a las técnicas no destructivas para la inspección y diagnóstico del estado del hormigón.....	13
1.3. Objetivo .....	17
1.4. Resumen del Proyecto Fin de Máster .....	19
<b>2. EL RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE (<i>GROUND PENETRATING RADAR, GPR</i>).....</b>	<b>23</b>
2.1. Fundamento de las ondas electromagnéticas empleadas por el georradar .....	24
2.2. Propagación de las ondas electromagnéticas .....	25
2.2.1. Propiedades dieléctricas de un medio.....	25
2.2.2. Velocidad de propagación de la onda electromagnética en un medio.....	26
2.2.3. Determinación de la profundidad a la que se localiza una interfase o anomalía .....	26
2.3. Instrumentación.....	28
2.4. Resolución del georradar .....	31
2.5. Registros: radargramas .....	37
2.6. Parámetros de un registro .....	40
2.7. El georradar como técnica de inspección del hormigón .....	42
<b>3. LA TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA PARA LA INSPECCIÓN DEL HORMIGÓN .....</b>	<b>47</b>
3.1. Fundamento de las ondas elásticas empleadas por la técnica de ultrasonidos.....	48
3.2. Propagación de las ondas elásticas .....	49
3.2.1. Determinación de las propiedades mecánicas de un medio mediante la técnica de ultrasonidos .....	50
3.2.2. Velocidad de propagación de la onda elástica en un medio.....	51
3.2.3. Determinación de la profundidad a la que se localiza una interfase o anomalía .....	52
3.3. Instrumentación.....	53
3.4. Registros: imágenes tomográficas .....	56
3.5. Resolución de equipos de inspección ultrasónica convencional y del tomógrafo ultrasónico basado en la técnica SAFT.....	60
3.5.1. Resolución de equipos de inspección ultrasónica convencional .....	60
3.5.2. Resolución de la técnica de tomografía ultrasónica .....	62
3.6. Parámetros de un registro .....	65
3.7. La tomografía ultrasónica como técnica de inspección del hormigón.....	67
<b>4. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>73</b>
4.1. Descripción del material de estudio .....	74
4.2. Descripción de los equipos empleados en el estudio .....	80
4.2.1. Equipo de georradar .....	80
4.2.2. Equipo de tomografía ultrasónica (MIRA) .....	81
4.3. Calibrado del equipo de georradar .....	83

4.3.1. Estudio de la señal emitida: determinación de la longitud de onda y frecuencia para cada caso.....	83
4.3.2. Determinación experimental de la constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ).....	84
4.4. Calibrado del equipo de tomografía ultrasónica MIRA.....	88
4.4.1. Estudio de la señal emitida: determinación de la longitud de onda y frecuencia para cada caso.....	88
4.4.2. Determinación experimental de la velocidad de propagación ultrasónica.....	90
4.5. Estudio de la resolución del georradar.....	91
4.5.1. Estudio de la resolución horizontal.....	91
4.5.2. Estudio de la resolución vertical.....	97
4.6. Estudio de la resolución del tomógrafo ultrasónico (MIRA).....	102
4.6.1. Resolución horizontal.....	102
4.6.2. Resolución vertical.....	102
4.7. Estudio experimental de la capacidad de penetración de las ondas.....	104
4.7.1. Capacidad de penetración de las ondas electromagnéticas.....	104
4.7.2. Capacidad de penetración de las ondas elásticas.....	106
4.8. Adquisición de registros.....	109
4.8.1. Método de adquisición de registros mediante georradar.....	109
4.8.2. Método de adquisición de registros mediante tomografía ultrasónica.....	111
4.9. Procesado de registros.....	113
4.9.1. Imágenes 2D de georradar.....	113
4.9.2. Imágenes 3D de georradar y <i>time-slices</i> .....	115
4.9.3. Imágenes de tomografía ultrasónica.....	116
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>119</b>
<b>6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>129</b>
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>137</b>
7.1. Conclusiones de las inspecciones realizadas.....	138
7.2. Conclusiones a tener en cuenta a efectos de la elección de las técnicas para un procedimiento basado en las técnicas no destructivas estudiadas.....	140
7.3. Conclusiones para la elaboración de un procedimiento de inspección.....	142
<b>8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>149</b>
<b>ANEXO 1. Listado de figuras.....</b>	<b>153</b>
<b>ANEXO 2. Listado de tablas.....</b>	<b>159</b>
<b>ANEXO 3. Imágenes 2D georradar. Radargramas.....</b>	<b>163</b>
<b>ANEXO 4. Imágenes 3D georradar. Time-slices.....</b>	<b>175</b>
<b>ANEXO 5. Imágenes tomográficas.....</b>	<b>187</b>

## CAPÍTULO 1

### **Introducción**

---



## 1. INTRODUCCIÓN

El planteamiento de este Proyecto Final de Máster surge de la necesidad de obtener cierta información de elementos estructurales, cuyo interior no es accesible y no es posible proceder mediante una campaña de inspección destructiva. Dicha información relevante comprende la geometría interna y la existencia de defectos distribuidos en dichos elementos.

En la actualidad existen diversas técnicas no destructivas que se emplean en la inspección de estructuras de hormigón armado. Por todo ello, se plantea un trabajo de investigación que integre dos técnicas no destructivas, como son la técnica de inspección mediante Radar de Penetración Terrestre (*Ground Penetrating Radar, GPR*), o georradar y la técnica de la Tomografía Ultrasónica, que son las técnicas no destructivas que mejor potencial tienen, para obtener la mejor combinación de éstas en la inspección de elementos de hormigón.

El interés del presente Proyecto se centra en la aplicación de estas técnicas no destructivas al hormigón armado, es decir, en desarrollar un protocolo de trabajo que permita la aplicación de diferentes técnicas no destructivas a partir del conocimiento experimental de sus capacidades y limitaciones. Se trata no sólo de conocer el estado general de la estructura a partir de estas técnicas no destructivas, sino también de ser capaces, por medio de las mismas, de dimensionar posibles defectos que hubiera. Los resultados previstos estarán, por tanto, orientados en esta dirección.

El presente trabajo se desarrolla dentro del Proyecto de Investigación y Desarrollo INFINIT, *Estrategias para unas infraestructuras inteligentes y seguras*, desarrollado por AIDICO (Instituto Tecnológico de la Construcción). Dicho Proyecto tiene como objeto cubrir desde varias áreas tecnológicas una estrategia conjunta para desarrollar y validar soluciones tecnológicas que puedan ser aprovechables para el sector de las infraestructuras, concretamente, el sector de la construcción y conservación de dichas infraestructuras, desde el punto de vista estructural, impacto medioambiental y de seguridad para los usuarios y operadores de las mismas. Por lo que el Proyecto comprende los principales aspectos que deben ser contemplados en la seguridad de las construcciones.

El presente trabajo de investigación ha sido aceptado para ser presentado en REHABEND 2014 *Congreso Latinoamericano sobre Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio*, que se celebrará en Santander (España) del 1 al 4 de abril de 2014. La ponencia será presentada con el título *“Evaluación no destructiva de estructuras de hormigón armado mediante la integración de radar de subsuelo y tomografía ultrasónica”* y como autores constan: **Fuente, José Vicente<sup>1</sup>; Rodríguez-Abad, Isabel<sup>2</sup>; González, Nuria<sup>1</sup>; Císcar, Vicent<sup>1</sup>; Mené, Jesús<sup>2</sup>** (1: AIDICO Instituto Tecnológico de la Construcción; 2: Universitat Politècnica de València).

### 1.1. Descripción del material a estudio: hormigón. Principales patologías

---

Las estructuras constituyen un elemento fundamental para conseguir la necesaria seguridad de las construcciones que en ellas se sustentan, tanto de edificación como de ingeniería civil y, en consecuencia, la de los usuarios que las utilizan. Entre los diferentes materiales que se emplean en su construcción, el hormigón es el más habitual, por lo que su control y mantenimiento cobran una especial relevancia para la consecución de dicha seguridad. Es fundamental estudiar aquellos síntomas patológicos que son expresivos de un comportamiento anormal de las estructuras de hormigón armado, analizando posteriormente las causas de los mismos, su significado y las actuaciones recomendables.

El hormigón es el material resultante de unir áridos con la pasta que se obtiene al añadir agua a un conglomerante que, generalmente, es un cemento artificial. El más importante y habitual es el cemento Portland. Los áridos proceden de la desintegración o trituración, natural o artificial de rocas. El árido cuyo tamaño sea superior a 4 mm se denomina árido grueso o grava, mientras que el inferior a 4 mm se denomina árido fino o arena. La pasta formada por cemento y agua es la que confiere al hormigón su fraguado y endurecimiento, mientras que el árido es un material inerte sin participación directa en el fraguado y endurecimiento del hormigón. El cemento se hidrata en contacto con el agua, iniciándose diversas reacciones químicas de hidratación que lo convierten en una pasta maleable con buenas propiedades adherentes, que en el transcurso de unas horas, derivan en el fraguado y endurecimiento progresivo de la mezcla, obteniéndose un material de consistencia pétreo.

Según **García Meseguer** (2009), entre los síntomas patológicos que sufre el hormigón, los más importantes son: las rugosidades y formación de películas superficiales, los cambios de coloración, las exfoliaciones, las descantilladuras o degradaciones y, sobre todo, la aparición de fisuras, coqueras y oquedades. La inspección del material para la determinación de la existencia de los distintos tipos de anomalías que pueden presentarse en los elementos de hormigón armado, es imprescindible para poder diagnosticar acertadamente la etiología de las lesiones.

**Cervera López** (2002), del Grupo Español del Hormigón, GEHO, publica en su Boletín nº 10 *“Encuesta sobre patología de estructuras de hormigón”*, una serie de estadísticas, de las que se extrae que las tres fases de la construcción que más patologías presentan son (por este orden) la fase de proyecto, la calidad de los materiales y la ejecución, las cuales suman el 88% de las causas de las patologías generadas. El mismo estudio estadístico indica que en función del material empleado en la construcción en España, el que mayor cantidad de patologías conlleva es el hormigón, en un 86% de los casos, evidentemente motivado por ser el material más ampliamente utilizado.

Todo ello conlleva a que la mayor parte de las patologías estén relacionadas con la puesta en obra del hormigón, lo que genera fisuras, coqueas y oquedades como lesiones más frecuentes, así como errores en el diseño de las estructuras (fase de proyecto), los cuales dan lugar a erróneas disposiciones de las armaduras, que pueden dar lugar a patologías sumamente graves. La tipología de patologías que generan las anteriores causas, pueden poner en entredicho la duración de la vida en servicio de las estructuras y, por consiguiente, de las personas que las habitan.

Motivado por ello, en el presente trabajo se ha pretendido simular en un bloque de hormigón construido a tal efecto, a modo de banco de ensayos, las lesiones que más habitualmente se encuentran en estructuras de hormigón, dejando embebidas esferas de distintos materiales en su interior y colocando armados de distintos diámetros de barras y a distintas profundidades, para su estudio mediante técnicas no destructivas.

## 1.2. Introducción a las técnicas no destructivas para la inspección y diagnóstico del estado del hormigón

---

El término *ensayo no destructivo* (END, en inglés *non-destructive testing NDT*), es una denominación general aplicada a una serie de técnicas destinadas a inspeccionar o probar un material sin perjudicar su estado de servicio futuro, es decir, sin menoscabo de sus propiedades físicas y químicas.

Diversos autores han clasificado los ensayos no destructivos aplicables al hormigón. **Tobio** (1967) propone una clasificación según el tipo de fuente que genera la energía necesaria para su realización. **Fernández Gómez** (2001) los clasifica según su campo de aplicación.

A menudo es necesario para inspeccionar estructuras de hormigón, una vez éste ha endurecido, determinar si la estructura es adecuada para su uso proyectado. Lo ideal sería que tales pruebas pudieran hacerse sin dañar el hormigón.

Las técnicas que existen para la evaluación de un elemento de hormigón, engloban las que son completamente no destructivas, que no dañan de ningún modo el elemento estudiado, aquellas técnicas a través de las cuales resulta sólo ligeramente dañada la superficie del elemento de hormigón, que se consideran técnicas *quasi* no destructivas y, finalmente, las técnicas destructivas, donde la superficie del elemento debe ser reparada tras la prueba.

La gama de propiedades que pueden ser evaluadas utilizando pruebas no destructivas y pruebas destructivas es bastante amplia, e incluye parámetros fundamentales como la densidad, módulo elástico y resistencia, así como la dureza y la absorción de la superficie, la ubicación del armado, su tamaño y distancia a la superficie. En algunos casos también es posible comprobar la calidad de la puesta en obra y la integridad estructural por la capacidad de detectar huecos, grietas y fisuras.

Los ensayos no destructivos se pueden aplicar a las estructuras antiguas y nuevas. Para las nuevas, las aplicaciones más probables estarán relacionadas con el control de calidad, o para resolver dudas sobre la calidad de los materiales de construcción. La prueba de las estructuras

existentes normalmente está relacionada con la evaluación de la integridad estructural o su adecuación. Tal y como indica **International Atomic Energy Agency** (2002), en cualquiera de los casos, las técnicas no destructivas no pueden sustituir a otras destructivas tradicionales, sino que se utilizan como técnicas complementarias a éstas y aportan datos cualitativos y cuantitativos sobre el estado del material, muy especialmente de zonas no visibles del mismo.

Además de la técnica de georradar y de la tomografía ultrasónica, que se van a estudiar detalladamente en el presente trabajo, existen diversas técnicas no destructivas para la inspección de hormigón. A continuación se enumeran las principales:

#### **Inspección visual:**

Es el precursor esencial para cualquier ensayo no destructivo previsto. Sirve para poder establecer las posibles causas de los daños aparecidos en una estructura de hormigón armado y, por tanto, identificar cuáles de los diversos métodos de ensayos no destructivos disponibles, podrían ser de utilidad para la investigación de la patología.

#### **Método de potencial eléctrico de media celda:**

Se utiliza para determinar el potencial de corrosión de las barras de acero del armado de las estructuras.

#### **Radiografía mediante rayos X:**

Es una técnica que emplea la radiación ionizante de alta energía, la cual, al pasar a través de un material sólido, parte de su energía es atenuada, consecuencia de las diferencias de espesor, densidad o presencia de discontinuidades en el material. Permite la detección, interpretación y evaluación de discontinuidades internas del hormigón tales como grietas, porosidad, elementos metálicos o no metálicos, etc...

#### **Métodos basados en ondas elásticas:**

Consisten en introducir un pulso elástico en el medio a estudio mediante un transductor (pulso-eco) o impacto mecánico (impacto-eco). El pulso-eco se propaga por el medio y se refleja en aquellos defectos del material o interfases de diferentes densidades o módulos elásticos. Estas ondas reflejadas, se reciben en un segundo transductor, cuya salida es un

osciloscopio o equipo similar. Se utiliza en la detección de discontinuidades o interfases del elemento de hormigón a estudio, así como coqueras y calidad del hormigón.

Dentro de estas técnicas, la más empleada para la inspección de hormigón es la técnica de ultrasonidos.

La generación de las ondas ultrasónicas se basa en que una unidad de pulso envía una señal eléctrica al transductor, el cual, mediante un cristal piezoeléctrico interno, genera una onda de tensión de baja energía y alta frecuencia. La onda viaja entonces a través de la sección, siendo captada por el transductor receptor, que puede situarse en varias posiciones en función del método empleado, el cuál a su vez convierte la energía de la onda en energía eléctrica.

El procedimiento de interpretación de esta técnica se realiza analizando las variaciones que experimentan el pulso u onda durante su tránsito por el medio objeto de estudio. Mediante la inspección ultrasónica se obtiene fundamentalmente información de los diferentes caminos de propagación que recorre la onda a través del material. Se determina el tiempo de recorrido y la potencia del impulso recibido respecto del emitido.

El hormigón se caracteriza por su carácter heterogéneo. Ello provoca comportamientos diversos ante la propagación de las ondas elásticas y es en este principio en el que se fundamenta la técnica de ultrasonidos.

#### **Georradar:**

A grandes rasgos, es un método de investigación no destructivo del interior de medios materiales. Se basa en la emisión de pulsos electromagnéticos de muy corta duración a través de una antena y que se transmiten por el medio que se quiere analizar. Permite obtener imágenes del interior de un medio relacionadas con cambios en sus parámetros electromagnéticos. De este modo, se utiliza para localizar oquedades, nivel freático, elementos embebidos en el interior del medio, etc...

#### **Termografía infrarroja:**

Cualquier objeto cuya temperatura sea superior al cero absoluto (0 Kelvin = -273.15 °C) emite radiación infrarroja, invisible al ojo humano. Tal y como demostró el físico **Max Planck** en el año 1900, existe una correlación entre la temperatura de un cuerpo y la intensidad de la

radiación infrarroja que emite. Una cámara termográfica mide la onda larga de la radiación infrarroja recibida en el campo de visión, a partir de la cual calcula la temperatura del objeto a medir. El cálculo tiene en cuenta la emisividad de la superficie del objeto medido, así como la compensación de la temperatura reflejada. La termografía (medición de temperatura con una cámara termográfica) es un método de medición pasivo, sin contacto. La imagen termográfica muestra la distribución de temperatura en la superficie de un objeto, por lo que una cámara termográfica no se debe usar para inspeccionar el interior o a través de los objetos. Se utiliza para detectar huecos, fisuras, presencia de humedad y otras patologías en el hormigón.

### 1.3. Objetivo

---

Uno de los objetivos del proyecto INIFINIT, dentro del cual se enmarca este trabajo, es el de determinar la capacidad del georradar y de la tomografía ultrasónica en virtud de las indicaciones detectadas, de su vinculación a discontinuidades y/o defectos, realizar la evaluación de forma conjunta mediante la posibilidad de fusionar los datos que ambas técnicas proporcionen y, si es posible, especificar un procedimiento puramente no destructivo para la detección de anomalías en estructuras de hormigón armado, mediante el uso de estas dos técnicas.

Este estudio permitirá su aplicación a diferentes elementos estructurales donde puede resultar atractivo e incluso necesario en ciertos casos, el conocer, no sólo el estado general de la estructura a partir de estas técnicas no destructivas, sino dimensionar posibles defectos que hubiera. El sector de aplicación sería el control de calidad, mantenimiento y reparación de estructuras de hormigón armado mediante técnicas de auscultación, pero sería claramente extrapolable a estructuras pertenecientes al patrimonio histórico como son los muros de mampostería, ladrillo y sillería, con la pertinente calibración y limitaciones en la resolución final de la integración de las técnicas no destructivas.

Por todo ello, el objetivo principal de este trabajo es la comparación de la capacidad de las técnicas no destructivas del georradar y de la tomografía ultrasónica, para detectar anomalías o irregularidades en el interior del hormigón armado.

Para la consecución del objetivo principal ha sido necesario el desarrollo de los siguientes objetivos particulares:

- Estudiar el estado del arte de la inspección en hormigón armado mediante georradar y mediante tomografía ultrasónica.
- Estudiar los fundamentos de la técnica de georradar y de la tomografía ultrasónica.
- Estudiar la resolución horizontal y vertical de cada una de las dos técnicas.
- Realizar medidas experimentales que aporten resultados de las mediciones según cada técnica, para su posterior comparación e interpretación.

- Obtener conclusiones respecto a como combinar el uso de ambas técnicas en la inspección de hormigón armado.
- Extraer conclusiones a tener en cuenta a la hora de elaborar un procedimiento de inspección en estructuras de hormigón armado, mediante la técnica de georradar y la tomografía ultrasónica.

#### 1.4. Resumen del Proyecto Fin de Máster

---

El presente trabajo presenta un estudio de aplicación de dos técnicas que están dando buenos resultados, como son la exploración con radar de subsuelo o georradar y equipos desarrollados para la inspección ultrasónica del hormigón. Para la realización de este trabajo se construyó un bloque de hormigón con armados de diferentes diámetros e inclusiones esféricas de diferente tamaño en posiciones concretas.

Las técnicas aplicadas son la inspección con georradar con dos frecuencias de inspección 900 MHz y 2 GHz, mientras que también se ha utilizado un equipo tomógrafo ultrasónico para hormigón (MIRA).

El trabajo comprende un estudio de calibración inicial de los equipos por ambas técnicas para conocer su resolución y limitaciones, así como el alcance de las inspecciones.

La memoria en la que se describe el trabajo realizado se ha organizado en siete capítulos. En el primer capítulo se introduce el contexto de estudio y el objetivo del mismo. En el segundo se presenta la técnica del georradar. En el tercer capítulo se describe la técnica de la tomografía ultrasónica. En el capítulo cuarto se desarrolla el programa experimental realizado. En el quinto se aportan los resultados obtenidos, los cuales se interpretan en el capítulo sexto. Finalmente en el séptimo capítulo se extraen las conclusiones del trabajo presentado.



## CAPÍTULO 2

### **El radar de penetración terrestre**

### **(Ground Penetrating Radar, GPR)**

---



## 2. EL RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE (*GROUND PENETRATING RADAR, GPR*)

El radar de penetración terrestre (*Ground Penetrating Radar, GPR*), comúnmente llamado georradar, es un término general para la técnica que utiliza ondas electromagnéticas de altas frecuencias orientadas a detectar las características internas de un determinado medio.

Muchos autores han aportado información sobre el fundamento y el estado del arte de la técnica de georradar, como son **Annan** (1999), **Corralizo Nieto** (2005), **Rodríguez-Abad** (2010) y **Malcom y Honggang** (2011).

En este capítulo se describen los principales conceptos de georradar, definiendo los aspectos fundamentales de las ondas electromagnéticas que emplea el georradar. Además se definen los factores que influyen en la propagación de dichas ondas a través de un medio (propiedades dieléctricas) y la velocidad de propagación de las ondas, así como puede determinarse la profundidad a la que se encuentra una anomalía o interfase. También se describe la instrumentación para un equipo de georradar.

Como tema fundamental de este trabajo, en el presente capítulo se definen los conceptos de resolución vertical y horizontal de una antena de georradar, así como la atenuación.

En cuanto a los registros que se obtienen de la realización de medidas experimentales, se detalla en este capítulo el concepto de radargrama y se definen los parámetros que se utilizarán en su interpretación.

También se resumen los estudios realizados sobre la técnica de georradar en el ámbito de la inspección del hormigón.

## 2.1. Fundamento de las ondas electromagnéticas empleadas por el georradar

Una onda electromagnética es la forma de propagación de la radiación electromagnética a través del espacio. A diferencia de las ondas mecánicas, las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio material para propagarse, es decir, pueden desplazarse por el vacío. Quizá su descubrimiento sea el mayor logro teórico de la física en el siglo XIX.

La base teórica de todo fenómeno electromagnético se apoya en la teoría de campos electromagnéticos. Sus ecuaciones básicas fueron formuladas por **Maxwell** y relacionan los campos eléctrico y magnético con sus fuentes. El comportamiento de una onda electromagnética durante su propagación por un medio determinado, se determina a partir de las ecuaciones de Maxwell.

La onda electromagnética es la perturbación simultánea de los campos eléctrico ( $E$ ) y magnético ( $B$ ) existentes en una región.

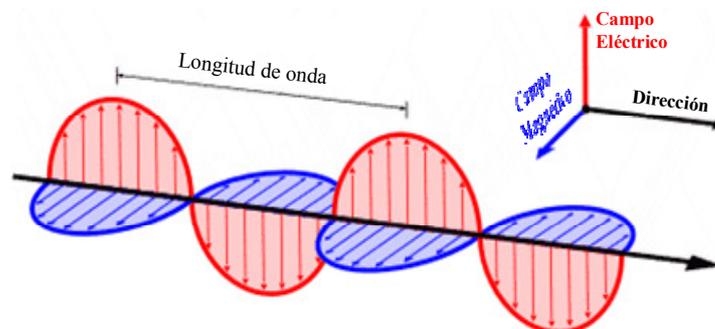


Fig. 1. Onda electromagnética

Las ondas electromagnéticas son transversales; las direcciones de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la de propagación (Fig. 1).

## 2.2. Propagación de las ondas electromagnéticas

---

### 2.2.1. Propiedades dieléctricas de un medio

La onda electromagnética se propaga por el interior del medio que se desea analizar (hormigón), a una velocidad que depende principalmente de la conductividad eléctrica, la permitividad dieléctrica, la permeabilidad magnética y la frecuencia de emisión. También influyen variables externas tales como la temperatura, la presión, la humedad, etc. Todos estos parámetros, pueden ser relacionados unos en términos de otros. Los tres primeros son propios del medio o material de propagación, determinan la propagación de una onda electromagnética en el interior de un medio diferente al vacío y se definen como:

#### **Conductividad eléctrica ( $\sigma$ ):**

Es la medida de la respuesta de las cargas libres del medio en presencia de un campo eléctrico externo, es decir, de la capacidad que tiene un material de conducir corriente eléctrica.

#### **Permitividad dieléctrica absoluta ( $\epsilon_{abs}$ ):**

Es una constante de proporcionalidad entre la intensidad del campo eléctrico externo aplicado y el vector desplazamiento eléctrico.

La permitividad absoluta ( $\epsilon_{abs}$ ), cuyas unidades son F/m, se define como el producto entre la permitividad relativa de un material ( $\epsilon_r$ ), que es una constante adimensional y la permitividad dieléctrica del vacío ( $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$  F/m, donde F son Faradios).

$$\epsilon_{abs} = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (\text{ec. 1})$$

La permitividad o constante dieléctrica relativa del material ( $\epsilon_r$ ) es una constante que da una medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico

**Permeabilidad magnética ( $\mu$ ):**

Relaciona la inducción magnética con la intensidad del campo magnético.

**2.2.2. Velocidad de propagación de la onda electromagnética en un medio**

La velocidad de propagación ( $v$ ) se puede calcular de forma sencilla en los casos en los que es posible una aproximación de pequeñas pérdidas. Esto ocurre cuando los medios por los que se propaga la señal son dieléctricos casi perfectos. Cuando los medios son dieléctricos o poco conductores (que son la mayoría de los materiales que se estudian habitualmente), el término asociado con la conductividad ( $\sigma$ ) tiende a cero. Si además el medio es no magnético (como también sucede en la mayoría de los casos), la permeabilidad magnética ( $\mu$ ) tiende a la unidad. Bajo estas condiciones, la velocidad se puede estimar utilizando una ecuación que depende únicamente de la velocidad de la luz en el vacío ( $c=3 \cdot 10^8$  m/s) y de la constante dieléctrica relativa del medio ( $\epsilon_r$ ) (ec.2):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{ec. 2})$$

**2.2.3. Determinación de la profundidad a la que se localiza una interfase o anomalía**

El tiempo que tarda una onda desde se emite hasta que se recibe tras reflejarse en una interfase es conocido, ya que se visualiza en las señales obtenidas mediante el empleo del equipo de georradar.

El cálculo de la profundidad a la que se encuentra una interfase o anomalía ( $h$ ), viene dado por la expresión:

$$h = v \frac{\Delta t}{2} \quad (\text{ec. 3})$$

$$h = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \Delta t \quad (\text{ec. 4})$$

donde:

$v$  es la velocidad a la que se propaga la onda electromagnética

$\Delta t$  es el tiempo que tarda la señal desde que se emite hasta que se recibe

$\epsilon_r$  es la constante dieléctrica relativa del medio

$c$  es la velocidad de la luz ( $3 \cdot 10^8$  m/s)

Como el tiempo de propagación de la onda es el tiempo de ida y vuelta al emisor–receptor de la onda, para el cálculo de la profundidad ha de emplearse la mitad de ese tiempo.

Si se determina la velocidad de propagación de la onda en el medio investigado, o bien su constante dieléctrica relativa, es posible por tanto convertir la escala de tiempos en una escala de profundidad.

### 2.3. Instrumentación

---

El equipo de georradar consta básicamente de una unidad central de control y adquisición, una antena receptora y una antena emisora, además del equipamiento complementario.

#### **Unidad central de control:**

La unidad de control del equipo coordina y controla las antenas y el equipamiento complementario, así como la adquisición y el almacenamiento de los datos registrados.

Consiste básicamente en una consola electrónica que funciona a través de un procesador central, que es utilizada mediante un teclado de funciones básicas y controlada a través de una pantalla (Fig. 2). Las antenas se conectan a esta unidad de control a través de cables metálicos u ópticos.

Se trata de un sistema especialmente desarrollado para enviar pulsos electromagnéticos de potencia sumamente baja y ultra ancho de banda dentro de un determinado material. La señal es recibida en la antena receptora, midiendo el tiempo que tarda en ser reflejada desde las discontinuidades dieléctricas del medio, para luego almacenar los datos. La emisión de los pulsos se coordina desde aquí hacia la antena mediante un reloj interno. Cada uno de estos pulsos activa el o los dipolos de la antena para emitir la señal a la frecuencia central que corresponde al modelo de antena utilizado. Mientras no se emiten pulsos, el sistema continúa recibiendo las reflexiones provenientes de los distintos reflectores del medio.

Esta unidad puede realizar un tratamiento básico de la señal recibida en el proceso de adquisición de datos mediante una aplicación informática implementada.



Fig. 2. Unidad de control y adquisición de lo equipo de georradar SIR-3000 de la marca GSSI

### Antenas:

Las antenas son los elementos que emiten el pulso electromagnético y reciben la energía que vuelve a la superficie tras la reflexión. La antena transmisora es el equipo transductor que transforma los pulsos eléctricos provenientes de la unidad central en impulsos electromagnéticos. La antena receptora es la que capta la onda electromagnética y la transforma en pulsos eléctricos que son enviados a la unidad central que los procesa como información. Pueden ser monoestáticas, que son antenas emisoras o receptoras, o biestáticas, las cuales disponen de un módulo emisor y otro receptor por separado.

Existen distintos tipos de antenas según el tipo de aplicación en la que se trabaje. Las antenas isotrópicas radian energía en todas direcciones. Las antenas utilizadas en georradar son direccionales, es decir, que emiten en una dirección privilegiada de radiación. Es necesario que las antenas utilizadas en estudios con georradar sean muy directivas. La direccionalidad es un factor importante en los estudios con georradar, porque un haz de emisión estrecho permite concentrar la mayor cantidad de energía hacia el interior del material, que es el área de interés, de este modo se disminuye la relación señal/ruido. La disminución del ruido se consigue porque al emitir la energía sólo al interior del medio de estudio, se evitan las reflexiones en objetos externos. Por este motivo es necesario el uso de antenas direccionales y apantalladas.

Habitualmente las antenas se clasifican en función de su frecuencia central de emisión, la cual limita el alcance del método (rango) y su resolución. La elección del tipo de antena y por tanto, su frecuencia, determina la penetración de la señal emitida en el material a inspeccionar. Es

importante tener en cuenta que, conforme aumenta la frecuencia de emisión, las dimensiones de la antena disminuyen, como se observa en la Fig. 3

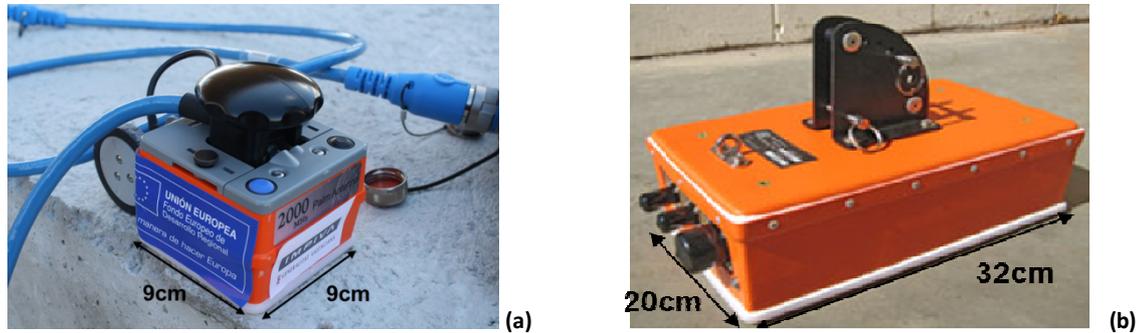


Fig. 3. Antenas de frecuencias 2 GHz (a) y 900 MHz de la marca GSSI (b)

#### Equipamiento complementario:

A los componentes básicos del georradar (unidad de control y antena/s), se pueden añadir accesorios que faciliten la realización de la inspección. Entre ellos están los carros para desplazar las antenas de mayor tamaño, bastones para facilitar el desplazamiento de las antenas, odómetros para determinar la posición de la antena (implementados en un soporte con ruedas o en la propia antena) y los sistemas GPS para la determinación de las coordenadas de los perfiles obtenidos (Fig. 4).

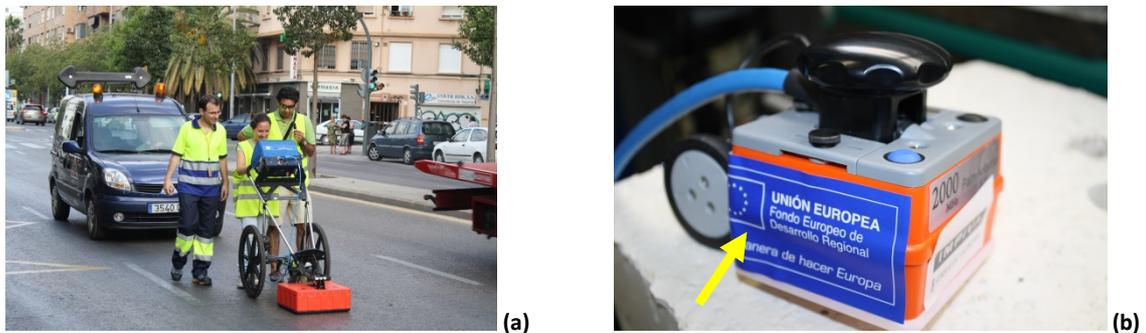


Fig. 4. Carro de transporte de equipo (a) y odómetro implementado en antena de 2 GHz (b), de la marca GSSI

## 2.4. Resolución del georradar

---

Como punto preliminar a la hora de estudiar la resolución del georradar, es necesario conocer qué es la atenuación. Ésta ( $\alpha$ ) se define como la pérdida de energía que sufre una onda como consecuencia de su propagación por un medio.

El campo electromagnético continuo se dispersa a medida que el frente de onda se aleja de la fuente, lo que hace que las ondas electromagnéticas se alejen cada vez más entre sí, en consecuencia, la cantidad de ondas por unidad de área es menor.

Cabe destacar que no se pierde ni se disipa nada de la potencia irradiada por la fuente a medida que el frente de onda se aleja, sino que el frente se extiende cada vez más sobre un área mayor lo que ocasiona una pérdida de potencia que se suele llamar atenuación de la onda.

La atenuación se determina según la ec. 5 como:

donde:

$$\alpha = \frac{W'}{c} \sqrt{\frac{\mu_r \epsilon_r}{2}} \left[ (1 + p^2) - 1 \right] \quad (\text{ec. 5})$$

$W' = 2\pi f$  es la pulsación

$c$  es la velocidad de la luz en el vacío

$\mu_r$  es la permeabilidad magnética del medio

$\epsilon_r$  es la permitividad dieléctrica del medio

$p = \frac{\sigma}{W\epsilon_r}$  es un factor de pérdidas, siendo  $\sigma$  la conductividad

Si se considera que el medio estudiado es de bajas pérdidas ( $\rho=1$ ) y no magnético ( $\mu_r=1$ ), la ecuación que define la atenuación resulta:

$$\alpha = \frac{w}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{2}} = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{2}} \quad (\text{ud.: m}^{-1}) \quad (\text{ec. 6})$$

Esto significa que la atenuación depende de la frecuencia ( $f$ ) a la que se emite el pulso y de la permitividad dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) del medio estudiado.

Se define como resolución del georradar la capacidad de las antenas para distinguir elementos o anomalías en el medio objeto del estudio.

#### Resolución horizontal:

La resolución horizontal de una antena, se define como su capacidad para diferenciar dos elementos adyacentes en la dirección de desplazamiento de la antena. Se le conoce también por resolución lateral o resolución espacial. En el caso de estudios en hormigón, la resolución horizontal es la condición más restrictiva y depende de las características de la señal, de las propiedades electromagnéticas del medio y de la distancia de la antena a la anomalía.

La resolución horizontal está relacionada con la huella de la antena o primera zona de Fresnel. En un sistema de georradar, la antena genera un haz aproximadamente cónico. La dirección de desplazamiento de la antena suele corresponder con la del semieje mayor de su huella (área de incidencia en la superficie reflectora). La mayor parte de la energía radiada queda comprendida dentro de la zona definida por el ángulo de radiación, que varía según la antena, entre 45° y 90°, en la dirección de desplazamiento de la antena (Fig. 5).

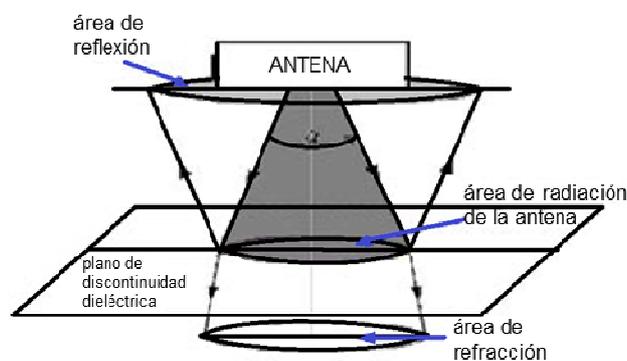


Fig. 5. Esquema simplificado de radiación de la antena emisora con ángulo de radiación  $\alpha$

Se considera como la primera zona de Fresnel la huella de la antena, o el área iluminada por la antena. La primera zona de Fresnel define el área mínima detectable por la antena, de tal forma que las anomalías de menor tamaño que el área, no se detectan. Cuanto mayor sea esta zona, peor será la resolución horizontal a la hora de detectar anomalías adyacentes y cuanto mayor sea la frecuencia utilizada, menor será el radio de la primera zona de Fresnel. Según algunos autores, la primera zona de Fresnel es una superficie circular, en cambio otros consideran que tiene forma elíptica.

Como parte fundamental del presente trabajo, se ha consultado en bibliografía distintos criterios teóricos que permitan el cálculo de valores teóricos mínimos de la resolución horizontal. De entre ellos se describen los siguientes:

Criterio 1:

Según un trabajo de **Pérez Gracia et al. (2008)**, una forma usual de estimar la primera zona de Fresnel es considerarla como una superficie circular que está definida por su radio ( $r_F$ ):

$$r_F = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda 2h} \quad (\text{ec. 7})$$

donde:

$\lambda$  es la longitud de onda dominante

$h$  es la distancia entre los puntos de emisión y recepción

Criterio 2:

Según el mismo trabajo de **Pérez Gracia et al. (2008)**, otra definición usual de la primera zona de Fresnel, la considera como una superficie circular que está definida por su diámetro ( $d_F$ ):

$$d_F = 2 \sqrt{\left(h + \frac{\lambda^2}{4}\right)^2 - h^2} \quad (\text{ec. 8})$$

donde:

$\lambda$  es la longitud de onda dominante

$h$  es la distancia entre los puntos de emisión y recepción

**Criterio 3:**

Finalmente, el mismo estudio de los autores **Pérez Gracia et. al.** (2008), indica que otra expresión común para obtener la primera zona de Fresnel, consiste en considerarla como una superficie elíptica, definida por sus dos ejes ( $A$  y  $B$ ).

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{h}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (\text{ec.9}) \quad B = \frac{A}{2} \quad (\text{ec. 10})$$

donde:

$\lambda$  es la longitud de onda dominante

$h$  es la distancia entre los puntos de emisión y recepción

$\epsilon_r$  es la constante dieléctrica del medio donde se encuentra la anomalía

**Criterio 4:**

En los trabajos de **Leucci et. al.** (2003) y **Conyers y Godman** (1997), se define el área de la primera zona de Fresnel como una elipse, calculando la longitud de su eje mayor ( $A$ ), que corresponde a la dirección en la que se desplaza la antena.

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{h}{\sqrt{\epsilon_r + 1}} \quad (\text{ec. 11})$$

donde:

$\lambda$  es la longitud de onda dominante

$h$  es la distancia entre los puntos de emisión y recepción

$\epsilon_r$  es la constante dieléctrica del medio donde se encuentra la anomalía

**Criterio 5:**

**Daniels** (2004), en su trabajo define que la resolución horizontal depende del coeficiente de atenuación ( $\alpha$ ) y es inversamente proporcional a su raíz. Esta relación determina que la resolución horizontal es menor en medios poco atenuantes que en los medios altamente atenuantes. Daniels toma en cuenta esta relación y define la resolución horizontal ( $SR$ ) de la siguiente forma:

$$SR = 4h \sqrt{\frac{\ln 2}{2 + \alpha h}} \quad (\text{ec. 12})$$

donde:

$h$  es la distancia entre los puntos de emisión y recepción

$\alpha$  es el coeficiente de atenuación de la señal en el material donde se encuentra la anomalía

### Resolución vertical:

La resolución vertical de una antena la determina su capacidad para diferenciar dos señales cercanas en el tiempo, es decir, para detectar las distintas reflexiones producidas por dos discontinuidades electromagnéticas del medio, consecutivas en el tiempo de propagación.

Existen diversos autores que han propuesto una serie de criterios, en base a los cuales hacer el cálculo teórico de la resolución vertical, de entre ellos se han escogido los dos siguientes:

Criterio 1:

Según describe **Rodríguez Abad** (2010), la resolución vertical de una antena de georradar, viene dada por su capacidad para diferenciar dos señales cercanas en el tiempo.

Una antena de georradar, está diseñada para que se cumpla la relación siguiente entre el ancho de banda ( $B$ ) y la frecuencia central ( $f$ ):

$$B \cong f \frac{1}{T} \text{ (ec. 13)}$$

donde:

$T$  es la duración del pulso

Una medida de la resolución vertical ( $R_v$ ) es el espesor mínimo que puede tener una interfase intermedia para que sea claramente detectada. Para que el georradar sea capaz de identificarla con nitidez de espesor ( $e_{medio}$ ), es necesario que en el momento en que la reflexión de la base alcanza en su camino de vuelta la cara superior, se haya reflejado la totalidad de la señal primera, por tanto, la resolución vertical ( $R_v$ ), se podrá expresar según la siguiente relación:

$$R_v = e_{medio} \geq \frac{vT}{2} = \frac{\lambda}{2} \text{ (ec. 14)}$$

donde:

$v$  es la velocidad de propagación de las ondas en el medio

$T$  es la duración de la señal o pulso

$\lambda$  es la longitud de onda de la señal en el medio estudiado

Criterio 2:

En **Sheriff y Geldart** (1995) se expone que la resolución vertical ( $R_v$ ) depende fundamentalmente de la longitud de onda ( $\lambda$ ). La distancia mínima para que una antena sea capaz de identificar dos reflectores separados debe ser  $\frac{1}{4} \lambda$ , por tanto:

$$R_v = \frac{\lambda}{4} \quad (\text{ec. 15})$$

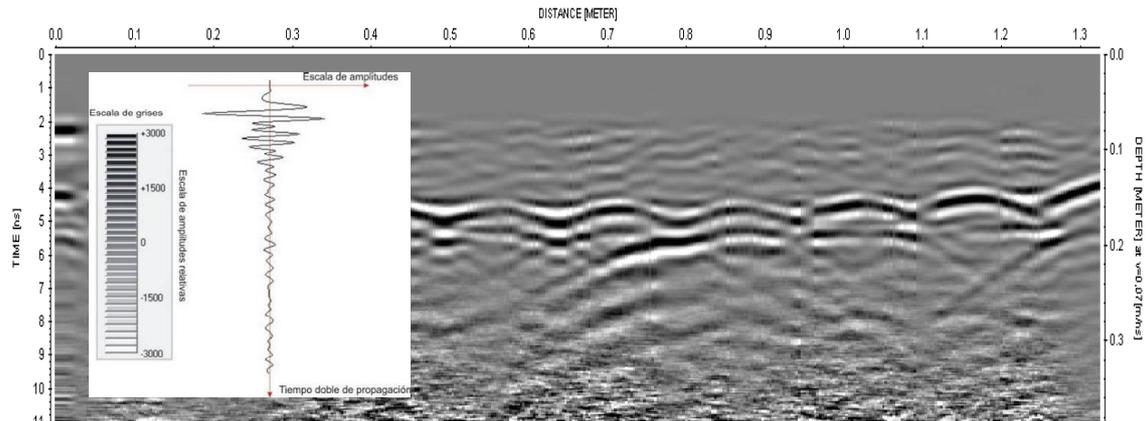
## 2.5. Registros: radargramas

---

La antena receptora del equipo de georradar incorpora un circuito electrónico conectado al circuito electrónico de amplificación y recepción. Una vez que las reflexiones la alcanzan, este circuito convierte el pulso electromagnético de alta frecuencia en otro de banda de audiofrecuencia que es enviado a través de un cable coaxial altamente apantallado a la unidad central, donde la señal es reconstruida, procesada y almacenada, obteniéndose como resultado final el radargrama o registro de datos del georradar.

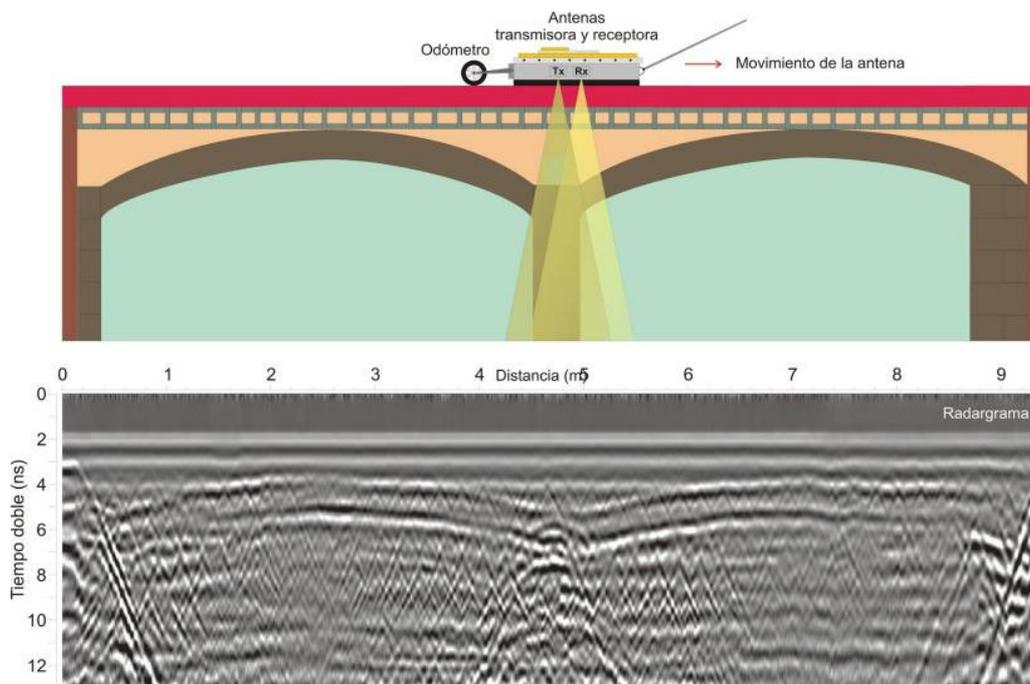
La unidad central está conectada a las antenas y a un sistema de almacenamiento masivo de datos provisto de una pantalla de visualización en tiempo real donde se reproduce la señal recibida.

Cada señal o grupo de señales que se reciben se registran como una traza. El técnico puede definir el número de señales emitidas cada intervalo de distancia o cada intervalo de tiempo. La posibilidad de emitir un elevado número de estas señales cada metro permite que, al mover la antena sobre la superficie del terreno o de la estructura, se obtenga un registro continuo que refleja la estratigrafía y/o la existencia de anomalías en el subsuelo o en el interior de la estructura explorada. Las trazas son señales que muestran la amplitud de la onda en función del tiempo de propagación (o profundidad si se conoce la velocidad de la onda en el medio) hasta un tiempo máximo limitado por la ventana temporal seleccionada. El conjunto de trazas consecutivas proporciona el registro continuo. Este registro es un diagrama bidimensional que tiene como eje horizontal la distancia sobre la superficie del medio (posición de la traza recibida) y como eje vertical el tiempo doble de propagación de la onda (o la profundidad si se conoce la velocidad de la señal). Puede presentarse como un apilamiento de amplitudes pero, para obtener una mejor visualización de las anomalías, se suele asignar un color de una determinada escala a cada rango. Un ejemplo de ello se esquematiza en la Fig. 6 de **Pérez Gracia** (2011) con una asociación de los rangos de amplitudes con colores de una escala determinada.



**Fig. 6. Las amplitudes de las trazas se transforman según una escala de colores para su visualización**

Quando la señal se recibe en la consola de control, ésta le aplica una ventana de amplitudes, cuyo tamaño y colorido decide el operador. Las amplitudes mayores al valor de la ventana establecida aparecen en la pantalla. El resultado es un registro denominado radargrama, en el que el eje de abscisas corresponde al desplazamiento de la antena sobre la estructura (movimiento lateral), y el eje de ordenadas refleja el tiempo invertido por el pulso en recorrer el camino antena-reflector-antena, también llamado tiempo doble de reflexión, normalmente medido en nanosegundos (ns) (Fig. 6).



**Fig. 7. Proceso de adquisición de datos. El resultado es un radargrama que contiene las reflexiones que se han producido en las diversas discontinuidades del medio**

La Fig. 7 muestra esquemáticamente cómo se produce la emisión, propagación, reflexión y registro posterior de la energía. El resultado es un radargrama que se obtiene tras este proceso en el que se recogen las reflexiones producidas en las discontinuidades entre zonas que presentan diferentes parámetros electromagnéticos. El valor de estos parámetros suele estar relacionado con variaciones de las propiedades físicas de los materiales. Es decir, las discontinuidades electromagnéticas pueden corresponderse, por ejemplo, con variaciones de las características propias del hormigón, con la presencia de oquedades o fisuras, con la existencia de objetos embebidos en él, o con zonas que presentan variaciones en su contenido de agua.

## 2.6. Parámetros de un registro

---

Para poder realizar la interpretación de los registros que se obtendrán de la inspección mediante georradar, es necesario conocer los parámetros que definen el radargrama, los cuales se detallan a continuación:

### **Rango:**

El rango de un registro define su longitud temporal, es decir, la máxima coordenada vertical que se alcanza en el radargrama. El ajuste del rango requiere que se conozca de antemano la profundidad máxima que se pretende alcanzar y la velocidad aproximada a la que se propaga la onda electromagnética por el medio ( $v$ ), o lo que es equivalente, la constante dieléctrica relativa del medio ( $\epsilon_r$ ).

### **Muestra:**

Determina el muestreo de cada traza (señal recibida), o lo que es lo mismo, los puntos utilizados para su representación. Este parámetro está relacionado con el rango, ya que cuanto mayor sea la ventana temporal de registro, mayor debería ser el número de puntos por traza. Asimismo, este parámetro debe ser tal que permita detectar aquellos eventos de interés, registrando los puntos necesarios para poder definir correctamente la traza.

### **Escaneo/unidad:**

Determina la cantidad de escaneos por unidad de distancia horizontal. Cuanto menor es el espaciado entre escaneos, más alta es la resolución, pero mayor es el archivo informático generado.

### **Ganancia:**

La aplicación de ganancia consiste en amplificar la señal que se recibe y su objetivo es contrarrestar los efectos de atenuación que se producen. Puede realizarse durante la adquisición de datos o durante el procesado posterior.

### Posición:

Con este parámetro se controla la posición cero, que es la localización del tiempo inicial del registro. Este parámetro lo ajusta el equipo automáticamente al inicio del registro, o se puede hacer de forma manual en el instante que se requiera.

### Filtros frecuenciales:

Los filtros se utilizan para eliminar interferencias o ruido. Hay que tener en cuenta que su utilización durante el registro puede ocasionar pérdida de datos, por lo que es recomendable aplicarlos en el procesado posterior a la adquisición de datos.

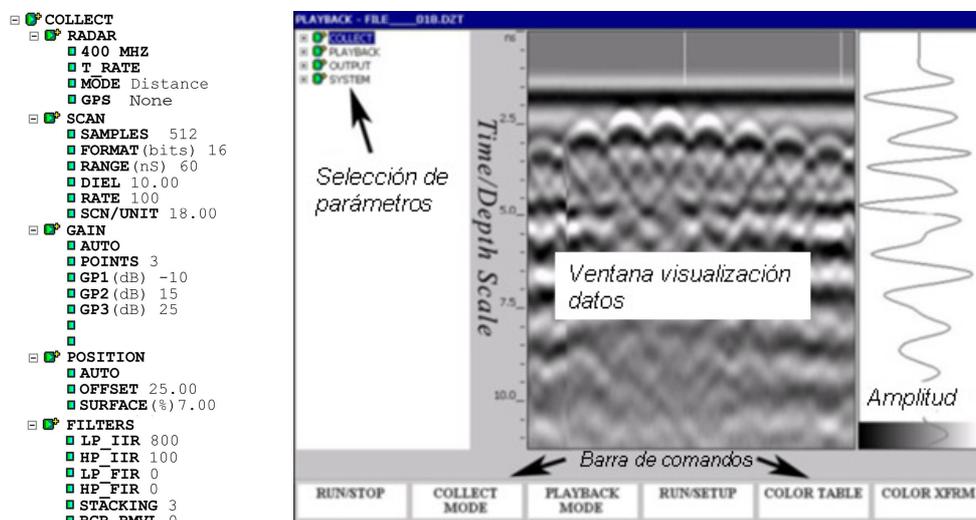


Fig. 8. Pantalla de configuración de parámetros del equipo SIR-3000

En la Fig. 8 se muestra la pantalla de configuración del equipo SIR-3000, en la que se pueden modificar los parámetros principales de adquisición del registro.

Por lo tanto, como se verá más adelante, para el empleo del georradar, es necesario seleccionar el tipo de antena adecuado, la frecuencia de la antena, combinación de antena y su configuración, la polarización del campo eléctrico radiado y las trazas, en base a lo que las mediciones deben ser ejecutadas. Para el análisis de datos se emplean las técnicas de filtrado, que suelen utilizarse mayoritariamente para mejorar el contraste de los objetos detectados.

## 2.7. El georradar como técnica de inspección del hormigón

---

El radar de penetración terrestre o georradar es un método utilizado originalmente para estudios geofísicos, tales como investigaciones del subsuelo. Es una técnica muy eficaz para la investigación de la integridad del hormigón de las estructuras, gracias a los avances tecnológicos de la última década.

Un sistema de radar es un sistema electrónico que permite detectar objetos fuera del alcance de la vista y estimar la distancia a que se encuentran. Como se ha visto anteriormente, todos los sistemas de radar funcionan bajo un mismo principio, la propagación de la onda electromagnética. El radar de penetración terrestre (GPR) o georradar, es el tipo de radar que normalmente se utiliza en medios terrestres o materiales sólidos.

A partir de los años 30 esta técnica fue usada y desarrollada para determinar profundidades de hielo, agua, depósitos de sal, desiertos y formación de rocas. Podría considerarse que desde la década de los 70 hasta la actualidad, esta técnica ha sido perfeccionada y el rango de aplicaciones se ha expandido considerablemente a áreas tales como glaciológica, geológica arqueológica, minera, ingeniería civil, etc...

En la actualidad se utiliza la técnica de georradar para el estudio de materiales de construcción, entre ellos el hormigón es el más utilizado y, por tanto, el más investigado. Se utiliza cada vez más habitualmente en la inspección, diagnosis y estudio de patologías propias del hormigón, así como en la detección de elementos embebidos en él.

La primera descripción del uso para ubicación de objetos enterrados la realizaron **Leimbach y Löwy** en 1910 con patente alemana.

Existe gran diversidad de estudios publicados por autores, con investigaciones realizadas sobre elementos de hormigón. En la publicación de **Maierhofer** (2003), se mencionan, entre otros muchos existentes, los siguientes trabajos en los que se manifiesta la importancia del uso de la técnica del georradar e la investigación de elementos de hormigón.

Según **Krause et al.** (1995), esta técnica es especialmente adecuada para la evaluación de grandes estructuras de hormigón pretensado, puentes de hormigón, vías ferroviarias, carreteras y túneles. La técnica de georradar también se puede utilizar como parte de un sistema de control de calidad, reduciendo así los costes de mantenimiento de las estructuras.

Las evaluaciones más comúnmente relacionadas con las aplicaciones del georradar son la detección de del armado de las estructuras y la localización de conductos como por ejemplo determinan en sus trabajos **Bungey et al.** (1997), **Funk et al.** (1997), **Kong** (2000), **Maierhofer** (2000) y **Maierhofer et al.** (2000). **Maser** (1996) realiza un estudio para la evaluación de dovelas y anclajes. Para la detección de huecos y segregación existen trabajos de **Steinway et al.** (1981), **Azevedo et al.** (1996), **Maser** (1996), **Clemena et al.** (1997), **Maierhofer** (2001) y **Maierhofer et al.** (2000, 2001). Existen también estudios para mediciones de espesores de las estructuras de hormigón que son sólo accesibles desde una de sus caras, la ubicación de segregación en capas (**Maierhofer et al.** 1998, 2000; **Colla et al.** 2002) y la detección de huecos de aire y la humedad en las interfases **Maierhofer y Wöstmann** (1998). También los autores **Huston et al.** (2002), analizaron la aplicación de la técnica de georradar en el estudio del hormigón armado en puentes.

En 1995, los autores **Lorenzo y Cuéllar**, publican un trabajo en el que se estudian tres situaciones de interés en ingeniería civil, concluyendo que el georradar se manifiesta como una gran ayuda para la resolución y prevención de problemas relacionados con estructuras de hormigón.

Centrándonos en el objeto de este trabajo, por una parte destaca el trabajo de **Pérez Gracia, et al.** (2008), los cuales publican un estudio en el que se estima la resolución horizontal mediante el cálculo de la primera zona Fresnel donde se define como el área mínima detectable por una antena de georradar (cuanto mayor sea el radio de la primera zona Fresnel, peor será la resolución horizontal) y se evalúan los resultados de cuatro experimentos realizados en laboratorio. Comparando los resultados de los experimentos con las estimaciones matemáticas a nivel teórico (para la frecuencia nominal y para la frecuencia dominante para una determinada profundidad), se determina cuál de ellos es el más exacto.

Por otra parte, en estudios recientes como en el de **Cassidy et al.** (2011), se analiza la integración de distintas técnicas no destructivas, como es la de los ultrasonidos con el georradar, para el estudio de varios casos prácticos de inspección en hormigón.

## CAPÍTULO 3

### **La tomografía ultrasónica para la inspección del hormigón**

---



### 3. LA TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA PARA LA INSPECCIÓN DEL HORMIGÓN

En este capítulo se describen los conceptos fundamentales de la técnica de ultrasonidos, definiendo los aspectos fundamentales de las ondas elásticas empleadas por esta técnica. También se detalla como determinar las propiedades mecánicas de un medio mediante la técnica de ultrasonidos, la velocidad de propagación de la onda elástica en un medio y la determinación de la profundidad a la que se encuentra una interfase o anomalía.

Asimismo se describe la instrumentación empleada por la técnica de ultrasonidos, que distingue fundamentalmente entre los equipos que emplean un único emisor y receptor y los que disponen de un elevado número de transductores que actúan como emisores y receptores (tomógrafos ultrasónicos).

Como parte fundamental de este trabajo, en el presente capítulo se definen los conceptos de resolución y vertical y horizontal tanto de la técnica de ultrasonidos convencional, como de la tomografía ultrasónica.

Se describen también los registros que se obtienen de la realización de medidas experimentales (imágenes tomográficas), así como los parámetros necesarios para poder interpretar dichas imágenes.

Por último se resumen estudios realizados sobre la técnica de ultrasonidos y de la tomografía ultrasónica en el ámbito de la inspección del hormigón.

### 3.1. Fundamento de las ondas elásticas empleadas por la técnica de ultrasonidos

---

Una onda elástica es una perturbación tensional que se propaga a lo largo de un medio elástico. Cuando un medio elástico es perturbado por una acción instantánea o continua, hace que esta perturbación se propague a través del referido medio, mediante lo que se llama movimiento ondulatorio u onda. Esta propagación no supone traslación real de materia, sino transmisión de energía. Según **Gómez de León** (2009), cada partícula afectada por la perturbación se desplaza de su posición de equilibrio, tendiendo a volver a la posición de reposo.

Los ultrasonidos son ondas elásticas cuyas frecuencias quedan fuera del rango de percepción del oído humano medio. El espectro audible queda entre los 15 Hz y los 20 KHz, donde comienzan los ultrasonidos. Si las oscilaciones mecánicas generadas por un sistema acústico son de alta frecuencia (mayores de 20 KHz), el sistema se denomina ultrasónico.

Debido a su corta longitud de onda, los pulsos ultrasónicos se propagan en línea recta, por lo que éstos son muy direccionables. Cuanto mayor es la longitud de onda, mayor es la dispersión angular que se produce.

### 3.2. Propagación de las ondas elásticas

Como se ha visto anteriormente, la onda elástica requiere de una fuente de perturbación, un medio que pueda perturbarse y cierta conexión física por medio de la cual partes adyacentes del medio puedan afectarse entre sí.

Si una onda elástica ocasiona que las partículas del medio por el que se propaga, se muevan paralelas a la dirección de propagación de la onda, se conoce como onda longitudinal. A estas ondas también se les denomina ondas primarias (P), ya que son las que se reciben en primer lugar al tener mayor velocidad de propagación ( $v$ ). También se las conoce como ondas de compresión ya que su avance provoca zonas de compresión y descompresión de partículas (Fig. 9a).

Cuando una onda elástica produce que las partículas del medio perturbado se muevan perpendiculares a la dirección de movimiento de la onda, se conoce como onda transversal. Estas ondas también son conocidas con ondas secundarias (S), ya que siempre llegan al receptor después de las ondas longitudinales. También se las conoce como ondas de cizalla porque provocan esfuerzos de este tipo en los materiales que atraviesan (Fig. 9b).

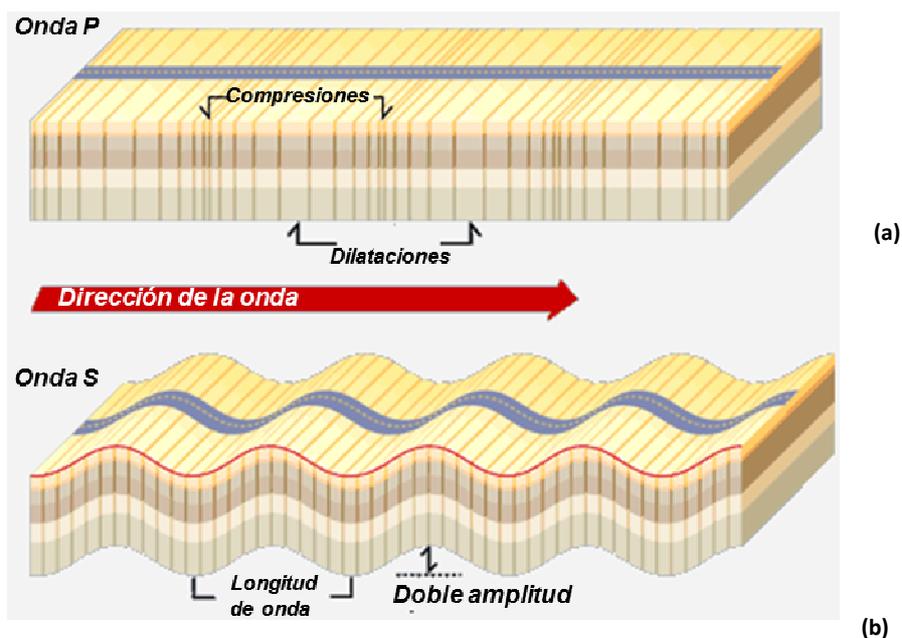


Fig. 9. Esquema de propagación de ondas P (a) y ondas S (b)

### 3.2.1. Determinación de las propiedades mecánicas de un medio mediante la técnica de ultrasonidos

Los procedimientos mediante el empleo de la técnica de ultrasonidos, son unos de los más habituales en el mundo de las medidas no destructivas. En ellos la interpretación se realiza a partir del análisis de las variaciones que dichos pulsos u ondas experimentan durante su tránsito por el seno del medio investigado.

En los últimos 40 años el desarrollo de estos procedimientos ha sido espectacular, tanto en diseño de nuevos métodos, como en mejora de los ya existentes, habiendo pasado a ser herramientas indispensables en el control de calidad de materiales y en diversas ramas de la investigación científica.

El impulso ultrasónico es emitido y recibido por unos transductores electroacústicos (emisor y receptor), colocados en contacto con la superficie del hormigón a estudio. Al aplicar la técnica de ultrasonidos las características del material se determinan teniendo en cuenta dos variables esenciales: el tiempo de recorrido ( $t$ ) entre el emisor y el receptor y la potencia del impulso recibido considerando la pérdida de potencia respecto a la del impulso emitido.

La propagación de ondas elásticas por el interior de un elemento de hormigón armado, sufre la influencia directa de una serie de factores que deben ser controlados para su correcta interpretación. Dichos factores pueden dividirse en intrínsecos, es decir, debidos a las características propias del hormigón (compacidad, densidad, porosidad, etc...), y extrínsecos, ajenos a la naturaleza del material y provocados por la instrumentación utilizada o por las condiciones imperantes durante las mediciones (grado de humedad, temperatura, presión). Según un estudio de **Birks y Green** (1991), algunos de los factores más significativos son los siguientes:

- La velocidad de propagación de los ultrasonidos se ve modificada por el contenido en humedad del hormigón, ya que las ondas longitudinales se propagan con una velocidad 5 veces mayor en el agua que en el aire, por lo que una muestra saturada tendrá una velocidad de propagación mayor que

una seca de la misma porosidad. Por el contrario, las ondas transversales sólo se propagan a una velocidad que permanece casi constante, independientemente del grado de saturación.

- Existe una relación prácticamente lineal entre la densidad y las velocidades de propagación de ondas.
- Hay una clara relación inversa entre porosidad y velocidad de propagación, ya que la señal suele sufrir elevada atenuación en poros y fisuras en comparación con la que se transmite por el medio sólido. La influencia de las fisuras sobre la velocidad de propagación es mayor que la que ejercen los poros.

### 3.2.2. Velocidad de propagación de la onda elástica en un medio

Las vibraciones ultrasónicas son producidas por un transductor electroacústico que se pone en contacto con la superficie del elemento de hormigón que se quiere inspeccionar. Después de recorrer a través del elemento de hormigón una distancia conocida ( $L$ ), el impulso es convertido a señal eléctrica por medio de un segundo transductor, que también está en contacto con la superficie del hormigón. Se determina el tiempo de tránsito ( $t$ ) que ha necesitado el impulso para recorrer la distancia. La velocidad de los ultrasonidos ( $v$ ), viene entonces dada por:

$$v = \frac{L}{t} \quad (\text{ec. 16})$$

La velocidad de propagación ( $v$ ) de la onda elástica a través del medio, es constante y característica de cada material, sea cual sea la frecuencia. La velocidad a la que los ultrasonidos se transmiten por un medio determinado, depende de la densidad y de la elasticidad de dicho medio.

Como se ha comentado anteriormente, las ondas que se propagan por el interior de un medio por un impulso elástico pueden ser longitudinales (ondas P) o transversales (ondas S). Las más rápidas son las longitudinales y sus velocidades dependerán de las propiedades elásticas del medio por el que se propagan.

### 3.2.3. Determinación de la profundidad a la que se localiza una interfase o anomalía

De forma general, si la velocidad de la onda se conoce, la profundidad de la interfase reflejante ( $d$ ), puede calcularse como se muestra en la Fig. 10 (la ecuación asume que los dos transductores están cerca uno del otro).

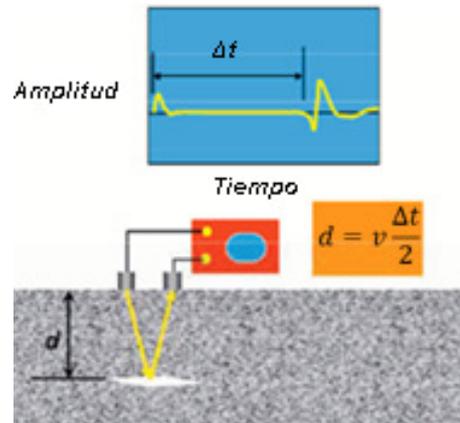


Fig. 10. Cálculo de la profundidad ( $d$ ) a la que se encuentra la anomalía

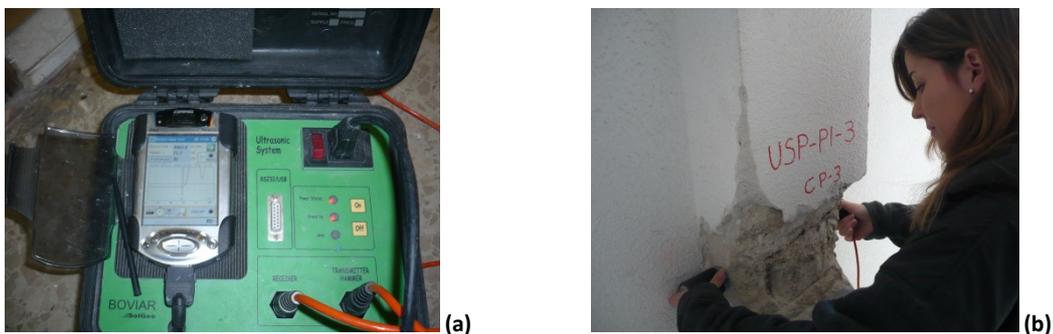
Para determinar la profundidad a la que se encuentra un contraste elástico o anomalía, debe tomarse la mitad del tiempo transcurrido desde que se emite el impulso ultrasónico hasta que se recibe y, por tanto, se divide entre 2 ya que es el tiempo que tarda el impulso ultrasónico (tiempo doble) en realizar el camino de ida y vuelta.

### 3.3. Instrumentación

Dentro de la técnica de ultrasonidos, nos encontramos con dos grupos de equipos. Por una parte están los que emplean un único emisor y receptor y por otra, los que tienen un elevado número de sondas que actúan como emisores y receptores, mediante los cuales se puede realizar la denominada tomografía ultrasónica.

#### Equipo de impulsos ultrasónicos:

Existe una amplia gama de equipos ultrasónicos diseñados específicamente para el método según el cual se opere, subdividiéndose, según el tipo de excitación, en resonancia e impulso ultrasónico (Fig. 11a y 11b). En el caso más frecuente, de excitación por impulsos ultrasónicos, se colocan dos transductores, uno emisor y otro receptor, alineados sobre dos caras opuestas del elemento de hormigón a inspeccionar (método de transparencia o directo) o sobre la misma cara del objeto (método de superficie o indirecta).



**Fig. 11. Equipo portátil para la inspección ultrasónica “in situ”, modelo CMS con transductores de banda ancha y frecuencia de inspección 55 KHz de la marca Boviar, propiedad de AIDICO (a) y ejemplo de medición directa con el mismo equipo (b)**

Se componen de una unidad de control de adquisición y dos sondas que actúan como transmisor y receptor de alta potencia. La transmisión de potencia de los impulsos a través de los transmisores piezoeléctricos y la alta sensibilidad del receptor piezoeléctrico, permite realizar mediciones en muestras de hormigón de laboratorio y en obras de construcción para investigación “in situ” de elementos estructurales.

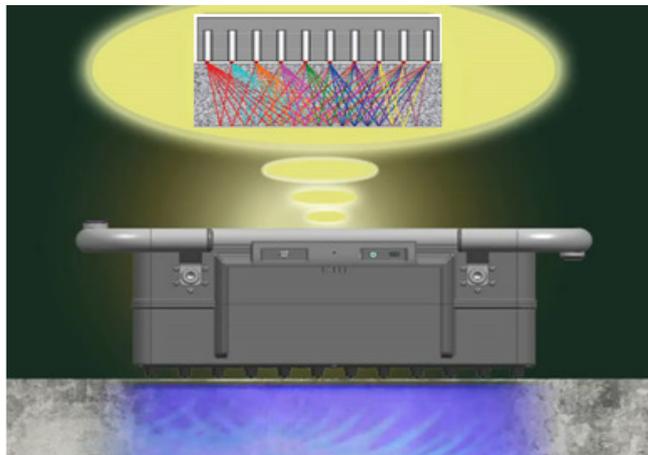
**Tomógrafo ultrasónico:**

El tomógrafo ultrasónico dispone fundamentalmente de dos componentes principales: una antena que se utiliza para la excitación, recepción de la señal y transformación de la señal a formato digital y una unidad de control que consiste en un ordenador que controla la antena mediante una aplicación instalada en él, recibe las señales, las procesa, crea imágenes y almacena los datos obtenidos en la inspección (Fig. 12).



**Fig. 12.** Equipo de tomografía ultrasónica MIRA, de la marca Germann Instruments A/S, propiedad de AIDICO

La inspección mediante el tomógrafo ultrasónico MIRA supone una gran ventaja con respecto a los equipos ultrasónicos convencionales a la hora del estudio de un material como el hormigón, ya que en pocos segundos permite realizar una gran cantidad de emisiones y recepciones de pulsos ultrasónicos.



**Fig. 13.** Esquema de transmisión y recepción completadas  
(imagen de Dynasty Group Engineers & Surveyors)

La Fig. 13 muestra las rutas de los 45 rayos involucrados para cada una de las cuatro filas de transductores del equipo ultrasónico MIRA empleado en este trabajo. Se tarda menos de 3 segundos en realizar la adquisición de datos completa, su procesamiento, y su transferencia para una medida en una ubicación de la antena. La información aportada por el tomógrafo es mucho mayor que la que ofrece un equipo ultrasónico convencional que se limita a emitir-recibir un solo pulso en cada medida.

### 3.4. Registros: imágenes tomográficas

El funcionamiento básico de un tomógrafo ultrasónico, consiste en que la unidad de control excita una fila de transductores de la antena y las demás filas de transductores actúan como receptores. Los transductores de punto actúan como transmisores y receptores del pulso de un modo secuencial. En la Fig. 14 que se incluye a continuación, se observa como la imagen izquierda muestra la primera fila de transductores en calidad de transmisores y las filas restantes en calidad de receptores. Consecutivamente, tal y como se muestra en la imagen derecha, la siguiente fila de transductores se excita y las filas restantes a la derecha actúan como receptores. Este proceso se repite hasta que cada una de las primeras nueve filas de transductores han actuado como transmisores.

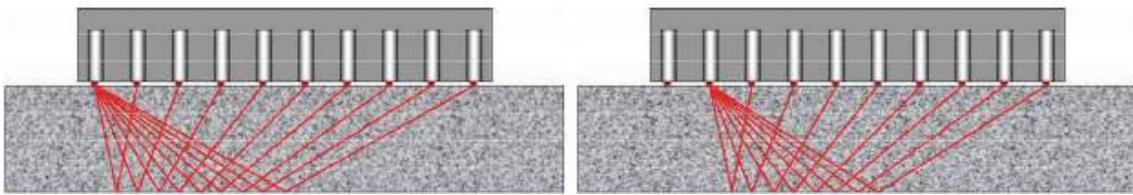


Fig. 14. Esquema básico de funcionamiento del equipo MIRA

El tiempo de tránsito de cada pulso reflejado es procesado posteriormente por la unidad de control para crear un modelo 3D de la localización de las interfases reflectoras. Si hay una anomalía en el elemento de estudio en forma de interfase hormigón-aire lo suficientemente grande, se reflejará una porción del pulso en la anomalía y el pulso reflejado llegará al receptor antes que los reflejos de la pared opuesta, tal y como se ilustra en la Fig. 15. Como se indicaba anteriormente, el software de procesamiento de señal utiliza los tiempos de llegada de los pulsos reflejados para determinar la localización del defecto dentro de los miembros.

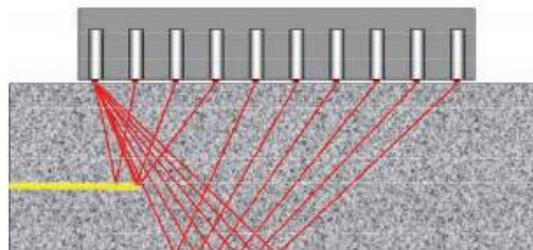


Fig. 15. Detección de anomalía en el interior del elemento de estudio

Tras la adquisición de datos, el equipo utiliza una técnica de procesamiento de señales llamada “Técnica Enfocada en Apertura Sintética” SAFT (del inglés *Synthetic Aperture Focusing Technique*) para reconstruir una imagen tomográfica 3D del interior del elemento de hormigón. La técnica SAFT permite, mediante el postprocesado de las señales, obtener una imagen tomográfica de alta resolución similar a la que se obtendría si se empleará un equipo de inspección ultrasónica en configuración de *phased array*. Un *phased array* consta de una matriz de transductores ultrasónicos a los cuales se introduce un pulso desfasado para conseguir un ancho de haz más directivo.

En términos más sencillos, el objeto se subdivide en elementos de poco volumen (análogos a elementos finitos para el análisis de esfuerzos). Con los tiempos de llegada del pulso y las posiciones conocidas de los pares de transmisor-receptor, la profundidad de la interfaz reflejada puede ser establecida. Debido a las trayectorias de los rayos inclinados, la profundidad de la anomalía se calcula utilizando la fórmula de la relación entre las longitudes de los lados de un triángulo rectángulo (Teorema de Pitágoras). En la Fig. 16 se muestra la velocidad de la onda ( $v_s$ ) determinada por el MIRA durante la calibración inicial para el bloque de hormigón. Si hay una interfase que refleja grandes reflexiones serán recogidos por más de un receptor. Esto permitirá la reconstrucción de la medida aproximada de la interfaz de reflexión.

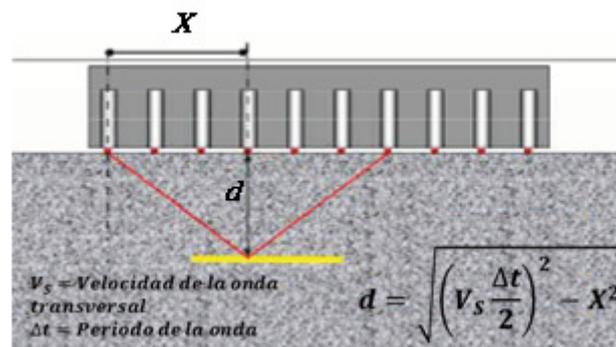


Fig. 16. Cálculo de la profundidad a la que se encuentra la anomalía

La imagen tridimensional reconstruida se almacena en el ordenador y el usuario puede ver una imagen 3D de la localización de todas las interfases detectadas y la proyección de las interfases en tres planos ortogonales. Los puntos de vista sobre los tres planos ortogonales tienen nombres oficiales (Fig. 17). El C-scan de la muestra refleja las interfases proyectadas en un plano paralelo a la superficie de prueba, es decir, un C-Scan es una vista en planta de los

reflectores. Un B-scan muestra los reflectores proyectados en un plano perpendicular a la superficie de ensayo y perpendicular a la dirección de exploración, es decir, que proporciona una vista de perfil de los reflectores. El D-scan muestra los reflectores proyectados en un plano perpendicular a la superficie de prueba, paralelo a la dirección de exploración, es decir, que proporciona una vista de alzado de los reflectores. También se pueden obtener secciones en cada una de las tres direcciones al definir la coordenada z de un C-scan de la imagen, la coordenada x de un B-scan de la imagen, y la coordenada y de un D-scan de la imagen.

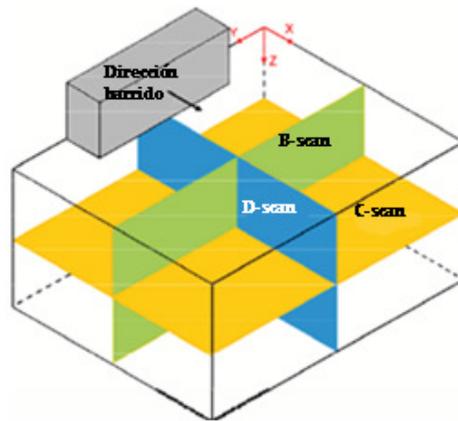


Fig. 17. Planos generados para imagen 3D

Las imágenes tomográficas representan en una escala de colores la amplitud de la señal obtenida en la adquisición. Los colores más fríos representan las amplitudes menores, mientras que los colores cálidos representan las mayores amplitudes de la señal (Fig. 18).

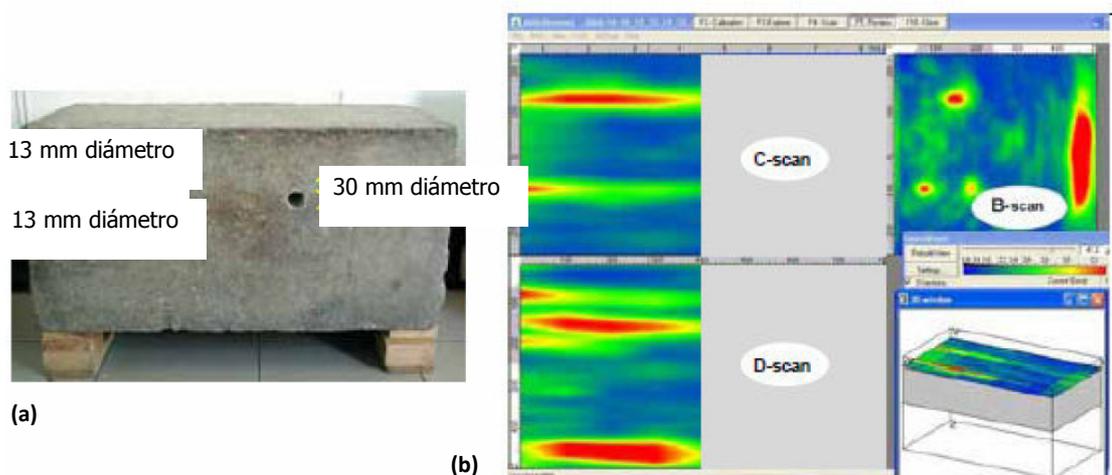


Fig. 18. Ejemplo de elemento de hormigón en el que existen anomalías (a) e imagen tomográfica extraída en su inspección (b)

La imagen tomográfica es una técnica computacional que utiliza un método iterativo para el procesamiento de una gran cantidad de datos. Los datos de los ensayos ultrasónicos pueden ser empleados como datos de entrada de un algoritmo de reconstrucción tomográfica para proporcionar una representación de las propiedades internas de una determinada sección.

Los procedimientos desarrollados para exploraciones en hormigón han mostrado una razonable aproximación del tamaño y extensión de las anomalías internas. Los defectos internos como oquedades, grietas y deterioro pueden ser localizados y detallados mediante la imagen tomográfica. En el caso de optar por una tomografía en función del tiempo, la magnitud medida es el tiempo de viaje de una señal y la imagen obtenida se asocia con la distribución de la velocidad de propagación dentro del objeto de estudio. En el caso de la tomografía de amplitud, la magnitud medida es la amplitud de la señal.

### 3.5. Resolución de equipos de inspección ultrasónica convencional y del tomógrafo ultrasónico basado en la técnica SAFT

#### 3.5.1. Resolución de equipos de inspección ultrasónica convencional

Se define como resolución del ultrasonido a su capacidad para distinguir elementos o anomalías en el medio objeto de estudio.

Un factor determinante es la longitud de onda ( $\lambda$ ) ya que, al propagarse, la onda no detectará todas aquellas discontinuidades de menor tamaño que la longitud de onda, sin ser afectada por ellas. Así, si se toma una frecuencia alta, la longitud de onda será pequeña y, por tanto, el poder de discriminación de la señal aumentará; pero con una alta frecuencia, la atenuación será considerable y difícil la recepción de la señal. De esta forma, uno de los factores determinantes para elegir un método u otro será la selección de la frecuencia de la onda generada, así se está definiendo el tamaño mínimo del elemento que se está buscando.

#### Resolución vertical:

Capacidad para distinguir dos discontinuidades del material que están en la línea de la dirección de propagación del haz de ultrasonidos. Se le conoce también por resolución axial.

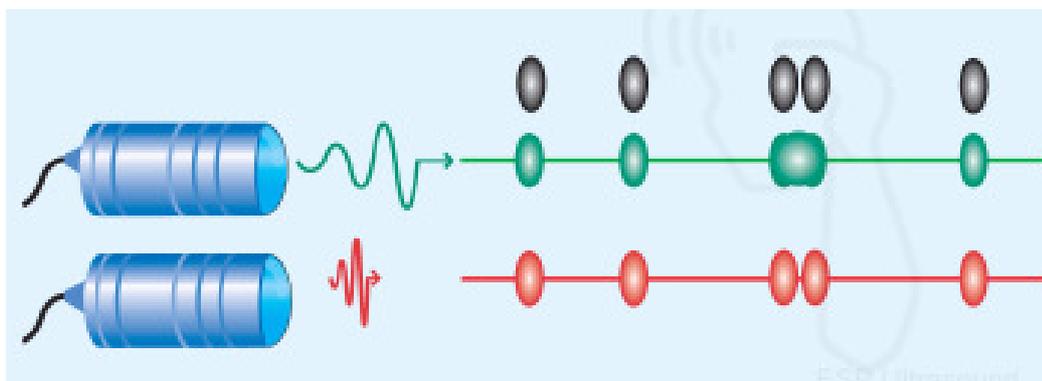
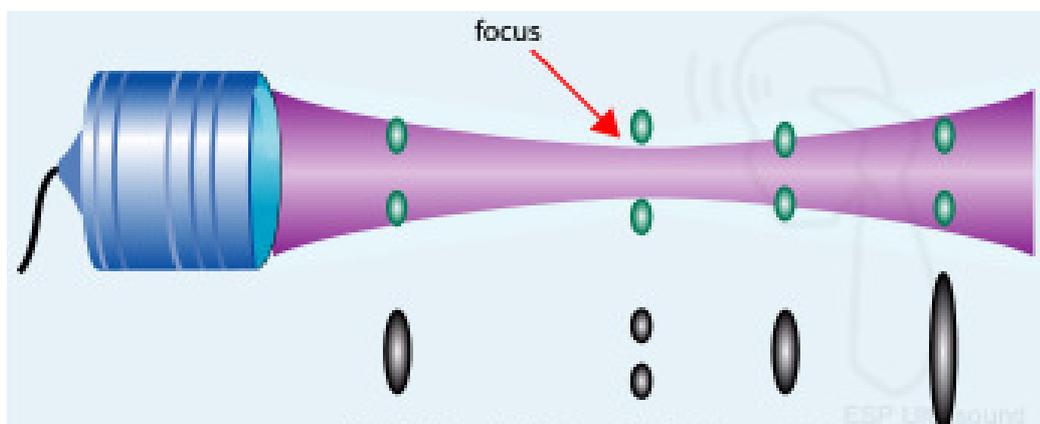


Fig. 19. Esquema de la resolución vertical (Sidney K. Edelman, 2003)

La resolución vertical será mayor cuanto menor sea la longitud de onda, por lo tanto se podrán detectar anomalías de menor tamaño. En la Fig. 19 se aporta un esquema ilustrativo de ello: en color negro se observan las anomalías reales existentes en un elemento, en verde se observa un pulso de baja frecuencia y gran longitud de onda que detecta las anomalías espaciadas lo suficiente para poder detectarlas por separado, ya que la distancia entre ellas es mayor que su resolución vertical, pero no consigue detectar dos anomalías muy próximas entre ellas que están separadas una distancia menor que su resolución vertical. Por último, en color rojo, se muestra un pulso de alta frecuencia y, por tanto, menor longitud de onda, que sí es capaz de detectar todas esas anomalías por separado, ya que la menor distancia de separación entre ellas es mayor que su resolución vertical.

#### **Resolución horizontal:**

Es la capacidad del equipo para distinguir dos discontinuidades del material que se encuentran de forma perpendicular a la dirección de propagación del haz de ultrasonidos. Se le conoce también por resolución lateral o resolución espacial.



**Fig. 20. Esquema de la resolución horizontal (Sidney K. Edelman, 2003)**

En la Fig. 20 se esquematiza un transductor y su haz de propagación. En color verde se observan las anomalías reales existentes en el elemento inspeccionado. En color negro se observa como las anomalías que están separadas entre ellas una distancia menor que el ancho del haz, no pueden detectarse independientemente, en cambio, las anomalías que se encuentran separadas entre ellas una distancia mayor que el ancho del haz en ese punto, sí que pueden detectarse como anomalías independientes.

### 3.5.2. Resolución de la técnica de tomografía ultrasónica

La inspección no destructiva mediante ultrasonidos se utiliza para la detección de defectos en elementos de hormigón armado. Resulta muy importante llevar a cabo una correcta localización y dimensionamiento de dichos defectos los cuales consisten principalmente en oquedades o interfases hormigón-aire. El método más ampliamente utilizado en inspección ultrasónica es el pulso-eco puesto que únicamente requiere del acceso a una de las superficies del elemento a inspeccionar. De esta manera, para cada punto de inspección el transductor emisor introduce una onda ultrasónica que se propaga por el interior del material, mientras que otro transductor receptor recoge los diferentes ecos generados por los dispersores y los reflectores, en forma de discontinuidades internas.

Cuando esta inspección ultrasónica se realiza por medio de transductores con un haz poco directivo, las imágenes tomográficas obtenidas presentan una baja resolución. Una manera sencilla de mejorar la resolución horizontal de dichas imágenes, consiste en focalizar el haz de los transductores haciéndolos más directivos. Esto último se puede realizar de dos maneras: colocando físicamente una lente en el transductor para focalizar la señal emitida y recibida, o emplear técnicas de procesado de la señal que numéricamente permiten obtener el mismo efecto de estrechamiento del haz o focalización a partir de múltiples señales ultrasónicas obtenidas desde diferentes posiciones (técnica SAFT: *Synthetic Aperture Focusing Technique*). La primera de las técnicas citadas presenta la desventaja de que el enfoque del haz se configura para una determinada profundidad generando impurezas en el resto de la imagen. La técnica SAFT utilizada por el tomógrafo ultrasónico MIRA, utiliza la suma coherente de diferentes señales ultrasónicas desfasadas. La ventaja principal de este método respecto del anterior, es que permite focalizar la onda ultrasónica para todos los puntos simultáneamente.

#### **Resolución horizontal:**

La resolución horizontal se puede obtener a partir del diagrama de radiación de los transductores empleados. Dicho diagrama presenta un lóbulo principal acompañado

de lóbulos secundarios. La anchura del lóbulo está directamente relacionada con la resolución horizontal del transductor.

Según **Stepinski** (2007), el valor de la resolución horizontal en este caso, se obtiene directamente de la resolución que se obtendría con un *phased array* del mismo tamaño que la apertura efectiva obtenida mediante SAFT, pero teniendo en cuenta el camino de ida y vuelta del pulso ultrasónico lo que supone dividir la resolución por la mitad, quedando de la siguiente forma.

$$R_h = \frac{R\lambda}{2L_{eff}} \quad (\text{ec. 17})$$

donde:

$L_{eff}$  representa el valor de longitud de apertura efectiva para un transductor circular:

$$L_{eff} \cong \frac{R\lambda}{d} \quad (\text{ec. 18})$$

siendo:

$d$  el diámetro del transductor ultrasónico

$R$  la distancia al dispersor

$\lambda$  la longitud de onda del pulso

Combinando las ecuaciones anteriores se obtiene que la resolución horizontal es igual a la mitad del diámetro del transductor ultrasónico empleado:

$$R_h \cong \frac{d}{2} \quad (\text{ec. 19})$$

#### **Resolución vertical:**

La resolución en profundidad teórica para un sistema de ultrasonidos empleando la técnica SAFT para reconstruir tomográficamente el elemento inspeccionado, es proporcional a la longitud de onda del pulso ultrasónico transmitido.

La resolución teórica obtenida suponiendo medios homogéneos (velocidad de propagación constante) y sin atenuación, se puede obtener como la mitad de la longitud de onda efectiva, puesto que en la configuración pulso-eco la onda recorre el doble de la distancia entre el emisor y la discontinuidad que genera la onda reflejada. Según **Barkefors** (2010), el valor teórico para la resolución vertical se presenta por lo tanto de la siguiente manera.

$$R_v = \frac{\lambda_{eff}}{2} = \frac{v}{4f} \quad (\text{ec. 20})$$

donde:

$\lambda_{eff} = \frac{v}{2f}$  es la longitud efectiva de onda para el caso monoestático

$v$  es la velocidad de propagación en el medio

$f$  es la frecuencia del pulso ultrasónico

### 3.6. Parámetros de un registro

---

Para poder realizar la interpretación de las imágenes generadas que se obtendrán en la inspección mediante tomografía ultrasónica, es necesario conocer los parámetros que definen el registro obtenido de la adquisición de datos, los cuales se detallan a continuación y se observan en la Fig. 21:

**Frecuencia de trabajo:**

Es la frecuencia que utiliza por defecto el tomógrafo. Se puede variar en función de las necesidades en su utilización.

**Filtro de alta frecuencia B-scans:**

Aplica un filtro que elimina las áreas de ruido, por lo que la imagen se ve más claramente. Si se usa existe riesgo de pérdida de información de la estructura interna del elemento que se está inspeccionando.

**DAC (corrección distancia/amplitud):**

Consiste en la corrección del efecto de la atenuación en la disminución amplitud de la onda en función de la profundidad.

**Rango:**

Es la profundidad de la imagen tomográfica reconstruida, medida en mm. Debe determinarse de forma que sea menor que el espesor del objeto que se quiere inspeccionar.

**Ancho B-scan:**

Es el ancho del B-scan medido en mm.

**Scan step:**

Es la distancia entre las medidas que se realizarán para la inspección. La cantidad de medidas serán recalculadas tras la adquisición en base a la distancia entre el punto de comienzo de las medidas y la posición más alejada de ese punto. Cuanto menor sea la distancia entre medidas,

más detallada será la reconstrucción obtenida, pero menos eficiente será la realización del procesado de datos.

### Velocidad ultrasónica:

Es la velocidad media que se obtiene en el proceso de calibración del equipo, con la cual se reconstruirá la imagen tomográfica. Puede variarse durante la adquisición de datos para ajustarse al espesor del objeto a inspeccionar.

### Características de directividad:

Se utiliza para reducir la aparición de ondas en superficie, limitando el diagrama de directividad de la señal.

### Corrección del campo cercano:

Durante el proceso de calibración del equipo, compensa las ondas superficiales mejorando la imagen obtenida cerca de la superficie del objeto a inspeccionar.

### Normalización de la señal:

Nivela las señales obtenidas en cada medida realizada, para poder compararlas entre ellas.

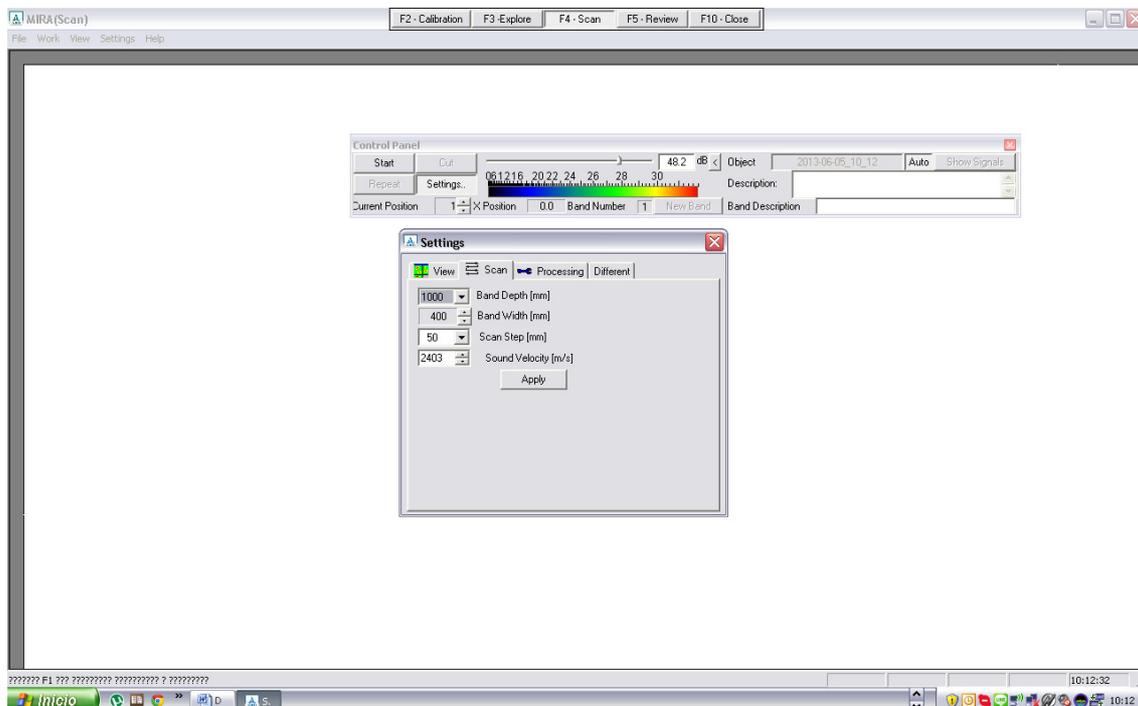


Fig. 21. Pantalla de configuración de parámetros del equipo MIRA

### 3.7. La tomografía ultrasónica como técnica de inspección del hormigón

---

En un trabajo publicado por **Hertlein** (2012), en el que hace una revisión a los últimos 25 años de técnicas basadas en propagación de ondas para inspección de hormigón, se detalla que las técnicas ultrasónicas comenzaron a emplearse como técnicas de inspección no destructivas durante la década de 1920, durante la cual la aplicación práctica de estas técnicas se desarrolló rápidamente. Dos investigadores obtuvieron resultados de la aplicación por primera vez de ultrasonidos para la inspección de materiales, **Sokolov** (1929) en la aplicación de metales y **Muhlhauser** (1931) que obtuvo la primera patente en el área de los métodos no destructivos mediante el empleo de ultrasonidos.

En el mismo estudio se menciona que existen numerosos métodos de ensayo no destructivos actualmente disponibles para la evaluación y la investigación de hormigón, utilizando diversos aspectos de la propagación de las ondas elásticas a través del material que está siendo investigado. Algunos tratan sobre el tiempo de propagación. Otros son métodos más complejos, con la participación del análisis de la frecuencia, la medición de la atenuación de la energía, o la captura de reflexiones. A pesar de su relativa simplicidad o complejidad, todos los métodos han evolucionado ampliamente en los últimos 25 años, en gran parte debido a la evolución de la industria de la electrónica y la capacidad de procesamiento.

La primera aplicación comercial efectiva de la onda como método para la evaluación concreta de la velocidad del pulso ultrasónico, fue el Soniscope, detallado en el trabajo de **Cheesman y Arndt** (1949). El Soniscope era un complejo dispositivo para su tiempo, desarrollado sobre la base de un osciloscopio analógico. Permitted generar un impulso ultrasónico en un transductor emisor y monitorizar la señal registrada por un transductor receptor. En su pantalla había un rastro de amplitud en función del tiempo en bruto, en el que se tenía que identificar el momento de la transmisión, el tiempo de recepción, y calcular la diferencia entre los dos para llegar a calcular el tiempo de tránsito del impulso ultrasónico. Además calculaba, utilizando la distancia medida entre la transmisión y la recepción, la velocidad del pulso ultrasónico, ya que ésta es una función de la densidad, y el módulo del material por el que había pasado el pulso, que es un indicador de la calidad del material.

La tecnología se estancó durante las décadas de 1950 y 1960, en las que reciben muy poca publicidad o interés, fuera de los círculos puramente académicos. Tras ello, la electrónica desarrolló transistores, y poco después, circuitos integrados. Los estudios basados en la velocidad de pulso ultrasónico fueron los beneficiarios inmediatos de este avance tecnológico. A finales de la década de 1960 y principios de los años 70 estaba disponible el “*V-Meter*”, de *James Instruments*, con transductor con cristal de sal Rochell. En 1980, el *SNC Electrónica* desarrolló el “*Pundit - Portable Ultrasonic*”, que fue un éxito comercial. Una pequeña caja aparentemente simple, con dos conexiones del transductor y tres botones en la parte delantera, su pequeña pantalla digital proporcionaba el tiempo de tránsito del pulso ultrasónico. Una toma de salida en la parte posterior de la caja permitía conectar un osciloscopio que mostraba la evolución temporal de cada impulso ultrasónico. Como la tecnología electrónica se desarrolló, los fabricantes de dispositivos de ultrasonidos, incorporaron el almacenamiento de datos adicional en las pantallas de los tiempos marcados por el impulso ultrasónico programable por el usuario, lo cual permitió al equipo calcular velocidad ultrasónica de tiempo de propagación de la onda y los datos de longitud del camino, así como la capacidad para detectar señales falsas o de mala calidad.

Desde sus humildes inicios en la década de 1970, el “*Pundit*” ha sido el caballo de batalla de casi todo investigador involucrado en mediciones mediante ondas. Los equipos ultrasónicos ofrecen datos de calibración, correlación y comparación para casi todas las técnicas de medición con ondas que se han desarrollado. Las mediciones mediante ultrasonidos han ayudado a los investigadores, mediante ensayos no destructivos, a comprender mejor las propiedades físicas del hormigón y otros materiales y han proporcionado información valiosa para el desarrollo de otras técnicas de excitación con ondas.

Los ensayos ultrasónicos tienen limitaciones para evaluar materiales muy heterogéneos pero, en el caso del hormigón, los ensayos ultrasónicos pueden ser empleados satisfactoriamente para poder valorar tanto propiedades físicas como mecánicas. Para el estudio del hormigón, existen correlaciones entre la velocidad ultrasónica y diferentes propiedades del mismo, así como rangos de velocidades relacionados con la calidad del material.

Según **Malcolm y Honggang** (2011), las principales técnicas ultrasónicas existentes para inspección de hormigón armado, así como sus aplicaciones, pueden resumirse en las siguientes:

- Impacto-eco: Comprobación de espesores, segregación.
- Impulso-respuesta: Segregación, evaluación general de la calidad del material.
- Velocidad del pulso ultrasónico: Defectología interna, evaluación uniformidad del material, profundidades de grietas.
- Pulso-eco ultrasónico: Control de espesores, oquedades y coqueras.
- Termografía infrarroja: Defectos superficiales, envolvente del edificio, puentes.

En el trabajo de **Albert** (2010) se detalla como la tomografía ultrasónica tiene un gran número de aplicaciones en la inspección no destructiva, incluyendo evaluación de objetos complejos en tres dimensiones, detección de discontinuidades, tamaño y localización de dichas discontinuidades. La viabilidad de un sistema de tomografía ultrasónica ha sido demostrada para el análisis de esfuerzos en acero a partir del tiempo de llegada del pulso ultrasónico y técnicas de reconstrucción algebraicas. Según **Hoegh** (2010), la técnica consiste, como se ha comentado previamente, en un método iterativo inverso del cual se obtiene el valor para las velocidades que mejor ajusta las ecuaciones.

Diversos autores han realizado casos de aplicación en elementos de hormigón mediante tomógrafo ultrasónico. Algunos ejemplos son trabajos como el mencionado de **Hoegh** (2010), el cual ha realizado estudios en soleras de hormigón para detección de anomalías concluyendo que la tomografía ultrasónica es muy útil para inspección en pavimentos de hormigón, sobre todo en combinación con otras técnicas no destructivas. En 2011 **De la Haza et al.** han publicado un estudio de inspecciones en elementos de hormigón, así como **Michaux y Grill** (2009).

La técnica de SAFT (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) es una técnica de reconstrucción asistida por ordenador para la detección y caracterización de discontinuidades, que utiliza la propagación de ultrasonidos. El método SAFT fue desarrollado en la Universidad de Michigan por la **United States Nuclear Regulatory Commission** durante 1970, concretamente para el trabajo de **Frederick et al.** (1975), para la inspección no destructiva de cubas a presión y tuberías. Se basa en el cambio de fase no lineal producido en una discontinuidad. Se puede obtener una mejor resolución horizontal y una elevada relación señal/ruido analizando este cambio de fase, enfocando mediante una lente ultrasónica sobre todos los puntos de la muestra ensayada.



## CAPÍTULO 4

### **Programa experimental**

---



#### 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

En este capítulo del trabajo se hace una descripción del bloque de hormigón inspeccionado, en cuanto a sus dimensiones, características del hormigón empleado y las esferas y el armado colocados en su interior. También se describen los equipos de georradar y el tomógrafo ultrasónico empleados durante la inspección.

Dentro de los apartados de calibración de los equipos empleados, se incluye un estudio de las señales emitidas junto a sus principales características y se han determinado experimentalmente la constante dieléctrica del medio, para el caso del georradar y la velocidad de propagación ultrasónica, para el caso del tomógrafo.

Se ha procedido también a la determinación de la resolución horizontal y vertical, tanto teórica como experimentalmente para las diferentes antenas del georradar. Igualmente se han calculado los valores teóricos de la resolución horizontal y vertical para el tomógrafo ultrasónico.

Por último se incluye un estudio experimental de la capacidad de penetración de las ondas electromagnéticas (georradar) y elásticas (tomógrafo ultrasónico) en el medio inspeccionado.

#### 4.1. Descripción del material de estudio

El elemento donde calibrar y verificar la resolución y alcance de las técnicas y metodologías de inspección analizadas en este Proyecto Final de Máster, se encuentra en las instalaciones del Instituto Tecnológico de la Construcción, AIDICO. Se trata de un prisma de hormigón de 1,38 x 1,38 x 1,00 m (largo, ancho y alto) donde se colocaron de forma prediseñada diferentes objetos con diferentes tamaños y orientaciones tales como esferas de poliestireno expandido (porexpan) y de plástico hueco (Fig. 22). También se dispuso una armadura en ambos sentidos, conformando un mallazo superior y otro inferior.

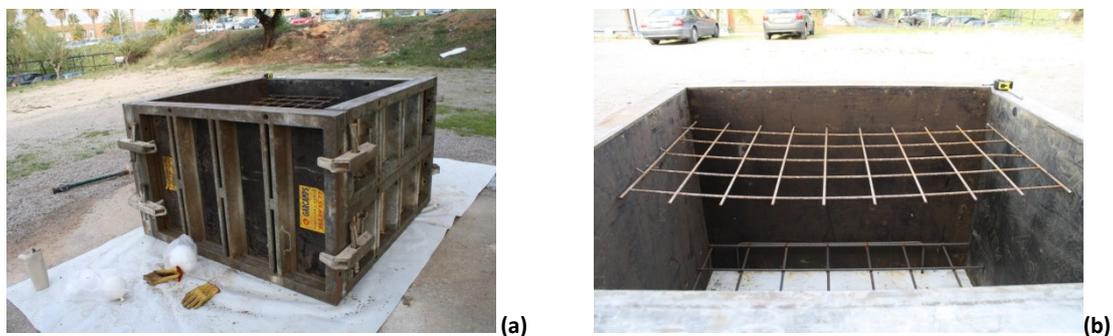


Fig. 22. Encofrado (a) y colocación de armado (b) para hormigonado del bloque

Mientras que los mallazos corresponden a las armaduras típicas presentes en elementos estructurales, las esferas simulan discontinuidades físicas a modo de coqueas o burbujas de aire de diferente tamaño.

El hormigón que se empleó es de tipo HA-25/B/20/III-A con cemento CEM I/32,5R suministrado en el lugar del emplazamiento final, donde se preparó un encofrado metálico de las dimensiones requeridas y finales del prisma. El proceso de vertido del hormigón se ejecutó por capas, de unos 20 a 25 cm (4 capas en total) y se vib100 ró con aguja. Las esferas de fueron colocadas previamente sujetas con cuerda de nylon rígido para mantener, en la medida de lo posible, las coordenadas previamente determinadas, y en cualquier caso, dejando las posiciones finales tales que cumplan con los retos planteados en la localización.

Asimismo se practicó un corte del bloque de 16,5 cm de profundidad medido desde la cara A del prisma, realizado por debajo del armado a modo de eco de fondo. También se realizó un escalón o rebaje en su cara superior.



**Fig. 23. Detalle del corte y rebaje practicados en el bloque**

Para el primer armado, colocado a unos 15 cm de profundidad desde la cara superior, se utilizaron barras de acero corrugado de diámetro 8 mm separadas 20 cm (distancia medida a ejes de barras).

El segundo armado se encuentra a unos 80 cm de profundidad, las barras son de acero corrugado de diámetro 12 mm, separadas 20 cm (distancia medida a ejes de barras).

La cara B es la enfrentada y paralela a la Av. Benjamín Franklin, y la cara A la que recae a el edificio de AIDICO, siendo la cara C la más cercana y paralela al puente atirantado del Parque Tecnológico en el que se ubica AIDICO.

El origen de coordenadas (0,0,0) considerado, se situó sobre el vértice inferior que comparten las caras B y C.

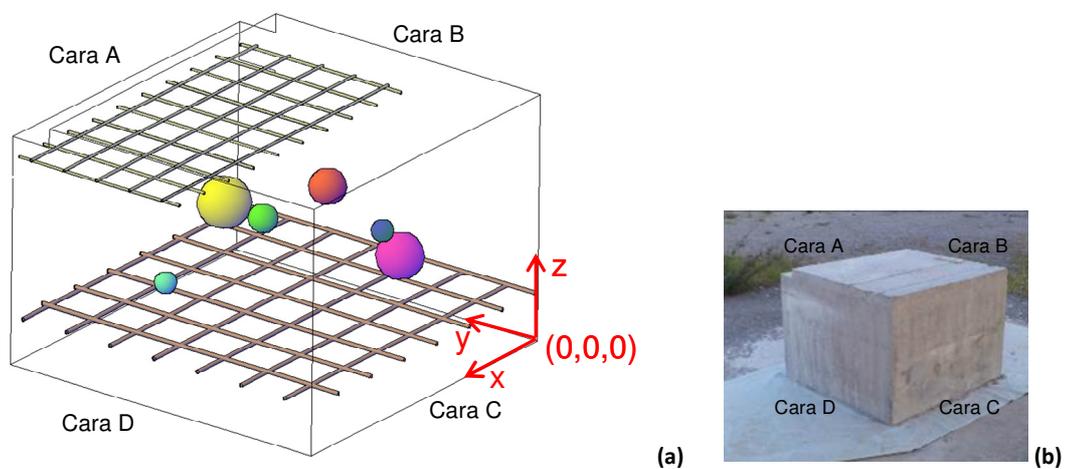
La Tabla 1 resume la situación teórica de las esferas existentes en el interior del prisma. Se denomina situación teórica porque precisamente, uno de los objetivos de este estudio es determinar la posición que realmente acabarán teniendo los objetos introducidos en el interior

del bloque, que probablemente se verá afectada por la ejecución del bloque (hormigonado, vibrado, etc).

**Tabla 1. Coordenadas de las esferas, referidas al origen y características básicas**

Esferas	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Radio (cm)	Material	Comentarios tamaño	Color identificativo
E1	60	99	50	10	Plástico hueco	Grande	
E2	23	46	30	9	Plástico hueco	Grande	
E3	17	84	46	7	Plástico hueco	Mediana	
E4	106	47	73	5,5	Poliestireno expandido	Mediana	
E.5.1	73	17	65	4	Poliestireno expandido	Pequeña	
E.5.2	117	83	41	4	Poliestireno expandido	Pequeña	

En la Fig. 24a se muestra un esquema que permite visualizar la posición aproximada de los elementos a detectar, mientras que en la Fig. 24b se muestra una fotografía del mismo, donde se observa la disposición de dichos elementos y las caras de inspección.



**Fig. 24. Esquema (a) y fotografía (b) del prisma de hormigón desde las caras C y D**

En las figuras siguientes (Fig. 25 a Fig. 29) se muestran las vistas del prisma junto con sus fotografías correspondientes:

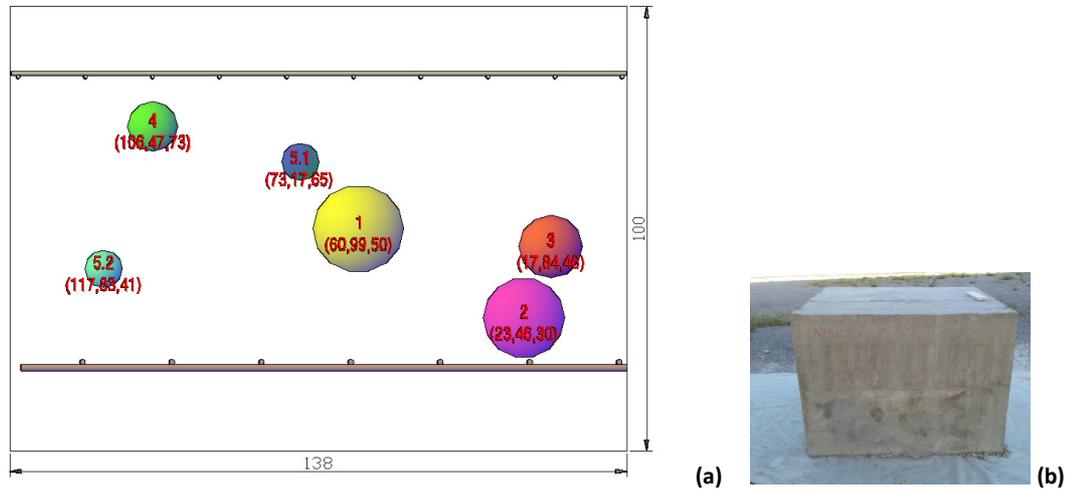


Fig. 25. Alzado (a) y fotografía (b) correspondientes a la cara C

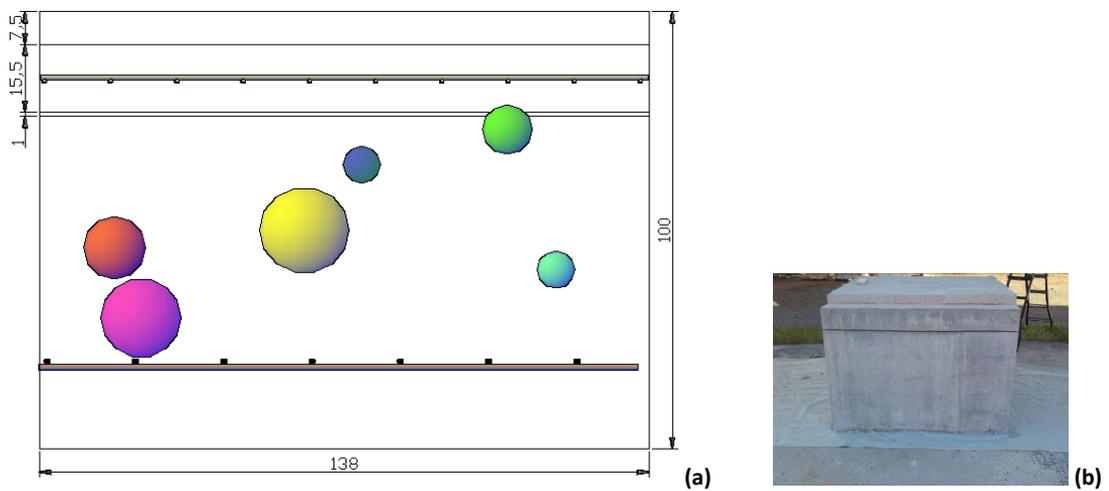


Fig. 26. Alzado (a) y fotografía (b) correspondientes a la cara A

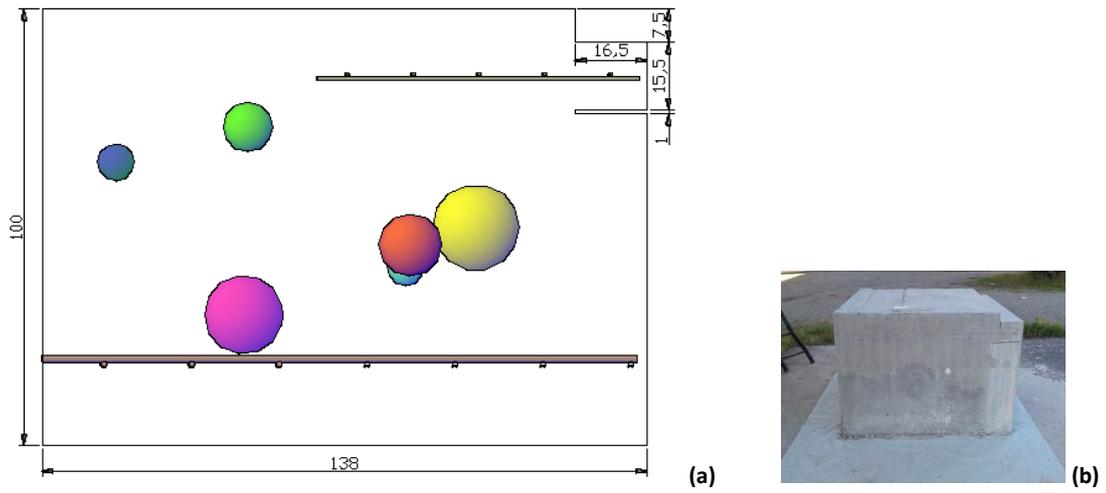


Fig. 27. Alzado (a) y fotografía (b) correspondientes a la cara B

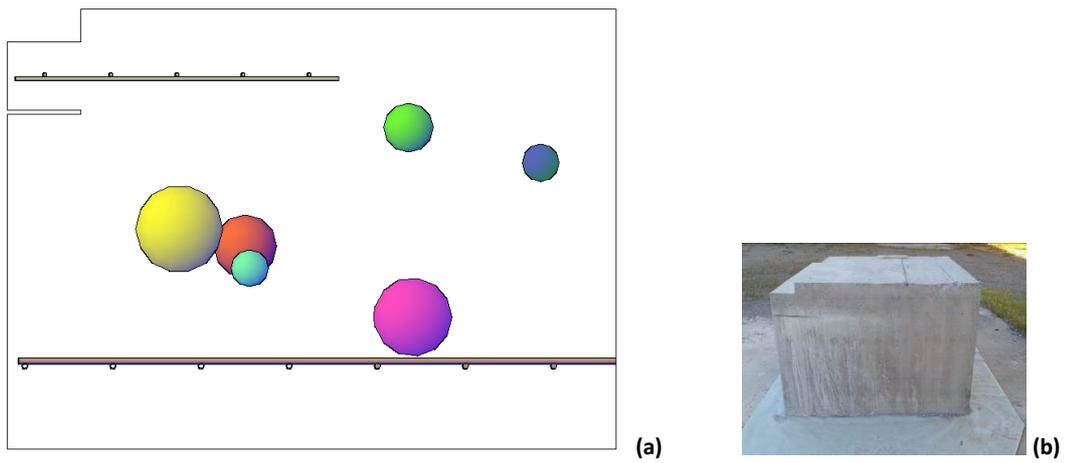


Fig. 28. Alzado (a) y fotografía (b) correspondientes a la cara D

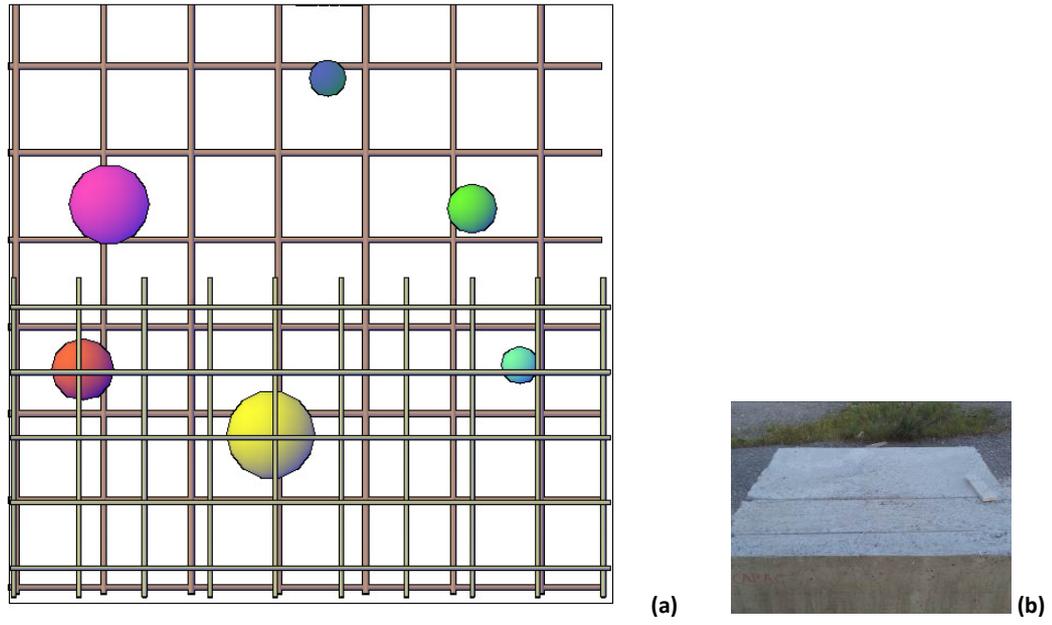


Fig. 29. Vista en planta (a) y fotografía (b) correspondiente

## 4.2. Descripción de los equipos empleados en el estudio

### 4.2.1. Equipo de georradar

El equipo que se utilizó en este trabajo ha sido el Subsurface Interface Radar SIR 3000 de la marca Geophysical Survey System Inc. (GSSI) (Fig. 30). El equipo de medición se encuentra disponible en el Laboratorio de Diagnóstico Estructural del Instituto Tecnológico de la Construcción, AIDICO, en Paterna (Valencia).



Fig. 30. Unidad central de control SIR 3000 con pantalla de visualización integrada de la marca GSSI

Se emplearon dos antenas para la realización de este estudio. Las frecuencias centrales a las que operan las antenas empleadas son 900 MHz (Fig. 31a) y 2 GHz (Fig. 31b), respectivamente.



(a)



(b)

Fig. 31. Antenas empleadas en el estudio, de frecuencias centrales 900 MHz (a) y de 2 GHz (b), de la marca GSSI

#### 4.2.2. Equipo de tomografía ultrasónica (MIRA)

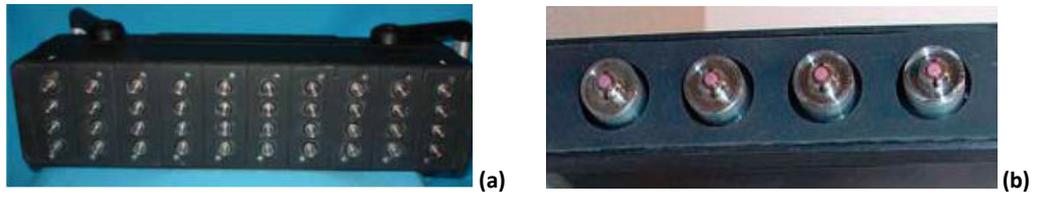
El equipo que se utilizó, es el tomógrafo ultrasónico MIRA, de la marca Germann Instruments A/S que se encuentra disponible en el Laboratorio de Diagnóstico Estructural del Instituto Tecnológico de la Construcción, AIDICO, en Paterna (Valencia), al igual que el equipo de georradar. Se trata de un instrumento utilizado para crear una representación (tomografía tridimensional 3D) de las anomalías internas que pueden estar presentes en un elemento de hormigón. Está basado en el método de ultrasonidos “*pitch-catch*” (arroja y captura) y utiliza una antena compuesta de una serie de transductores de puntos de contacto en seco (*Dry Point Contact, DPC*), que emiten las ondas (Fig. 32). Los transductores son controlados por el ordenador PC y los datos registrados son transmitidos de forma inalámbrica a éste en tiempo real. El ordenador recibe los datos y crea una imagen 3D de las interfases reflejadas en el elemento.

Es importante resaltar, que el equipo MIRA no necesita el empleo de ningún gel para facilitar la propagación de las ondas por el interior del material. Esto es una ventaja más de este equipo frente a los equipos de ultrasonidos convencionales.



Fig. 32. Tomógrafo ultrasónico MIRA de la marca Germann Instruments A/S

La antena se compone de un array de 4 x 10 transductores de punto (Fig. 33a y 33b)



**Fig. 33. Antena (a) y detalle de los transductores de punto del equipo MIRA (b)**

El equipo usa una frecuencia de 50 KHz por defecto, aunque puede variarse en función de su utilización, entre 15 KHz y 150 KHz, en escalones de 5 KHz.

### 4.3. Calibrado del equipo de georradar

En una primera fase del estudio experimental, se procedió a realizar la calibración de los equipos, para obtener los parámetros más adecuados de ajuste de los mismos, aplicados al material de estudio (hormigón).

Todo ello se realizó en base a que las posiciones de los elementos introducidos en el bloque de hormigón (armado superior e inferior, esferas de poliestireno y esferas de plástico hueco), a priori son conocidas, según se ha definido en el apartado 4.1.

#### 4.3.1. Estudio de la señal emitida: determinación de la longitud de onda y frecuencia para cada caso

En la Fig. 34, se muestra el pulso electromagnético emitido por la antena de 900 MHz al radiar al aire y el espectro de frecuencias característico de esta señal. De igual forma se presenta en la Fig. 35 la misma información para la antena de 2 GHz.

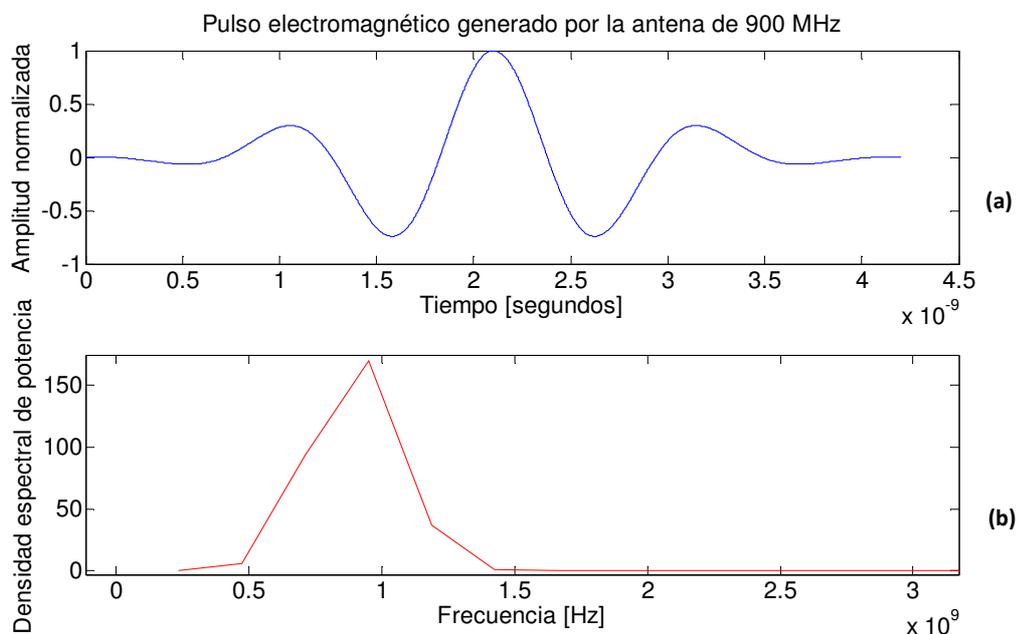


Fig. 34. Pulso electromagnético emitido al aire con antena de 900 MHz (a). Espectro de frecuencias característico (b)

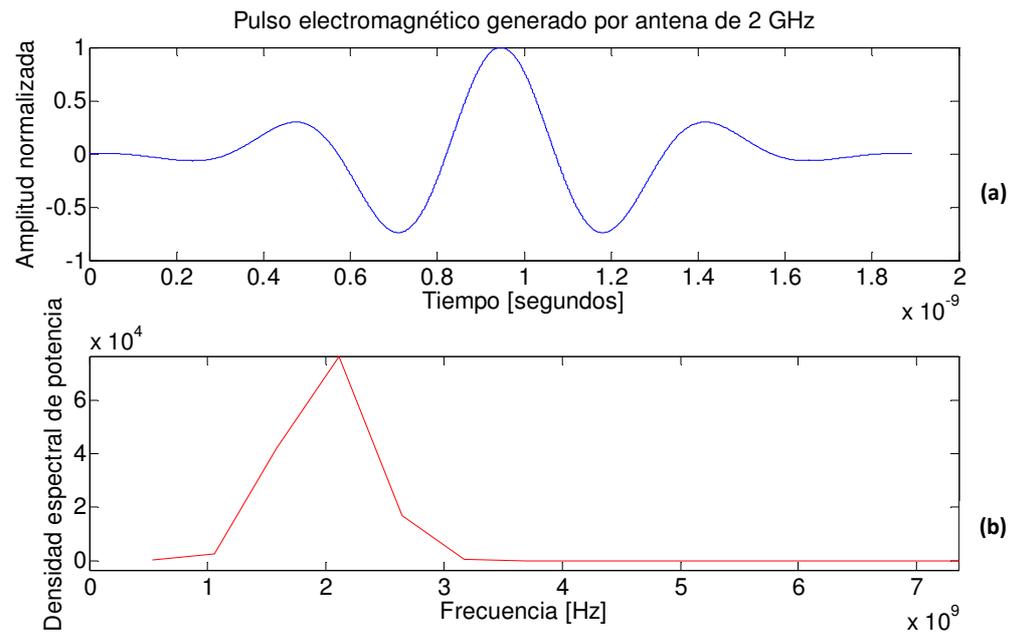


Fig. 35. Pulso electromagnético emitido al aire con antena de 2 GHz(a). Espectro de frecuencias característico (b)

La onda electromagnética se emite por medio de dos antenas diferentes de frecuencia central 900 MHz y 2 GHz.

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{ec. 21})$$

Sustituyendo los valores en la ecuación, se obtienen longitudes de onda de 11,4 cm y 5,1 cm para las antenas de 900 MHz y 2 GHz, respectivamente, para una emisión al aire.

#### 4.3.2. Determinación experimental de la constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ )

##### Antena de 900 MHz:

Para la determinación de la constante dieléctrica que se empleó en la realización de este estudio, en primer lugar se escogió un entorno de valores para la constante dieléctrica del hormigón ( $\epsilon_r$ ), en base al estudio de Gerigh et al. (2004), mediante la cual se muestran valores de  $\epsilon_r$  entre 6 y 12, para hormigón.

Para la obtención experimental de la constante dieléctrica, se precisa un eco claro, que esté situado a una profundidad conocida, de tal forma que se pueda obtener el tiempo de propagación que tarda en recorrer la onda el camino de ida y vuelta. Los parámetros de ajuste fueron variándose hasta obtener una configuración de los equipos que permitiese obtener registros de los objetos introducidos en el bloque de hormigón, que se correspondiesen con la posición real que tienen en el interior del bloque y que es conocida.

Los parámetros de ajuste aplicados finalmente fueron:

Muestra:	1024
Rango:	20 ns
Scan/unid:	120

Se procedió a realizar la adquisición de datos desplazándose sobre el rebaje del bloque, para poder comparar la profundidad real a la que se encuentra el corte practicado en él con la del radargrama obtenido (Fig. 36). Se colocó una lámina de aluminio para poder detectar la presencia del corte practicado en el bloque de hormigón, ya que sin dicha lámina no podía distinguirse claramente.

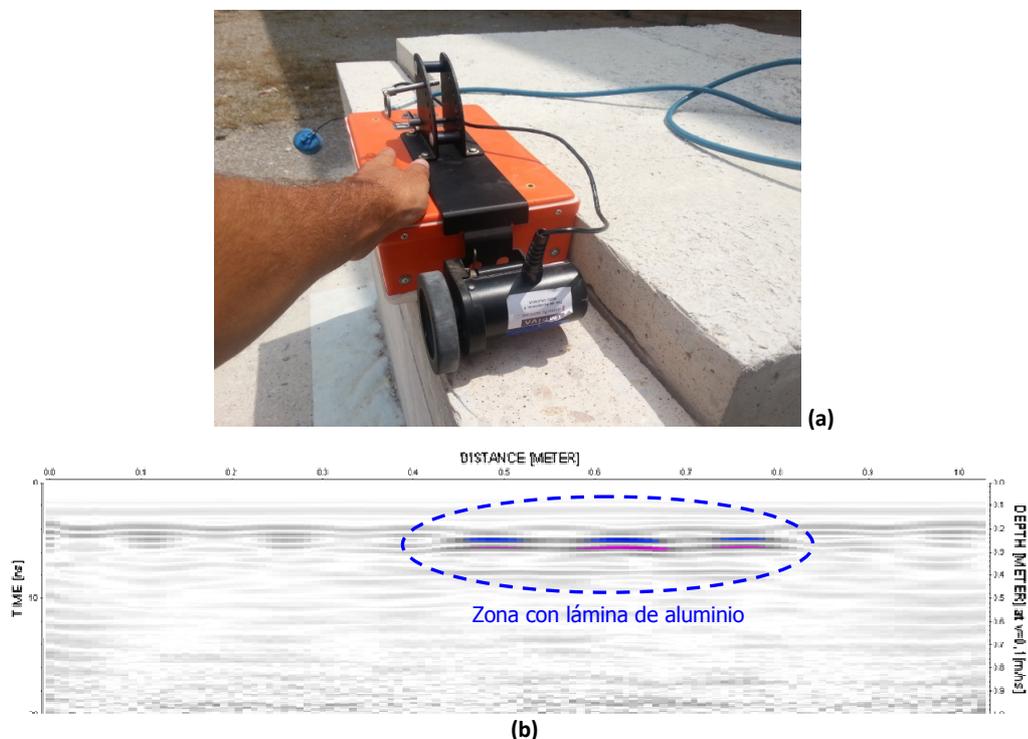


Fig. 36. Fotografía (a) y radargrama 29 (b). Antena 900 MHz. Registro dinámico sobre rebaje

Los valores obtenidos de las medidas realizadas sobre el radargrama fueron los siguientes:

Profundidad media del corte: 22,4 cm

Profundidad de la zona anterior a la penetración de la onda en la superficie: 6,8 cm

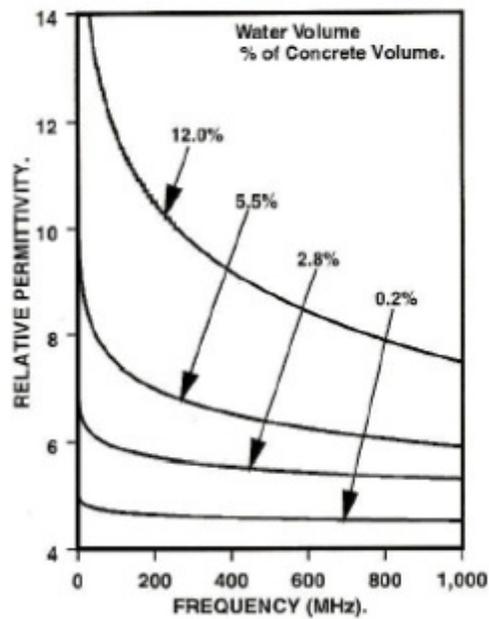
Profundidad corte:  $22,4 - 6,8 = 15,6$  cm

La profundidad real del corte medida desde el rebaje es de 15,5 cm, por lo que puede darse por válida esta configuración del equipo, obteniendo una constante dieléctrica del hormigón objeto de estudio  $\epsilon_r$  de 8,6.

### **Antena 2 GHz:**

Para la determinación de la constante dieléctrica para la antena de 2 GHz, se ha tenido en cuenta que el bloque de hormigón objeto de estudio, se encuentra a la intemperie, sometido a las condiciones climáticas exteriores propias de la época del año en la que se ha realizado este trabajo. El estudio para la antena de 2 GHz fue realizado en fechas posteriores al realizado con la antena de 900 MHz y, por tanto, aunque no se midió el contenido de humedad del hormigón del bloque inspeccionado, se estimó que estaba por debajo del 3%.

Según el trabajo realizado por **Soustos M.N. et al.** (2001), a partir de frecuencias de emisión de 900 MHz en adelante, el valor de la constante dieléctrica tiende a estabilizarse. La gráfica que es aportada en el mencionado trabajo, que se incluye en la Fig. 37, muestra la variación de la constante dieléctrica para distintas frecuencias de emisión, dependiendo del contenido de humedad del hormigón a estudio. Las frecuencias de emisión mayores de 1 GHz, no se representan en la gráfica ya que, en ese caso, el valor de la constante dieléctrica prácticamente no varía. En caso de encontrar una ligera variación, sería un pequeño descenso de la constante dieléctrica del hormigón.



**Fig. 37. Variación de la constante dieléctrica para distintas frecuencias de emisión, dependiendo del contenido de humedad del hormigón**

Según podemos comprobar en dicha gráfica, los valores de la velocidad de propagación de la onda electromagnética, se deben encontrar en torno a 0,1 m/ns para el caso de las dos antenas empleadas en este estudio (900 MHz y 2 GHz). La constante dieléctrica, según la misma gráfica, tendrá un valor en torno a 9.

Para la realización del presente trabajo, se dió por válida una constante dieléctrica del hormigón  $\epsilon_r$  de 8,6, tal y como se había obtenido en la calibración realizada con la antena de 900 MHz y que corresponde a una velocidad de propagación de la onda en el medio  $v$  de 0,1 m/ns.

#### 4.4. Calibrado del equipo de tomografía ultrasónica MIRA

---

##### 4.4.1. Estudio de la señal emitida: determinación de la longitud de onda y frecuencia para cada caso

En el caso del tomógrafo ultrasónico MIRA empleado, el pulso emitido presenta una frecuencia central configurable a 55 KHz y a 150 KHz, lo que se traduce en longitudes de onda de 4,3 cm y 1,6 cm, respectivamente.

La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia emitida, tal y como se observa en su ecuación:

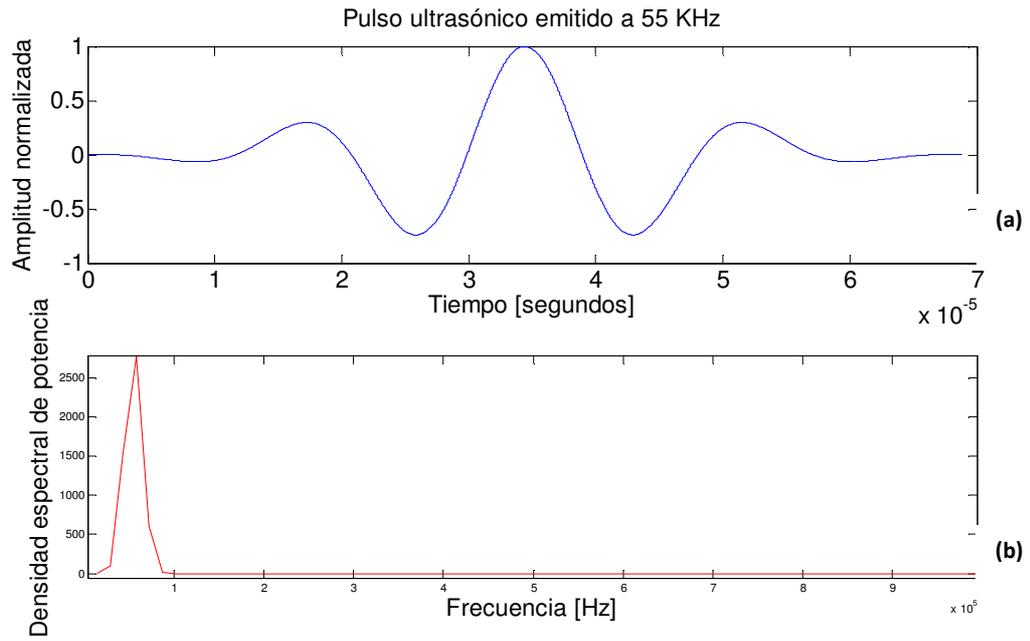
$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (\text{ec. 22})$$

donde:

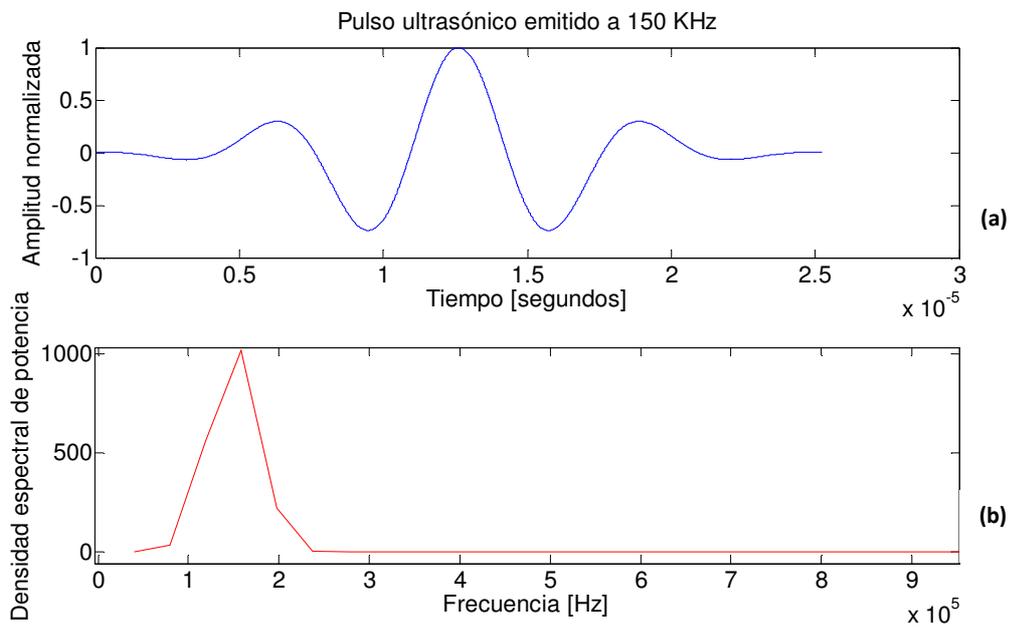
$v$  representa la velocidad de la onda transversal en el hormigón. En este caso la velocidad obtenida es de 2403 m/s.

$f$  representa la frecuencia central del pulso.

La Fig. 38 representa gráficamente el pulso emitido para una frecuencia de 55 KHz y su espectro de frecuencia. En la Fig. 39 se muestran estas mismas funciones para una frecuencia de emisión de 150 KHz.



**Fig. 38. Pulso ultrasónico (a) y espectro de frecuencia (b) en la emisión al aire, para una frecuencia de emisión de 55 KH**



**Fig. 39. Pulso ultrasónico (a) y espectro de frecuencia (b) en la emisión al aire, para una frecuencia de emisión de 150 KH**

#### 4.4.2. Determinación experimental de la velocidad de propagación ultrasónica

La determinación de la velocidad de propagación ultrasónica se realizó mediante el modo de calibración del equipo. Tal y como recomienda el fabricante del equipo, se procedió a realizar 8 medidas en distintas posiciones del bloque de hormigón, para obtener una buena estimación de la velocidad media de la onda. La velocidad obtenida de las medidas realizadas fue de 2.403 m/s. La velocidad de la onda determinada es representativa del hormigón que se va a estudiar, cerca de la superficie. En la Fig. 40 se muestra la pantalla de calibración del tomógrafo empleada para la obtención de la velocidad transversal.

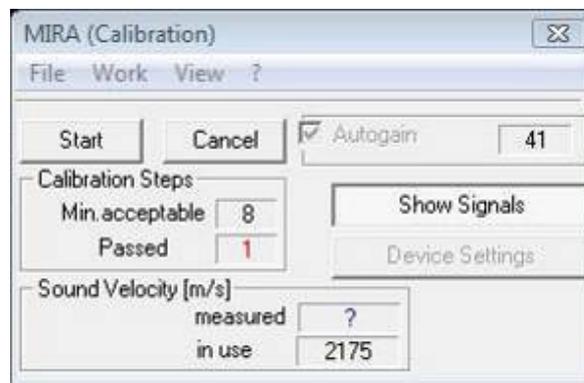


Fig. 40. Pantalla de adquisición de medidas de velocidad para calibración del equipo MIRA

## 4.5. Estudio de la resolución del georradar

---

El estudio de la resolución de los equipos empleados es fundamental y condiciona todo el estudio, ya que aportará datos sobre los límites inferiores de detección de anomalías.

### 4.5.1. Estudio de la resolución horizontal

Para el cálculo teórico de la resolución horizontal de las dos antenas utilizadas en este trabajo, se emplearon los diferentes criterios citados en el apartado 2.4 del presente estudio; C1, C2, C3, C4 y C5 (ecuaciones 7, 8, 9, 10 y 11, respectivamente). Se procedió calculando los valores teóricos de resolución horizontal para cada una de las antenas. Esto se consiguió mediante las barras del armado superior (Tablas 2 y 3). Finalmente se realizó el promediado de las resoluciones horizontales obtenidas para poder compararlas con los valores obtenidos en la campaña experimental (Tablas 4 y 5). Para poder concretar cuál de ellas aportaba los resultados más aproximados al caso real, se realizaron medidas experimentales, con el fin de obtener la resolución horizontal, usando las antenas de 900 MHz y 2 GHz. Los cálculos teóricos se realizaron utilizando la frecuencia nominal central ( $f_n$ ) de las antenas facilitada por el fabricante y la frecuencia dominante ( $f_d$ ) obtenida experimentalmente del espectro de frecuencias para cada una de las señales reflejadas. Concretamente el valor de  $fd$  representa la frecuencia para la cual la amplitud espectral presenta un valor máximo.

#### **Procedimiento experimental:**

Para la determinación de estos parámetros de forma experimental para la antena de 900 MHz se analizó el radargrama obtenido sobre el rebaje que existe en el bloque de hormigón y que supone obtener un registro dinámico de 1,3 m, desplazándose sobre las barras de armado del mallazo superior situados aproximadamente a 11 cm de profundidad y teniendo un eco de fondo a unos 15,5 cm producido por el corte existente en el bloque de hormigón.

Para la obtención de los mismos parámetros de forma experimental con la antena de 2 GHz, se procedió de la misma forma que en el caso de la antena de 900 MHz. (Fig. 41).

**Tabla 2. Valores de resolución horizontal obtenidos teóricamente para la antena de 900 MHz (en cm)**

$$\epsilon_r = 8,6$$

$$v = 0,1 \text{ m/ns}$$

$$\alpha = 1,54 \text{ m}^{-1}$$

$$f_n = 900 \text{ Mhz } (\lambda = 0,114 \text{ m}); f_d = 540 \text{ MHz } (\lambda = 0,201 \text{ m})$$

Barra	C. 1		C. 2		C. 3		C. 4		C. 5
	fn	fd	fn	fd	fn	fd	fn	fd	
2	18,6	26,2	6,3	12,8	8,4	11,2	7,7	10,6	33,8
3	19,2	22,2	6,5	8,7	8,7	9,7	8,1	9,0	35,9
4	19,8	29,2	6,7	14,9	9,1	12,4	8,4	11,7	38,0
5	20,2	28,4	6,8	13,8	9,3	12,2	8,6	11,4	39,4
6	19,2	21,6	6,5	8,3	8,8	9,5	8,1	8,9	36,2
7	19,2	21,0	6,5	7,8	8,7	9,2	8,0	8,6	35,6
8	18,8	27,8	6,4	14,2	8,5	11,8	7,9	11,2	34,6
9	19,0	27,0	6,5	13,1	8,7	11,5	8,0	10,8	35,5

**Tabla 3. Valores de resolución horizontal obtenidos teóricamente para la antena de 2 GHz (en cm)**

$$\epsilon_r = 8,6$$

$$v = 0,09 \text{ m/ns}$$

$$\alpha = 1,75 \text{ m}^{-1}$$

$$f_n = 2000 \text{ Mhz } (\lambda = 0,045 \text{ m}); f_d = 1888 \text{ MHz } (\lambda = 0,048 \text{ m})$$

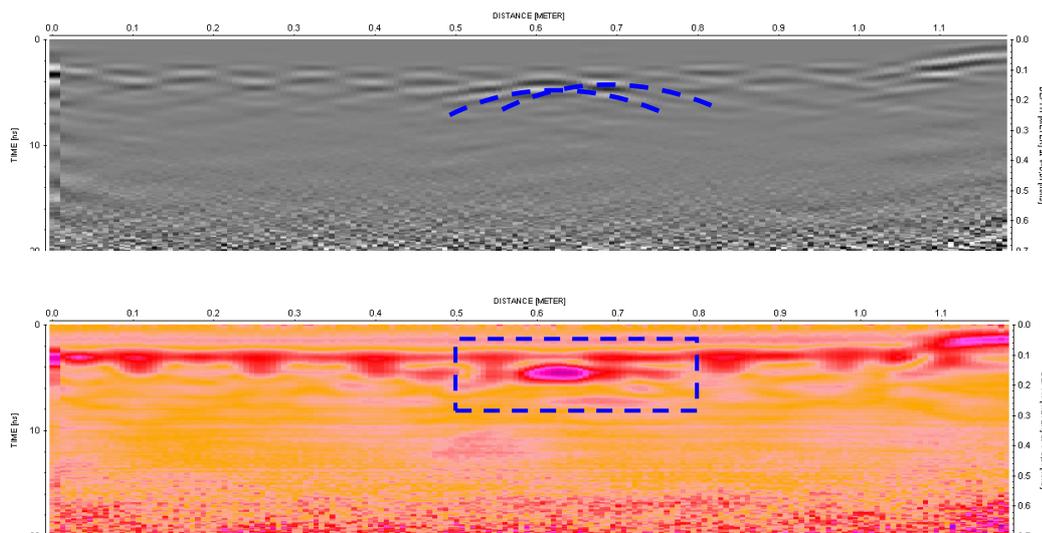
Barra	C. 1		C. 2		C. 3		C. 4		C. 5
	fn	fd	fn	fd	fn	fd	fn	fd	
2	9,4	10,4	2,0	2,5	4,7	5,0	4,3	4,6	22,1
3	9,6	10,6	2,0	2,5	4,8	5,1	4,4	4,7	22,9
4	10,4	10,4	2,2	2,2	5,4	5,4	4,9	5,0	26,4
5	10,4	10,6	2,2	2,3	5,5	5,5	5,0	5,1	26,8
6	10,4	10,2	2,2	2,1	5,5	5,4	5,0	5,0	26,9
7	10,4	10,2	2,2	2,1	5,5	5,4	5,0	4,9	26,8
8	10,0	10,2	2,1	2,2	5,1	5,2	4,7	4,7	24,7
9	9,8	10,2	2,1	2,3	5,0	5,1	4,6	4,7	24,0

El procedimiento experimental se basó en el análisis de los radargramas obtenidos al introducir dos láminas de aluminio a modo de reflectores de dimensiones 20 x 1,5 cm, en el corte practicado en el bloque, separando estos reflectores a razón de 1 cm (distancia entre ejes de las láminas de aluminio) para cada una de las 20 adquisiciones realizadas (Fig. 41).

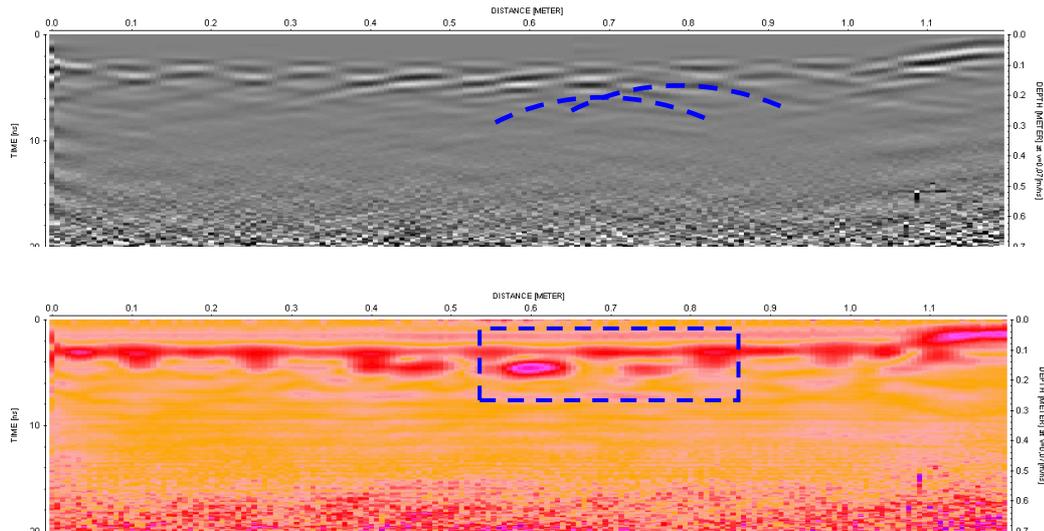


**Fig. 41. Colocación de reflectores metálicos en el corte del bloque de hormigón**

Para el procesado de los registros obtenidos con la antena de 900 MHz, se aplicaron los filtros *Subtracting Average* y *Envelope*. Debido a la resolución de esta antena, es complicado visualizar cuando se observa una sola hipérbola, ya que la armadura superior está próxima a una de las dos láminas de aluminio. Esto realiza un efecto en la composición de las señales que separa la hipérbola en dos debido al arrastre de la reflexión en la barra metálica. Sin embargo, a partir de una distancia entre láminas de 10 cm (Fig. 42), se distinguieron las dos hipérbolas separadas debido a la distancia que hay entre ellas y no por la reflexión superior y, a partir de una distancia de 14 cm (Fig. 43), se pudieron detectar las láminas claramente separadas.

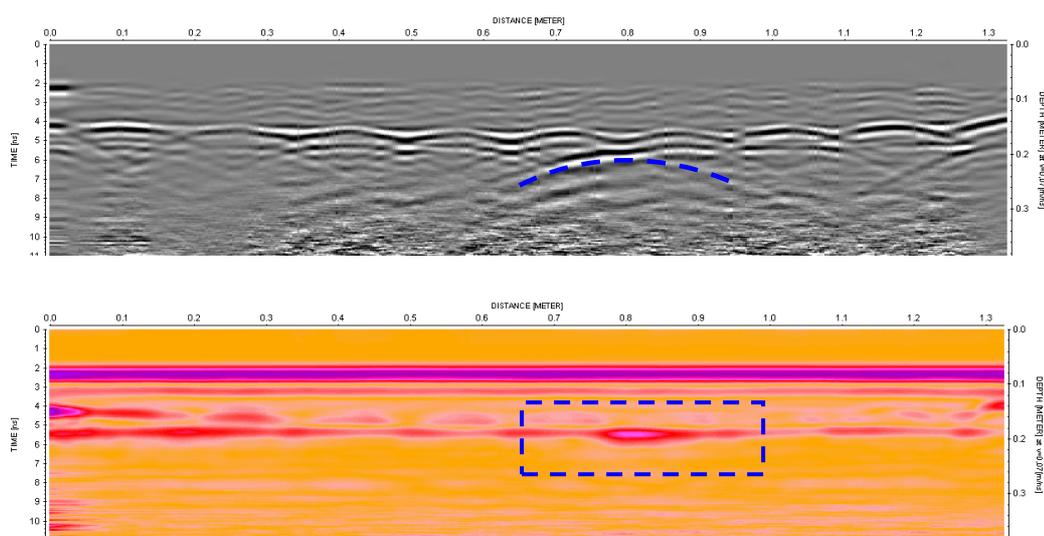


**Fig. 42. Radargrama 50. Antena de 900 MHz. Láminas de aluminio separadas 10 cm**

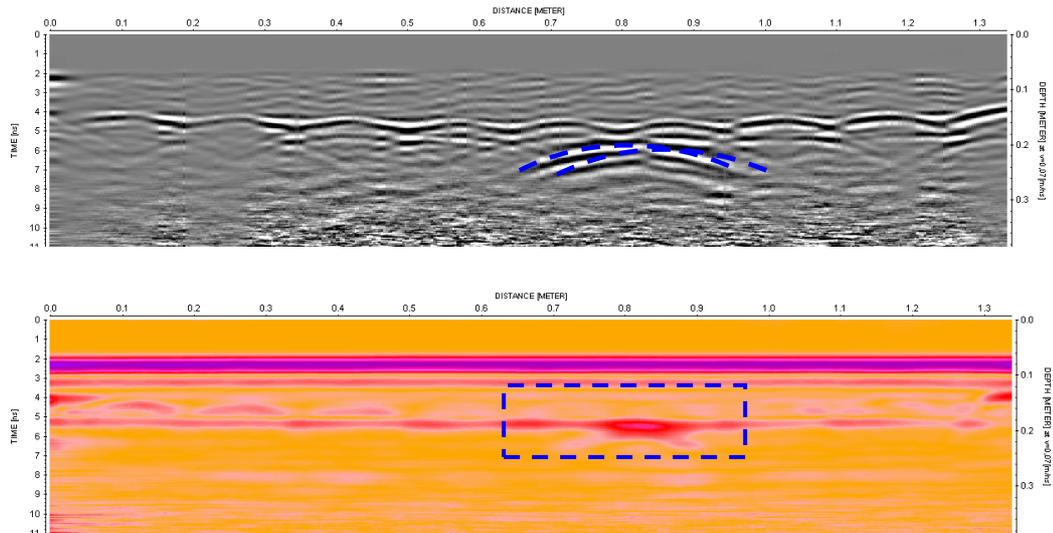


**Fig. 43. Radargrama 54. Antena 900 MHz. Láminas de aluminio separadas 14 cm**

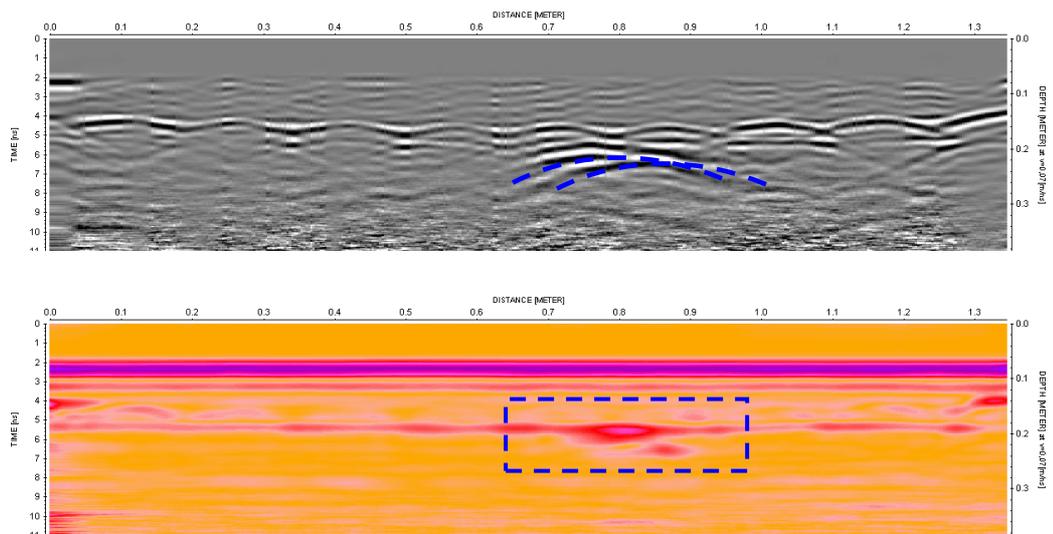
Para el procesado de los registros obtenidos en la adquisición realizada con la antena de 2 GHz se aplicó el filtro *Subtracting Average*. Con esta antena se comprobó que, hasta una distancia de 2-3 cm entre las láminas de aluminio sólo se apreciaba una hipérbola, como puede observarse en la Fig. 44. En la adquisición realizada con una distancia entre las láminas de aluminio de 4 cm, comenzaban a apreciarse dos hipérbolas separadas (Fig. 45). Cuando las láminas de aluminio se encontraban separadas una distancia de 6 cm se distinguían claramente las dos hipérbolas separadas (Fig. 46).



**Fig. 44. Radargrama 15. Antena 2 GHz. Láminas de aluminio separadas 2 cm**



**Fig. 45. Radargrama 17. Antena 2 GHz. Láminas de aluminio separadas 4 cm**



**Fig. 46. Radargrama 19. Antena 2 GHz. Láminas de aluminio separadas 6 cm**

**Resultados:**

En las Tablas 4 y 5, se muestran los valores medios de resolución horizontal obtenidos utilizando los criterios teóricos mencionados anteriormente, acompañados de los valores obtenidos experimentalmente (ambos en cm). En ambos casos, D1 es la distancia en cm necesaria para detectar dos objetos aunque con interferencias importantes entre las ondas reflejadas y D2 la distancia mínima en cm necesaria para detectar dos objetos con pocas o nulas interferencias entre las ondas reflejadas.

**Tabla 4. Resultados teóricos y experimentales de resolución horizontal obtenidos mediante la antena de 900 MHz (valores en cm)**

$$\epsilon_r = 8,6$$

$$v = 0,1 \text{ m/ns}$$

$$\alpha = 1,54 \text{ m}^{-1}$$

$$f_n = 900 \text{ Mhz } (\lambda = 0,114 \text{ m}); f_d = 540 \text{ MHz } (\lambda = 0,201 \text{ m})$$

C. 1		C. 2		C. 3		C. 4		C. 5	MEDIDAS EXPERIMENTALES	
fn	fd	fn	fd	fn	fd	fn	fd		D1 (cm)	D2 (cm)
19,3	25,4	6,5	11,7	8,8	10,9	8,1	10,3	36,1	10	14

**Tabla 5. Resultados teóricos y experimentales de resolución horizontal obtenidos mediante la antena de 2 GHz (valores en cm)**

$$\epsilon_r = 8,6$$

$$v = 0,1 \text{ m/ns}$$

$$\alpha = 1,75 \text{ m}^{-1}$$

$$f_n = 2000 \text{ Mhz } (\lambda = 0,045 \text{ m}); f_d = 1888 \text{ MHz } (\lambda = 0,048 \text{ m})$$

C. 1		C. 2		C. 3		C. 4		C. 5	MEDIDAS EXPERIMENTALES	
fn	fd	fn	fd	fn	fd	fn	fd		D1 (cm)	D2 (cm)
10,1	10,4	2,1	2,3	5,2	5,3	4,7	4,8	25,1	3	6

### Conclusiones:

Para el cálculo de los valores de la resolución horizontal mediante los criterios teóricos recopilados, se utilizaron las propiedades electromagnéticas determinadas en los experimentos realizados en la fase de calibración. La profundidad evaluada fue de 15,5 cm, correspondiente a la profundidad a la que se encuentra el corte practicado en el bloque de hormigón. Los resultados se calcularon utilizando las frecuencias nominal y dominante, la cual se estimó en base al espectro de frecuencias obtenido de las ondas reflejadas. La frecuencia dominante es menor que la frecuencia nominal, aunque las estimaciones obtenidas del cálculo del área de la primera zona de Fresnel, son mayores para la frecuencia dominante que para la frecuencia nominal, por lo que el uso de la frecuencia dominante para el cálculo teórico proporciona una estimación más conservadora de la resolución horizontal.

Para el caso de la antena de 900 MHz y distancias entre láminas menores de 10 cm, no fue posible obtener registros en los que se identifiquen como dos objetos distintos. Una distancia de 14 cm sí permitió obtener registros en los que se distinguen claramente las láminas como dos objetos independientes. Para distancias comprendidas entre los 10 y los 14 cm de separación entre las láminas de aluminio, se produjeron interferencias significativas que podrían provocar interpretaciones erróneas de los registros obtenidos.

En el caso de la antena de 2 GHz, se observó que, a distancias menores a los 3 cm de separación entre las láminas de aluminio, no era posible distinguirlas como dos objetos distintos. Distancias mayores a los 6 cm de separación entre láminas, permitieron obtener registros en los que se observaban dichas láminas como dos objetos claramente diferenciados. Para distancias comprendidas entre los 3 y los 6 cm de separación entre las láminas de aluminio, también se producían interferencias significativas que podrían provocar interpretaciones erróneas en la interpretación de resultados obtenidos.

Tanto para la antena de 900 MHz como para la de 2 GHz, el Criterio 1 es el que arrojó resultados menos precisos sobre el área de la primera zona de Fresnel. Para ambas antenas, el Criterio 3 fue el que proporcionó con mayor precisión el cálculo de las distancias obtenidas en el procedimiento experimental. Finalmente, el Criterio 5 proporcionó la estimación más conservadora de la resolución horizontal, para las dos antenas.

#### 4.5.2. Estudio de la resolución vertical

Los valores de resolución vertical para las antenas de 900 MHz y 2 GHz se han obtenido teóricamente a partir de los dos criterios definidos en el apartado 2.4; C1 y C2 (ecs. 12 y 13 respectivamente). Los resultados obtenidos se compararon con valores experimentales. Estos últimos fueron obtenidos mediante la obtención de diferentes registros, colocándose dos laminas de acero que se han ido separando progresivamente. Al igual que en el caso de la resolución horizontal, los cálculos teóricos se realizaron utilizando la frecuencia nominal central ( $f_n$ ) de las antenas

facilitada por el fabricante y la frecuencia dominante ( $f_d$ ) obtenida experimentalmente del espectro de frecuencias para cada una de las señales reflejadas.

#### Procedimiento experimental:

En las Tablas 6 y 7 se muestran los valores teóricos obtenidos para la resolución vertical a partir de los criterios teóricos ya comentados.

**Tabla 6. Resultados de resolución vertical obtenidos para la antena de 900 MHz (valores en cm)**

$$\epsilon_r = 8,6$$

$$v = 0,09 \text{ m/ns}$$

$$f_n = 900 \text{ Mhz } (\lambda = 0,114 \text{ m}); f_d = 540 \text{ MHz } (\lambda = 0,201 \text{ m})$$

C. 1		C. 2	
fn	Fd	fn	fd
5,7	10,1	2,9	5,0

**Tabla 7. Resultados de resolución vertical obtenidos para la antena de 2 GHz (valores en cm)**

$$\epsilon_r = 8,6$$

$$v = 0,09 \text{ m/ns}$$

$$f_n = 2000 \text{ MHz } (\lambda = 0,045 \text{ m}); f_d = 1888 \text{ MHz } (\lambda = 0,048 \text{ m})$$

C. 1		C. 2	
fn	Fd	fn	fd
2,3	2,4	1,1	1,2

Distancias inferiores a las obtenidas para los valores de resolución vertical, entre anomalías que se encuentran posicionadas de forma consecutiva, produjeron que no pudieran ser detectadas por separado.

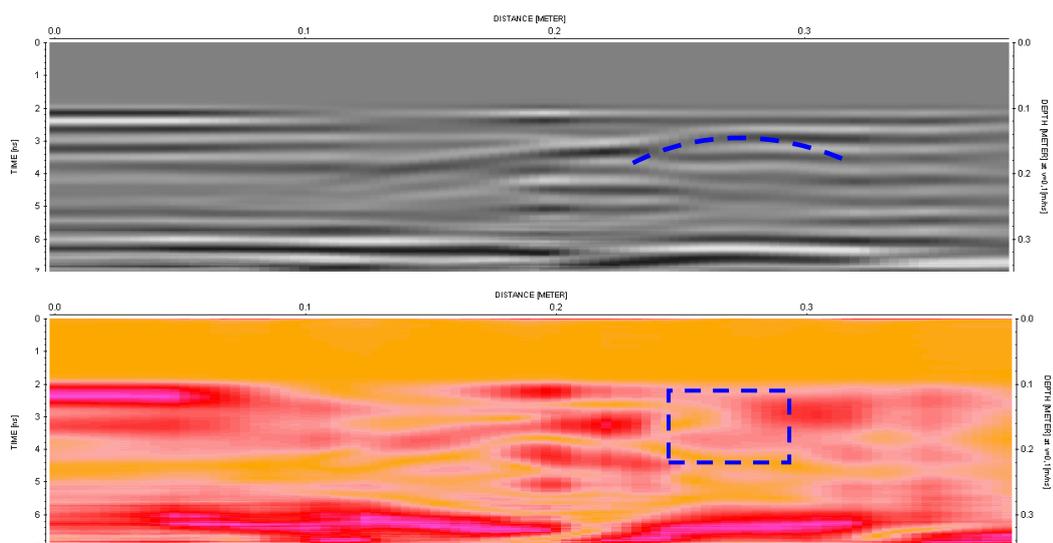
Con el objeto de validar el estudio previo teórico realizado, se procedió a la medida experimental de la resolución vertical para las antenas de 900 MHz y 2 GHz. Se analizaron los radargramas obtenidos al colocar dos láminas de acero de 5 mm de espesor superpuestas, que se fueron separando a razón de 1 cm hasta completar un total de 15 registros (Fig. 47).



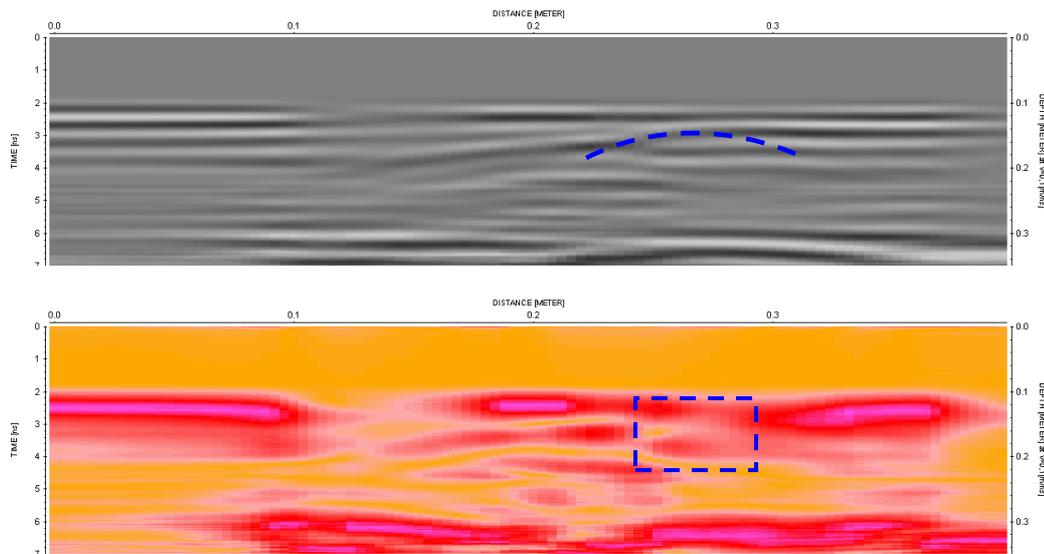
**Fig. 47. Detalle colocación de las láminas de acero**

Para el procesado de los registros obtenidos mediante la utilización de la antena de 900 MHz, se aplicaron los filtros *Substracting Average* y *Envelope*. Debido a la resolución de esta antena, es complicado visualizar cuando se observa una sola hipérbola, ya que la armadura superior está próxima a una de las dos láminas de aluminio.

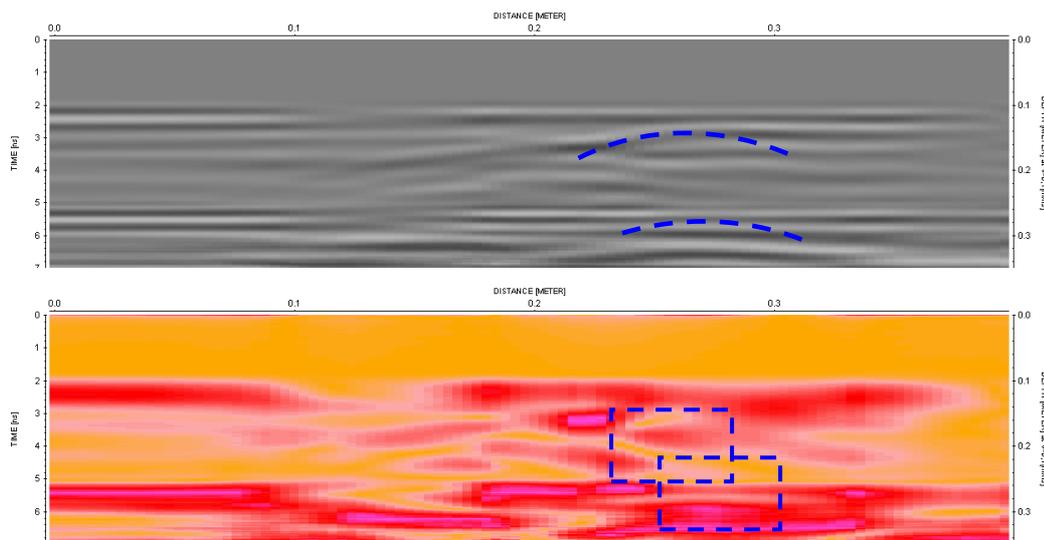
Tal y como se puede observar en la figuras siguientes (Fig. 48 a Fig. 50), las anomalías comenzaron a ser visibles y claramente separables cuando la distancia entre ellas es superior a los 2 cm. En la Fig. 48 se observa claramente la presencia de la segunda anomalía no detectada en los radargramas previos.



**Fig. 48. Radargrama 70. Antena 2 GHz. Láminas de acero a 10 cm de profundidad**



**Fig. 49. Radargrama 71. Antena 2 GHz. Láminas de acero separadas 1 cm**



**Fig. 50. Radargrama 72. Antena 2 GHz. Láminas de acero separadas 2 cm**

**Resultados:**

En la Tabla 8 se presentan los valores teóricos y experimentales obtenidos únicamente mediante la antena de 2 GHz debido a la proximidad del armado superior a las láminas introducidas en el bloque. Con esta antena nos aseguramos la posibilidad de detectar y localizar correctamente las láminas de acero de 5 mm de espesor introducidas en el corte, con pocas o nulas interferencias entre las ondas reflejadas.

**Tabla 8. Resultados teóricos y experimentales de resolución vertical obtenidos mediante la antena de 2 GHz (valores en cm)**

$$\epsilon_r = 8,6$$

$$v = 0,09 \text{ m/ns}$$

$$f_n = 2000 \text{ MHz } (\lambda = 0,045 \text{ m}); f_d = 1888 \text{ MHz } (\lambda = 0,048 \text{ m})$$

C. 1		C. 2		MEDIDAS EXPERIMENTALES
fn	fd	fn	fd	D (cm)
2,3	2,4	1,1	1,2	2

### Conclusiones:

Para el cálculo de los valores de la resolución vertical mediante los criterios teóricos recopilados, se utilizaron las propiedades electromagnéticas determinadas en los experimentos realizados en la fase de calibración, al igual que para la resolución horizontal. La profundidad evaluada fue de 25 cm, correspondiente a la profundidad máxima a la que colocaron las láminas de acero.

Los resultados se calcularon utilizando las frecuencias nominal y dominante, la cual se estimó en base al espectro de frecuencias obtenido de las ondas reflejadas. La frecuencia dominante resultó ser menor que la frecuencia nominal.

Los registros obtenidos experimentalmente, permiten distinguir dos hipérbolas claramente separadas cuando la distancia entre las mismas es superior a 2 cm, lo que se traduce en valores de resolución vertical del orden de los obtenidos teóricamente mediante el criterio 1. Dicho criterio resulta más aproximado frente al criterio 2, para el cual se obtienen valores de resolución vertical en torno a 1 cm.

## 4.6. Estudio de la resolución del tomógrafo ultrasónico (MIRA)

---

### 4.6.1. Resolución horizontal

Para el cálculo de la resolución horizontal del tomógrafo ultrasónico MIRA, el criterio que se utilizó es el indicado en el apartado 3.5.2. Para este caso, el tamaño del transductor es de 5 cm.

El valor de la resolución horizontal que se obtuvo, es válida para las dos frecuencias utilizadas en la inspección (55 y 150 KHz), ya que no depende de la frecuencia de emisión.

$$R_h \cong \frac{d}{2}; R_h = \frac{5}{2} = 2,5 \text{ cm}$$

Dos anomalías adyacentes (situadas en el mismo plano horizontal), no se podrán detectar independientemente si la distancia entre ellas es inferior al valor de la resolución horizontal de este equipo.

El valor que se obtuvo en el cálculo no coincidiría exactamente con el obtenido experimentalmente puesto que, para simplificar el modelo teórico, se supuso una velocidad constante de propagación en el medio, el cual no presenta atenuación, y que la frecuencia del pulso recibido es igual a la frecuencia del pulso transmitido.

### 4.6.2. Resolución vertical

Los valores de la resolución vertical para el caso de estudio, se estimaron para las dos frecuencias que se emplearon en la inspección (55 y 150 KHz). El criterio que se utilizó para el cálculo es el indicado en el apartado 3.5.2.

Como se ha comentado anteriormente, la determinación de la velocidad de propagación ultrasónica se realizó mediante el modo de calibración del equipo. La

velocidad media obtenida de las medidas realizadas era de 2.403 m/s. La velocidad de la onda determinada era representativa del hormigón que se va a estudiar, cerca de la superficie.

Para una frecuencia de emisión en la inspección de 55 KHz:

$$R_v = \frac{v}{4f} \approx 1 \text{ cm}$$

Para una frecuencia de emisión en la inspección de 150 KHz:

$$R_v = \frac{v}{4f} \approx 0,4 \text{ cm}$$

Las anomalías presentes en profundidades que disten un valor inferior a la resolución vertical (para cada caso), no pudieron ser detectadas por separado.

Nuevamente cabe destacar que estos valores van a diferir de los obtenidos experimentalmente, puesto que se supone una velocidad constante de propagación en el medio que no presenta atenuación, y que la frecuencia del pulso recibido es igual a la frecuencia del pulso transmitido.

## 4.7. Estudio experimental de la capacidad de penetración de las ondas

### 4.7.1. Capacidad de penetración de las ondas electromagnéticas

Para determinar la capacidad de penetración de las ondas electromagnéticas en el hormigón estudiado, se procedió a realizar diversas medidas sobre ecos de fondo en diferentes distancias o profundidades.

#### Exploraciones con antena de 900 MHz:

En primer lugar, se procedió a la exploración con antena de 900 MHz desde la cara A. Para una velocidad de 0,1 m/ns, aparecía la reflexión relacionada con el final del bloque a 1,416 m (eco de fondo) (Fig. 51). A esta profundidad hay que restarle el retardo que produce la antena antes de que la señal entre en la superficie del bloque de hormigón. Este retardo es de 0,04 m, por tanto, resultó un valor para la posición en profundidad del eco de fondo de 1,376 m.

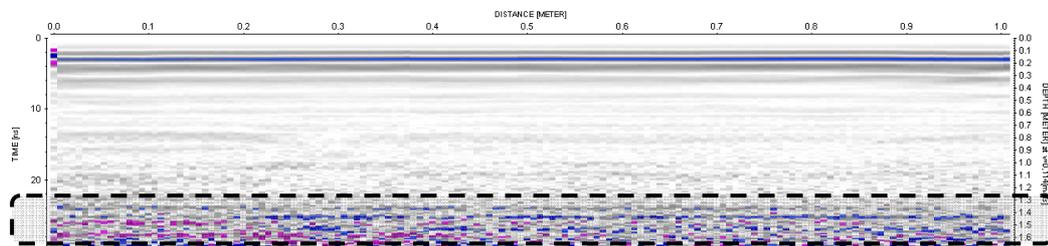
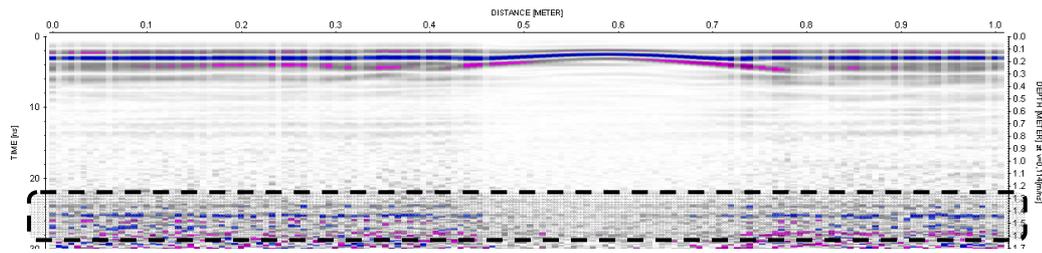


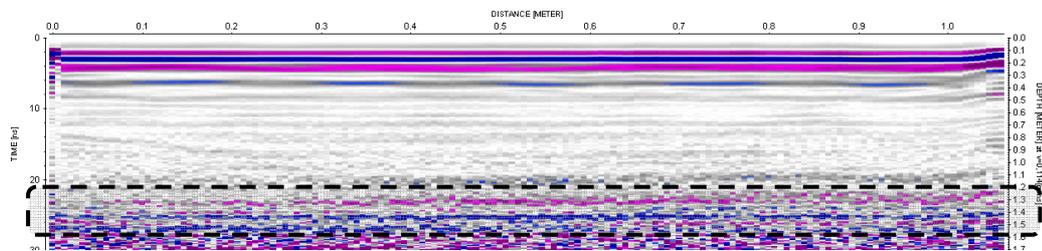
Fig. 51. Radargrama 55. Antena de 900 MHz. Adquisición desde cara A

En el caso de la inspección realizada desde la cara B, el eco de fondo apareció a una profundidad de 1,42 m (Fig. 52) (en el radargrama se aprecia la reflexión producida por la esfera 2 a unos 0,6 m del inicio del radargrama, pero en este apartado nos centraremos en el eco de fondo). Descontando a este valor el retardo de la antena de 0,04 m, se obtuvo una profundidad de 1,382 m.



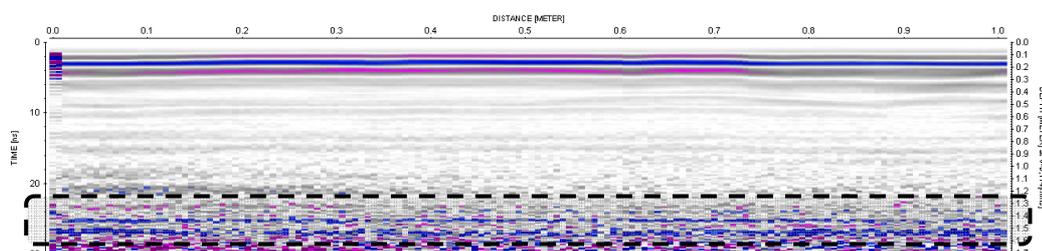
**Fig. 52. Radargrama 48. Antena de 900 MHz. Adquisición desde cara B**

También se realizó una exploración con la misma antena desde la superficie de la cara C (Fig. 53). En este caso, el valor del eco de fondo es muy aproximado si se utiliza una velocidad de 0,1 m/ns. Al valor de profundidad que medimos en el radargrama de 1,429 m, hemos de sustraerle el retardo de 0,04 m y obtenemos un valor de 1,389 m.



**Fig. 53. Radargrama 50. Antena de 900 MHz. Adquisición desde cara C**

Para la Cara D, se procedió de igual forma (Fig. 54), obteniendo un valor de 1,43 m de distancia al eco de fondo, medido sobre el radargrama. Quitándole 0,04 m de retardo, obtenemos una dimensión de 1,39 m.



**Fig. 54. Radargrama 48. Antena de 900 MHz. Adquisición desde cara D**

La antena de 900 MHz alcanza un rango suficiente de medida donde puede inspeccionarse todo el ancho del bloque de hormigón. Cabe señalar que, a partir de una distancia de 1 m, esta antena produce mucho ruido en la señal que obtiene. Sin embargo se logró observar el eco de fondo buscado a 1,38 m.

### Exploraciones con antena de 2 GHz:

Para el caso de la antena de 2 GHz, se realizaron medidas sobre el rebaje practicado en el bloque de hormigón desde su cara superior.

En este caso, la resolución vertical de la antena, permitió diferenciar entre el armado superior y el corte del bloque, incluso se observó la curvatura real del armado, que no se detectaba en las medidas realizadas con la antena de 900 MHz. Comparando la profundidad real del mallazo superior con la profundidad obtenida del radargrama, se obtuvieron los mismos valores.

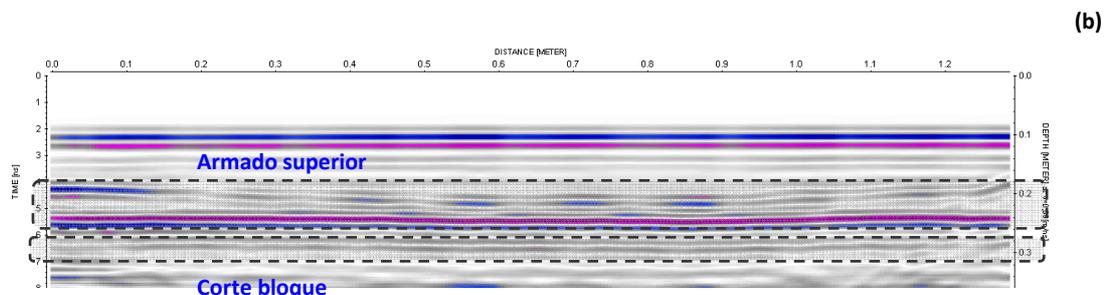


Fig. 55. Desplazamiento de la antena de 2 Ghz sobre el rebaje del bloque de hormigón (a). Radargrama 1 obtenido. Antena de 2 GHz

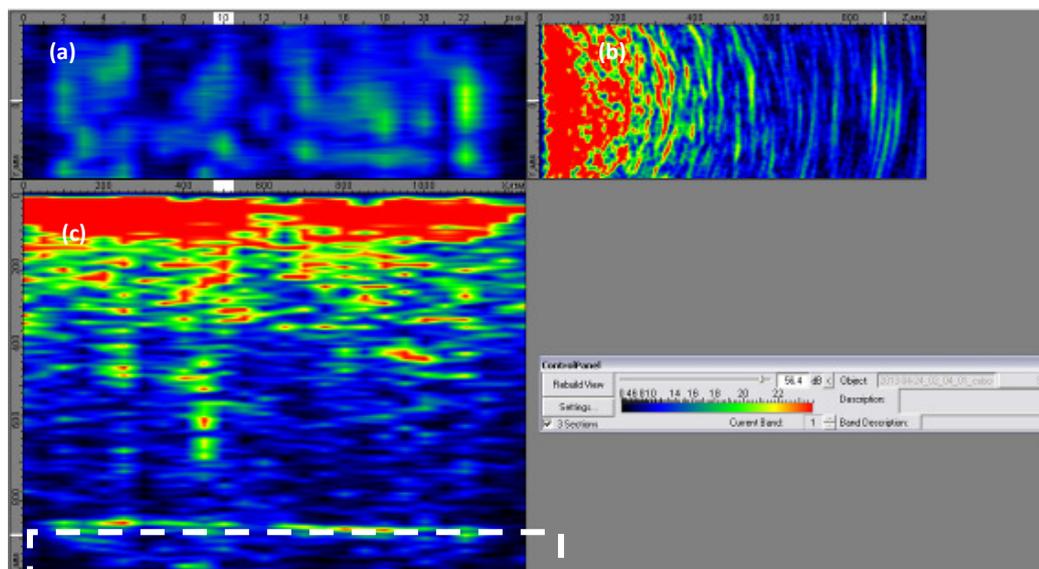
Como se aprecia en la Fig. 55, para la antena de 2 GHz, la capacidad de penetración de la señal, relacionada con la profundidad a la que el radargrama obtenido ya no muestra la suficiente información para una detección fiable, es de aproximadamente 0,45 m.

#### 4.7.2. Capacidad de penetración de las ondas elásticas

Para el estudio de la capacidad de penetración de las ondas elásticas en el hormigón estudiado, se procedió a realizar medidas desde la cara superior del bloque de hormigón con el tomógrafo ultrasónico, utilizando una frecuencia de trabajo de 150 KHz.

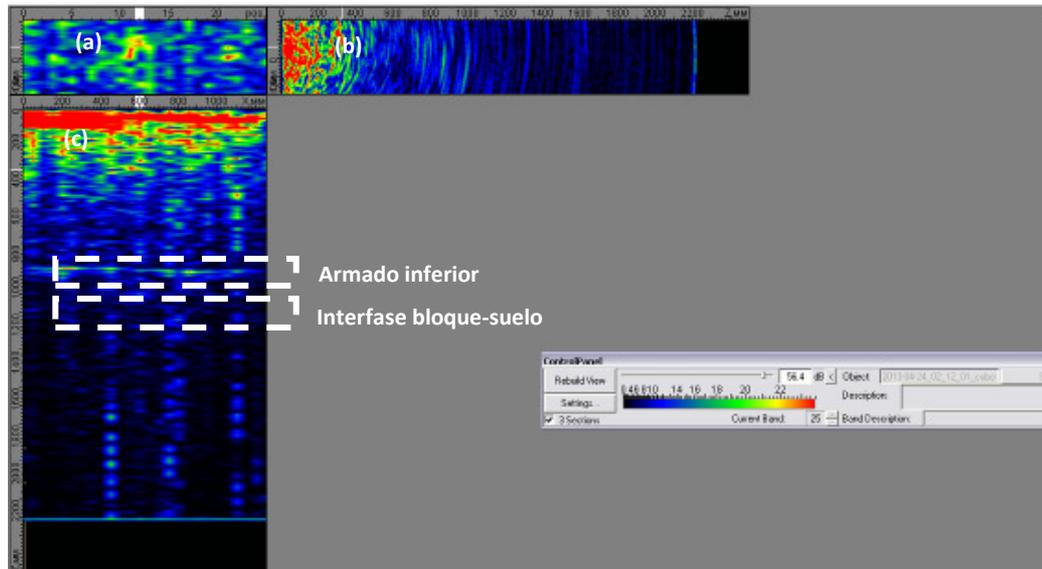
De entre los rangos que dispone el tomógrafo ultrasónico MIRA para configurar el equipo, se escogieron los dos que se podrían aplicar al presente caso de estudio, en el que la altura del bloque de hormigón es de 1 m. Los rangos elegidos para realizar el estudio experimental de la capacidad de penetración de las señales elásticas en el hormigón, fueron el rango de 1 m y el de 2,5 m.

Para el caso de un rango de 1 m (Fig. 56), se observó el armado inferior del bloque de hormigón en la imagen ultrasónica obtenida, a una profundidad de 0,87 m, lo cual coincide aproximadamente con al posición real del armado.



**Fig. 56. Visualización del armado inferior. Frecuencia 150 KHz. Rango 1 m. Zona de exploración 1. C-Scan (a), B-Scan (b) y D-Scan (c).**

En el caso de una configuración del equipo con un rango de medida de 2,5 m (Fig. 57), la reflexión del armado inferior fue mayor que la del cambio de material entre el bloque de hormigón y el suelo en el que se encuentra ubicado, lo cual dificultó su determinación, por lo que la capacidad de penetración de la onda en el hormigón de estudio se considera de aproximadamente 1 m de profundidad.



**Fig. 57. Visualización del armado inferior y la interfase hromigón-suelo. Frecuencia 150 KHz. Rango 2,5 m. Zona de exploración 1. C-Scan (a), B-Scan (b) y D-Scan (c)**

## 4.8. Adquisición de registros

---

### 4.8.1. Método de adquisición de registros mediante georradar

Con la exploración con georradar, se pretende estudiar la posibilidad de detección y localización de los objetos a modo de esferas, así como la armadura superior e inferior, existentes en el bloque de hormigón.

Para ello, se utilizaron dos antenas que confieren dos resoluciones diferentes. La antena de 900 MHz que tiene capacidad de penetración desde la cara superior hasta la cara inferior del bloque. Asimismo, la antena de 2 GHz, consigue explorar hasta unos 45 cm en dicho hormigón. La elección de parámetros a estudiar viene condicionada por la calibración realizada y expuesta en el apartado 4.3. Las dos antenas son utilizadas de forma específica para inspección de estructuras de hormigón.

Como se ha visto en apartados anteriores, la primera de las verificaciones se realizó para la determinación de la constante dieléctrica y la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. Para ello, se tomaron registros desplazando las antenas sobre el rebaje practicado en el bloque de hormigón, tal y como se describe en el apartado 4.5.1.

A partir de estas comprobaciones y verificaciones, pudieron comenzar las medidas relativas a las inspecciones, como puede observarse en la Fig. 58. Las inspecciones se realizaron mediante escaneos o barridos que cubrían la superficie accesible de las caras con el fin último de obtener unos radargramas en los que obtener las anomalías o singularidades.

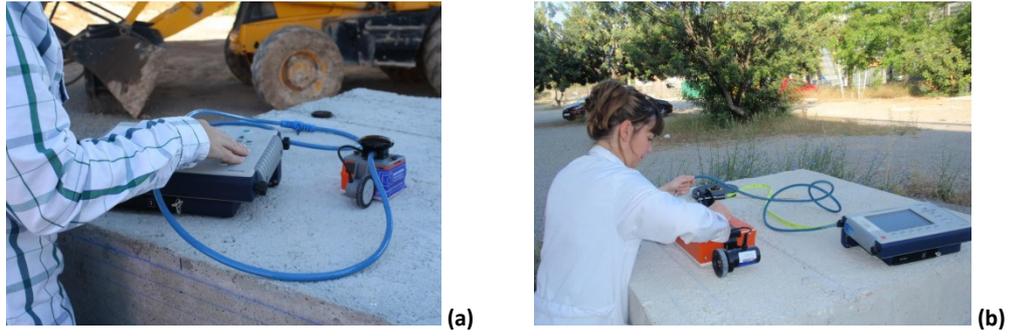


Fig. 58. Realización de medidas con georradar, antenas de 2 GHz (a) y 900 MHz (b)

A tal efecto, se tomaron diferentes distancias entre las medidas para realizar los barridos. Con la antena de 900 MHz se realizaron medidas cada 20 cm, mientras que con la antena de 2 GHz se tomaron medidas cada 5 cm, 10 cm y 20 cm, resultando un total de 51 perfiles. Estas medidas se realizaron con el fin de obtener un solape creciente entre los conos de radiación y ver cómo se traduce en la resolución obtenida, y sobre todo en la localización de los diferentes objetos, tal y como se muestra en la Fig. 59.

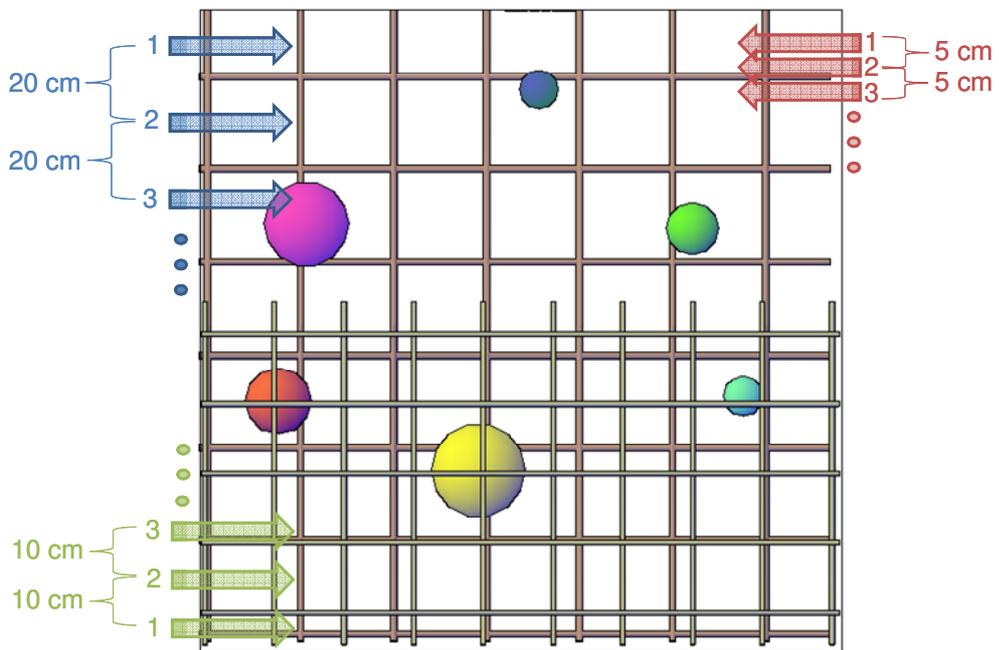
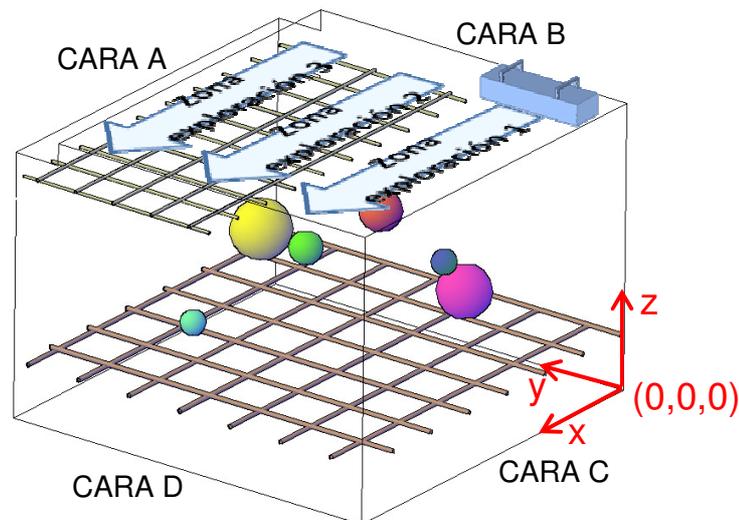


Fig. 59. Esquema de las líneas de exploración sobre la cara superior del bloque con el georradar

#### 4.8.2. Método de adquisición de registros mediante tomografía ultrasónica

Para llevar a cabo la inspección del bloque de hormigón, se establecieron tres zonas de exploración en la superficie desde donde se realiza la adquisición, que corresponde a su cara superior (Fig. 60). La antena se orientó perpendicularmente a la dirección de exploración y los datos se registraron en los pasos predeterminados a lo largo de cada línea de exploración.



**Fig. 60.** Esquema de las zonas de exploración con tomografía ultrasónica sobre la cara superior del bloque

La distancia entre las sucesivas posiciones de la antena depende de la naturaleza de los defectos a detectar. En este caso se tomaron medidas cada 5 cm a lo largo de las tres zonas de exploración contiguas de 40 cm de ancho (correspondiente a la anchura del equipo), sobre la cara superior del bloque de hormigón, resultando 26 medidas por cada una de las tres zonas de exploración, que suman un total de 78 medidas.

El sentido de desplazamiento fue desde la cara B del bloque de hormigón hacia la cara D, tal y como se puede observar en la Fig. 61. Esta información se introduce en el software y la información se utiliza durante el procesamiento de señales para establecer la ubicación de las interfases reflejantes dentro del bloque de hormigón.



Fig. 61. Realización de medidas con tomógrafo ultrasónico MIRA

## 4.9. Procesado de registros

### 4.9.1. Imágenes 2D de georradar

Una vez realizada la adquisición de datos, se realizó el procesado de los registros obtenidos. Para ello se empleó el software de análisis y tratamiento de datos *Reflexw*. Se aplicaron filtros y funciones de ganancia. En la Fig. 62 se muestra una captura de pantalla del software donde se está aplicando un algoritmo de eliminación del ruido de fondo en la señal.

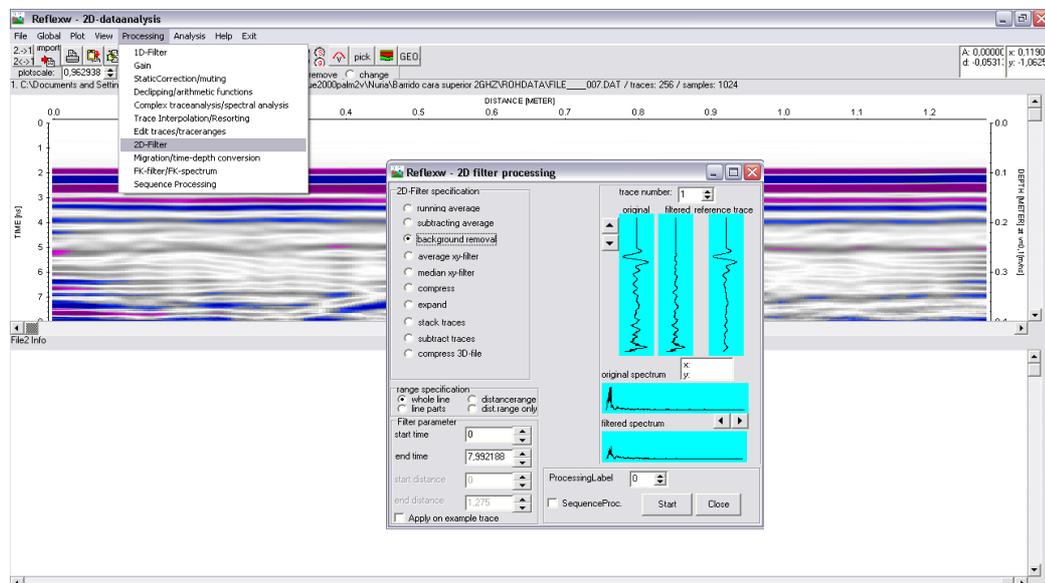


Fig. 62. Pantalla de visualización, software Reflexw, aplicación de filtros

#### Filtros:

De los filtros disponibles en el software, se utilizaron los siguientes:

El filtro *Background Removal*, que elimina las reflexiones de fondo, es decir, crea una señal media y la resta a todas las señales que forman el radargrama. Por tanto, elimina la información que se repite en todas las señales, de forma que se consigue acentuar la visualización de indicaciones individuales.

El filtro *Subtract Traces* sustrae de un número seleccionable de señales la primera traza dentro cada grupo. Con ello se consigue eliminar señales que forman el radargrama, consiguiendo que, a pesar de que la imagen aparece pixelada, algunos elementos se identifican más fácilmente.

El filtro *Envelope* crea la envolvente de la traza, creando imágenes más definidas y redondeadas de los objetos que se encuentran en el interior del elemento inspeccionado.

El filtro *Bandpass Filtering* elimina las más altas y más bajas frecuencias, que normalmente aparecen debido a interferencias o ruido.

**Ganancia:**

La aplicación de funciones de ganancia consiste en amplificar la señal que se recibe y su objetivo es contrarrestar los efectos de atenuación que se producen. Las funciones de ganancia empleadas en el procesado de registros fueron:

Registros obtenidos mediante antena de 900 MHz:

Función de dos puntos:  $-62x+30y+360=0$

Registros obtenidos mediante antena de 2 GHz:

Función de dos puntos:  $-10x+64y+10=0$

**Velocidad de propagación:**

El software dispone de hipérbolas tipo relacionadas con la velocidad, que pueden usarse como plantilla para confirmar la velocidad de propagación de la onda. Pero en el presente estudio, la velocidad de propagación se determinó en la fase de calibración (apartado 4.3.2).

#### 4.9.2. Imágenes 3D de georradar y *time-slices*

Para la creación de imágenes 3D y *time-slices*, se empleó el software *Reflex3Dscan*, el cual permite importar y analizar automáticamente radargramas que se adquirieron a lo largo de las líneas de exploración equidistantes y paralelas en una o dos direcciones perpendiculares. Los *time-slices* son una animación gráfica realizada a partir de diferentes cortes horizontales del objeto tridimensional.

El software compone de forma automática las imágenes correspondientes a los cortes paralelos a la superficie medida y los correspondientes a los cortes perpendiculares a los radargramas adquiridos.

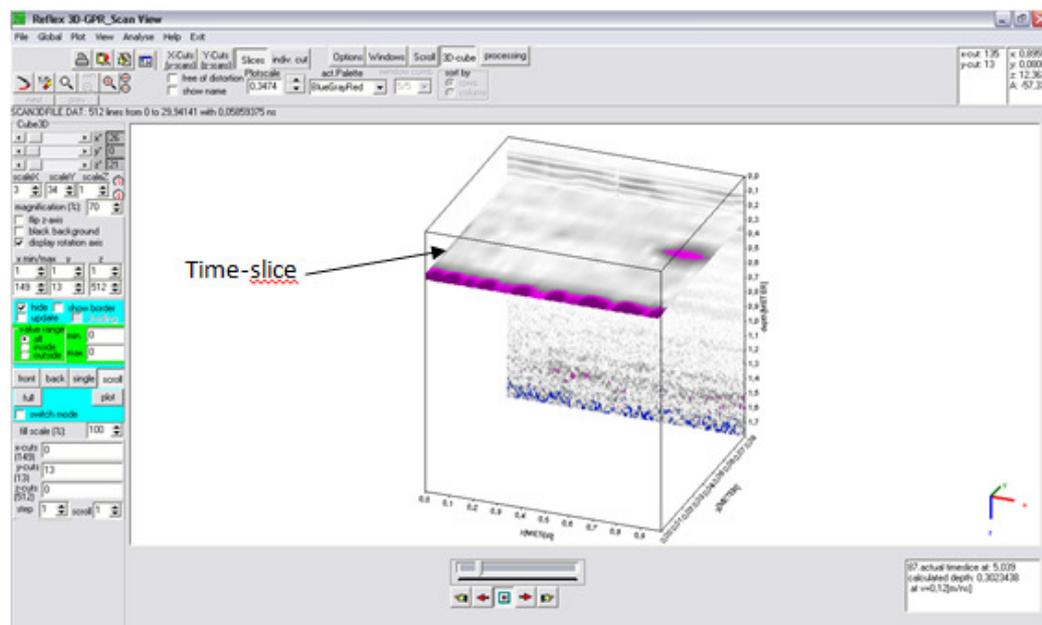


Fig. 63. Pantalla visualización software Reflex3Dscan

El software *Reflex3Dscan* también dispone de filtros que se pueden aplicar a los radargramas obtenidos. En la Fig. 63 se puede observar un *time-slice* del bloque de hormigón. Concretamente en la imagen se observa el corte correspondiente a 30 cm en el sentido longitudinal del bloque. En este caso se empleó el filtro *Background removal* que elimina las reflexiones de fondo.

### 4.9.3. Imágenes de tomografía ultrasónica

Para el procesado de datos se utilizó el software *MIRA* que dispone el propio equipo. Para la obtención de medidas en las tres zonas de exploración determinadas anteriormente, se utilizaron dos frecuencias diferentes (55 KHz y 150 KHz), para poder analizar las diferencias visibles entre ambos casos. Se configuró el equipo con un rango de 1 m (profundidad que se quiere inspeccionar), ya que coincide con la altura total del bloque de hormigón objeto de este estudio (eje z).

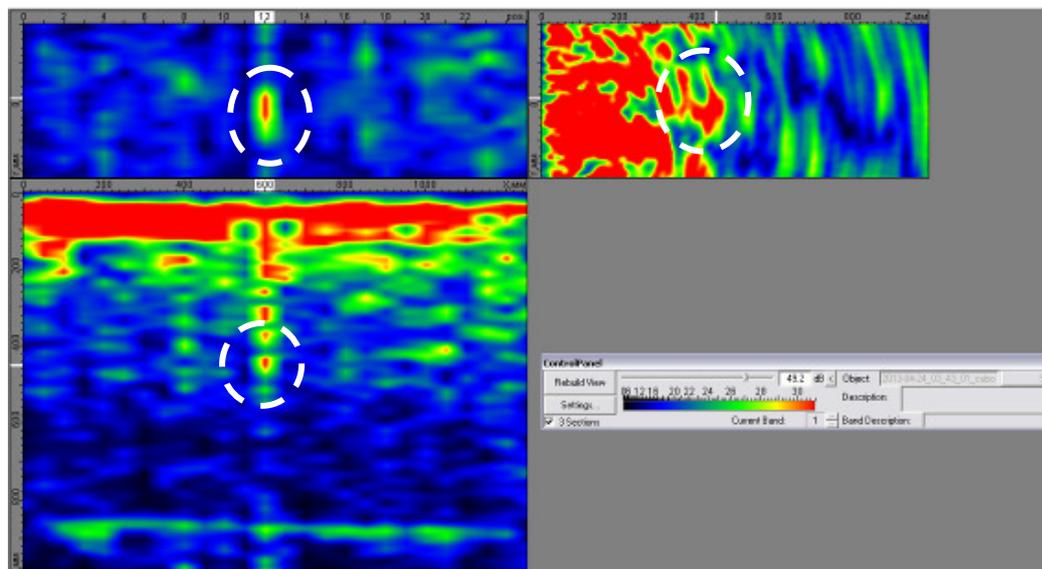


Fig. 64. Visualización de la esfera 5.1. Frecuencia de 55 KHz. Zona de exploración 1

En la Fig. 64 se muestra un registro de amplitudes de la señal. Los colores más fríos muestran las amplitudes menores, mientras que los colores cálidos muestran las mayores amplitudes.

El software de procesado del equipo MIRA no dispone de filtros, pero sí permite aumentar o disminuir el contraste entre los colores que representan las amplitudes de las señales.

Sobre la propia imagen se muestran las coordenadas en unidades de longitud, que marca la ubicación de cada punto concreto que se quiere analizar.

## CAPÍTULO 5

### **Resultados**

---



## 5. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las inspecciones de georradar (antenas de 900 MHz y de 2 GHz), así como los resultados de la inspección mediante tomografía ultrasónica.

De las inspecciones realizadas para el desarrollo de todo este trabajo, se obtuvieron un total de 51 perfiles mediante georradar (antenas de 900 MHz y 2 GHz) y 78 registros mediante el tomógrafo ultrasónico. Para no generar conflictos en el archivo informático y para facilitar el trabajo experimental, no se han incluido todos los registros obtenidos en los resultados, sino que se han desarrollado unas fichas de inspección, en las cuales se analiza cada objeto detectado en el proceso de adquisición de registros. Estas fichas se han incorporado en los Anexos 3, 4 y 5.

En el Anexo 3 se incluyen los radargramas en los que se localizan los objetos que han podido identificarse en la inspección mediante georradar. En la Fig. 65 se incluye un ejemplo de ficha de inspección de las realizadas.

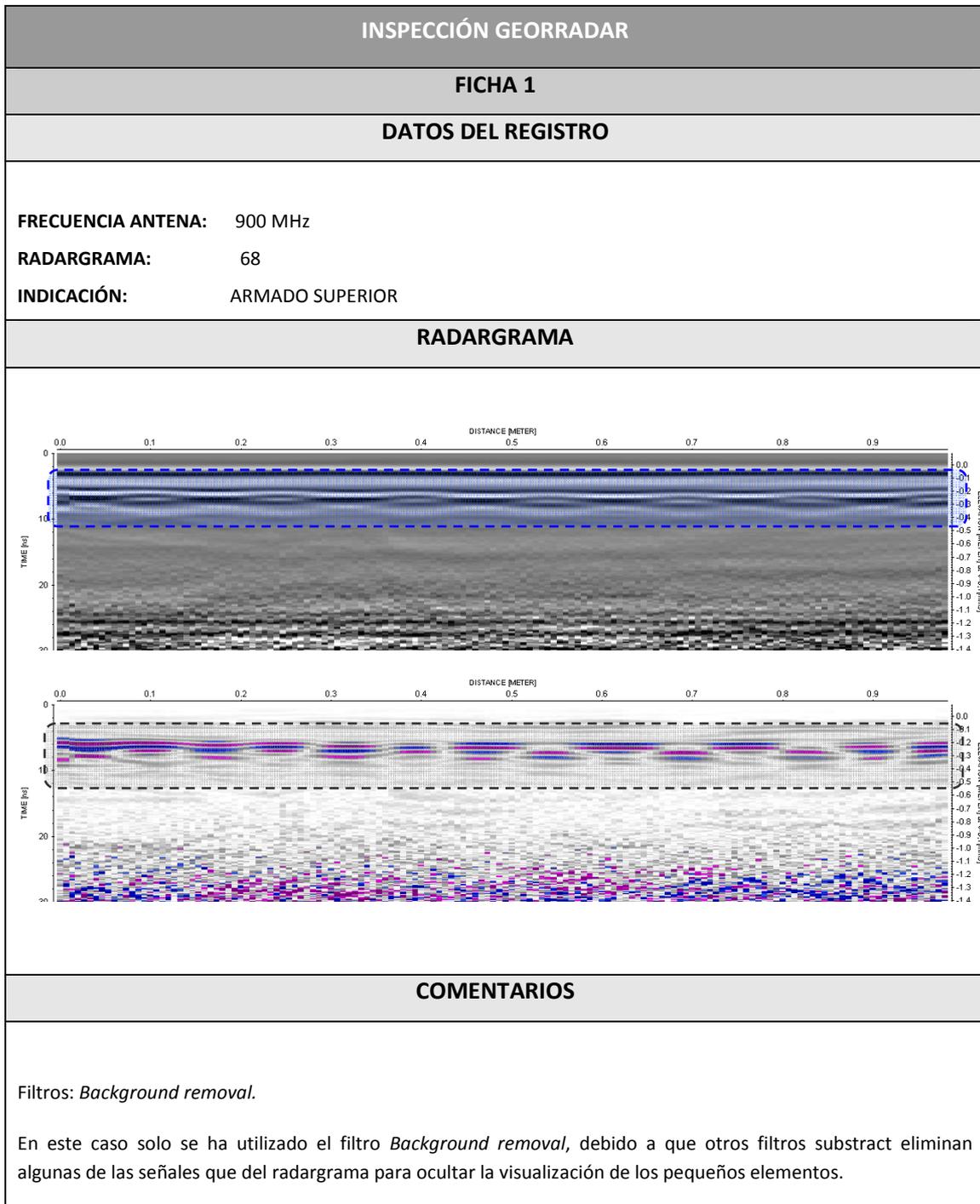


Fig. 65. Ficha 1, correspondiente a la inspección mediante georradar. Anexo 3

El Anexo 4 contiene las imágenes 3D o time-slices obtenidos mediante la integración de los radargramas obtenidos en la inspección con georradar. En La Fig. 66 se incluye una de estas fichas a modo de ejemplo.

INSPECCIÓN GEORRADAR	
FICHA 1	
DATOS DEL REGISTRO	
<b>FRECUENCIA ANTENA:</b>	900 MHz
<b>INDICACIÓN:</b>	ARMADO SUPERIOR
ESQUEMA LÍNEA DE EXPLORACIÓN	
IMAGEN 3D	
COMENTARIOS	
<p>Dirección eje x: Ocupa toda la superficie</p> <p>Dirección eje y: Se detecta hasta una distancia de 85 cm</p> <p>Dirección eje z: Se detecta a una profundidad de 15 cm</p>	

Fig. 66. Ficha 1, correspondiente a la inspección mediante georradar. Anexo 4

En el Anexo 5 se incluyen las imágenes obtenidas en la inspección con el tomógrafo ultrasónico, indicando los *scans* en los que se han podido identificar las esferas o armaduras que existen en el interior del bloque de hormigón. Se incluye un ejemplo en la Fig. 67.

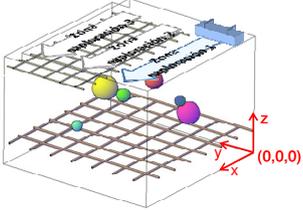
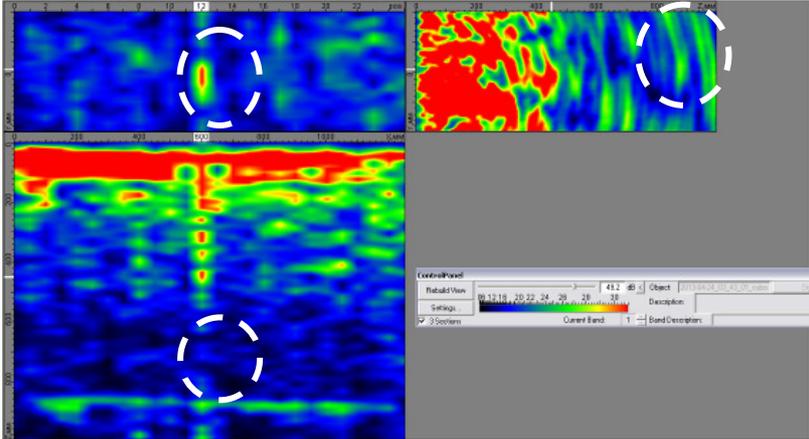
INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA	
FICHA 1	
DATOS DEL REGISTRO	
<p><b>ZONA DE EXPLORACIÓN:</b> 1</p> <p><b>FRECUENCIA EMISIÓN:</b> 55 KHz</p> <p><b>INDICACIÓN:</b> ESFERA 5.1</p>	
ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN	
	
IMAGEN TOMOGRÁFICA	
	
COMENTARIOS	
<p>Coordenadas medidas sobre imagen: x = 60 cm, y = 8 cm, z = 45 cm</p> <p>Coordenadas absolutas: x = 60 cm, y = 8 cm, z = 55 cm</p>	

Fig. 67. Ficha 1, correspondiente a la inspección mediante tomografía ultrasónica. Anexo 5

En cuanto a los resultados obtenidos, en el caso de las esferas, las coordenadas referidas son medidas del centro geométrico de cada esfera. En el caso de los armados superior e inferior, se refieren al plano horizontal en el que se encuentran. Las unidades de todas las coordenadas indicadas son cm.

Como se indica en el apartado 4.1, el origen de coordenadas (0,0,0) considerado, se sitúa sobre el vértice inferior que comparten las caras B y C del bloque de hormigón.

En la Tabla 9 se indican las coordenadas iniciales en las que teóricamente se encuentran los objetos en el interior del bloque de hormigón.

**Tabla 9. Coordenadas teóricas iniciales de las esferas y armados**

T: toda la superficie

N: no se detecta

	COORDENADAS TEÓRICAS (cm)		
	X	Y	Z
<b>Esfera 1</b>	60	99	50
<b>Esfera 2</b>	23	46	30
<b>Esfera 3</b>	17	84	46
<b>Esfera 4</b>	106	47	73
<b>Esfera 5.1</b>	73	17	65
<b>Esfera 5.2</b>	117	83	41
<b>Armado inf.</b>	T	T	80
<b>Armado sup.</b>	T	87	20

A partir del análisis detallado de las fichas elaboradas, se han creado unas tablas resumen (Tablas 10 a 12) en las que se detalla la posición en la que se ha localizado cada una de las anomalías estudiadas. En los casos marcados con letra "T", se indica que el armado se localiza en toda la superficie. En los marcados con letra "N", se indica que la técnica no ha sido capaz de detectar el elemento examinado.

**Tabla 10. Resultados de la inspección con georradar con antena de 900 MHz**

T: toda la superficie

	<b>ANTENA 900 MHz</b>		
	<b>Coordenadas (cm)</b>		
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>Esfera 1</b>	68	110	55
<b>Esfera 2</b>	18,5	45	53,8
<b>Esfera 3</b>	13,5	88	55
<b>Esfera 4</b>	101,5	68	85,5
<b>Esfera 5.1</b>	58	12	60
<b>Esfera 5.2</b>	96,5	88	62
<b>Armado inf.</b>	T	T	79
<b>Armado sup.</b>	T	85	15

**Tabla 11. Resultados de la inspección con georradar con antena de 2 GHz**

T: toda la superficie

N: no se detecta

	<b>ANTENA 2 GHz</b>		
	<b>Coordenadas (cm)</b>		
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>Esfera 1</b>	62	116	34,2
<b>Esfera 2</b>	N	N	N
<b>Esfera 3</b>	N	N	N
<b>Esfera 4</b>	108,5	67	88
<b>Esfera 5.1</b>	57,8	12	60
<b>Esfera 5.2</b>	N	N	N
<b>Armado inf.</b>	N	N	N
<b>Armado sup.</b>	T	71	15

**Tabla 12. Resultados de la inspección mediante tomógrafo ultrasónico (MIRA)**

T: toda la superficie

N: no se detecta

	FRECUENCIA 55 KHz			FRECUENCIA 150 KHz		
	Coordenadas (cm)			Coordenadas (cm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
<b>Esfera 1</b>	65	105	60	65	105	61
<b>Esfera 2</b>	4,5	58	42,5	11	49,5	49,6
<b>Esfera 3</b>	10	102	54	9	101	55
<b>Esfera 4</b>	85	63	78	85	63	59
<b>Esfera 5.1</b>	60	8	55	58	5,5	66
<b>Esfera 5.2</b>	104	101	57	100	92	52
<b>Armado inf.</b>	T	T	87	T	T	89
<b>Armado sup.</b>	T	89	20,5	N	N	20

La Tabla 13 muestra los resultados obtenidos de restar a las coordenadas teóricas iniciales, las que se han obtenido en las medidas realizadas, para cada una de las técnicas:

**Tabla 13. Comparación de los resultados de la combinación de ambas técnicas. Valores de desplazamiento relativo de los objetos**

T: toda la superficie

N: no se detecta

	GEORRADAR						MIRA					
	ANTENA 900 MHz			ANTENA 2 GHz			FRECUENCIA 55 KHz			FRECUENCIA 150 KHz		
	Coordenadas (cm)			Coordenadas (cm)			Coordenadas (cm)			Coordenadas (cm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
<b>Esfera 1</b>	-8	-11	-5	-2	-17	15,8	-5	-6	-10	-5	-6	-11
<b>Esfera 2</b>	4,5	1	-23,8	N	N	N	18,5	-12	-12,5	12	-3,5	-19,6
<b>Esfera 3</b>	3,5	-4	-8	N	N	N	7	-18	-8	8	-17	-9
<b>Esfera 4</b>	4,5	-21	-12,5	2,5	-20	-15	21	-16	-5	21	-16	14
<b>Esfera 5.1</b>	15	5	5	15,2	5	5	13	9	10	15	11,5	-1
<b>Esfera 5.2</b>	20,5	-5	-21	N	N	N	13	-18	-16	17	-9	-11
<b>Arm. inf.</b>	T	T	1	N	N	N	T	T	-7	T	T	-9
<b>Arm. sup.</b>	T	2	5	T	16	5	T	-2	-0,5	N	N	0



## CAPÍTULO 6

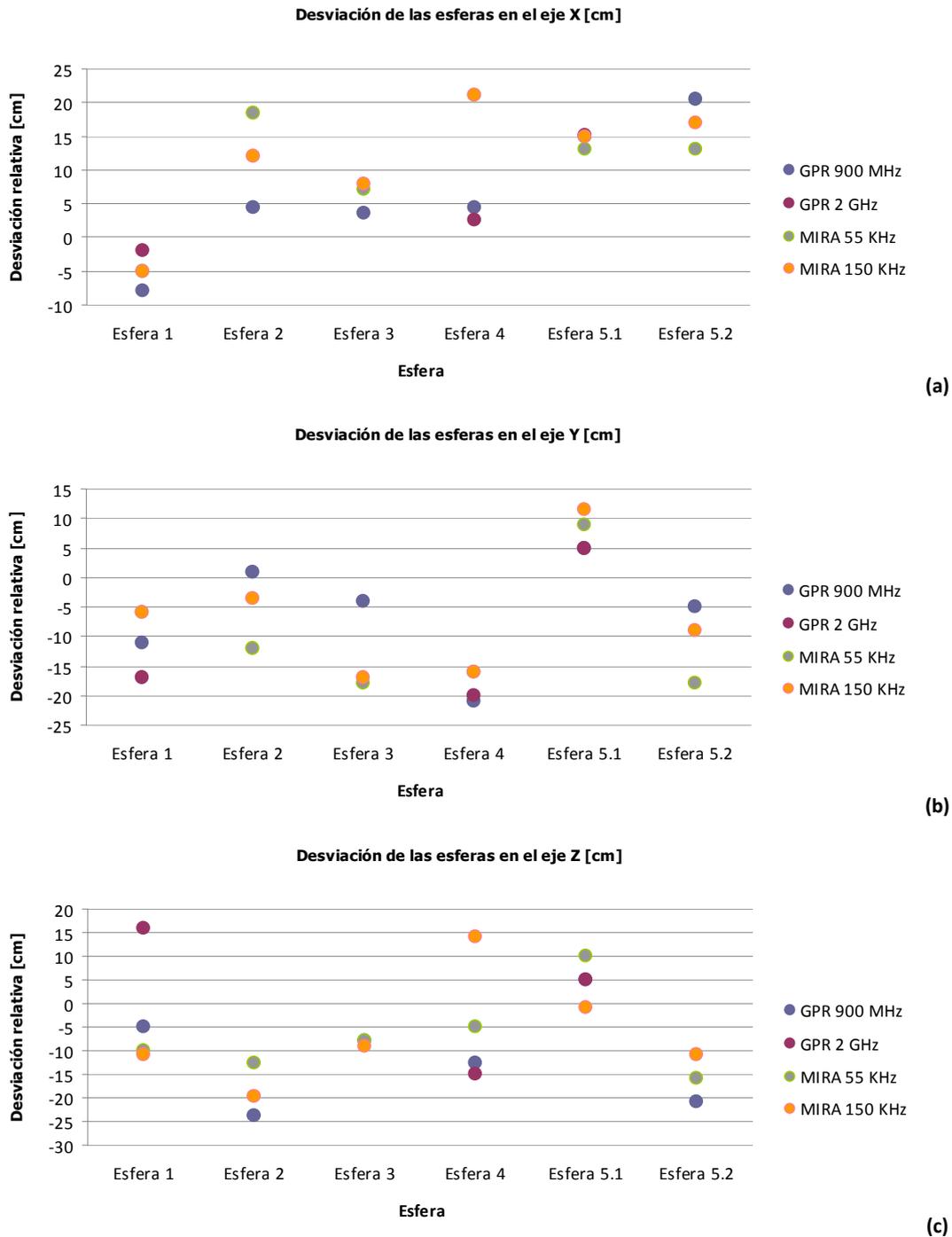
### **Interpretación de resultados**

---



## 6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los objetos introducidos en el bloque de hormigón, han sufrido desplazamientos de su posición teórica inicial (Tabla 9), consecuencia de los trabajos de hormigonado, vibrado, etc, en la ejecución del bloque.



**Fig. 68.** Desviaciones relativas de coordenadas representadas por cada eje: X (gráfica a), Y (gráfica b) y Z (gráfica c)

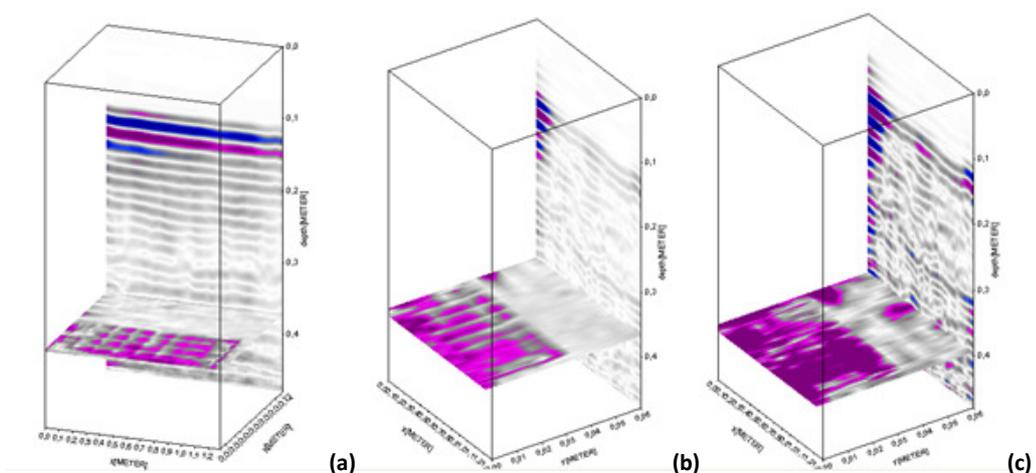
Para poder realizar una interpretación conjunta y global de los resultados obtenidos en las inspecciones, se ha realizado una representación de los desplazamientos relativos en cada dimensión, respecto de su posición teórica inicial, por cada una de las esferas introducidas en el bloque de hormigón (Fig. 68). En dicha figura se muestran, para las diferentes esferas (representadas en el eje de abscisas), la desviación relativa de la posición de cada una de ellas (representada en el eje de ordenadas), respecto de la posición inicial en la que fueron colocadas antes de proceder al hormigonado del bloque. Los diferentes valores obtenidos para cada una de las esferas, corresponden a las diferentes técnicas de inspección empleadas: georradar con antenas de 900 Mhz y de 2 GHz, y tomógrafo ultrasónico MIRA con frecuencias de 55 KHz y de 150 KHz.

Como conclusiones más destacadas en cuanto a la localización de las esferas, se pueden citar:

- La posición teórica inicial en la cual se colocaron las esferas, ha variado ligeramente tras el hormigonado y ejecución del bloque.
- Las inspecciones realizadas con ambas frecuencias del tomógrafo ultrasónico MIRA, muestran unos valores de desplazamiento relativo similares, excepto para la medida en el eje z de la esfera 4 (frecuencia de 150 KHz).
- Para el caso de las esferas 1, 4, 5.1 y 5.2 los valores coinciden para casi todos los casos, de ambas técnicas.
- Para las esferas 2 y 3 se obtienen valores muy dispares. Se deduce que las esferas que se encuentran a distancias mayores de 40 cm se detectan con mayor dificultad.
- A la vista de los resultados, no influye el material del que están constituidas las esferas en su detección (porexpan o plástico hueco), puesto que las propiedades dieléctricas y elásticas de ambos materiales difieren en gran medida de las propiedades del hormigón empleado, lo que hace pensar "a priori" que las esferas van a ser detectadas con ambas técnicas. Sin embargo, esto no es así, algunas esferas no son detectadas correctamente con las técnicas empleadas, lo que es debido a su posición y a su tamaño, y no a los materiales empleados.

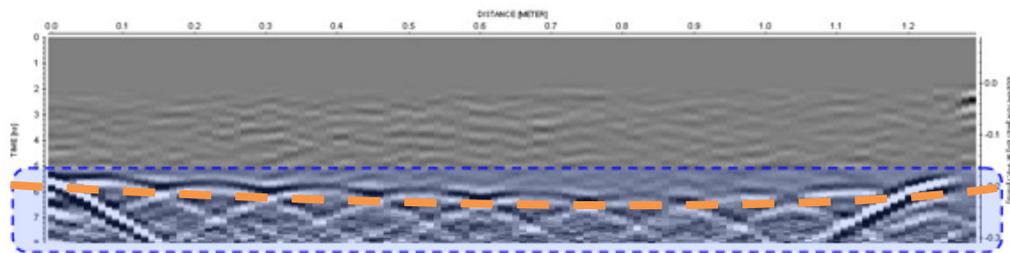
Como conclusiones en cuanto a la inspección del armado, se pueden citar:

- Con la antena de 2 GHz de georradar no resulta posible detectar el armado inferior, puesto que la capacidad de penetración de las ondas emitidas por las antenas empleadas (aproximadamente 45 cm) es inferior a la profundidad a la que se encuentra el armado inferior.
- Aunque la antena de 900 MHz de georradar tiene una capacidad de penetración de aproximadamente 1 m, tampoco se detecta el armado inferior ya que a profundidades mayores de 80 cm se producen muchas interferencias que no permiten detectar claramente los objetos que allí se encuentren.
- Para la correcta determinación de la geometría del armado, la distancia entre los perfiles obtenidos con el georradar debe ser igual o inferior a la separación entre barras del mismo.
- El armado superior se detecta con ambas antenas de georradar. Por medio de esta técnica se pueden distinguir las diferentes barras que conforman el armado, determinando la distancia entre ellas.



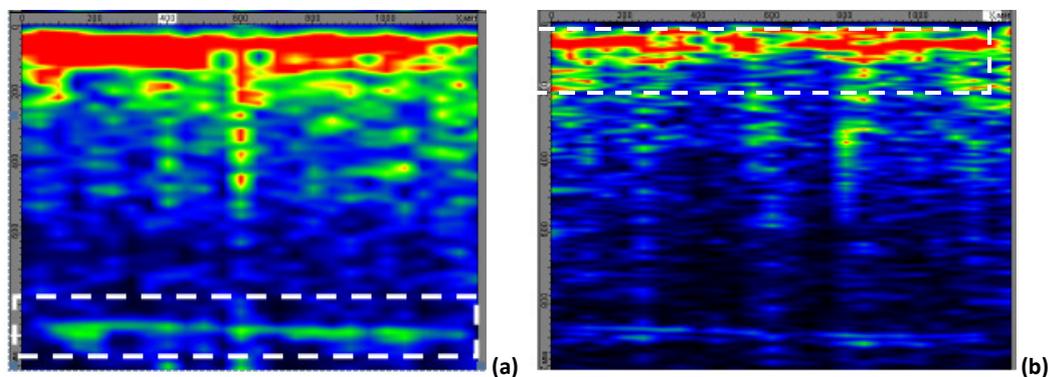
**Fig. 69.** Imágenes 3D del armado superior con antena 2GHz para diferente separación entre perfiles de medida, 5 cm (a), 10 cm (b) y 20 cm (c).

- Con la antena de 2 GHz se han realizado diferentes perfiles de medida con separaciones de 5 cm, 10 cm y 15 cm. Para una separación entre perfiles de 5 cm se obtienen los mejores resultados en términos de resolución, pudiéndose distinguir claramente las barras que conforman el armado en ambas direcciones, longitudinal y transversal. Para separaciones mayores a los 5 cm entre perfiles de medida no se han podido distinguir claramente las barras en el sentido transversal.(Fig. 69)
- En el caso de la antena de 2 GHz, las resoluciones horizontal y vertical son mayores que las de la antena de 900 MHz, lo que permite detectar incluso la curvatura que ha adquirido el armado debido a su propio peso. (Fig. 70)



**Fig. 70. Radargrama 32. Curvatura del armado superior con antena de 2GHz**

- Con el tomógrafo ultrasónico sí que resulta posible detectar los armados superior e inferior. A pesar de que la capacidad de penetración de las ondas elásticas permite inspeccionar toda la profundidad del bloque, en el caso del armado inferior no se pueden distinguir las diferentes barras y por tanto la distancia de separación de las mismas. (Fig. 71)



**Fig. 71. Registros D-scan obtenidos mediante tomógrafo ultrasónico. Detección de armados inferior (a) y superior (b)**

Para la obtención de las coordenadas reales de los objetos, se ha tomado como criterio, la coincidencia en el desplazamiento relativo por las diferentes técnicas (georradar y tomografía ultrasónica), y para las todas las frecuencias.

Las coordenadas experimentales, que corresponden a la posición que ocupan realmente los objetos en el interior del bloque de hormigón se resumen en la Tabla 14. Estas coordenadas han sido calculadas a partir de la posición de los objetos para cada una de las técnicas empleadas (Tabla 10, 11 y 12).

**Tabla 14. Coordenadas reales y definitivas de los objetos embebidos en el interior del bloque de hormigón.**

T: toda la superficie

	COORDENADAS EXPERIMENTALES (cm)		
	X	Y	Z
<b>Esfera 1</b>	65 ( $\pm 2,45$ )	105 ( $\pm 5,23$ )	58 ( $\pm 12,51$ )
<b>Esfera 2</b>	13 ( $\pm 7,01$ )	46 ( $\pm 6,60$ )	50 ( $\pm 5,71$ )
<b>Esfera 3</b>	9 ( $\pm 2,36$ )	88 ( $\pm 7,81$ )	54 ( $\pm 0,58$ )
<b>Esfera 4</b>	85 ( $\pm 11,90$ )	63 ( $\pm 2,63$ )	80 ( $\pm 13,12$ )
<b>Esfera 5.1</b>	61 ( $\pm 1,04$ )	10 ( $\pm 3,20$ )	66 ( $\pm 4,5$ )
<b>Esfera 5.2</b>	104 ( $\pm 3,75$ )	88 ( $\pm 6,66$ )	55 ( $\pm 5$ )
<b>Armado inf.</b>	T	T	80 ( $\pm 5,29$ )
<b>Armado sup.</b>	T	87 ( $\pm 9,45$ )	20 ( $\pm 3,04$ )

Al igual que en las Tablas 9, 10, 11 y 12 correspondientes al apartado de resultados, en los casos marcados con letra "T", se indica que el armado se localiza en toda la superficie.

Las imágenes de georradar en 3D del bloque de hormigón, se obtienen mediante una imagen animada donde se van superponiendo en el tiempo los diferentes cortes obtenidos mediante el georradar. Mediante estas imágenes se puede determinar la posición de los objetos en el espacio.

La utilización de fichas de inspección ha resultado de gran utilidad para la correcta interpretación de los resultados, ya que integran toda la información obtenida para cada objeto y técnica, incluyendo las coordenadas de localización del objeto, información de los

registros adquiridos sobre los que se representan indicaciones gráficas de anomalías, así como las herramientas de procesado aplicadas en cada caso (filtros, funciones de ganancia...).

## CAPÍTULO 7

### **Conclusiones**

---



## 7. CONCLUSIONES

En este apartado, se exponen las conclusiones de las inspecciones realizadas mediante la técnica de georradar y mediante la técnica de la tomografía ultrasónica, obtenidas durante el desarrollo del presente trabajo.

En los apartados siguientes se exponen, en primer lugar, las conclusiones generales de las inspecciones realizadas. En un segundo apartado, se aportan las conclusiones a tener en cuenta a efectos de la elección de las técnicas, para un procedimiento basado en las técnicas no destructivas estudiadas. En el tercer apartado, se muestran las conclusiones para la elaboración de un procedimiento de inspección.

## 7.1. Conclusiones de las inspecciones realizadas

---

- La capacidad de penetración de la antena de 2 GHz se encuentra en torno a 45 cm de profundidad aproximadamente, no pudiendo detectar nada a distancias mayores, por lo que no detecta las esferas 2 y 3 debido a su localización.
- Mediante las antenas de 2 GHz y 900 MHz del georradar, se obtienen posiciones (en x, y y z) parecidas. En el caso del tomógrafo ultrasónico (55 y 150 KHz), el posicionamiento en los ejes x e y presenta valores similares, mientras que aparecen algunas desviaciones en el eje z, ocasionadas por la resolución vertical y la capacidad de penetración del equipo.
- Los resultados de la esfera 1, pese a ser la esfera de mayor tamaño, no son todo lo claros que se esperaban, al menos en los ejes y y z, donde su detección en coordenadas con la antena de 2 GHz es discrepante con los otros métodos y frecuencias.
- Para el caso de las esferas 2 y 3, existe una discrepancia entre la antena de georradar de 900 MHz y el tomógrafo ultrasónico MIRA (con frecuencias de 55 KHz y de 150 KHz) en la coordenada y.
- Las esferas 4, 5.1 y 5.2 parecen apuntar a unas coordenadas similares, obtenidas mediante todas las técnicas, que plantean desplazamientos claros respecto de las coordenadas donde fueron ubicadas teóricamente. Estos desplazamientos se han producido durante la ejecución del bloque.
- El armado superior se detecta con ambas técnicas, el georradar y la tomografía ultrasónica, mientras que el armado inferior únicamente se detecta con el tomógrafo. Además, en el caso del armado superior, la antena de georradar de 2GHz es la que aporta mejores resultados en términos de resolución y reconstrucción de la geometría de las barras que lo conforman.

- Como se ha podido demostrar a partir de las imágenes 3D obtenidas para separaciones de 5, 10 y 20 cm, la menor de ellas es la que permite distinguir con mayor claridad la disposición de las barras en el armado. La separación entre barras del armado superior es de 20 cm, por lo que para las separaciones de 10 y 20 cm la resolución de medida supera este valor no pudiéndose distinguir claramente las diferentes barras, cosa que sí que ocurre para una separación de 5 cm donde las barras se distinguen claramente en ambas direcciones, longitudinal y transversal.

## 7.2. Conclusiones a tener en cuenta a efectos de la elección de las técnicas para un procedimiento basado en las técnicas no destructivas estudiadas

---

- Ambas metodologías permiten detectar objetos, siempre y cuando estos se encuentren en el rango de resolución vertical y horizontal de cada una de las técnicas empleadas y estén a una profundidad a la que la onda electromagnética y/o elástica llega y vuelve al emisor - receptor.
- En cuanto al georradar, cuando un objeto está a una profundidad mayor de 45 cm, resulta más conveniente la inspección con la antena de 900 MHz, puesto que a esta frecuencia las ondas emitidas presentan una mayor capacidad de penetración. De otro modo, cuando el objeto se encuentra a una profundidad inferior a los 45 cm, conviene analizarla con la antena de 2 GHz, puesto que esa antena presenta una mayor resolución a esas profundidades.
- A pesar de que la capacidad de penetración de la onda electromagnética se establece en 45 cm para el caso de la antena de 2 GHz, cabe destacar que a profundidades mayores de 30 cm la señal presenta un fondo de ruido considerable.
- Asimismo, aunque la capacidad de penetración de la onda en el caso de la antena de 900 MHz del georradar, es aproximadamente de 1 m, a profundidades mayores de 80 cm también existe ruido que no permite distinguir claramente los objetos.
- Del mismo modo sucede con el tomógrafo ultrasónico MIRA, donde para objetos situados a profundidades mayores de 40-45 cm, se deben emplear frecuencias bajas para su detección. Se debe evitar trabajar con ondas de alta frecuencia, ya que para profundidades elevadas, los niveles de ruido que se alcanzan no permiten identificar correctamente las reflexiones ocasionadas por los objetos.
- La separación entre los perfiles de medida mediante georadar influye en la resolución de los radargramas obtenidos. A menor separación entre los mismos, mejores resultados en términos de resolución se obtienen. Sin embargo, se debe tener en

cuenta que reducir la separación implica realizar un mayor número de medidas y obtener un volumen de datos más grande con mayores costes de procesado y análisis. Por lo tanto la elección de dicha separación vendrá determinada por el tamaño de las anomalías o singularidades que se pretendan detectar, así como por las características de la antena empleada y el material inspeccionado.

### 7.3. Conclusiones para la elaboración de un procedimiento de inspección

---

A efectos de establecer un procedimiento para inspección en estructuras de hormigón, mediante la combinación de la inspección con georradar y la inspección mediante tomografía ultrasónica, el procedimiento de inspección debería tener en cuenta los siguientes aspectos:

#### Trabajos previos:

- En primer lugar, se debe identificar el elemento a inspeccionar, obteniendo la mayor información de él, con especial interés acerca de su estructura o morfología interna, proceso de fabricación, elementos o materiales constituyentes, para conocer su previsible respuesta física a la excitación electromagnética y/o mecánica, es decir, su constante dieléctrica y su impedancia mecánica.
- Se debe conocer y planificar la inspección a tenor del tipo de anomalías previsibles, posición, tamaño y forma de la misma, así como la superficie de inspección.

#### Método de adquisición de datos:

- Para el caso de la inspección mediante georradar, en cuanto al método de adquisición de los perfiles, se deben tener en cuenta las especificaciones técnicas en términos de resolución de los equipos (horizontal y vertical) y capacidad de penetración de las ondas, para la elección de la frecuencia de emisión. Las inspecciones con la antena de 900 MHz, precisarán una distancia entre perfiles de unos 10 cm, lo que equivale a su resolución horizontal. Para el caso de la antena de 2 GHz, la distancia será de unos 5 cm como mínimo.
- Para la inspección mediante tomografía ultrasónica, se planificarán unas medidas tales que se cubra la superficie a inspeccionar con barridos rectilíneos en forma de matriz de filas y/o columnas (zonas de exploración), según se requiera, para poder realizar reconstrucciones tomográficas. La separación entre las medidas será determinada por las frecuencias de inspección.

**Calibración:**

A partir del diseño del experimento o inspección, debe realizarse la correspondiente calibración del equipo.

**Calibración del georradar:**

En los procesos de calibración se deben elegir los parámetros de funcionamiento e inspecciones adecuados que son:

- Adecuación de la superficie y zona a inspeccionar para que sea representativa.
- Calibración del odómetro para medir distancias reales.
- Colocación y programación de parámetros de inspección y, si es posible, calibrar en objetos conocidos o en ecos de fondo verificables.
- Elección de la constante dieléctrica en ecos de fondo verificables (si es posible).
- Ajuste de sensibilidad con la ganancia y paleta de colores para la visualización “in situ”.

**Calibración mediante tomógrafo ultrasónico:**

Al igual que con el georradar, en los procesos de calibración se deben elegir los parámetros de funcionamiento e inspecciones adecuados que son:

- Adecuación de la superficie y zona para que sea representativa.
- Colocación y programación de parámetros de inspección y, si es posible, calibrar en armaduras conocidas o en ecos de fondo verificables.
- Ejecutar el modo calibración del equipo que se realiza previamente a cada medida, guardado o almacenamiento de dicha información y verificación previa de resultados obtenidos comparando la velocidad de onda transversal con lo esperado.
- Ajuste de sensibilidad con la ganancia y paleta de colores para la visualización “in situ”.

**Inspección / Adquisición:**

- Previo a la ejecución de las medidas, se valorará la inspección convencional mediante el uso de un pachómetro o detector de metales, cuando se requiera o sea conveniente analizar el espesor de recubrimiento de hormigón que se va a inspeccionar.
- Ejecución de las medidas en el elemento de hormigón armado, tal y como se ha diseñado el método de adquisición de registros, sin que se modifiquen las condiciones en el proceso. Las condiciones inalterables serán las introducidas en el proceso de

- calibración y en la superficie inspeccionada, manteniendo su estado general (no puede haber una parte mojada o saturada de agua, o mucho más rugosa, respecto de la calibrada).
- Si existe la necesidad de tener resultados evaluables desde los primeros 5 cm y hasta los 30-35 cm, se analizará con frecuencias altas (antena de 2 GHz en georradar y frecuencias por encima de 100 KHz y hasta 150 KHz en tomografía ultrasónica).
  - Si existe la necesidad de tener resultados evaluables desde 30-35 cm y hasta 1-1,5 m, se analizará con frecuencias medias (antena de 900 MHz en georradar y frecuencias por debajo de 100 KHz, siendo adecuada una frecuencia de 55 KHz en tomografía ultrasónica).

### **Análisis y procesado de los resultados obtenidos:**

#### Resultados de georradar:

- Se analizarán los datos de georradar analizando los radargramas más significativos, donde se visualicen las anomalías más relevantes y de mayor interés, para que puedan establecerse los filtros de procesado más indicados para su posterior valoración.
- Se integrarán los radargramas como imágenes 3D que son fácilmente evaluables con cortes en los ejes x, y, z.
- Se evaluarán los radargramas específicos relacionados con las indicaciones detectadas o priorizadas del análisis de las reconstrucciones anteriores.
- Se analizará el cambio de fase de la señal y su desplazamiento en frecuencia para determinar la posible naturaleza de la indicación.
- Se estudiará la distancia óptima de separación de los perfiles para la detección y reconstrucción del mallado.

#### Resultados del tomógrafo ultrasónico MIRA:

- Se procederá analizando las secciones B-scan y C-scan (para cada profundidad) y D-scan (para los ejes x, y, z) exploradas.
- Se evaluarán las secciones específicas con representaciones de las indicaciones detectadas o priorizadas del análisis mediante georradar.
- Se analizará el cambio de fase de la señal y su desplazamiento en frecuencia para determinar la posible naturaleza de la indicación.

**Evaluación:**

Por último, se realizará una valoración general o global de las indicaciones encontradas y sus relaciones con defectos u anomalías. Se procederá a justificar la evaluación y/o catalogación de las mismas, su valoración, sus implicaciones o consecuencias y el tratamiento que estas anomalías o discontinuidades físicas, pudieran tener en los procesos de control de calidad, tan necesarios en los procesos productivos hoy en día.



## CAPÍTULO 8

### **Referencias bibliográficas**

---



## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albert V., Proyecto Final de Máster, Evaluación no destructiva de materiales mediante métodos de reconstrucción tomográfica basados en redes neuronales de base radial, Universitat Politècnica de València, Valencia, 2010.

Annan, A.P., "Ground Penetrating radar. Survey desing", Sensors & Software, INC, 1999.

Azevedo S.G., HERMES: A high-speed radar imaging system for inspection of bridge decks, SPIE Proc., 2946, 195–204, 1996.

Barkefors A., 3D Synthetic Aperture Technique for ultrasonic imaging, 2010.

Birks A.S., Green R.E., Nondestructive testing handbook. Volume 7. Ultrasonic testing. Ed. American Society for Nondestructive Testing, 1991.

Bungey J.H., Millard S.G., Shaw M.R., 'Radar assessment of post-tensioned concrete, Proc., 7th Int. Conf. on Structural Faults and Repair, Vol. 1, M. C. Forde, ed., Engineering Technics Press, Edinburgh, U.K., 331–339, 1997.

Cassidy N.J., Eddies R., Dods S., Void detection beneath reinforced concrete sections: The practical application of ground-penetrating radar and ultrasonic techniques, 2011.

Cervera López, J.R., Curso de patología y rehabilitación de estructuras de hormigón armado, 2002.

Cheesman W.J., Arndt W.J., Dynamic testing of concrete with the soniscope apparatus. Highway Res Board Proc, 1949.

Clemena G.M., Sprinkel M.M., Long R.R., Use of ground-penetrating radar for detecting voids under a jointed concrete pavement, Transportation Research Record 1109, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1–10, 1997.

Colla C., Krause M., Maierhofer C., Hohberger H., Sommer, H., Combination of NDT techniques for site investigation of non-ballasted railway tracks, NDT & E Int., 35\_2\_, 95–105, 2002.

Conyers L.B., Goodman D., Ground penetrating radar: an introduction for archaeologists, Walnut Creek, CA, USA: Altamira Press, 1997.

Corralizo Nieto, R., Tesis doctoral Modelado de registros de geo-radar en dos y tres dimensiones: Diseño e implementación de algoritmos para la resolución de los problemas directo e inverso, 2005.

Daniels D.J., "Ground penetrating radar. Sonar and navigation series 15, UK: Institution of Electrical Engineers, 2004.

De la Haza A.O., Samokrutov A.A., Samokrutov P.A., Assessment of concrete structures using the Mira and Eyecon ultrasonic shear wave devices and the SAFT-C image reconstruction technique, 2011.

Fernández Gómez J., Evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón. Ensayos no destructivos y pruebas de carga, Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC), 2001.

Frederick JR, Seydel JA, Fairchild RC. Improved ultrasonic nondestructive testing of pressure vessels. Yearly Progress Report. Washington, DC: Nuclear Regulatory Commission, 1975.

Funk T., Maierhofer C., Leipold S., Borchardt K., Nondestructive location of tendon ducts in concrete for the installation of noise insulating walls using impulse radar, Proc., 7th Int. Conf. on Structural Faults and Repair, Vol. 2, M. C. Forde, ed., Engineering Technics Press, Edinburgh, U.K., 323–329, 1997.

García Meseguer A., Morán Cabré F., Arroyo Portero J.C., Jiménez Montoya. Hormigón armado, Ed. Gustavo Gili, 2009.

Gehrig M.D., Morris D.V., Bryant J.T., Ground penetrating radar for concrete evaluation studies, 2004.

Gómez de León, E., Ultrasonidos Nivel II, AEND, FC Editorial, 2009.

- Hertlein B.H., Stress wave testing of concrete: A 25-year review and a peek into the future, 2012.
- Hoegh K., Ultrasonic tomography technique for evaluation concrete pavements, 2010.
- Huston D., Fuhr P., Maser K., Weedon W., Nondestructive testing of reinforced concrete bridges using radar imaging techniques, 2002.
- International Atomic Energy Agency, Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, 2002.
- Kong F., Choice of antenna type and frequency range for testing concrete structures, Proc., 8th Int. Conf. on Ground Penetrating Radar, Univ. of Queensland, Gold Coast, Australia, 2000.
- Krause, M., Maierhofer C., Wiggenhauser H.. 'Thickness measurement of concrete elements using radar and ultrasonic impulse echo techniques, Proc., 6th Int. Conf. on Structural Faults and Repairs, M. C. Forde, ed., Vol. 2, Engineering Technics Press, London, 17–24, 1995.
- Leucci G., Negri S., Carrozzo M.T., Ground penetrating radar (GPR): an application for evaluating the state of maintenance of the building coating. AnnGeophys, 2003.
- Lorenzo E., Cuéllar V., Geofísica de alta resolución en ingeniería civil. Estudios en estructuras de hormigón utilizando geo-radar, 1995.
- Maierhofer C., Krause M., Wiggenhauser H., 'Nondestructive investigation of sluices using radar and ultrasonic impulse echo, NDT & E Int., 31\_6\_, 421–427, 1998.
- Maierhofer C., Wostmann J., 'Investigation of dielectric properties of brick materials as a function of moisture and salt content using a microwave impulse technique at very high frequencies, NDT & E Int., 31\_4\_, 259–263, 1998.
- Maierhofer, C., Radar investigation of masonry structures, NDT & E Int., 34\_9\_, 139–147, 2000.
- Maierhofer C., Krause M., Mielentz F., Milmann B., Muller W., Kombiniertes Einsatz von Radar und Ultraschallarray-Verfahren zur Strukturuntersuchung von Brückenbauteilen, Berichtsband 73 der DACH-Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 519–534, German, 2000.
- Maierhofer C., Wostmann J., Schaurich D., Krause, M., Radar investigation of historical structures, Proc., Seiken Symp. No. 26, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, T. Uomoto, Elsevier, Amsterdam, 529–537, 2000.
- Maierhofer C., Impulsradar zur Untersuchung der inneren Struktur von Beton, Betonwerk\_Fertigteil-Technik, No. 11, 94–101, German, 2001.
- Maierhofer C., Brink A., Rollig M., Wiggenhauser H., 'Detection of shallow voids in concrete structures with impulse thermography and radar, Proc., 10th Int. Conf. on Structural Faults and Repair, M. C. Forde, ed., Engineering Technics Press, London, 2001.
- Maierhofer, C., Nondestructive evaluation of concrete infrastructure with ground penetrating radar, ASCE, 2003.
- Malcolm K.L., Honggang C., Combining multiple NDT methods to improve testing effectiveness, 2011.
- Maser K.R., Condition assessment of transportation infrastructure using ground-penetrating radar, J. Infrastruct. Syst., 2-2, 94–101, 1996.
- Michaux C., Grill M., NDT 3D tomographic testing cases on concrete and national heritage buildings, In Situ SA, Rue de la Cimenterie, Site MecanArbed, L-2014 Luxembourg, 2000.
- Pérez Gracia V., González Drigo R., Di Capua D., Horizontal resolution in a non-destructive shallow GPR Surrey: An experimental evaluation, Elsevier, 2008.
- Pérez Gracia V., AIDICO, 2011.
- Rodríguez-Abad I., Tesis doctoral Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera, Universitat Politècnica de València, Valencia, 2010.

Rodríguez Abad I., Ensayos y comportamiento en servicio de productos en el sector específico, Universitat Politècnica de València, Valencia, 2010.

Sheriff R.E., Geldart L.P., Exploration seismology. Second Edition, Cambridge University Press, New York, 1995.

Sidney K. Edelman, Understanding ultrasound physics, Ph. D., 2003.

Soustos M.N., Bungey J.H., Millard S.G., et al. 2001. Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing. NDT&E International 34, 419-425, 2001.

Steinway W.J., Echard J.D., Luke C.M., Locating voids beneath pavement using pulsed electromagnetic waves, NCHRP Rep. 237, National Cooperative Highway Research Program, National Academy of Sciences, Washington, D.C, 1981.

Stepinski T., Synthetic Aperture Focusing Technique in ultrasonic inspection of coarse grained materials, 2007.

Tobio J.M., Ensayos no destructivos. Métodos aplicables a la construcción, Patronato de Investigación Científica y Técnica "Juan de la Cierva" CSIC, 1967.



ANEXO 1

**Listado de figuras**

---



- Fig. 1.** Onda electromagnética
- Fig. 2.** Unidad de control y adquisición de lo equipo de georradar SIR-3000 de la marca GSSI
- Fig. 3.** Antenas de frecuencias 2 GHz (a) y 900 MHz de la marca GSSI (b)
- Fig. 4.** Carro de transporte de equipo (a) y odómetro implementado en antena de 2 GHz (b), de la marca GSSI
- Fig. 5.** Esquema simplificado de radiación de la antena emisora con ángulo de radiación  $\alpha$
- Fig. 6.** Las amplitudes de las trazas se transforman según una escala de colores para su visualización
- Fig. 7.** Proceso de adquisición de datos. El resultado es un radargrama que contiene las reflexiones que se han producido en las diversas discontinuidades del medio [15]
- Fig. 8.** Pantalla de configuración de parámetros del equipo SIR-3000
- Fig. 9.** Esquema de propagación de ondas P (a) y ondas S (b)
- Fig. 10.** Cálculo de la profundidad (d) a la que se encuentra la anomalía
- Fig. 11.** Equipo portátil para la inspección ultrasónica “in situ”, modelo CMS con transductores de banda ancha y frecuencia de inspección 55 KHz de la marca Boviari, propiedad de AIDICO (a) y ejemplo de medición directa con el mismo equipo (b)
- Fig. 12.** Equipo de tomografía ultrasónica MIRA, de la marca Germann Instruments A/S, propiedad de AIDICO
- Fig. 13.** Esquema de transmisión y recepción completadas (imagen de Dynasty Group Engineers & Surveyors)
- Fig. 14.** Esquema básico de funcionamiento del equipo MIRA
- Fig. 15.** Detección de anomalía en el interior del elemento de estudio
- Fig. 16.** Cálculo de la profundidad a la que se encuentra la anomalía
- Fig. 17.** Planos generados para imagen 3D
- Fig. 18.** Ejemplo de imagen tomográfica extraída en la inspección de un elemento de hormigón en el que existen anomalías
- Fig. 19.** Esquema de la resolución vertical (imagen de Sidney K. Edelman Ph. D.)
- Fig. 20.** Esquema de la resolución horizontal (imagen de Sidney K. Edelman Ph. D.)
- Fig. 21.** Pantalla de configuración de parámetros del equipo MIRA
- Fig. 22.** Preparación para hormigonado del bloque
- Fig. 23.** Detalle del corte y rebaje practicados en el bloque
- Fig. 24.** Esquema (a) y fotografía (b) del prisma de hormigón desde las caras C y D
- Fig. 25.** Alzado (a) y fotografía (b) correspondientes a la cara C
- Fig. 26.** Alzado (a) y fotografía (b) correspondientes a la cara A
- Fig. 27.** Alzado (a) y fotografía (b) correspondientes a la cara B
- Fig. 28.** Alzado (a) y fotografía (b) correspondientes a la cara D
- Fig. 29.** Vista en planta (a) y fotografía (b) correspondiente
- Fig. 30.** Unidad central de control SIR 3000 con pantalla de visualización integrada de la marca GSSI
- Fig. 31.** Antenas empleadas en el estudio, de frecuencias centrales 900 MHz (a) y de 2 GHz (b), de la marca GSSI
- Fig. 32.** Tomógrafo ultrasónico MIRA de la marca Germann Instruments A/S
- Fig. 33.** Antena (a) y detalle de los transductores de punto del equipo MIRA (b)
- Fig. 34.** Pulso electromagnético emitido al aire con antena de 900 MHz (a). Espectro de frecuencias característico (b)

- Fig. 35.** Pulso electromagnético emitido al aire con antena de 2 GHz (a). Espectro de frecuencias característico (b)
- Fig. 36.** Fotografía (a) y radargrama 29 (b).Antena 900 MHz. Registro dinámico sobre rebaje
- Fig. 37.** Variación de la constante dieléctrica para distintas frecuencias de emisión, dependiendo del contenido de humedad del hormigón
- Fig. 38.** Pulso ultrasónico (a) y espectro de frecuencia (b) en la emisión al aire, para una frecuencia de emisión de 55 KH
- Fig. 39.** Pulso ultrasónico (a) y espectro de frecuencia (b) en la emisión al aire, para una frecuencia de emisión de 150 KH
- Fig. 40.** Pantalla de adquisición de medidas de velocidad para calibración del equipo MIRA
- Fig. 41.** Colocación de reflectores metálicos en el corte del bloque de hormigón
- Fig. 42.** Radargrama 50. Antena de 900 MHz. Láminas de aluminio separadas 10 cm
- Fig. 43.** Radargrama 54. Antena 900 MHz. Láminas de aluminio separadas 14 cm
- Fig. 44.** Radargrama 15. Antena 2 GHz. Láminas de aluminio separadas 2 cm
- Fig. 45.** Radargrama 17. Antena 2 GHz. Láminas de aluminio separadas 4 cm
- Fig. 46.** Radargrama 19. Antena 2 GHz. Láminas de aluminio separadas 6 cm
- Fig. 47.** Detalle colocación de las láminas de acero
- Fig. 48.** Radargrama 70. Antena 2 GHz. Láminas de acero a 10 cm de profundidad
- Fig. 49.** Radargrama 71. Antena 2 GHz. Láminas de acero separadas 1 cm
- Fig. 50.** Radargrama 72. Antena 2 GHz. Láminas de acero separadas 2 cm
- Fig. 51.** Radargrama 55. Antena de 900 MHz. Adquisición desde cara A
- Fig. 52.** Radargrama 48. Antena de 900 MHz. Adquisición desde cara B
- Fig. 53.** Radargrama 50. Antena de 900 MHz. Adquisición desde cara C
- Fig. 54.** Radargrama 48. Antena de 900 MHz. Adquisición desde cara D
- Fig. 55.** Desplazamiento de la antena de 2 Ghz sobre el rebaje del bloque de hormigón (a). Radargrama 1 obtenido. Antena de 2 GHz
- Fig. 56.** Visualización del armado inferior. Frecuencia 150 KHz. Rango 1 m. Zona de exploración 1. C-Scan (a), B-Scan (b) y D-Scan (c)
- Fig. 57.** Visualización de la interfase bloque suelo. Frecuencia 150 KHz. Rango 2,5 m. Zona de exploración 1. C-Scan (a), B-Scan (b) y D-Scan (c)
- Fig. 58.** Realización de medidas con georradar, antenas de 2 GHz (a) y 900 MHz (b)
- Fig. 59.** Esquema de las líneas de exploración sobre la cara superior del bloque con el georradar
- Fig. 60.** Esquema de las zonas de exploración con tomografía ultrasónica sobre la cara superior del bloque
- Fig. 61.** Realización de medidas con tomógrafo ultrasónico MIRA
- Fig. 62.** Pantalla visualización software Reflexw de aplicación de filtros
- Fig. 63.** Pantalla visualización software Reflex3Dscan
- Fig. 64.** Visualización de la esfera 5.1. Frecuencia de 55 KHz. Zona de exploración 1
- Fig. 65.** Ficha 1, correspondiente a la inspección mediante georrdar. Anexo 3
- Fig. 66.** Ficha 1, correspondiente a la inspección mediante georrdar. Anexo 4
- Fig. 67.** Ficha 1, correspondiente a la inspección mediante tomografía ultrasónica. Anexo 5

- Fig. 68.** Desviaciones relativas de coordenadas representadas por cada eje: X (gráfica a), Y (gráfica b) y Z (gráfica c)
- Fig. 69.** Imágenes 3D del armado superior con antena 2GHz para diferente separación entre perfiles de medida, 5 cm (a), 10 cm (b) y 20 cm (c).
- Fig. 70.** Radargrama 32. Curvatura del armado superior con antena de 2GHz
- Fig. 71.** Registros D-scan obtenidos mediante tomógrafo ultrasónico. Detección de armados inferior (a) y superior(b)



## ANEXO 2

### **Listado de tablas**

---



- Tabla 1.** Coordenadas de las esferas, referidas al origen y características básicas
- Tabla 2.** Valores de resolución horizontal obtenidos teóricamente para la antena de 900 MHz (en cm)
- Tabla 3.** Valores de resolución horizontal obtenidos teóricamente para la antena de 2 GHz (en cm)
- Tabla 4.** Resultados teóricos y experimentales de resolución horizontal obtenidos mediante la antena de 900 MHz (valores en cm)
- Tabla 5.** Resultados teóricos y experimentales de resolución horizontal obtenidos mediante la antena de 2 GHz (valores en cm)
- Tabla 6.** Resultados de resolución vertical obtenidos para la antena de 900 MHz (valores en cm)
- Tabla 7.** Resultados de resolución vertical obtenidos para la antena de 2 GHz (valores en cm)
- Tabla 8.** Resultados teóricos y experimentales de resolución vertical obtenidos mediante la antena de 2 GHz (valores en cm)
- Tabla 9.** Resultados de la inspección con georradar con antena de 900 MHz
- Tabla 10.** Resultados de la inspección con georradar con antena de 2 GHz
- Tabla 11.** Resultados de la inspección mediante tomógrafo ultrasónico (MIRA)
- Tabla 12.** Coordenadas teóricas iniciales de las esferas y armados
- Tabla 13.** Comparación de los resultados de la combinación de ambas técnicas. Valores de desplazamiento relativo de los objetos
- Tabla 14.** Coordenadas reales y definitivas de los objetos embebidos en el interior del bloque de hormigón



ANEXO 3

**Imágenes 2D georradar. Radargramas**

---



INSPECCIÓN GEORRADAR	
FICHA 1	
DATOS DEL REGISTRO	
<p><b>FRECUENCIA ANTENA:</b> 900 MHz</p> <p><b>RADARGRAMA:</b> 68</p> <p><b>INDICACIÓN:</b> ARMADO SUPERIOR</p>	
RADARGRAMA	
COMENTARIOS	
<p>Filtros: <i>Background removal.</i></p> <p>En este caso solo se ha utilizado el filtro <i>Background removal</i>, debido a que otros filtros substract eliminan algunas de las señales que del radargrama para ocultar la visualización de los pequeños elementos.</p>	

<b>INSPECCIÓN GEORRADAR</b>	
<b>FICHA 2</b>	
<b>DATOS DEL REGISTRO</b>	
<b>FRECUENCIA ANTENA:</b>	900 MHz
<b>RADARGRAMA:</b>	66
<b>INDICACIÓN:</b>	ESFERA 1
<b>RADARGRAMA</b>	
<b>COMENTARIOS</b>	
<p>Filtros: Sin aplicación de filtros.</p> <p>La reflexión de la esfera 1 se observa muy cerca de la reflexión del armado.</p> <p>En este caso no se ha aplicado ningún filtro para no resaltar el resto de elementos que aparecen en el radargrama.</p>	

INSPECCIÓN GEORRADAR	
FICHA 3	
DATOS DEL REGISTRO	
<b>FRECUENCIA ANTENA:</b>	900 MHz
<b>RADARGRAMA:</b>	69
<b>INDICACIÓN:</b>	ESFERA 3
RADARGRAMA	
COMENTARIOS	
<p>Filtros: <i>Background removal.</i></p>	

### INSPECCIÓN GEORRADAR

#### FICHA 4

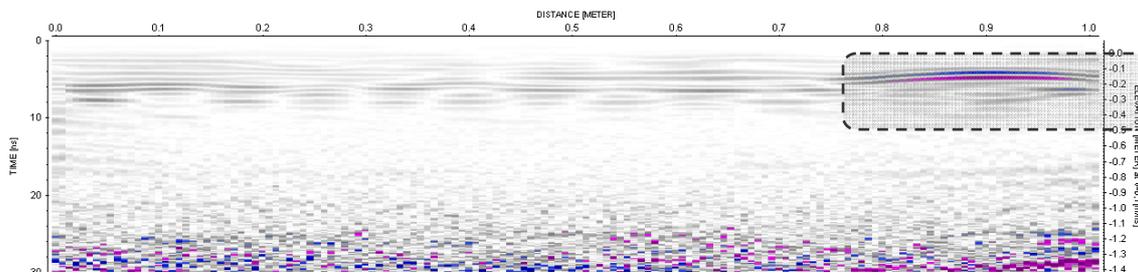
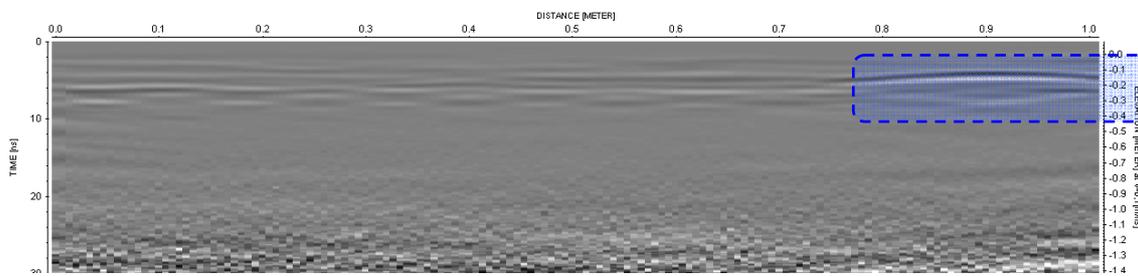
#### DATOS DEL REGISTRO

FRECUENCIA ANTENA: 900 MHz

RADARGRAMA: 71

INDICACIÓN: ESFERA 4

#### RADARGRAMA



#### COMENTARIOS

Filtros: *Background removal.*

### INSPECCIÓN GEORRADAR

#### FICHA 5

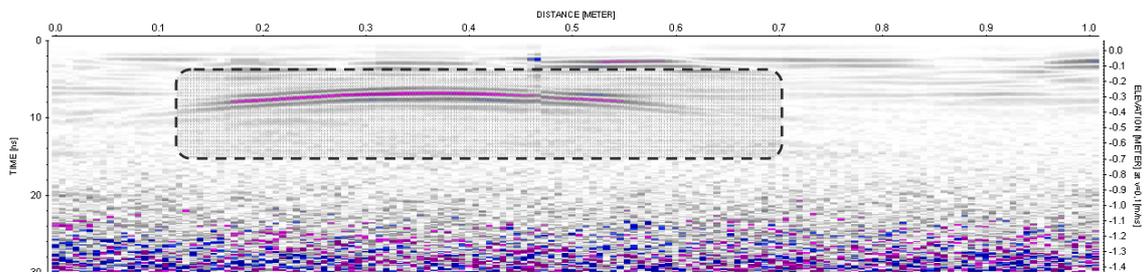
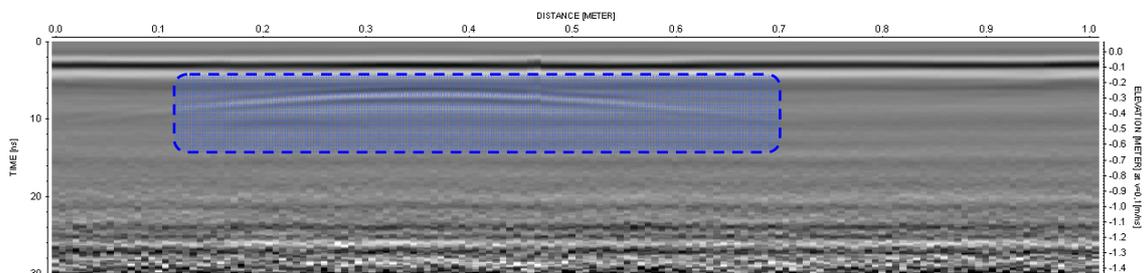
#### DATOS DEL REGISTRO

**FRECUENCIA ANTENA:** 900 MHz

**RADARGRAMA:** 76

**INDICACIÓN:** ESFERA 5.1

#### RADARGRAMA



#### COMENTARIOS

Filtros: *Background removal.*

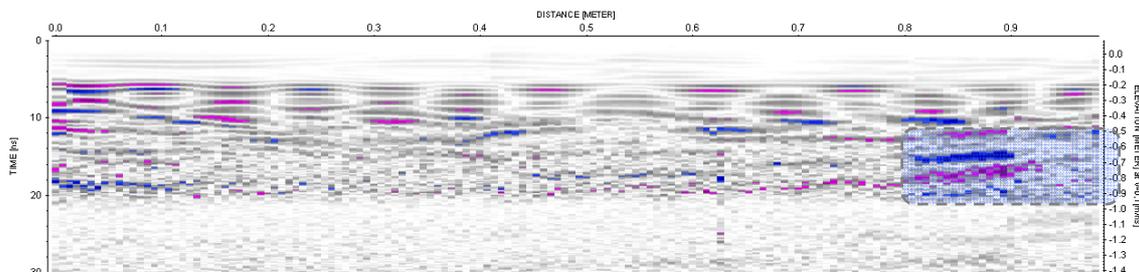
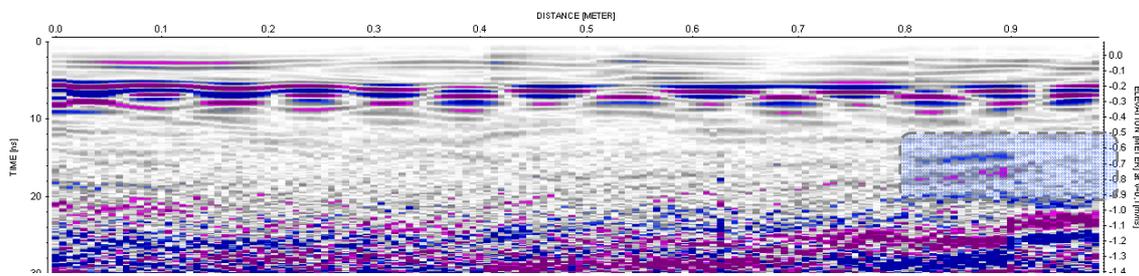
### INSPECCIÓN GEORRADAR

#### FICHA 6

#### DATOS DEL REGISTRO

**FRECUENCIA ANTENA:** 900 MHz  
**RADARGRAMA:** 69  
**INDICACIÓN:** ESFERA 5.2

#### RADARGRAMA



#### COMENTARIOS

Filtros: *Background removal.*

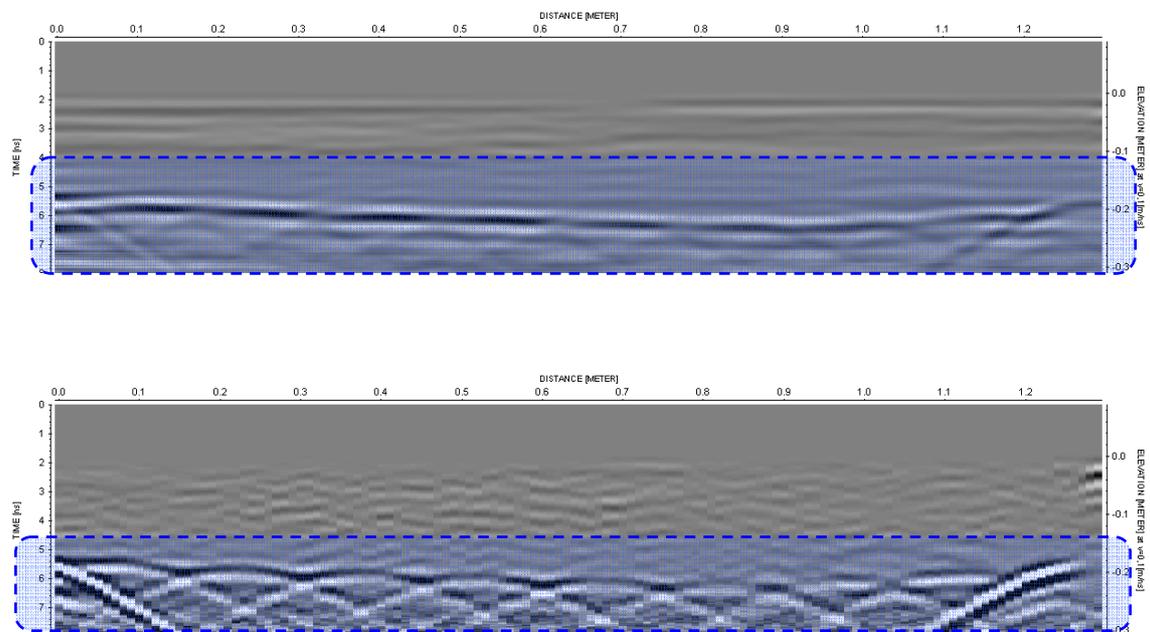
## INSPECCIÓN GEORRADAR

## FICHA 7

## DATOS DEL REGISTRO

FRECUENCIA ANTENA: 2 GHz  
RADARGRAMA: 32  
INDICACIÓN: ARMADO SUPERIOR

## RADARGRAMA



## COMENTARIOS

Filtros: *Background removal* y *Substract traces*.

En el caso del armado, las hipérbolas no llegan a observarse de forma clara si solo utilizamos el filtro *Background removal*. Para mostrar la variación de la imagen al aplicar también el filtro *Substract traces*, se ha mantenido la escala de grises.

El armado muestra una ligera curvatura, variando la profundidad de las diversas barras que lo componen.

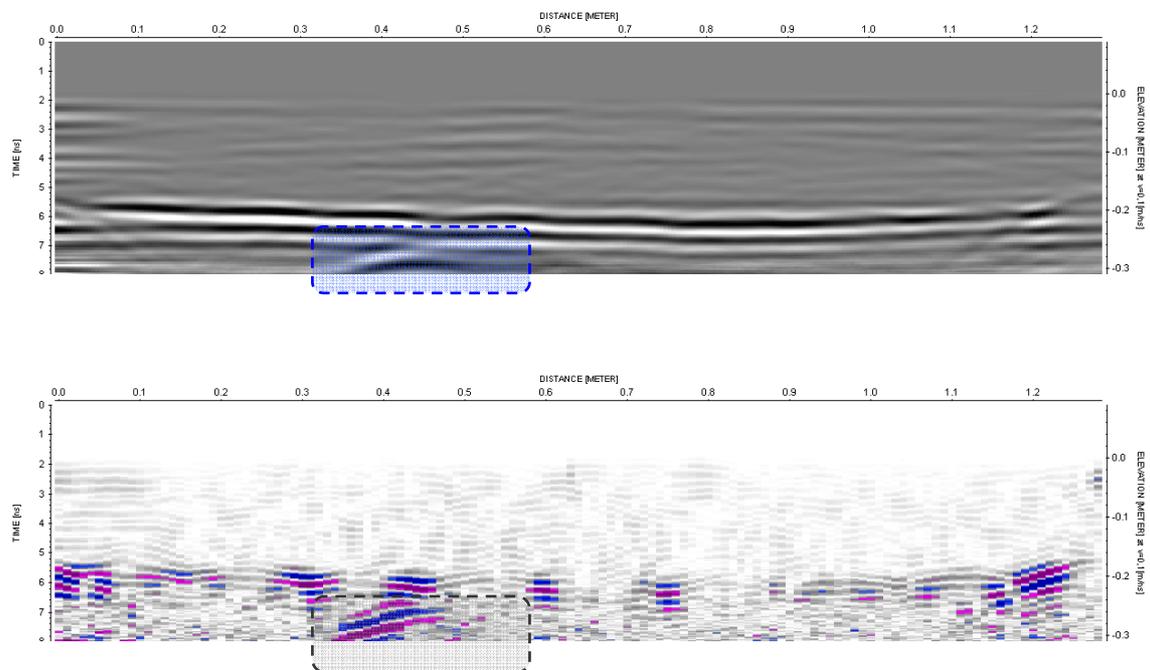
## INSPECCIÓN GEORRADAR

## FICHA 8

## DATOS DEL REGISTRO

FRECUENCIA ANTENA: 2 GHz  
RADARGRAMA: 23  
INDICACIÓN: ESFERA 1

## RADARGRAMA



## COMENTARIOS

Filtros: *Background removal* y *Substract traces*.

Solo se aprecia la parte superior de la esfera 1 debido a que el rango del radargrama no alcanza la profundidad necesaria para su correcta localización.

Se muestra el primer radargrama tratado con el filtro *Background removal* y el resultado de aplicarle el filtro *Substract traces*.

INSPECCIÓN GEORRADAR	
FICHA 9	
DATOS DEL REGISTRO	
<b>FRECUENCIA ANTENA:</b>	2 GHz
<b>RADARGRAMA:</b>	33
<b>INDICACIÓN:</b>	ESFERA 4
RADARGRAMA	
COMENTARIOS	
<p>Filtros: <i>Background removal</i> y <i>Substract traces</i>.</p> <p>En el primer caso se muestra el radargrama tratado con <i>Background removal</i> y en escala de grises, mientras que en el segundo se ha aplicado la técnica de procesamiento, <i>Substract traces</i>. Esta técnica permite visualizar mejor las hipérbolas cuando se utiliza una escala de amplitud en la cual los extremos corresponden a los colores azul y rojo.</p> <p>Puede comprobarse como la esfera 4 aparece desplazada hasta una profundidad menor que la del armado..</p>	

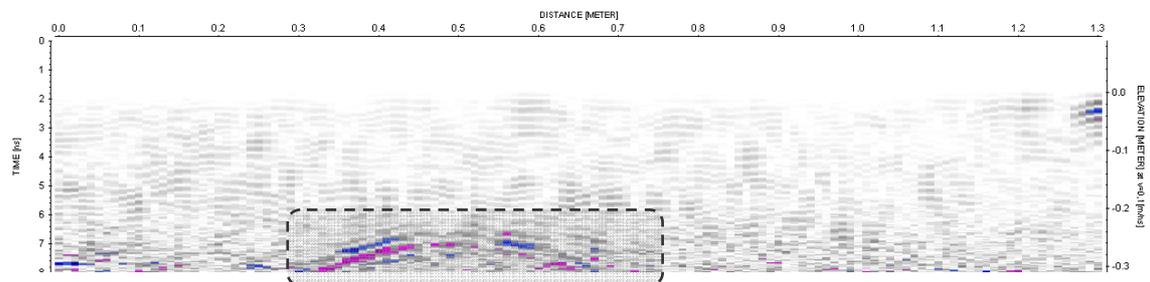
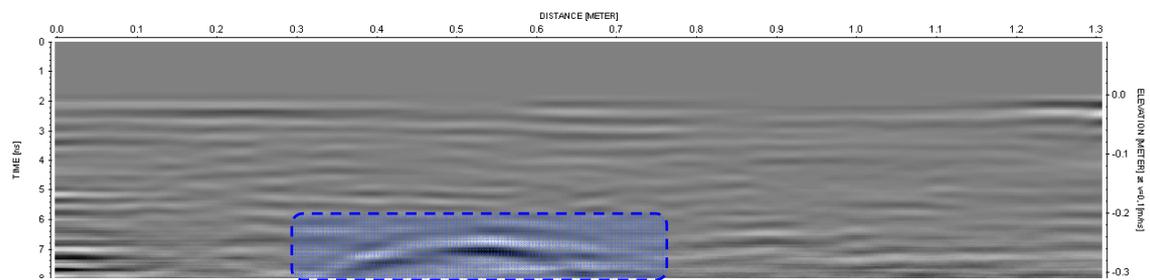
## INSPECCIÓN GEORRADAR

## FICHA 10

## DATOS DEL REGISTRO

**FRECUENCIA ANTENA:** 2 GHz  
**RADARGRAMA:** 45  
**INDICACIÓN:** ESFERA 5.1

## RADARGRAMA



## COMENTARIOS

Filtros: *Background removal* y *Substract traces*.

El rango de la antena de 2 GHz es suficiente para poder observar la esfera 5.1.

Aplicando el filtro 2D *Background removal* y utilizando una escala de grises, se observa una hipérbola correspondiente a dicha esfera.

En la segunda imagen se aprecia como se detecta la misma indicación si se aplica la técnica de procesado *Substract traces*.

ANEXO 4

**Imágenes 3D georradar. Time-slices**

---



INSPECCIÓN GEORRADAR
FICHA 1
DATOS DEL REGISTRO
<p><b>FRECUENCIA ANTENA:</b> 900 MHz</p> <p><b>INDICACIÓN:</b> ARMADO SUPERIOR</p>
ESQUEMA LÍNEA DE EXPLORACIÓN
IMAGEN 3D
COMENTARIOS
<p>Dirección eje x: Ocupa toda la superficie</p> <p>Dirección eje y: Se detecta hasta una distancia de 85 cm</p> <p>Dirección eje z: Se detecta a una profundidad de 15 cm</p>

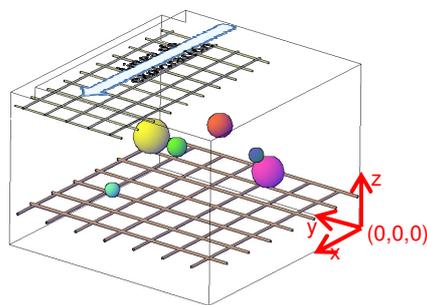
**INSPECCIÓN GEORRADAR**

**FICHA 2**

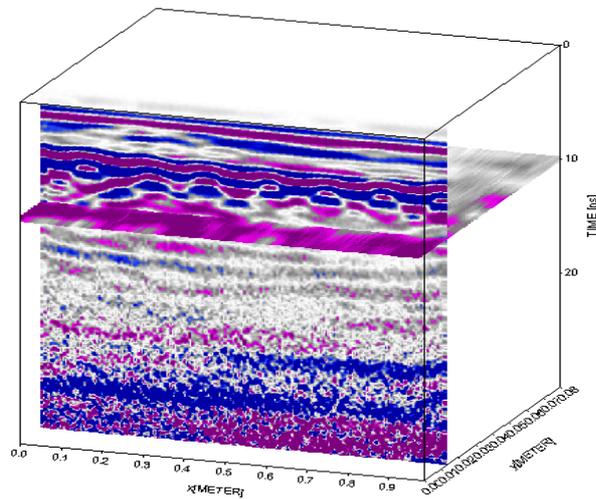
**DATOS DEL REGISTRO**

**FRECUENCIA ANTENA:** 900 MHz  
**INDICACIÓN:** ESFERA 1

**ESQUEMA LÍNEA DE EXPLORACIÓN**

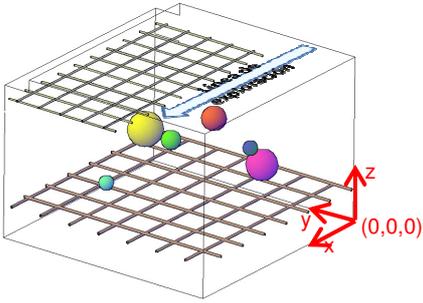
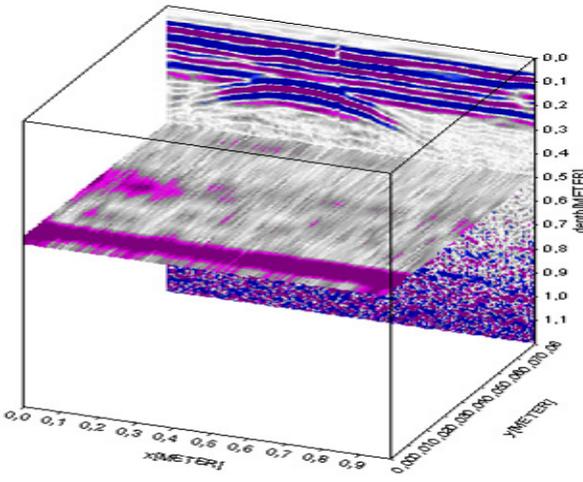


**IMAGEN 3D**



**COMENTARIOS**

Coordenadas reales: x = 68 cm, y = 110 cm, z = 55 cm

<b>INSPECCIÓN GEORRADAR</b>	
<b>FICHA 3</b>	
<b>DATOS DEL REGISTRO</b>	
<b>FRECUENCIA ANTENA:</b>	900 MHz
<b>INDICACIÓN:</b>	ESFERA 3
<b>ESQUEMA LÍNEA DE EXPLORACIÓN</b>	
 <p>A 3D schematic diagram showing a rectangular volume with a grid on the top and bottom surfaces. A blue arrow labeled 'LÍNEA DE EXPLORACIÓN' points along the grid. A 3D coordinate system is shown at the bottom right corner with axes x, y, and z, and the origin labeled (0,0,0).</p>	
<b>IMAGEN 3D</b>	
 <p>A 3D radar image showing subsurface layers. The vertical axis is labeled 'depth[METER]' and ranges from 0.0 to 1.1. The horizontal axes are labeled 'X[METER]' and 'Y[METER]', both ranging from 0.0 to 0.9. The image shows distinct horizontal layers of varying colors (purple, blue, white) representing different subsurface materials.</p>	
<b>COMENTARIOS</b>	
<p>Coordenadas reales: x = 13,5 cm, y = 88 cm, z = 55 cm</p>	

**INSPECCIÓN GEORRADAR**

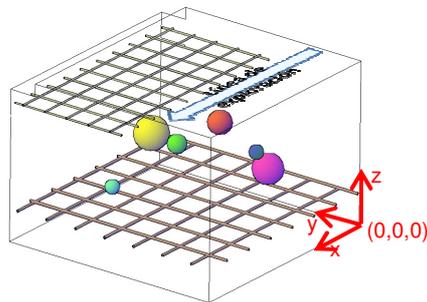
**FICHA 4**

**DATOS DEL REGISTRO**

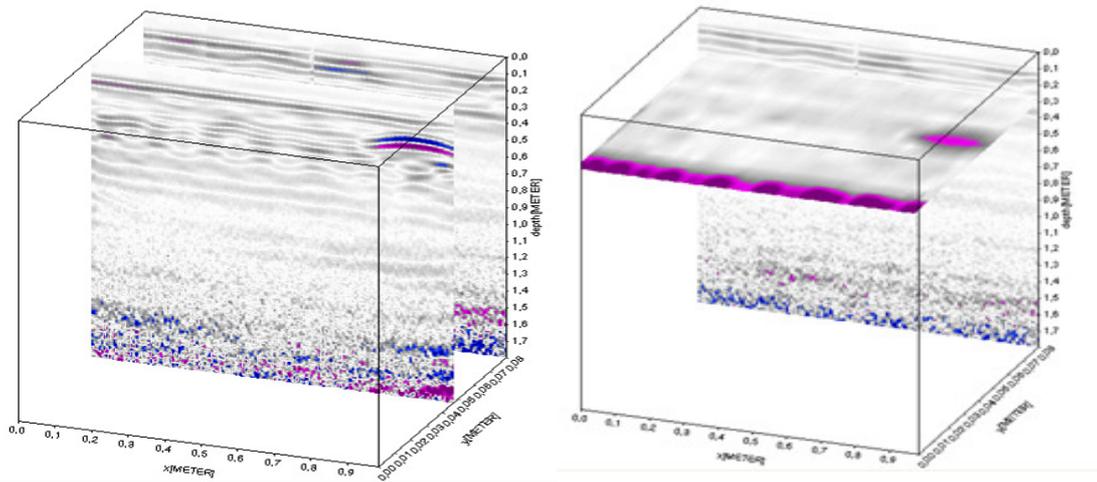
**FRECUENCIA ANTENA:** 900 MHz

**INDICACIÓN:** ESFERA 4

**ESQUEMA LÍNEA DE EXPLORACIÓN**



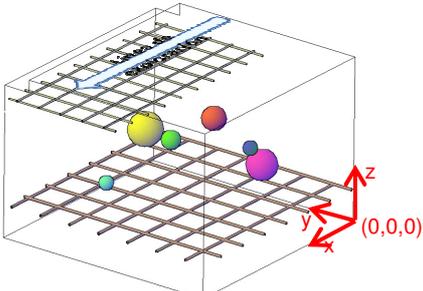
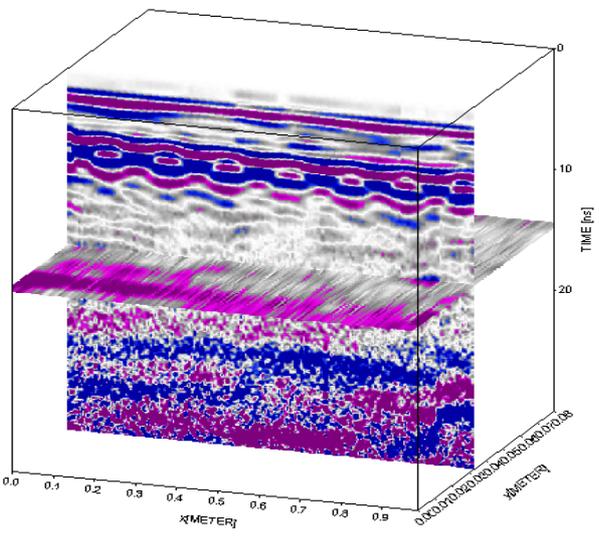
**IMAGEN 3D**

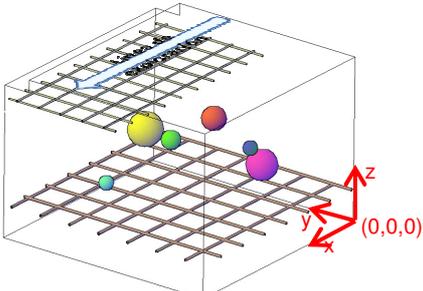
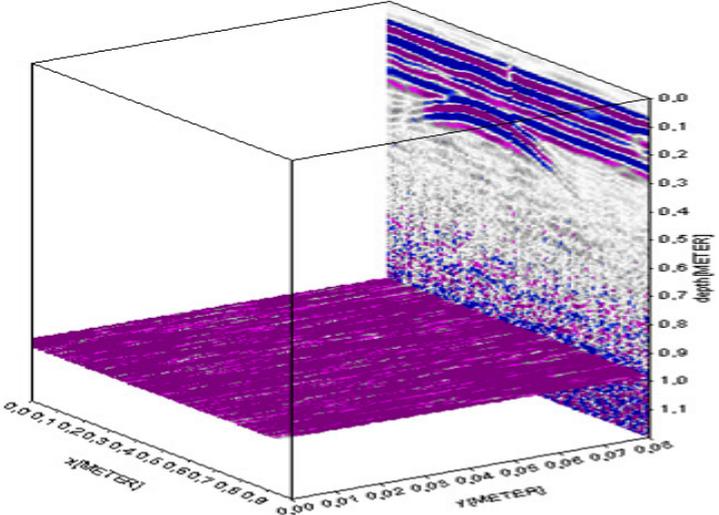


**COMENTARIOS**

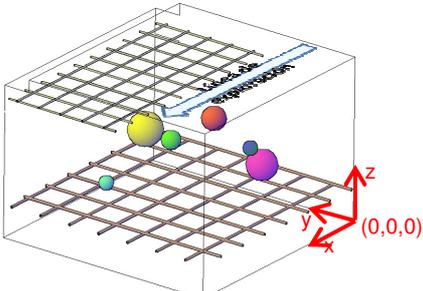
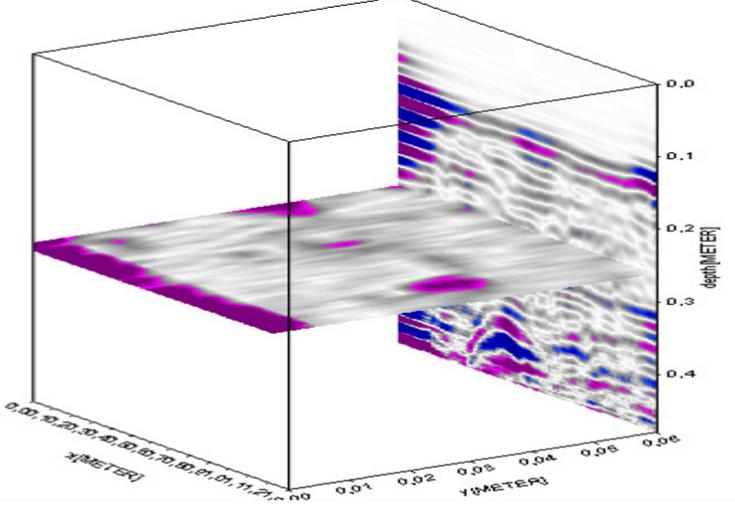
Coordenadas reales: x = 101,5 cm, y = 68 cm, z = 85,5 cm

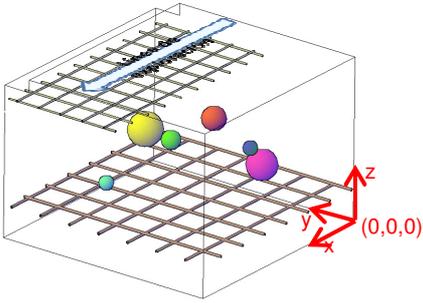
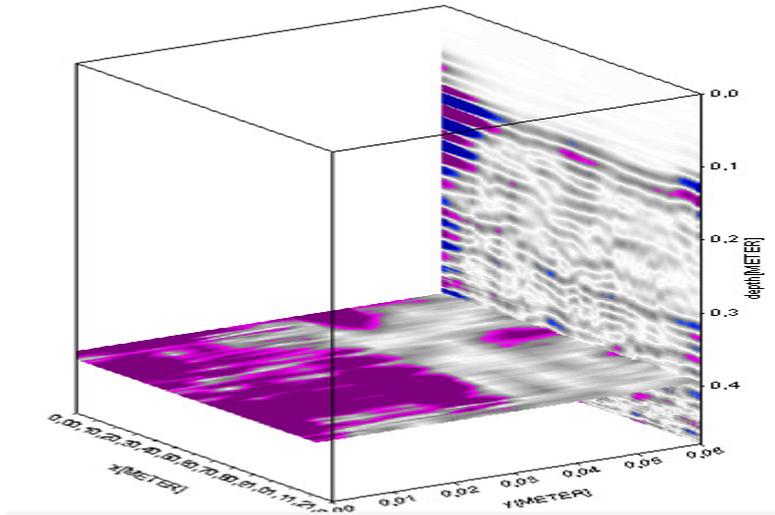
INSPECCIÓN GEORRADAR	
FICHA 5	
DATOS DEL REGISTRO	
<p><b>FRECUENCIA ANTENA:</b> 900 MHz</p> <p><b>INDICACIÓN:</b> ESFERA 5.1</p>	
ESQUEMA LÍNEA DE EXPLORACIÓN	
<p>A 3D schematic showing a rectangular grid representing the exploration area. A blue line indicates the path of the antenna. Several colored spheres (yellow, green, red, purple, blue) are scattered within the grid, representing detected objects. A 3D coordinate system is shown with red arrows for x, y, and z axes, and the origin is labeled (0,0,0).</p>	
IMAGEN 3D	
<p>Two 3D radar images side-by-side. The vertical axis is labeled 'depth(METER)' and ranges from 0.0 to 1.7. The horizontal axis is labeled 'x(METER)' and ranges from 0.0 to 0.9. The images show a grid of data points with a prominent purple and blue band across the middle, indicating a detected object or boundary.</p>	
COMENTARIOS	
<p>Coordenadas reales: x = 58 cm, y = 12 cm, z = 60 cm</p>	

INSPECCIÓN GEORRADAR
FICHA 6
DATOS DEL REGISTRO
<p><b>FRECUENCIA ANTENA:</b> 900 MHz  <b>INDICACIÓN:</b> ESFERA 5.2</p>
ESQUEMA LÍNEA DE EXPLORACIÓN

IMAGEN 3D

COMENTARIOS
<p>Coordenadas reales: x = 96,5 cm, y = 88 m, z = 62 cm</p>

INSPECCIÓN GEORRADAR
FICHA 7
DATOS DEL REGISTRO
<p><b>FRECUENCIA ANTENA:</b> 900 MHz  <b>INDICACIÓN:</b> ECO DE FONDO</p>
ESQUEMA LÍNEA DE EXPLORACIÓN

IMAGEN 3D

COMENTARIOS
<p>Se detecta el fondo del bloque de hormigón a una profundidad de 98 cm.</p>

INSPECCIÓN GEORRADAR
FICHA 8
DATOS DEL REGISTRO
<p><b>FRECUENCIA ANTENA:</b> 2 GHz</p> <p><b>INDICACIÓN:</b> ARMADO SUPERIOR</p>
ESQUEMA LÍNEA DE EXPLORACIÓN
IMAGEN 3D
COMENTARIOS
<p>Dirección eje x: Se detecta en toda la superficie.</p> <p>Dirección eje y: Se detecta hasta una distancia de 71 cm.</p> <p>Dirección eje z: Se detecta a una profundidas de 15 cm.</p> <p>Desplazándose en los cortes sobre el eje z, se puede apreciar como el armado superior ha adquirido curvatura en el proceso de hormigonado.</p>

<b>INSPECCIÓN GEORRADAR</b>	
<b>FICHA 9</b>	
<b>DATOS DEL REGISTRO</b>	
<b>FRECUENCIA ANTENA:</b>	2 GHz
<b>INDICACIÓN:</b>	ESFERA 4
<b>ESQUEMA LÍNEA DE EXPLORACIÓN</b>	
	
<b>IMAGEN 3D</b>	
	
<b>COMENTARIOS</b>	
<p>Coordenadas reales: x = 108,5 cm, y = 67 cm, z = 88 cm</p>	

INSPECCIÓN GEORRADAR	
FICHA 10	
DATOS DEL REGISTRO	
<p><b>FRECUENCIA ANTENA:</b> 2 GHz</p> <p><b>INDICACIÓN:</b> ESFERA 5.1</p>	
ESQUEMA LÍNEA DE EXPLORACIÓN	
	
IMAGEN 3D	
	
COMENTARIOS	
<p>Coordenadas reales: x = 57,8 cm, y = 12 cm, z = 60 cm</p>	

## **ANEXO 5**

Imágenes tomográficas

---



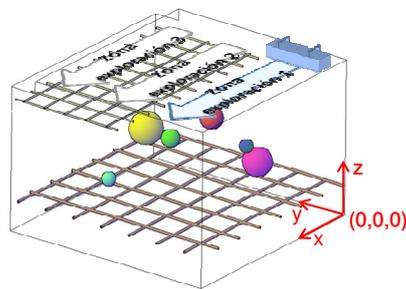
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 1**

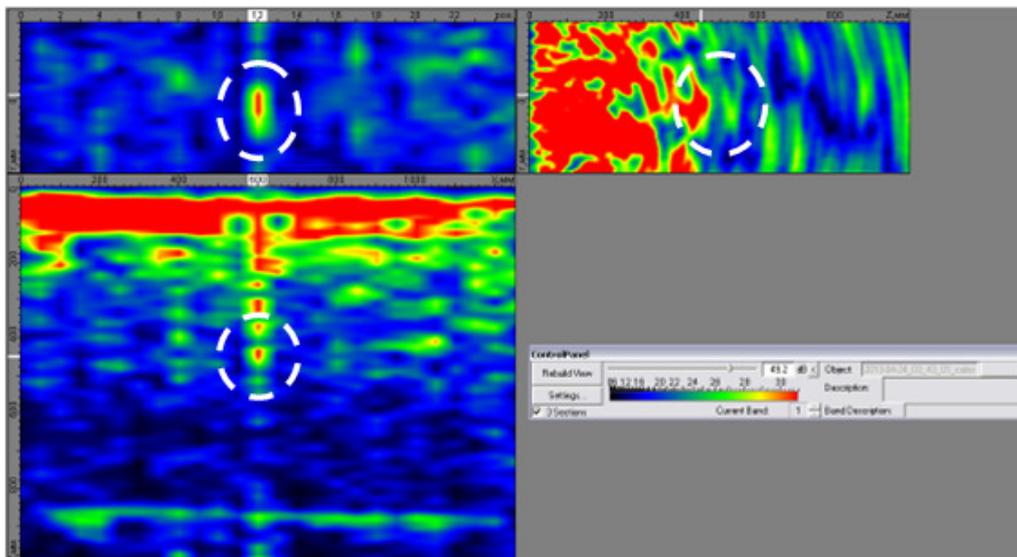
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 1  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 55 KHz  
**INDICACIÓN:** ESFERA 5.1

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Coordenadas medidas sobre imagen: x = 60 cm, y = 8 cm, z = 45 cm

Coordenadas absolutas: x = 60 cm, y = 8 cm, z = 55 cm

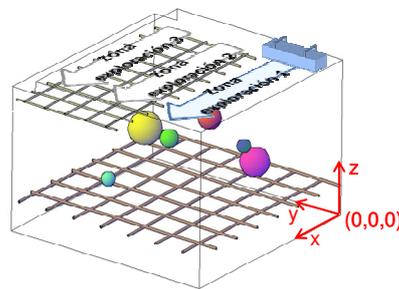
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 2**

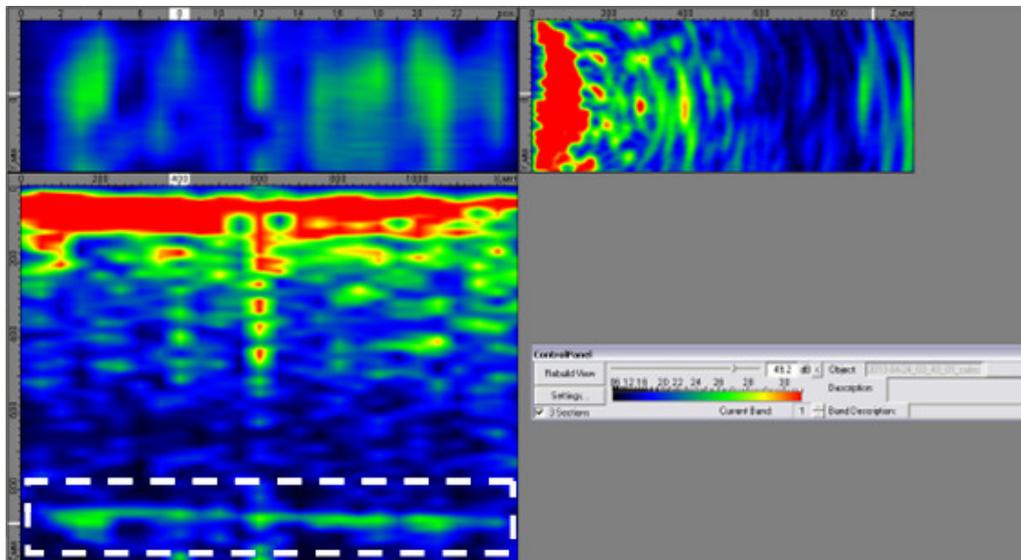
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 1  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 55 KHz  
**INDICACIÓN:** ARMADO INFERIOR

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Se observa al final de la imagen el armado inferior a unos 87 cm de profundidad, a lo largo de toda la zona de exploración.

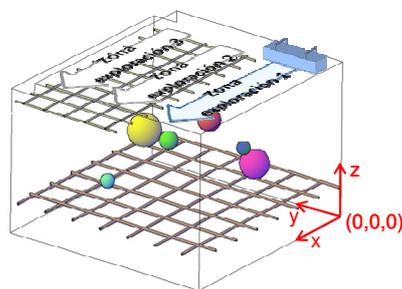
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 3**

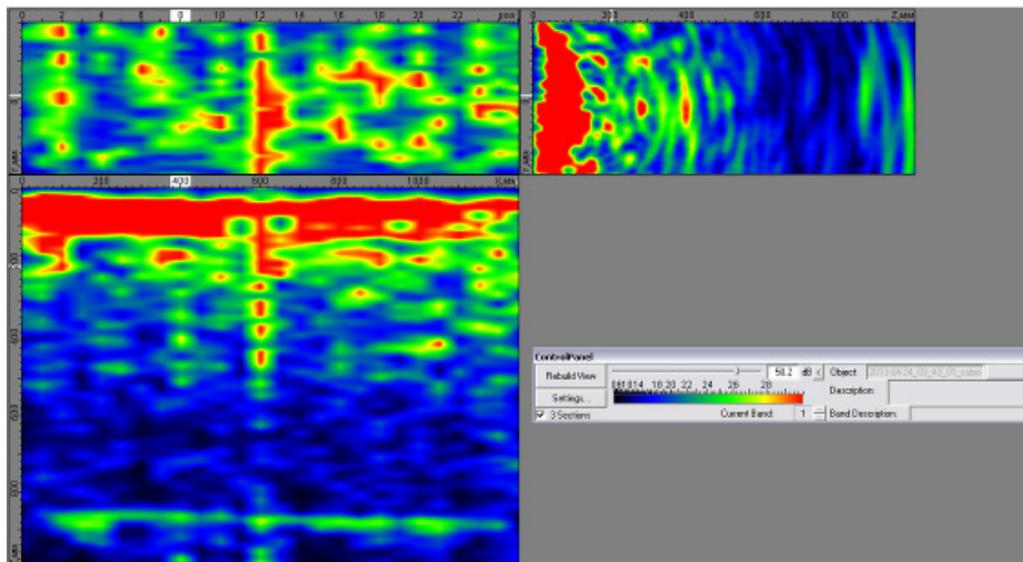
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 1  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 55 KHz  
**INDICACIÓN:** ZONA SUPERIOR

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

No existe presencia de armado superficial, debido a que las barras de acero no alcanzan toda la cara superior del bloque de hormigón.

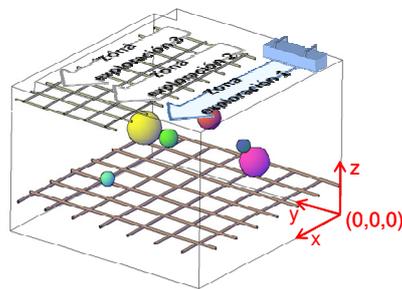
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 4**

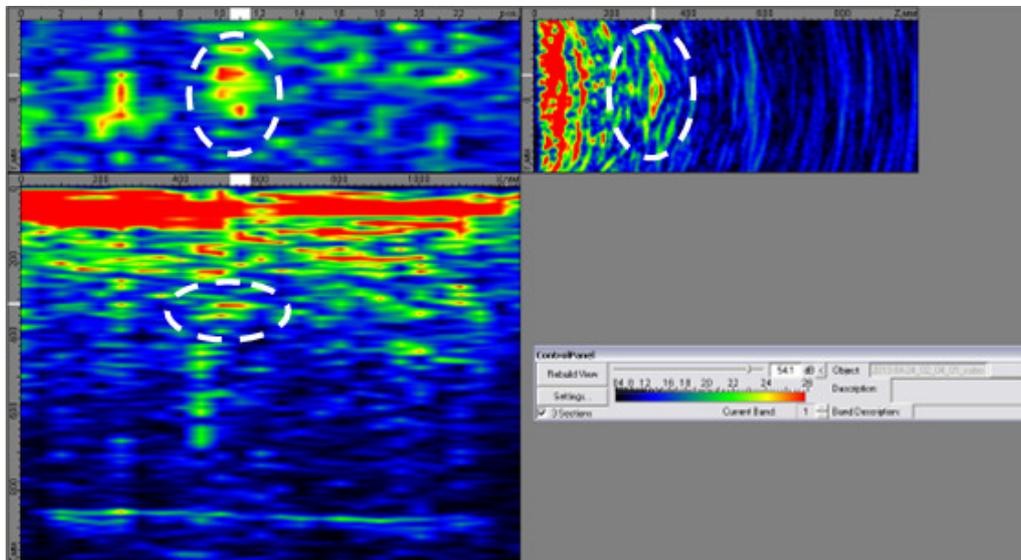
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 1  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 150 KHz  
**INDICACIÓN:** ESFERA 5.1

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Coordenadas medidas sobre imagen: x = 54 cm, y = 2,5 cm, z = 31,5 cm  
 Coordenadas absolutas: z = 68,5 cm

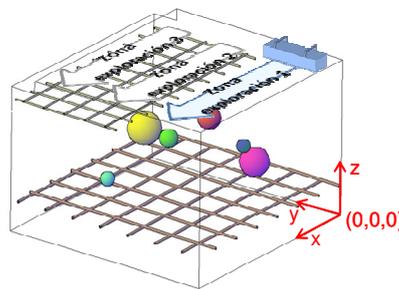
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 5**

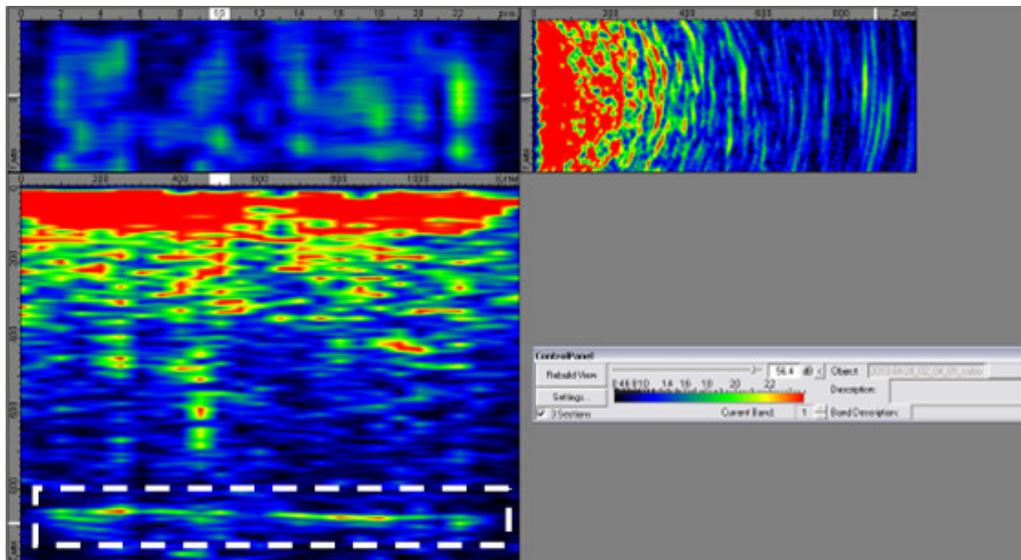
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 1  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 150 KHz  
**INDICACIÓN:** ARMADO INFERIOR

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Se observa el armado inferior a una profundidad de 87 cm.

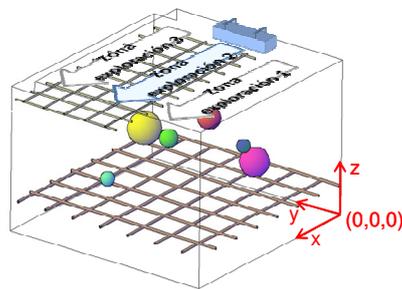
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 6**

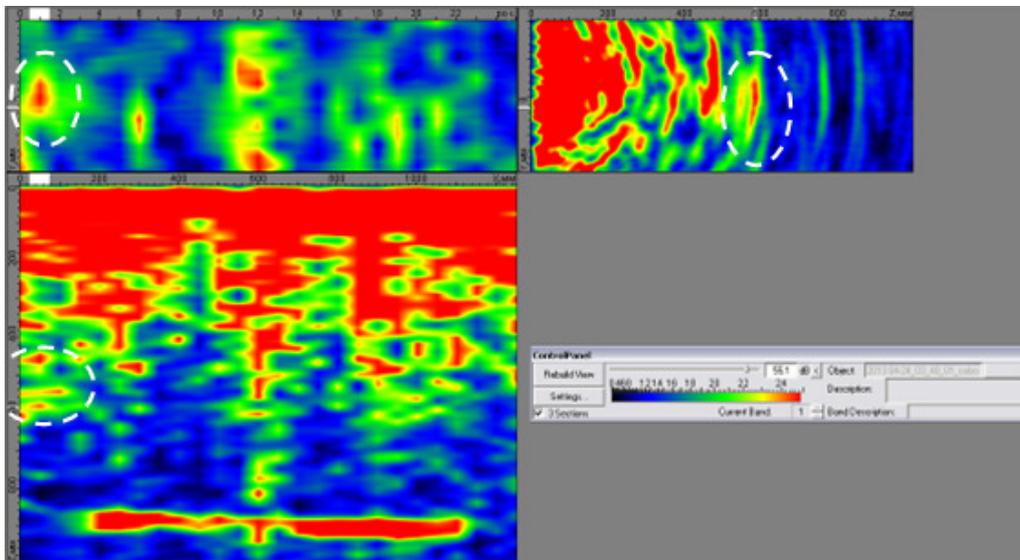
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 2  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 55 KHz  
**INDICACIÓN:** ESFERA 2

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Coordenadas medidas sobre imagen: x = 4,5 cm, y = 58 cm y z = 57,5 cm  
 Coordenadas absolutas: z = 42,5 cm

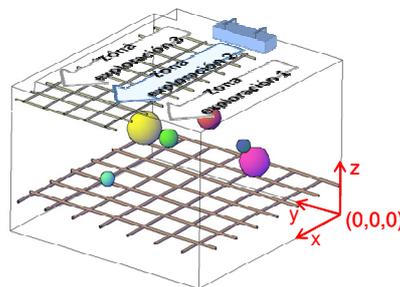
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 6**

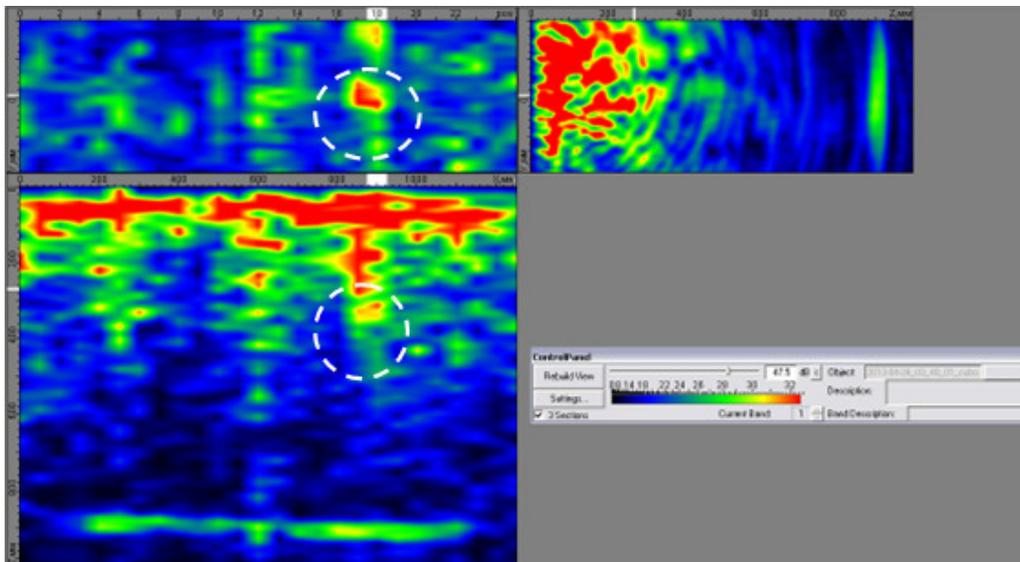
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 2  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 55 KHz  
**INDICACIÓN:** ESFERA 4

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Coordenadas medidas sobre imagen: x = 84,8 cm, y = 23 cm, z = 21,3 cm  
 Coordenadas absolutas: z = 78,7 cm

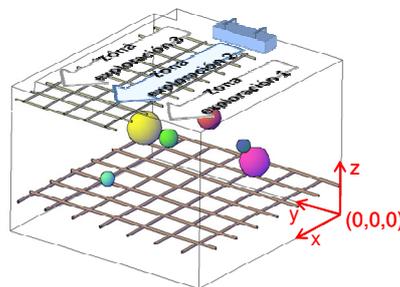
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 7**

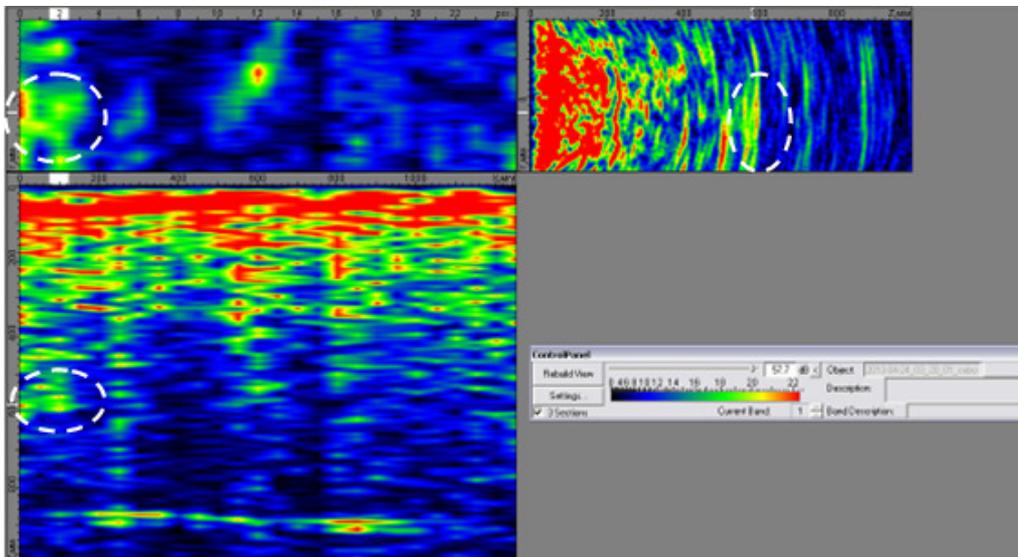
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 2  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 150 KHz  
**INDICACIÓN:** ESFERA 2

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Coordenadas medidas sobre imagen: x = 11 cm, y = 9,5 cm, z = 51,5 cm  
 Coordenadas absolutas: x = 11 cm, y = 49,5 cm, z = 49,5 cm

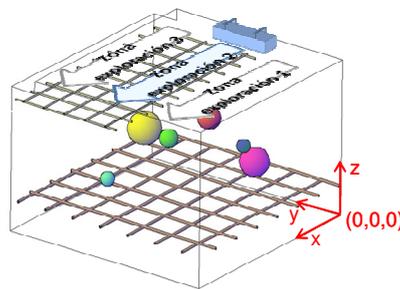
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 8**

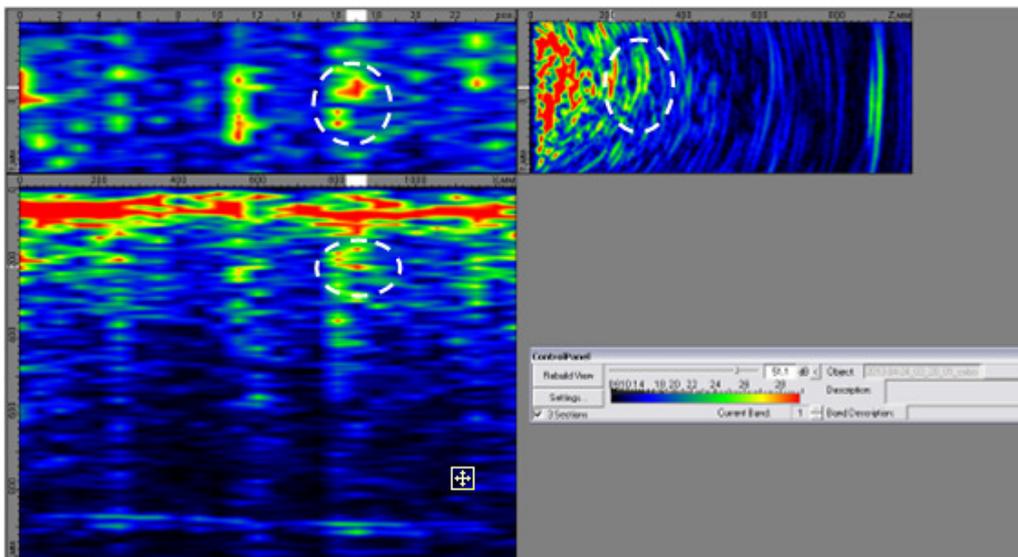
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 2  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 150 KHz  
**INDICACIÓN:** ESFERA 4

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Coordenadas medidas sobre imagen: x = 85 cm, y = 23 cm, z = 21,3 cm  
 Coordenadas absolutas: x = 85 cm, y = 63 cm, z = 78,7 cm.

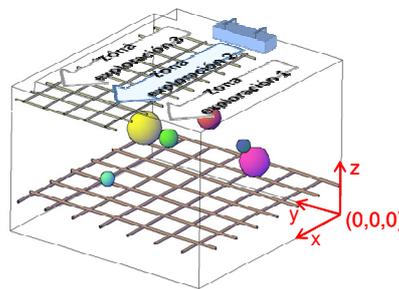
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 8**

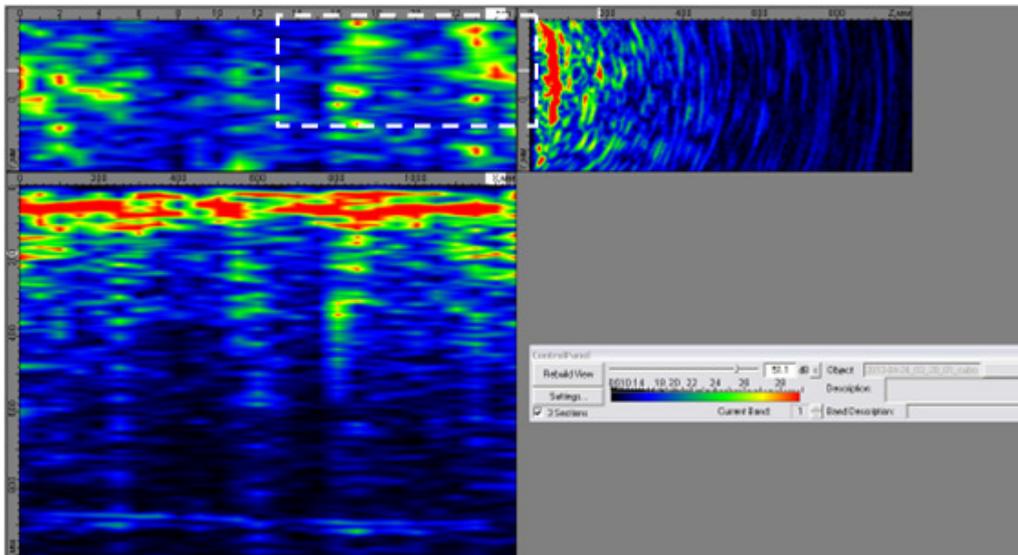
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 2  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 150 KHz  
**INDICACIÓN:** ARMADO SUPERIOR

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Dentro de la zona medida en la zona de exploración 2 se encuentra el inicio del armado superior. En la imagen se puede observar una zona con mayor amplitud en la parte más cercana a la zona de exploración 3. Esto puede deberse a la aparición de fisuras provocadas por las barras metálicas.

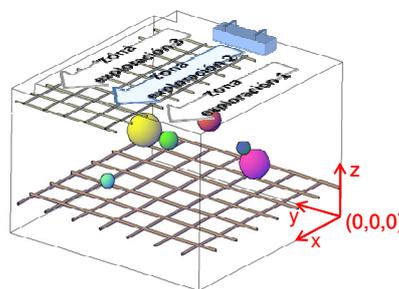
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 9**

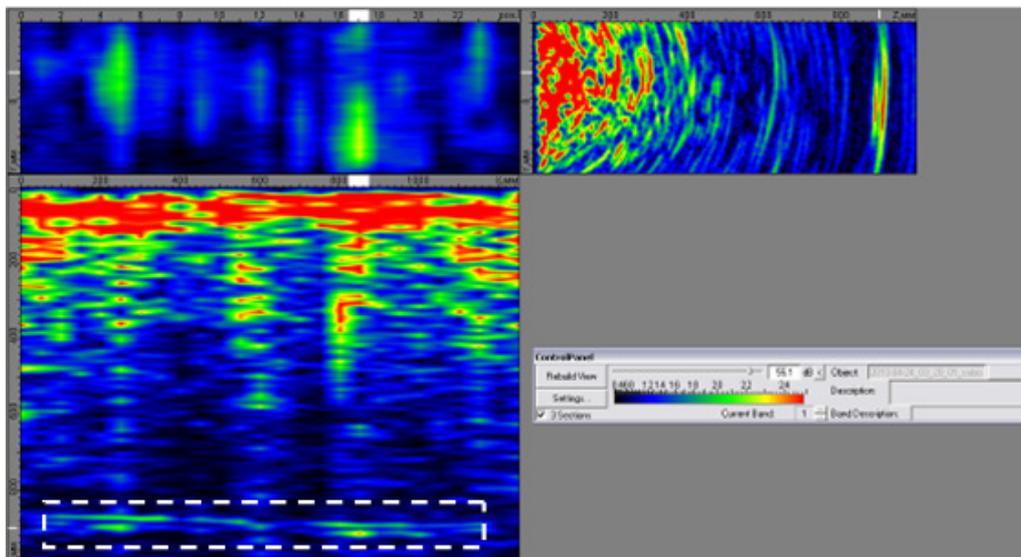
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 2  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 150 KHz  
**INDICACIÓN:** ARMADO INFERIOR

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Se observa una reflexión producida por el armado inferior. Este aparece a una profundidad de 87 cm. Esto da un valor muy aproximado al que se observaba en la zona de exploración 2. Además, también se observa una curvatura en el armado.

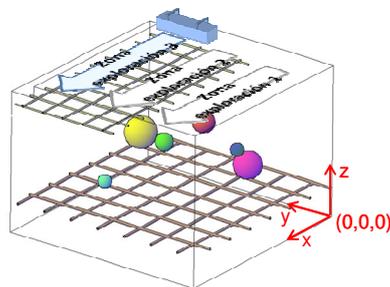
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 10**

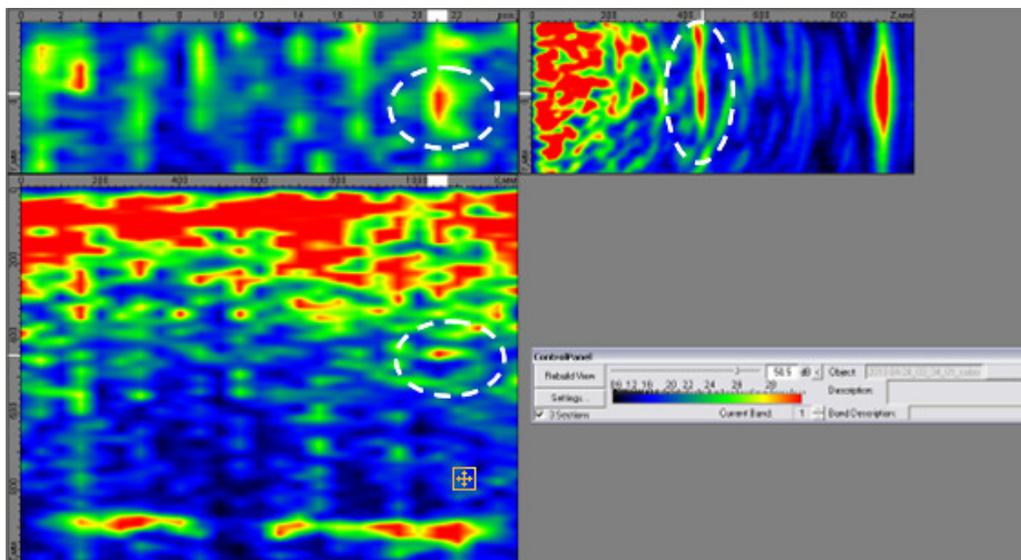
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 3  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 55 KHz  
**INDICACIÓN:** ESFERA 5.2

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Coordenadas medidas sobre imagen: x = 104 cm, y = 0,8 cm, y z = 44,2 cm  
 Coordenadas absolutas: x = 104 cm, y = 100,8 cm, z = 56,8 cm.

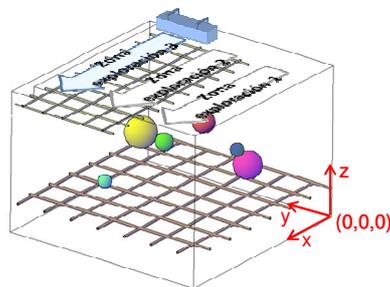
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 11**

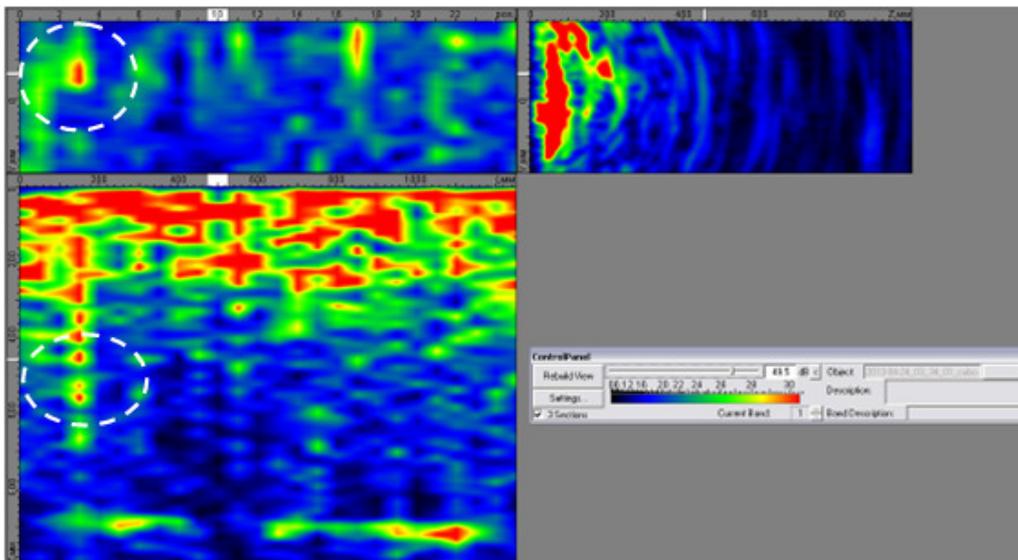
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 3  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 55 KHz  
**INDICACIÓN:** ESFERA 3

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Coordenadas medidas sobre imagen:  $x = 10$  cm,  $y = 12,3$  cm y  $z = 45,8$  cm  
 Coordenadas absolutas:  $x = 10$  cm,  $y = 102,3$  cm,  $z = 54,2$  cm.

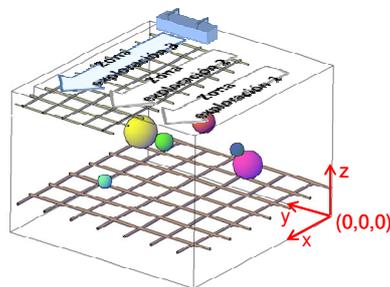
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 12**

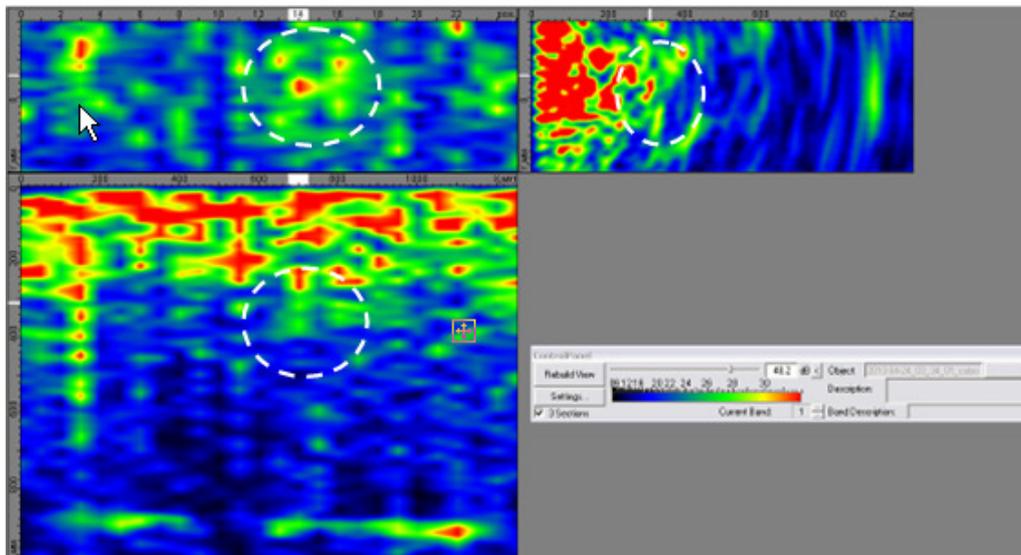
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 3  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 55 KHz  
**INDICACIÓN:** ESFERA 1

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Aunque la esfera 1 es la de mayor tamaño, su indicación no se observa de forma clara, tomándose unos coordenadas medidas sobre la imagen:  $x = 64,8$  cm,  $y = 4,8$  cm y en la dirección z se aprecia una zona con mayor amplitud desde los 30 cm hasta los 50 cm. Las coordenadas absolutas serían  $x = 64,8$  cm,  $104,8$  cm,  $z = 60$  cm.

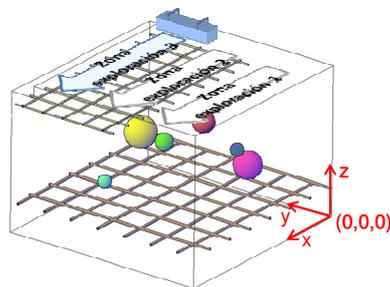
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 13**

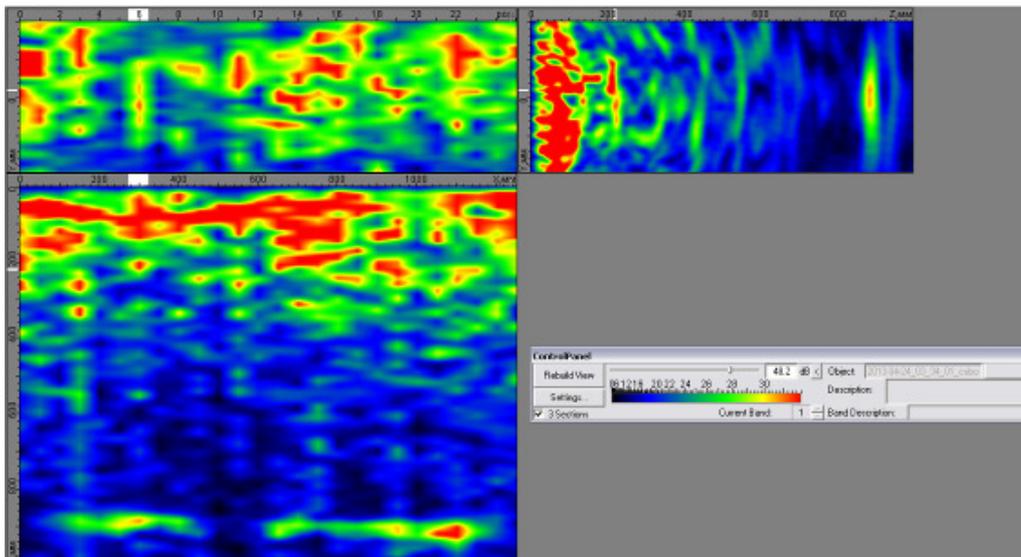
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 3  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 55 KHz  
**INDICACIÓN:** ARMADO SUPERIOR

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

El armado superior aparece a una profundidad de 20,5 cm.

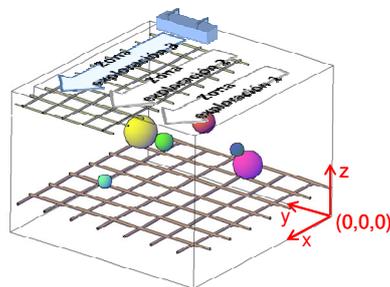
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 14**

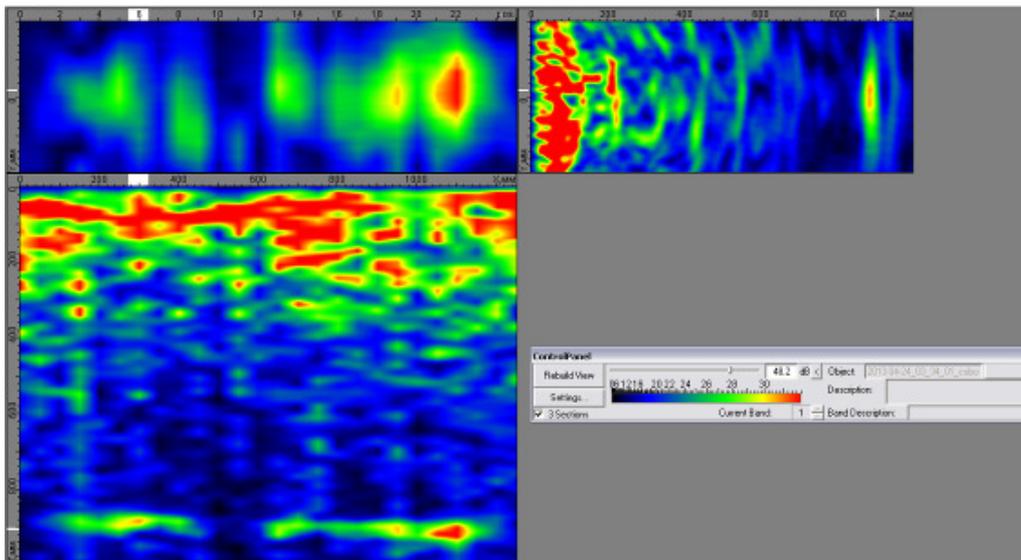
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 3  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 55 KHz  
**INDICACIÓN:** ARMADO INFERIOR

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

El armado inferior aparece a una profundidad de 89 cm.

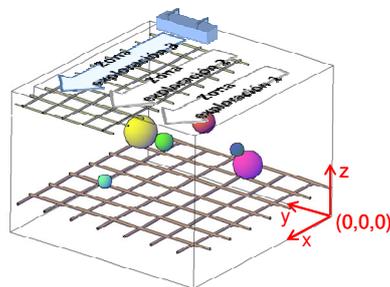
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 15**

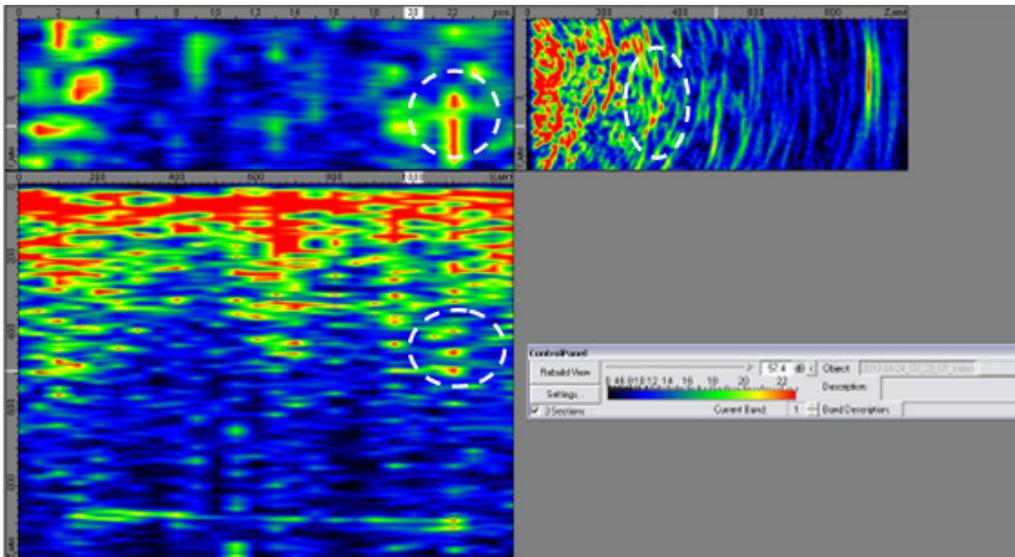
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 3  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 150 KHz  
**INDICACIÓN:** ESFERA 5.2

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Coordenadas medias sobre imagen: x = 100 cm, y = 8,2 cm, z = 48,7 cm  
 Coordenadas absolutas: x = 100 cm, y = 91,8 cm, z = 52,3 cm.

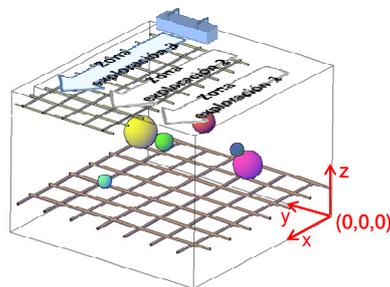
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 16**

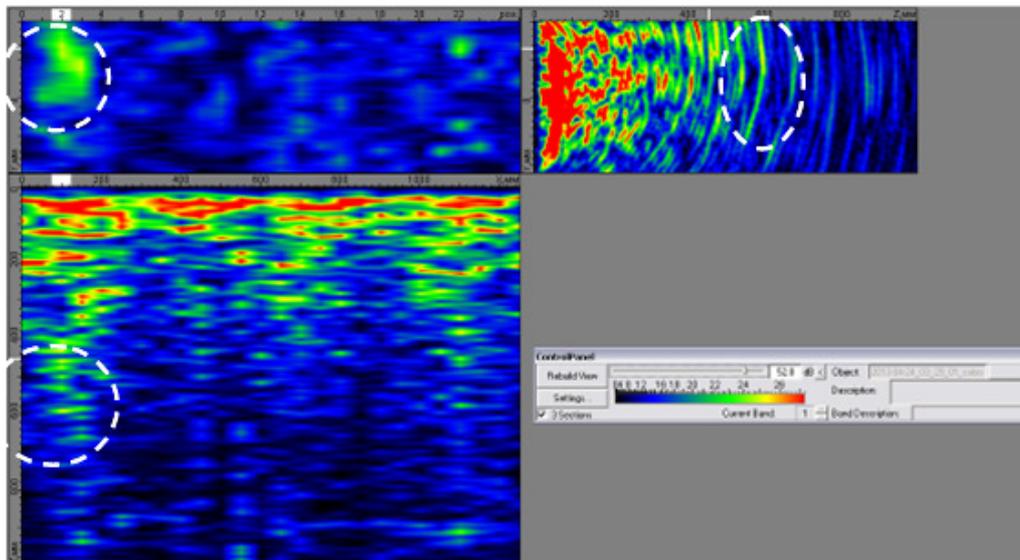
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 3  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 150 KHz  
**INDICACIÓN:** ESFERA 3

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Coordenadas medidas sobre imagen: x = 10 cm, y = 12,3 cm, z = 45,8 cm  
 Coordenadas absolutas: x = 10 cm, y = 102,3 cm, z = 54,2 cm.

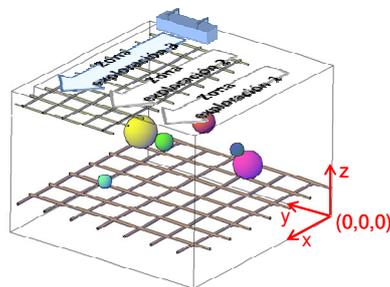
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 17**

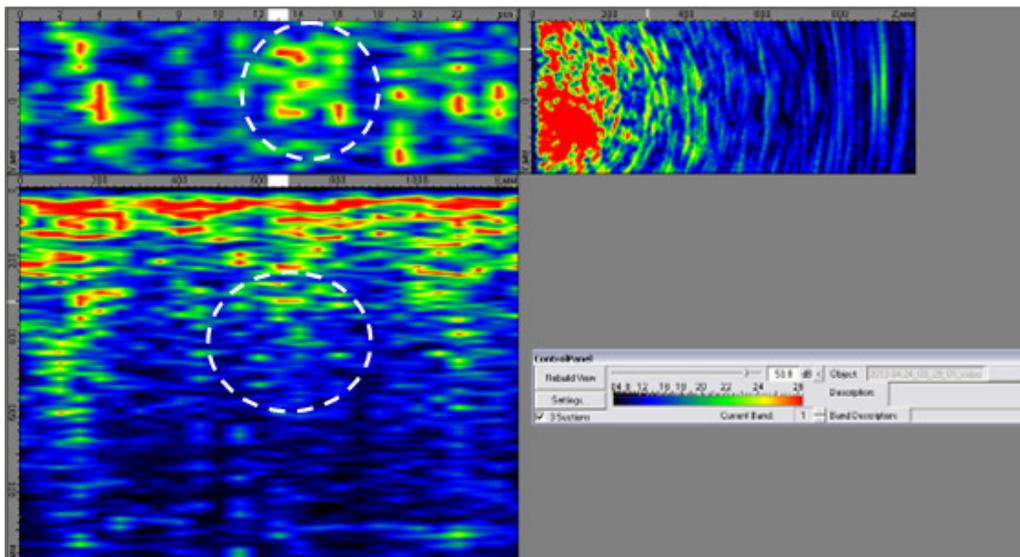
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 3  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 150 KHz  
**INDICACIÓN:** ESFERA 1

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

Coordenadas medias sobre imagen: x = 65 cm, y = 4,8 cm, z = 39 cm  
 Coordenadas absolutas: x = 65 cm, y = 104,8 cm, z = 61 cm

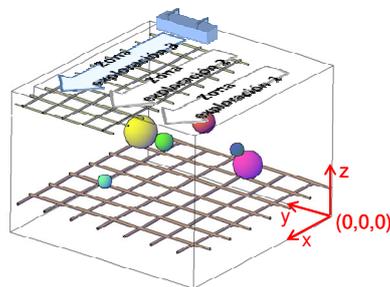
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 18**

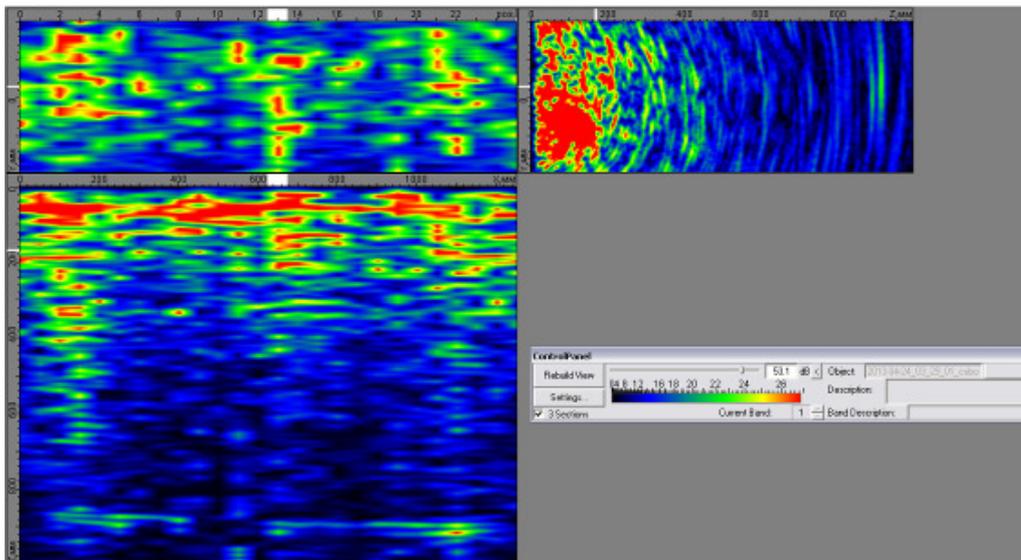
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 3  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 150 KHz  
**INDICACIÓN:** ARMADO SUPERIOR

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

La profundidad a la se observa el armado superior es de 12,7 cm.

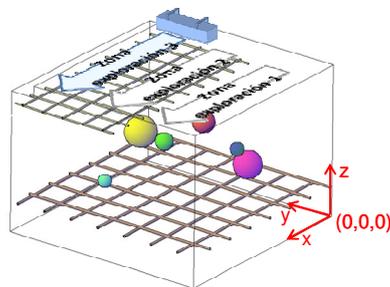
**INSPECCIÓN TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA**

**FICHA 19**

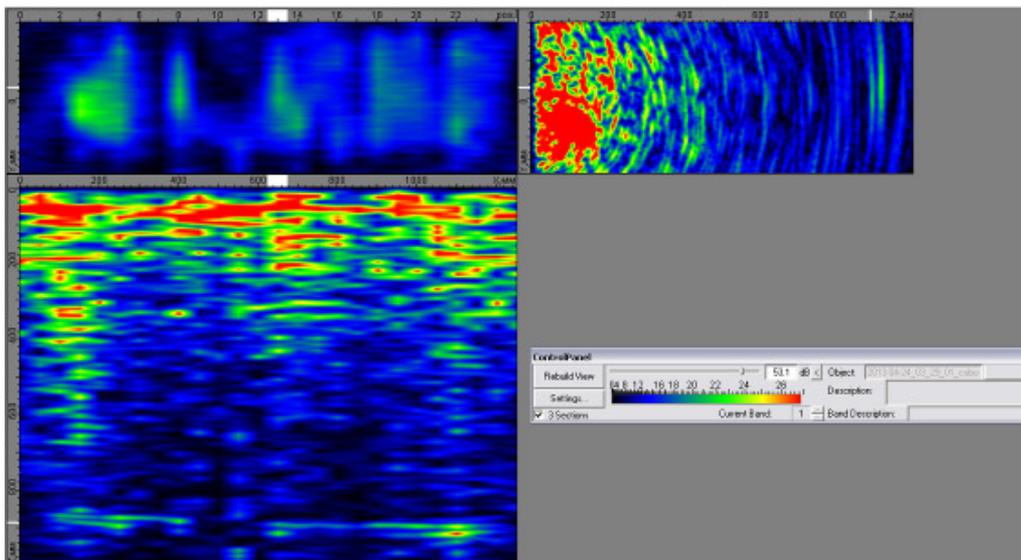
**DATOS DEL REGISTRO**

**ZONA DE EXPLORACIÓN:** 3  
**FRECUENCIA EMISIÓN:** 150 KHz  
**INDICACIÓN:** ARMADO INFERIOR

**ESQUEMA ZONA DE EXPLORACIÓN**



**IMAGEN TOMOGRÁFICA**



**COMENTARIOS**

El armado inferior se posiciona a una profundidad de 89,4 cm.