

**Máster en Edificación. Especialidad: Tecnología de la Edificación**

# **“EVALUACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LA TERMOGRAFÍA Y EL GEORRADAR PARA CARACTERIZAR MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN”**

**Trabajo final de máster 2015**

**Alumno**

Javier Zahonero Simó

**Tutores**

Isabel Rodríguez Abad

Jesús Mené Aparicio



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**



ESCUOLA TÉCNICA SUPERIOR  
**INGENIERÍA DE  
EDIFICACIÓN**



## **Evaluación de la idoneidad de la termografía y el georradar para caracterizar materiales de construcción**

Caso de estudio: Maderas, hormigón y pétreos naturales



### **Agradecimientos**

Quiero manifestar mi agradecimiento a mis tutores, la Dra. Isabel Rodríguez Abad y el Dr. Jesús Mené Aparicio, por su orientación y apoyo durante todo el trabajo. También quiero mencionar de manera especial a mi familia, por el constante ánimo que me han dedicado en este tiempo



## Resumen

En la actualidad las técnicas no destructivas son usadas en diferentes campos dentro de la construcción. En concreto, su aplicación en el área de caracterización materiales de construcción está proporcionando resultados muy prometedores e interesantes. Por todas estas razones, en esta investigación se evaluó el potencial de la termografía infrarroja y georradar para la evaluación física de diferentes materiales de construcción.

Como se ha comentando en el párrafo anterior, mediante estas técnicas se pretende analizar el comportamiento de tres tipos de materiales de construcción (madera, hormigón y pétreos naturales) sometidos a diferentes ensayos, donde la densidad y la absorción de agua serán las características principales a evaluar.

La termografía infrarroja y el georradar son técnicas no destructivas y como tal no producen ningún tipo de daño en el momento de inspeccionar los materiales. La termografía capta la radiación electromagnética emitida por una superficie, que es transformada inicialmente en una señal eléctrica y posteriormente en una imagen digital (termograma). Por otro lado, el georradar (Ground Penetrating Radar, GPR), se basa en la propagación de ondas electromagnéticas. En este caso, una antena situada sobre la superficie de un material transmite una onda que se propaga hacia el interior de éste, las ondas sufren una reflexión en las interfaces donde existe un contraste dieléctrico y estas reflexiones son registradas en el propio equipo.

Las características físicas evaluadas en este trabajo son la densidad y la capacidad de absorción de agua. La densidad expresa la relación entre la cantidad de material y el volumen. La densidad proporciona información de la condición material y está estrechamente relacionada con otras propiedades físicas y mecánicas. Además, las patologías en muchos materiales de construcción son causadas por la pérdida de densidad, lo que lleva a un deterioro del material que podría causar la pérdida de su comportamiento estructural fiable. Por lo tanto, para ser capaz de evaluar la densidad y su variación es de gran importancia cuando se analizan los materiales de construcción. La absorción de agua, por otra parte, se define como la capacidad de un material de absorber un fluido a presión atmosférica, se determina mediante el coeficiente de absorción y también influye en el comportamiento físico-mecánico del material.

Por todo lo anterior, en primer lugar en este trabajo se realizó un estudio sobre los fundamentos teóricos de la termografía infrarroja y el georradar. Dentro de los aspectos teóricos se hizo una revisión sobre los principios matemáticos en los que se basa cada método. Después se revisaron cuales son las características más relevantes de los equipos y cuáles son las variables que van a afectar de forma determinante en la obtención de los registros.

La segunda parte del trabajo incluye el diseño experimental y los resultados e interpretación de los ensayos realizados. Los ensayos realizados son los siguientes:

- Caracterización de los materiales
- Análisis y su variación de densidad
- Absorción y evaporación de agua

## Summary

Currently non-destructive techniques are used in different fields within the construction. In particular, its application in the area of building materials characterization is providing very promising and interesting results. For all these reasons, this research is focused on the analysis of the potential of infrared thermography and GPR for physical evaluation of different construction materials.

As commented in the previous paragraph, the behavior of three types of construction materials (wood, concrete and natural stone) will be analysed by these techniques, where the density and water absorption are the main features to be estimated.

Infrared thermography and GPR are non-destructive techniques that do not produce any damage to the material under study. Thermography captures the electromagnetic radiation emitted by a surface, which is initially transformed into an electrical signal and then into a digital image (thermogram). Furthermore, the GPR (Ground Penetrating Radar, GPR) is based on the propagation of electromagnetic waves. An antenna located on the surface of a material transmits a wave that propagates toward the interior of the material. The waves undergo reflection in the interfaces where a dielectric contrast occurs these reflections are recorded by the central unit.

The principal characteristics analysed in this work are density and the absorption capability of materials. Density provides information of the material condition and is closely related to other physical and mechanical properties. In addition, the pathologies in many building materials are caused by the loss of density, which leads to deterioration of material that could cause loss of reliable structural behavior. Therefore, to be able to assess the density and its variation is of great importance when building materials are analyzed. The water absorption is defined as the ability of a material to absorb a fluid under atmospheric pressure. It will be defined by the absorption coefficient and also influences the mechanical behavior.

For all these reasons, a study of the theoretical concepts of infrared thermography and GPR was performed. Within the theoretical aspects, a review of mathematical principles in which every method is based, is detailed after that, we reviewed what are the most important characteristics of the equipment and which variables will affect decisively in obtaining the records.

The second part of the work includes the design and experimental results and interpretation of the results of the tests performed. The tests performed are:

- Characterization of materials
- Analysis and density variation
- Absorption and water evaporation

## ÍNDICE

RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	6
<b>CAPÍTULO I. Introducción.....</b>	<b>13</b>
1.1. Objetivos.....	15
1.2. Resumen del contenido.....	16
1.3. Introducción a los ensayos no destructivos.....	17
<b>CAPÍTULO II. Descripción de las técnicas.....</b>	<b>19</b>
2.1. Fundamento de la termografía.....	21
2.1.1. Introducción a la termografía infrarroja.....	21
2.1.2. Métodos de transmisión de calor.....	23
2.1.3. Fundamento teórico de la termografía.....	25
2.1.4. La cámara termográfica.....	28
2.1.5. La imagen termográfica.....	29
2.1.6. Método de adquisición de registros termográficos.....	30
2.1.7. Aplicación de la termografía en edificación.....	31
2.1.8. Situación actual de la aplicación de la termografía en la caracterización de materiales.....	33
2.2. Fundamento de la técnica del GPR.....	34
2.2.1. Fundamentos teóricos del georradar.....	34
2.2.2. Parámetros electromagnéticos de un medio.....	36
2.2.3. Teoría de propagación de ondas electromagnéticas.....	38
2.2.4. Localización de anomalías o determinación de espesores.....	40
2.2.5. Instrumentación del georradar.....	41
2.2.6. Métodos de adquisición de registros.....	44
2.2.7. La imagen: radargrama.....	45
2.2.8. Resolución del georradar.....	48
2.1.9. Situación actual de la aplicación de la técnica del georradar en la caracterización de materiales de construcción.....	50

<b>CAPÍTULO III. Diseño experimental</b> .....	51
3.1. Materiales estudiados.....	53
3.1.1. Madera.....	53
3.1.2. Hormigón.....	56
3.1.3. Pétreos naturales.....	57
3.2. Instrumentación.....	62
3.2.1. Equipo de termografía.....	62
3.2.2. Equipo de georradar.....	64
3.2.3. Otros equipos.....	66
3.3. Estudios preliminares.....	68
3.3.1. Determinación del coeficiente de absorción de la Caliza ceniza.....	68
3.3.2. Determinación del coeficiente de absorción de un lote variado de pétreo Natural.....	71
3.4. Descripción de los ensayos.....	75
3.4.1. Determinación de los parámetros característicos de la técnica del georradar y de Infrarrojos para cada material a estudio: emisividad y cte. dieléctrica.....	75
3.4.2. Análisis y variación de densidad.....	79
3.4.3. Absorción y evaporación de agua.....	81
<b>CAPÍTULO IV. Resultados e interpretación</b> .....	83
4.1. Procesado preliminar de imágenes termográficas.....	85
4.2. Procesado preliminar de registros del georradar.....	88
4.3. Caracterización de materiales.....	90
4.3.1. Termografía: emisividad.....	90
4.3.2. Georradar: constante dieléctrica.....	93
4.4. Análisis y variación de densidad.....	97
4.4.1. Termografía.....	97
4.4.2. Georradar.....	103
4.5. Absorción y evaporación de agua.....	109
4.5.1. Termografía.....	109
4.5.2. Georradar.....	116
<b>CAPÍTULO V. Conclusiones</b> .....	127
<b>CAPÍTULO VI. Referencias bibliográficas</b> .....	131
<b>ANEXO 1. Registros completos: constante dieléctrica</b> .....	140
<b>ANEXO 2-3. Registros completos: análisis y variación de densidad</b> .....	143
<b>ANEXO 4-5. Registros completos: absorción y evaporación de agua</b> .....	156
<b>ANEXO 6. Abstract from COINVEDI</b> .....	164

## ÍNDICE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Cámara termográfica.....	28
<b>Figura 2.2.</b> Nivel y campo.....	28
<b>Figura 2.3.</b> Termograma e imagen visual de infiltración de aire.....	29
<b>Figura 2.4.</b> Propagación de una onda electromagnética.....	34
<b>Figura 2.5.</b> Parámetros de onda.....	35
<b>Figura 2.6.</b> Variación de la constante dieléctrica del cemento con el aumento del contenido de agua.....	37
<b>Figura 2.7.</b> Ley de reflexión. Ángulos que forman el rayo incidente y el reflejado con la normal.....	39
<b>Figura 2.8.</b> Reflexión de parte de la onda debido al contraste de impedancias dieléctricas.....	39
<b>Figura 2.9.</b> Esquema típico de un sistema de georradar.....	41
<b>Figura 2.10.</b> Unidades de control de diferentes equipos de georradar de la marca GSSI; (a) y (b) Unidad SIR 10H de la empresa GSSI con diferentes sistemas de visualización, y (c) Unidad SIR 3000 de GSSI con equipo de visualización integrado.....	41
<b>Figura 2.11.</b> Imagen cabecera programa radan e imagen de onda registrada.....	45
<b>Figura 2.12.</b> Registro estático con antena de 2000 MHz sobre muestra de madera y trazas de color del radagrama asociado .....	47
<b>Figura 2.13.</b> Registro de una señal generado por radan.....	47
<b>Figura 2.14.</b> (a) Se detectan separadamente las reflexiones producidas por dos discontinuidades electromagnéticas consecutivas; (b) No se detectan separadamente (Proyecto Final de Máster de Joan Santamaría Carracedo).....	48
<b>Figura 2.15.</b> Espesor mínimo detectable de un material para antenas de 1,6 GHz y 2,6 GHz [4].....	49
<b>Figura 3.1.</b> Lote de maderas de diferentes especies y densidades.....	53
<b>Figura 3.2.</b> (a) Balsa. (b) Maple Blando. (c) Silvestre. (d) Cerejeira. (e) Nigra. (f) Talí. (g) Elondo. (h) Eucalipto.....	55
<b>Figura 3.3.</b> (a)Lote de probetas de hormigón (b) Lote de probetas de hormigón cortadas.....	56
<b>Figura 3.4.</b> Pétreos naturales estudiados.....	58
<b>Figura 3.5.</b> (a) Golden Shell. (b) Amarillo Fósil. (c) Almorquí. (d) TeakSand. (e) Niwala. (f) Arcoiris. (g) Rosa Villamonte. (h) Dorada Villamonte. (i) Bateig. (j) Capri. (k) Lumaquela Rosa. (l) Cenia .....	61
<b>Figura 3.6.</b> Detalle de la cámara de infrarrojos i5.....	62
<b>Figura 3.7.</b> Unidad central y antena palm 2Ghz.....	64
<b>Figura 3.8.</b> (a)Balanza de precisión Mettler Toledo. (b)Estufa de secado “Conterm”. (c) Máquina de ensayo para materiales de alta resistencia a la compresión. (d) Medidor de climatización multifuncional Testo 435. (e) Sonda IAQ. (f) Registrador de datos de temperatura Testo 175 T2.....	67

<b>Figura 3.9.</b> (a) Probeta sumergida 3 cm. (b) Probeta sumergida 2 cm.....	69
<b>Figura 3.10.</b> Gráfica coeficiente de absorción.....	70
<b>Figura 3.11.</b> Gráfica coeficiente de absorción de todos los pétreos naturales.....	74
<b>Figura 3.12.</b> (a)C Caja de XPS. (b) Detalle sonda termopar.....	75
<b>Figura 3.13.</b> Dispositivo de medida de la emisividad.....	76
<b>Figura 3.14.</b> (a) Esquema de la trayectoria de propagación de las ondas; (b) Traza característica registrada con un equipo de georradar con una antena de 2 GHz.....	77
<b>Figura 3.15.</b> (a) Placa de acero. (b) Medición probeta de madera en tabla. (c) Medición probeta de hormigón en tabla.....	78
<b>Figura 3.16.</b> Termogramas de variación de temperatura muestra Cerejeira.....	79
<b>Figura 3.17.</b> Disposición de los equipos análisis de densidad.....	79
<b>Figura 3.18.</b> (a) Disposición del equipo de georradar para análisis de densidad (b) Análisis de densidad mediante georradar en madera seca.....	80
<b>Figura 3.19.</b> Lote de hormigón inmerso en agua .....	81
<b>Figura 3.20.</b> (a) Obtención de registros en madera húmedo (b) Obtención de registros en hormigón húmedo.....	81
<b>Figura 4.1.</b> Imagen termográfica con dimensiones 80 x 80 pixeles .....	85
<b>Figura 4.2.</b> (a) Tabla de dimensiones 80 x 80 valores proveniente del archivo “csv”. (b) Delimitación de imagen termográfica mediante el programa informático <i>Autocad</i> .....	86
<b>Figura 4.3.</b> Identificación de vértices en registro “csv” mediante el programa <i>Microsoft Office Excel</i> .....	87
<b>Figura 4.4.</b> (a) Interfaz programa <i>Radan-NT</i> . (b) Ejemplo de onda registrada .....	88
<b>Figura 4.5.</b> (a) Onda directa y reflejada en madera. (b) Onda directa y reflejada en hormigón..	88
<b>Figura 4.6.</b> Superposición de registro obtenido de probeta sobre metal con probeta elevada..	89
<b>Figura 4.7.</b> Ajuste de la temperatura obtenida con el termopar y la cámara termográfica de la variedad <i>Cenia</i> .....	92
<b>Figura 4.8.</b> Disminución de temperatura con el tiempo de exposición en maderas.....	92
<b>Figura 4.9.</b> Disminución de temperatura con el tiempo de exposición en hormigón.....	99
<b>Figura 4.10.</b> Disminución de temperatura con el tiempo de exposición en los pétreos naturales.....	101
<b>Figura 4.11.</b> Ajuste entre densidades y velocidades de propagación.....	107
<b>Figura 4.12.</b> Gráfico tiempo-temperatura evaporación de la madera .....	111
<b>Figura 4.13.</b> Gráfico tiempo-temperatura evaporación de agua del hormigón por termografía.....	114
<b>Figura 4.14.</b> Ejemplo de una traza con onda reflejada no identificable.....	118

## ÍNDICE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b> Estructura de documentos del TFM .....	16
<b>Tabla 2.1.</b> Propiedades de los materiales. Pyakurel, 2.009 [23].....	36
<b>Tabla 2.2.</b> Bandas de frecuencia y longitudes de onda correspondientes a cada banda para la propagación en el vacío Pyakurel, 2.009 [23].....	42
<b>Tabla 3.1.</b> Nomenclatura de las distintas especies de madera empleadas a lo largo de la tesis según la norma UNE-EN 13556:2004.....	53
<b>Tabla 3.2.</b> Características básicas de las distintas especies de madera empleadas.....	55
<b>Tabla 3.3.</b> Características de las distintas probetas de hormigón.....	56
<b>Tabla 3.4.</b> Tabla resumen obtención pétreos naturales.....	58
<b>Tabla 3.5.</b> Características técnicas de la cámara de infrarrojos i5.....	63
<b>Tabla 3.6.</b> Características técnicas de la antena del equipo.....	64
<b>Tabla 3.7.</b> Características técnicas del georradar SIR 3000.....	65
<b>Tabla 3.8.</b> Resultados ensayo de absorción piedra caliza <i>Cenia</i> .....	69
<b>Tabla 3.9.</b> Resultados ensayo de absorción de las variedades: <i>Bateig Azul, Capri, Niwala</i> .....	71
<b>Tabla 3.10.</b> Resultados ensayo de absorción de las variedades: <i>Golden Shell, Teak Sand, Almorquí, Dorada Villamonte</i> .....	72
<b>Tabla 3.11.</b> Resultados ensayo de absorción de las variedades: <i>Lumaquela Rosa, Rosa Villamonte, Amarillo Fósil, Arcoiris</i> .....	73
<b>Tabla 4.1.</b> Parámetros termográficos registrados de la variedad <i>Cenia</i> .....	90
<b>Tabla 4.2.</b> Valores de emisividad de la variedad <i>Cenia</i> .....	91
<b>Tabla 4.3.</b> Constantes dieléctricas del lote de maderas .....	93
<b>Tabla 4.4.</b> Constantes dieléctricas del lote de hormigón.....	96
<b>Tabla 4.5.</b> Resultados obtenidos del estudio de densidad mediante termografía en maderas..	92
<b>Tabla 4.6.</b> Resultados obtenidos del estudio de densidad mediante termografía en hormigón	100
<b>Tabla 4.7.</b> Valores del estudio de densidad mediante termografía en pétreos naturales.....	102
<b>Tabla 4.8.</b> Valores de propagación en las maderas cuando están a humedad de equilibrio higroscópico.....	103
<b>Tabla 4.9.</b> Coeficiente de absorción y densidad de lote de maderas .....	104
<b>Tabla 4.10.</b> Comportamiento anisótropo de la velocidad de propagación respecto a las fibras.....	104
<b>Tabla 4.11.</b> Comparación velocidades de propagación en madera a humedad en equilibrio higroscópico con densidad, según dirección de las fibras.. ..	105
<b>Tabla 4.12.</b> Ajuste entre la velocidad de propagación y la densidad de las maderas, considerando los máximos R1 para el cálculo .....	105
<b>Tabla 4.13.</b> Comparación de velocidades obtenidas en cm/ns, mediante georradar en hormigón 0,5 y 0,8 con humedad de equilibrio higroscópico en análisis de densidad .....	108

<b>Tabla 4.14.</b> Promedio de velocidades de propagación en cm/ns para cada máximo, en hormigón 0,5 y 0,8 con humedad de equilibrio higroscópico en análisis de densidad .....	108
<b>Tabla 4.15.</b> Valores de temperatura (°C) para cada probeta de madera durante el ensayo de evaporación.....	109
<b>Tabla 4.16.</b> Valores del estudio de absorción y evaporación de la madera .....	110
<b>Tabla 4.17.</b> Temperatura de evaporación de las maderas expresada mediante funciones exponenciales .....	111
<b>Tabla 4.18.</b> Valores de temperatura (°C) para cada probeta de hormigón durante el ensayo de evaporación .....	113
<b>Tabla 4.19.</b> Valores del estudio de absorción y evaporación del hormigón.....	113
<b>Tabla 4.20.</b> Valores promediados para cada lote de hormigón estudiado por medio de termografía la evaporación del agua .....	114
<b>Tabla 4.21.</b> Evaporación del hormigón expresada mediante funciones matemáticas.....	115
<b>Tabla 4.22.</b> Valores de velocidades de propagación (cm/ns) maderas seca-húmedas para el estudio de absorción- evaporación con georradar.....	116
<b>Tabla 4.23.</b> Valor absoluto de anisotropía en madera seca-húmeda con georradar .....	108
<b>Tabla 4.24.</b> Diferencia entre valores absolutos de anisotropía entre madera en condiciones de humedad de equilibrio higroscópico y húmeda .....	120
<b>Tabla 4.25.</b> Efecto de absorción de agua en la madera con las fibras paralelas y perpendiculares.....	121
<b>Tabla 4.26.</b> Velocidades de propagación obtenidas mediante georradar para hormigón con relación A/C de 0,5 y 0,8.....	123
<b>Tabla 4.27.</b> Diferencia de velocidades en absorción- evaporación mediante georradar en hormigón 0,5 y 0,8.....	124
<b>Tabla 4.28.</b> Comparación de velocidades en absorción- evaporación mediante georradar en el hormigón .....	125

## **CAPÍTULO I. Introducción**

Objetivos

Resumen del contenido

Introducción a los ensayos no destructivos



## CAPÍTULO I. Introducción

En este epígrafe se establecen los objetivos principales del trabajo y se realiza una introducción a los ensayos no destructivos.

### 1.1. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es analizar la capacidad de dos técnicas de ensayos no destructivos: termografía de infrarrojos y la técnica del georradar, para caracterizar diferentes materiales de construcción.

Para la consecución de este objetivo se buscaron diferentes materiales de construcción. Se decide usar tres tipos de materiales diferentes, madera, hormigón y pétreos naturales. Para cada material se obtienen diferentes tipos de especies con diferentes características entre ellas. Los 3 lotes se someten a 3 estudios con ambas técnicas no destructivas: caracterización de materiales, análisis de densidad y absorción-evaporación de agua.

Por todo ello los objetivos particulares del trabajo fueron:

- Avanzar en el manejo de una cámara termográfica por medio del diseño completo de un programa experimental completo
- Analizar las imágenes termográficas para evaluar si son útiles con respecto a la búsqueda de relaciones con la densidad y la absorción
- Mejorar el sistema de procesado de los registros obtenidos por la cámara infrarroja mediante un método sencillo y fiable
- Profundizar en el conocimiento de la técnica del georradar por medio del diseño de un programa experimental completo
- Analizar los parámetros de onda registrados para evaluar cuáles de ellos proporcionan resultados más fiables con respecto a densidad y absorción de agua: velocidades de propagación y amplitudes
- Calcular los parámetros dieléctricos característicos (emisividad y constante dieléctrica) y analizar cuáles de ellos son los más adecuados para el caso de estudio
- Comparar las técnicas empleadas y comprobar cuál de ellas es la más adecuada para cada ensayo

## 1.2. Resumen del contenido

A continuación se presenta un esquema de la estructura de esta investigación, compuesta de tres partes y 6 capítulos (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Estructura de documentos del TFM

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL DE MÁSTER		
Parte I	Capítulo I	Introducción
	Capítulo II	Descripción de las técnicas Fundamentos de la termografía Fundamentos de la técnica del GPR
Parte II	Capítulo III	Diseño experimental Materiales e Instrumentos Descripción de los ensayos
	Capítulo IV	Resultados e interpretación
Parte III	Capítulo V	Conclusiones
	Capítulo VI	Referencias bibliográficas

La primera parte contiene el capítulo I y el capítulo II, que incluye la introducción, los objetivos y la presentación de los ensayos no destructivos. En el capítulo II se definen los fundamentos físicos de las técnicas usadas: termografía y georradar.

La segunda parte se constituye de los capítulos III y IV. En el capítulo III, se muestran los materiales a estudiar, así como, los instrumentos usados. También se describen los ensayos realizados en este estudio. En el capítulo IV se recogen los métodos desarrollados para el procesado de datos y los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados y el análisis de los mismos.

La tercera parte consta de dos capítulos. En el capítulo V se exponen las conclusiones relacionadas con los objetivos iniciales. En el capítulo VI se incluyó la bibliografía utilizada en el trabajo final de máster.

Por último decir que parte del presente trabajo será presentado en el *III International Congress on Construction and Building Research* con el siguiente título *“Preliminary building materials characterization by means of infrared thermography”*, los autores son *Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., Mené-Aparicio J., Zahonero J.* Toda la información se recoge en el **anexo 6**.

### 1.3. Introducción a los ensayos no destructivos

Un Ensayo No Destructivo (END) consiste en la aplicación de ciertas pruebas sobre un objeto, para verificar su calidad sin modificar sus propiedades y estado original. Estas pruebas, permitirán detectar y evaluar discontinuidades o propiedades de los materiales sin modificar sus condiciones de uso o aptitud para el servicio.

Los END están basados en principios físicos y de su aplicación se obtienen los resultados necesarios para establecer un diagnóstico del estado o de la calidad del objeto inspeccionado. Los resultados no se muestran en forma absoluta, si no que deben ser interpretados a partir de las indicaciones propias de cada método.

En la edificación se puede saber mucho de un elemento constructivo a través de estos métodos, como estimar su resistencia, humedad, estado de deterioro, puntos de fugas, puentes acústicos o térmicos, localizar tuberías de agua, gas, eléctricas y diferentes tipos de aplicaciones que van apareciendo día a día.

Una de las técnicas de inspección no destructiva que es de interés conocer es la basada en la tecnología con infrarrojos (termografía de infrarrojos), que permite captar el flujo de energía emitido por una superficie y transformarlo inicialmente en una señal eléctrica y posteriormente en una imagen digital. El resultado de la transformación de la radiación infrarroja en imagen se conoce como termograma y se trabaja con un software que permite obtener la temperatura.

Otra técnica de inspección es la denominada técnica del Georradar, (Ground Penetrating Radar, GPR), se basa en la propagación de ondas electromagnéticas. Una antena situada sobre la superficie de un material transmite una onda que se propaga hacia el interior de éste. Las ondas sufren una reflexión en las interfases donde existe un contraste dieléctrico y estas reflexiones son registradas, procesadas y analizadas con el objeto de caracterizar y/o estudiar el medio por el que se propagan. Las bases teóricas de la técnica del georradar se encuentran expuestas extensamente en varias tesis doctorales españolas como [1] [2] [3] y [4]. Su aplicación en la inspección y diagnóstico de estructuras de edificación y materiales de construcción, como por ejemplo el hormigón, es cada vez más frecuente.

A continuación se exponen los objetivos principales y aplicaciones de los END:

#### 1. O. Técnicos

- Asegurar Calidad y Confiabilidad
- Contribuir al desarrollo de materiales
- Controlar los procesos de fabricación
- Mantener uniformidad de productos
- Realizar seguimientos predictivos

#### 2. O. De seguridad

- Prevenir accidentes

#### 3. O. Económicos

- Producir beneficios

### Áreas de aplicación

- Control de Calidad (detección de discontinuidades y defectos)
- Caracterización de materiales
- Mantenimiento de instalaciones y equipos
- Establecer condiciones de trabajo en estructuras y componentes
- Establecer condiciones de vida residual de equipos
- Respaldo para el estudio y preservación de patrimonios culturales

### Condiciones de aplicación

Los métodos no son de aplicación general sino específica

- No existe ningún método que pueda abarcar todo el espectro de aplicaciones
- Su selección depende de la información que se necesite con respecto al tipo y estado del material
- Las propiedades de los materiales y su estado limitan la aplicación de los métodos

## **CAPÍTULO II. Descripción de las técnicas**

Fundamentos de la termografía

Fundamentos de la técnica del GPR



## CAPÍTULO II. Descripción y técnicas

En este capítulo se exponen los principios y teorías fundamentales sobre las técnicas usadas, así como los elementos necesarios para la adquisición de registros y su posterior almacenamiento y procesado.

### 2.1. Fundamentos de la termografía

En este apartado se introducen los principales conceptos básicos de la termografía, como son el fundamento teórico de la radiación electromagnética en el rango de los infrarrojos, los principios básicos de la cámara termográfica y la imagen que se genera.

#### 2.1.1. Introducción a la termografía

En primer lugar, se revisó la información relacionada con la historia y los científicos que han aportado en su desarrollo con la intención de conocer de primera mano los orígenes y la evolución de la técnica, además, de los conceptos físicos para la comprensión de los capítulos posteriores. También se realizó una búsqueda de las investigaciones más recientes de aplicación de esta técnica en el área de la edificación, especialmente en termografía aplicada en los materiales de construcción [5] [6] [7] [8] [9] y [10].

La termografía infrarroja es la ciencia de adquisición y análisis de la información térmica obtenida mediante los dispositivos de adquisición de imágenes térmicas a distancia. Termografía significa “escritura con calor”, igual que fotografía significa “escritura con luz”. La imagen generada se denomina termograma o imagen térmica.

La termografía es una técnica que permite conocer la temperatura de las superficies por medio del registro de la radiación de ondas electromagnéticas.

Se basa en el principio de que cualquier cuerpo cuya temperatura absoluta sea mayor que cero (-273.15 °C) emite radiación electromagnética. La radiación de calor es detectada electrónicamente y se representan sus valores diferenciales por medio de escalas de color.

La termografía, es el proceso de producir una imagen visible en dos dimensiones de una escena, en virtud de sus diferencias en la radiación electromagnética emitida, siendo detectadas por un aparato receptor. Todo cuerpo a temperatura superior a cero grados (-273,15°C) emite radiación electromagnética y ésta es reconocida por la cámara. Éstas registran la diferencia de radiación emitida en la zona del espectro que corresponde al infrarrojo procesándola para la obtención de una imagen digital final.

En otras palabras, nosotros mismos experimentamos este tipo de radiación constantemente. El calor que sentimos como consecuencia de la luz del sol, el fuego, un radiador es radiación electromagnética en la banda del infrarrojo. Una persona, a temperatura normal, emite radiación a una longitud de onda de aproximadamente a 10  $\mu\text{m}$ .

El principio de la termografía tiene relación con el fenómeno de la radiación electromagnética. Estas ondas se propagan a la velocidad de la luz por el vacío, definiéndose ésta a partir de la longitud de onda y la frecuencia de oscilación o periodo de propagación.

El espectro electromagnético se divide en bandas de frecuencia. Todas estas bandas se encuentran regidas por las mismas leyes de la física y la única diferencia es su longitud de onda.

La banda espectral del infrarrojo, con la cual trabaja la técnica de la termografía, se divide en cuatro bandas, ubicadas entre la radiación del espectro de luz visible y las ondas microondas:

- Infrarrojo cercana de 0,75 – 3  $\mu\text{m}$
- Infrarrojo media de 3 – 6  $\mu\text{m}$
- Infrarrojo lejana de 6 – 15  $\mu\text{m}$
- Infrarrojo extrema de 15 – 100  $\mu\text{m}$

Se considera radiación térmica la parte del espectro electromagnético que empieza en algún punto dentro de la banda ultravioleta, y continúa en los rangos visible e infrarrojo. De nuevo, determinar las cifras exactas donde comienza y termina la radiación térmica es difícil, y realmente no es necesario.

### 2.1.2. Métodos de transmisión de calor

Ya sabemos que el calor se transmite entre los objetos con distinta temperatura, se produce un flujo de calor. Hay tres maneras de transmisión de calor:

- Conducción
- Convección
- Evaporación / condensación
- Radiación

Cada uno de estos tres métodos puede describirse como estable o inestable. Durante una transferencia en estado estable, será constante la velocidad de la transferencia de calor y no cambiará de sentido, ya podéis imaginar que no existe tal flujo de calor estable ideal, en la práctica los flujos son inestables y presentan ciertas fluctuaciones.

#### 1. Conducción

Es un mecanismo de transferencia de energía térmica entre dos sistemas por contacto directo de sus partículas sin flujo neto de materia y que tiende a igualar la temperatura dentro de un cuerpo y entre diferentes cuerpos en contacto por medio de ondas.

Para determinar el calor transmitido por conducción, se necesita conocer qué factores intervienen y cómo afectan, es decir:

$$P (W) = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{k \cdot A (T1 - T2)}{L} \quad (\text{ec. 2.1})$$

dónde:

- $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$  -> calor transmitido por unidad de tiempo
- k: (W/m·K) -> conductividad térmica del material
- A: (m<sup>2</sup>) -> área de la sección transversal
- T1 – T2: (K) -> diferencia de temperatura
- L: (m) -> longitud de la trayectoria de conducción

El valor del flujo de calor (en condiciones estacionarias) es directamente proporcional a la conductividad térmica del objeto, a la sección transversal a través de la que fluye el calor, y a la diferencia de temperatura entre los puntos del cuerpo bajo estudio. Es también inversamente proporcional a la longitud, o distancia entre ambos puntos. La transmisión de calor por conducción (P) se ve afectada por 4 factores: conductividad térmica del material, área de sección transversal, diferencia de temperatura y longitud de trayectoria de conducción.

Si se define la conductividad térmica (k), es la capacidad de un material para transferir calor. La conducción térmica es el fenómeno por el cual el calor se transporta de regiones de alta temperatura a regiones de baja temperatura dentro de un mismo material o entre diferentes cuerpos. Las unidades de conductividad térmica en el Sistema Internacional son W/(m·K), aunque también se expresa como kcal/ (h·m·°C), siendo la equivalencia: 1 W/(m·K) = 0,86 kcal/(h·m·°C). Como ejemplo de conductores (metales por ejemplo) y de materiales aislantes (espumas por ejemplo).

## 2. Convección

Se trata de un modo de transmisión de calor basado en el transporte mediante corrientes de masa circulantes dentro de un fluido (líquido o gas). La convección tiene lugar dentro del fluido, ya que la transmisión de calor que tiene lugar entre el fluido y la superficie que lo contiene, o en la superficie de fluidos que no se mezclan, corresponde a la conducción (o también puede deberse a radiación). En la zona cercana al sólido existe una fina capa de fluido estacionario (capa límite) donde la transmisión de calor dentro del fluido tiene lugar exclusivamente por conducción.

## 3. Radiación

La transmisión de calor por radiación se lleva a cabo por emisión y absorción de radiación térmica. Esta energía se transfiere a la velocidad de la luz, de ahí que la termografía sea tan útil detectando la radiación en continuo. Todos los cuerpos emiten y absorben radiación térmica al mismo tiempo. El calor neto transmitido será la diferencia entre lo que se ha absorbido y lo que se ha emitido.

### 2.1.3. Fundamento teórico de la termografía

Comenzamos por definir unos conceptos básicos para entender los parámetros que se estudian con la termografía:

1. Radiancia: Describe la cantidad de radiación que atraviesa o es emitida por una superficie en una dirección o ángulo específico. En sistema internacional se mide en vatios por steradian por metro cuadrado ( $W/sr \times m^2$ ).
2. Irradiancia: La potencia de la radiación electromagnética por unidad de superficie. En sistema internacional se mide en vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ).
3. Cuerpo negro: Un cuerpo negro es un cuerpo físico ideal que es capaz de absorber toda la energía electromagnética incidente de cualquier longitud de onda. También tendrá la propiedad de remitir toda esta energía hasta que el equilibrio termodinámico se haya restablecido y por esto se denomina radiador perfecto.

La ley de Planck describe la distribución espectral de la radiación de un cuerpo negro, es decir, define la distribución de la energía emitida en función de una longitud de onda a una temperatura determinada. En la ecuación 2.2 se define el término irradiancia espectral, que es la potencia irradiada por un cuerpo negro por unidad de superficie.

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \times 10^{-6} \left( \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2}, \mu\text{m} \right) \quad (\text{ec. 2.2})$$

dónde:

$W_{\lambda b}$  = Irradiancia radiante espectral del cuerpo negro con una longitud de onda de  $\lambda$

$c$  = Velocidad de la luz,  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

$h$  = Constante de Planck,  $6,6 \times 10^{-34} \text{ J/s}$

$k$  = Constante de Boltzmann,  $1,4 \times 10^{-23} \text{ J/k}$

$T$  = Temperatura absoluta (K) de un cuerpo negro

$\lambda$  = Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )

Se utiliza el factor  $10^{-6}$ , dado que la irradiancia espectral de las curvas se expresa en  $W/m^2$ , introduciendo los valores de longitud de onda en  $\mu\text{m}$ .

De hecho si se particulariza el valor de la temperatura para una temperatura ambiental de 22 °C se comprueba como la máxima irradiancia espectral se localiza en el entorno de las longitudes de onda del infrarrojo lejano del espectro. Es por ello que las cámaras termográficas emplean detectores centrados en este entorno de longitud de onda, ya que es donde mayor emisión de radiación van a captar.

Posteriormente, Wilhelm Wien expresó matemáticamente la relación entre longitud de onda a la que se obtiene la máxima emisión de energía y temperatura. Ésta ecuación nos permite establecer la relación entre la variación de colores y de temperatura de un radiante térmico. Esta relación se obtiene a través de la derivada de la ley de *Planck* (ec. 3).

$$\lambda_{max} = 2897 / T \mu m \quad (\text{ec. 2.3})$$

Según esta ley de Wien, los máximos de la concentración de radiación se desplazan hacia ondas más cortas conforme aumentamos la temperatura. Sólo en temperaturas muy elevadas la radiación no se concentrará en intervalos de radiación infrarroja. De hecho a temperaturas mayores a 500°C, la radiación electromagnética comienza a ser visible para el ojo humano.

Además, a partir de la ley de Stefan-Boltzmann se obtiene, al integrar la fórmula de *Planck* desde  $\lambda = 0$  hasta  $\lambda = \infty$ , la irradiancia espectral para cualquier longitud de onda  $W_b$  de un cuerpo negro (ec. 2.4):

$$W_b = \sigma T^4 \quad (\text{ec. 2.4})$$

Esto significa que la irradiancia intrínseca de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta ( $W/m^2$ ).

#### La interacción de la radiación con los cuerpos

Los objetos en la realidad no responden a la ley de cuerpos negros, señalada por *Planck*, aunque si se aproximan bastante a ese comportamiento, la diferencia de comportamiento vendrá definida por la llamada emisividad.

La emisividad es la relación entre la radiación que emite un cuerpo real y la emitida por un cuerpo negro, para una misma temperatura y longitud de onda.

Traducido a una fórmula se tiene:

$$\epsilon = \frac{W_{CR}}{W_{CN}} \quad (\text{ec. 2.5})$$

O dicho de otra manera,  $W_{CN} = W_{CR} / \epsilon$ , y este es el cálculo que hace la cámara termográfica. Ésta conoce la radiación que recibe del objeto, si se introduce la emisividad, se divide y es como si la radiación la hubiera emitido un cuerpo negro y su temperatura fuera real. Se ha transformado un cuerpo real en un cuerpo negro en el que se puede leer la temperatura.

Anteriormente, se habló de la Ley de *Stefan-Bofman* y de cómo a partir de la temperatura absoluta (a la cuarta potencia) se podía determinar la intensidad de radiación de un cuerpo negro. Pero no trabajamos con cuerpos negros sino con cuerpos reales y éstos emiten menos radiación para una misma temperatura. Aquí es donde entra la emisividad.

$$W_{CR} = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{ec. 2.6})$$

Los factores que afectan a la emisividad son:

1. El material del cuerpo: distintos materiales poseen distintas emisividades. Incluso un mismo material puede poseer distinta emisividad, esto se encuentra con frecuencia en materiales expuestos a determinadas condiciones ambientales, de manera que un material nuevo tiene una emisividad distinta pasados algunos años. Descubriremos que es más fácil trabajar con no metales que con metales. Los primeros suelen tener emisividades mucho más elevadas y ésta perdura mucho más en el tiempo, a diferencia de un metal que rápidamente sufre oxidación y cambia su emisividad completamente (hasta 0,95).
2. Su geometría: si es redondo, agujereado, liso, alargado, etc., influirá sobre su emisividad.
3. Su estructura superficial: las superficies lisas, pulidas, brillantes reflejan más que las rugosas. Sobre una superficie rugosa se obtendrá un mejor valor de la temperatura pues su emisividad es mayor.
4. El ángulo de la imagen: si nos colocamos perpendiculares al objetivo, nos reflejaremos sobre él, si nos esquinamos mucho, serán otros objetos los que se reflejen en la imagen. Se debe escoger un término medio en la medida de lo posible
5. La temperatura: por suerte esto sólo ocurrirá a temperaturas muy altas y en los metales. Algunos metales y a temperaturas cercanas a los 1.000 °C pueden incrementar su emisividad.
6. La longitud de onda: una misma medida sobre un objeto, puede ser distinta debido a que se detecta distinta emisividad. Esto ocurrirá si las cámaras que se usan trabajan en diferentes longitudes de onda. Rara vez será nuestro caso pero lo mencionamos.
7. El color del objeto no afecta a la emisividad, es algo del espectro visual, no del infrarrojo, las cámaras no saben de qué color son los objetos que enfocan, el color visual no afecta a la emisividad. Sí es cierto que los colores absorben luz visible de una u otra forma, la radiación solar es más alta en la franja visual del espectro que en la del infrarrojo, así algunos colores absorben más radiación que otros y por tanto se calientan más (e irradian más a nuestra cámara), pero no tiene que ver con la emisividad.

### 2.1.4. La cámara termográfica

Una cámara termográfica registra la intensidad de la radiación en la zona infrarroja del espectro electromagnético y la convierte en una imagen visible.

La energía de infrarrojos (A) que irradia un objeto se enfoca con el sistema óptico (B) sobre un detector de infrarrojos (C). El detector envía los datos al sensor electrónico (D) para procesar la imagen. Y el sensor traduce los datos en una imagen (E), compatible con el visor y visualizable en un monitor de vídeo estándar o una pantalla LCD.

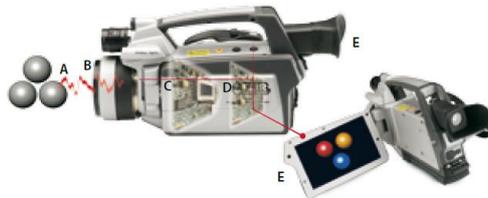


Figura 2.1. Cámara termográfica [82]

La termografía de infrarrojos es el arte de transformar una imagen de infrarrojos en una imagen radiométrica que permita leer los valores de temperatura. Por tanto, cada píxel de la imagen radiométrica es, de hecho, una medición de temperatura. Para ello, se incorporan complejos algoritmos a la cámara de infrarrojos.

La imagen se controla seleccionando los siguientes parámetros:

1. Control de la imagen. Los nombres y la forma en que se utilizan los controles puede ser diferente, pero los principios de utilización siempre son los mismos.
2. Rango de Temperatura: El rango de temperatura es el ajuste básico. Muchos instrumentos tienen de 2 a 5 rangos de temperatura. El rango fija las temperaturas por debajo y por encima de las cuales no se puede medir. Contra menos y más anchos sean los rangos, más fácil será utilizar el instrumento.
3. Campo: es la parte del rango de temperatura que estamos utilizando. Otra forma de llamarle es “contraste térmico”. Podemos hacer el campo más ancho ó más estrecho. Muchos sistemas muestran 256 colores. Esto es por razones técnicas, y también prácticas. El ojo humano es incapaz de diferenciar más colores en la misma imagen.

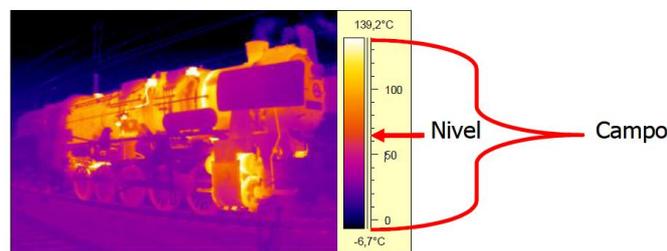


Figura 2.2. Nivel y campo [82]

4. Nivel: es el punto medio del campo. Otra forma de entender el nivel es como el “brillo térmico”. Desde hace unos diez años, los instrumentos tienen una función automática que nos da un ajuste aproximado de la imagen, con que nos evitamos tener que estar demasiado tiempo buscándolo. Estas funciones no son normalmente suficientes si desea analizar la imagen adecuadamente, así que debemos ser capaces de utilizar los controles de nivel y campo.

### 2.1.5. La imagen termográfica

Cuando miramos una imagen térmica, obviamente utilizamos la misma referencia que para la imagen visual. Esto es algo que nuestras mentes necesitan cambiar, ya que, son imágenes muy diferentes.

¿Qué es una imagen térmica?, es una imagen de la intensidad de radiación térmica. Otro fallo muy común es suponer también que es una imagen de distribución de temperaturas, no lo es.

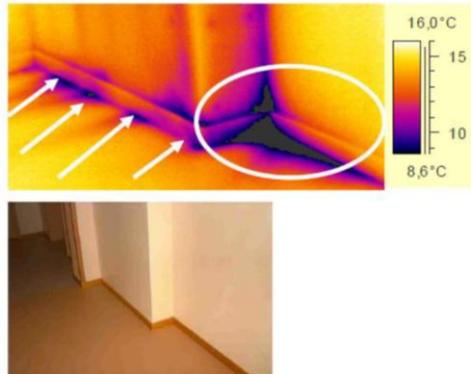


Figura 2.3. Termograma e imagen visual de infiltración de aire [82]

Aquí tenemos una imagen de un edificio, en el espectro visual y en el infrarrojo. En la imagen visual lo único que vemos es el encuentro de la pared con el suelo. En la imagen térmica, podemos ver que existen infiltraciones de aire.

Existen una serie de variables que se deben considerar importantes en el proceso de la obtención de la calidad de una imagen final:

- a) Campo de visión (Field Of View, FOV). Es el ángulo de visión que se obtiene con la lente de la cámara.
- b) Sensibilidad térmica. Es la diferencia más pequeña de temperaturas que puede detectar una cámara.
- c) Resolución IR. Corresponde al tamaño de visor de la cámara y hace referencia a la cantidad de píxeles que conforman la imagen digital obtenida.
- d) Resolución espacial (IFOV). Es el nivel de detalle que puede detectar una cámara. Está relacionado con el campo de visión y la distancia al área observada.
- e) Rango espectral. Hace referencia al tipo de longitud infrarroja que utiliza la cámara. En general se utiliza la banda infrarroja lejana (entre 7 -14  $\mu\text{m}$ ).
- f) Ajuste de la emisividad. Es la opción de la cámara termográfica en determinar la emisividad de una superficie observada. Se considera muy importante para obtener una imagen precisa.

Por otro lado, debemos destacar que el uso de un software que ayuda a procesar y mejorar la imagen infrarroja capturada, es primordial en el avance y utilización de esta técnica.

Las variedades de softwares han ido evolucionando hacia mayores prestaciones y simplificación del proceso de análisis, logrando de esta forma una mayor rapidez en la obtención de datos. Actualmente las compañías que distribuyen las cámaras termográficas, suministran sus propios softwares, entregando versiones actualizadas desde sus páginas web.

### 2.1.6. Método de adquisición de registros

A partir de la adquisición de registros térmicos se puede realizar el estudio absoluto o relativo de la temperatura del objeto, dependiendo de si se conoce o no la emisividad del mismo. Pero esto no tiene por qué ser un problema porque el valor absoluto de la temperatura no siempre es necesario conocerlo y en muchos casos podemos obtener la información necesaria a partir del estudio diferencial de temperaturas.

La forma de medición es un factor determinante en la calidad de la imagen final. Existen distintos tipos de métodos para medir un área observada. Según las tesis [9] y [11] destacan dos grandes tipos de metodología en la toma de registros, la termografía activa y la termografía pasiva.

- a) La termografía pasiva consiste en analizar un área observada de forma natural, sin intervención de fuentes de calor intencionadas o que de alguna forma alteren el resultado. En general se usa cuando el elemento tiene una temperatura diferente al ambiente, esto puede ser debido a que el cuerpo analizado es térmicamente activo o sea él mismo el que genera calor que lo distingue del entorno. En edificación se usa para detectar humedades, condensaciones, filtraciones y muchas otras.
- b) La termografía activa es la medición de un área observada, sobre la cual se aplica una fuente de energía externa, con la intención de aumentar su contraste térmico de los elementos que componen el área de estudio. Este método es muy usado debido a que permite resaltar de forma clara las diferencias térmicas, mejorando la calidad de la imagen recibida. Este requerimiento suele ser necesario en aquellos casos en los que los elementos a estudio se encuentran en equilibrio con el entorno.

### 2.1.7. Aplicación de la termografía en edificación

Si tenemos presente la importancia de la temperatura y la gran versatilidad y utilidad de la termografía, no nos sorprenderá la gran diversidad de aplicaciones establecidas actualmente.

Existen tres razones fundamentales que hacen de la termografía infrarroja una herramienta de gran utilidad:

- Es sin contacto. La medida se realiza de forma remota. Ello implica muchas ventajas, dos de ellas especialmente importantes. En primer lugar, mantiene al usuario fuera de peligro, en caso de haberlo. En segundo lugar, la termografía no es intrusiva ya que no afecta de ninguna forma al cuerpo a caracterizar. Sólo observamos la radiación que sale, que se emite aunque no se mida. Esto es una condición muy importante para muchas aplicaciones.
- Es bidimensional. Es posible la comparación directa entre áreas del mismo cuerpo: podemos medir la temperatura en dos puntos o en cien dentro de la misma imagen, y compararlas. Una imagen es perfecta para hacerse la idea inicial de una situación. Con una imagen se determina enseguida dónde están los problemas, o qué puntos tienen un especial interés. De antemano no conocemos dónde se debe realizar la medida; se puede decidir a partir de la inspección de la imagen.
- Es una medida actual, en tiempo real, es decir, se puede medir mientras se visualiza el objeto en la pantalla de la cámara. Si el objeto cambia, la cámara muestra el cambio inmediatamente, sin inercias ni actualizaciones.
- Es multidisciplinar, las imágenes no solo hablan de temperatura, hablan de patrones térmicos, comportamientos, anomalías, etc.

Después de todo lo explicado anteriormente se despliega un abanico impresionante de aplicaciones para la termografía. En concreto éstas son algunas de las más comunes aplicaciones de la termografía infrarroja.

- Diagnóstico en la edificación: Se trata de uno de los campos más amplios y con más proyección quizás. A pesar de la grave crisis que atraviesa, se están dedicando recursos a la rehabilitación de edificios, el control de calidad en las viviendas acabadas, las pequeñas y grandes reformas y un largo etcétera.
- Patrimonio histórico-artístico: Un ejemplo muy interesante es la localización de antiguos cerramientos tapados en reformas sucesivas llevadas a cabo en un edificio histórico. Al igual que otras técnicas (rayos X) también se está utilizando ahora para rehabilitar cuadros de importante valor histórico.
- Electricidad: Tanto en alta tensión como en baja tensión, su desarrollo en este campo ha sido enorme ya que es quizás donde primero comenzó a aplicarse. Sobretensiones o diferencias de temperatura entre fases, siempre sin manipular los contactos en tensión, evitando así el potencial peligro del usuario y evitando parar el proceso.
- Detección de humedades: Se localizan las zonas húmedas debido a filtraciones de agua de las cubiertas, o provenientes de fugas en la instalación, ya que, el patrón que deja el agua es siempre muy característico y pronto aprenderemos a diferenciarlo.
- Obra civil: Por ejemplo, en reparaciones de carreteras en la que se puede observar con la termografía las partes dañadas que van a ser cubiertas por el nuevo asfalto, que tendrá un aspecto más homogéneo al acabar el trabajo.
- Termografía aérea: planes urbanos de eficiencia energética.

La lista de aplicaciones se puede seguir incrementando: procesos industriales, control de calidad de productos, peritajes, medicina y veterinaria son también campos en los que la termografía ayuda al diagnóstico de patologías y otras lesiones. En fin, un mundo de aplicaciones tras la inversión en una cámara termográfica.

En la actualidad la termografía pasa por un importante crecimiento, debido a que desde los últimos 20 años se ha producido una gran mejora en la fabricación de cámaras termográficas, haciendo de ellas más transportables y de un peso más ligero, facilitando la inspección en obra, para el caso de edificación.

Otro factor que propicia el uso de la cámara termográfica en la actualidad es en el interés de los fabricantes en reducir los precios de este producto y de sus complementos. Además se ofrecen software y cursos de preparación, con la finalidad de hacer lo más sencillo posible la implementación de esta tecnología en sus operarios.

Los procedimientos y modos de aplicación de esta técnica, están normalizados por una certificación ASNT (American Society of Non destructive Testing), la cual es reconocida en todo el mundo y consiste en certificar a los inspectores por medio de un reconocimiento según su especialidad. Esta se divide en: Inspector de nivel I, II y III.

### **2.1.8. Situación actual de la aplicación de la termografía en la caracterización de materiales**

En los últimos años, las técnicas no destructivas han sufrido un desarrollo acelerado, que permite la observación objetiva de las propiedades físicas de los materiales sin causar ningún daño.

Desde hace poco tiempo la termografía infrarroja se ha utilizado como técnica no destructiva en la inspección de materiales estructurales. A pesar del innegable potencial de esta técnica, su uso actual en la evaluación de estructuras es casi insignificante, prácticamente limitado al estudio de las maderas: detección de alto contenido de humedad [12], y áreas deterioradas significativamente [13-18]. En este sentido, se está investigando la aplicación de la termografía en maderas para ilustrar el proceso de daño de estructuras a través de los mapas tensionales extraídos de la disipación de calor en las zonas cargadas [19].

Otras investigaciones se centran en usar la termografía para analizar defectos en los materiales de piedra, las imágenes fueron interpretadas por diferentes puntos de las paredes [20]. Las áreas con discontinuidades térmicas corresponden a puntos defectuosos en el material, mientras que los puntos con temperaturas similares representan inercia térmica, o la tendencia de un elemento para soportar los cambios de temperatura y - dependiendo de las características del material - humedad y el daño [21]. Otras líneas se han centrado en detección de grietas en estructuras de hormigón o como técnica de control de calidad de materiales (piedra, cerámica) [22].

La ausencia de uso en más aplicaciones es debido a la falta de una comprensión completa de todos los parámetros que intervienen en el proceso termográfico. Esto va desde la relación entre la radiación y la temperatura, a la naturaleza de transmisión de calor en los objetos, un proceso físico determinado por una ecuación diferencial altamente complejo y que proporciona una indicación de las propiedades físicas de un objeto dado.

Este trabajo se centra en realizar estudios en laboratorio para caracterizar diferentes tipos de materiales de construcción utilizando esta técnica.

## 2.2. Fundamentos de la técnica del GPR

En este apartado se explican los fundamentos teóricos de la técnica no destructiva del georradar, así como, su funcionamiento e instrumentación. Por último se define el registro de imágenes de esta técnica: radargrama.

### 2.2.1. Fundamentos teóricos del georradar

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

La teoría de Maxwell afirma que un campo eléctrico y otro magnético variables se inducen el uno al otro acoplándose juntos como una onda electromagnética que viaja a través del espacio, formando ángulos rectos entre sí y también con la dirección de la propagación de la onda (Figura 2.4). Se entiende por onda electromagnética aquella que se produce por la vibración de campos eléctricos y magnéticos, sin necesidad de la existencia de un medio material específico sobre el que propagarse.

Las ondas del georradar se propagan por un medio hasta que se produce un cambio en las propiedades dieléctricas del medio. En ese instante, parte de la energía de la emisión del georradar se refleja, mientras que el resto de la onda sigue propagándose hasta que la energía se pierde por atenuación.

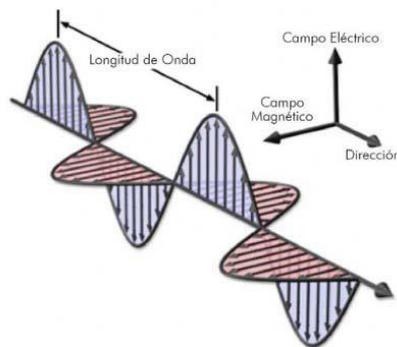


Figura 2.4. Propagación de una onda electromagnética

La teoría de Maxwell demostró que las amplitudes del campo eléctrico y el campo magnético en una onda electromagnética se relacionan por medio de la ecuación:

$$E = c \cdot B \quad (\text{ec. 2.7})$$

dónde:

- $E$  es la componente del campo eléctrico y se mide en Newton/Coulomb (N/C)
- $B$  es la componente del campo magnético y se mide en Weber/m<sup>2</sup> (wb/ m<sup>2</sup>) o Teslas (T)
- $c$  es la velocidad de propagación de la luz en el vacío; siendo este valor 299.792.458 m/s  $\approx 3 \cdot 10^8$  m/s = 30 cm/ns

A partir de las ecuaciones de Maxwell se deduce que tanto el campo eléctrico como el magnético se pueden expresar con la ecuación de una onda sinusoidal (Figura 2.5):

$$y = A \times \text{sen}[kx - \omega t] \quad (\text{ec. 2.8})$$

dónde:

- $A$  es la amplitud de onda, o valor máximo que puede alcanzar la cresta o pico de una onda
- $k$  es el número de onda angular y es igual a:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{ec. 2.9})$$

- $\lambda$  es la longitud de onda, que es la distancia mínima entre dos puntos idénticos cualesquiera en ondas contiguas
- $\omega$  es la frecuencia angular y es igual a:  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$
- $T$  es el periodo y es el tiempo requerido para que la onda recorra una longitud de onda. Se mide en segundos (s). Su inversa es  $f$ , la frecuencia, que se mide en ( $s^{-1}$ ) o Hertz (Hz)

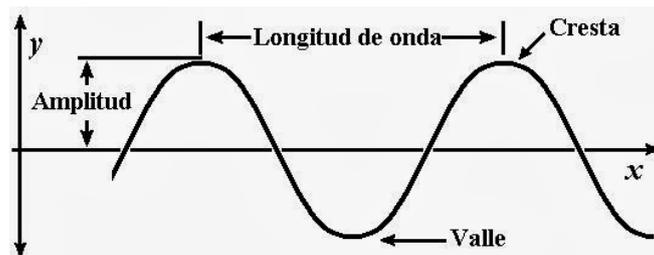


Figura 2.5. Parámetros de onda

Si queremos estudiar la variación en el espacio-tiempo de la onda electromagnética, teniendo en cuenta que las amplitudes del campo eléctrico ( $E$ ) y del magnético ( $B$ ) variarán con  $x$  y  $t$ , se llega, a través de operaciones matemáticas, a la siguiente relación entre los valores máximos de ambos campos:

$$K \cdot E_{max} = \omega \cdot B_{max} \quad (\text{ec.2.10})$$

$$\frac{E_{max}}{B_{max}} = \frac{\omega}{k} = c \quad (\text{ec.2.11})$$

De donde se deduce que, en cada instante, la razón entre el campo eléctrico y el campo magnético de una onda electromagnética es igual a la velocidad de la luz en el vacío. Además, puesto que todas las ondas electromagnéticas viajan a través del vacío con una velocidad  $c$ , su frecuencia  $f$  y su longitud de onda  $\lambda$ , están relacionadas por la expresión fundamental:

$$c = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T} \quad (\text{ec. 2.12})$$

Por otro lado, también se demuestra que las ondas electromagnéticas cumplen el principio de superposición e interferencia.

### 2.2.2. Parámetros electromagnéticos de un medio

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

#### a) Conductividad

La conductividad de un medio ( $\sigma$ ) proporciona una medida de la respuesta de sus cargas libres en presencia de un campo eléctrico externo, es decir, la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica. La conductividad eléctrica es lo opuesto a la resistencia y se mide en unidades de siemens/metro. El valor de conductividad eléctrica va de 4 a  $10^{-9}$  S/m (GSSI 2003). La conductividad eléctrica dependerá de la frecuencia de emisión de las ondas [23]. En la Tabla 2.1 se muestran los valores que pueden alcanzar distintos materiales según [23], a una frecuencia de 100 MHz.

Tabla 2.1. Propiedades de los materiales [23]

Material	Conductividad (Siemens/m)	Permitividad
Aire	0	1
Asfalto seco	$10^{-2}$ : $10^{-1}$	2-4
Asfalto húmedo	$10^{-3}$ : $10^{-1}$	6-12
Arcilla seca	$10^{-1}$ : $10^{-0}$	2-6
Arcilla húmeda	$10^{-1}$ : $10^{-0}$	5-40
Carbón seco	$10^{-3}$ : $10^{-2}$	3,5
Carbón húmedo	$10^{-3}$ : $10^{-1}$	8
Cemento seco	$10^{-3}$ : $10^{-2}$	4-10
Cemento húmedo	$10^{-8}$ : $10^{-6}$	10-20
Agua fresca	$10^{-6}$ : $10^{-2}$	81
Hielo natural	$10^{-4}$ : $10^{-3}$	4

Una baja conductividad media como la del granito, asfalto o cemento, que tienen una conductividad menor de  $10^{-7}$  S/m, es excelente para la toma de registros con georradar. Medios como el agua natural, el hielo, la nieve, la arena, el cieno y la arcilla tienen conductividades eléctricas entre  $10^{-7}$  S/m y  $10^{-2}$  S/m [24]. Estos valores representan condiciones aceptables para llevar a cabo tomas de registros con georradar. Sin embargo, es complicado tomar registros en medios de conductividad mayor de  $10^{-2}$  S/m, ya que la alta conductividad atenúa drásticamente la señal del georradar (GSSI,2003). Ejemplos de estos medios son la arcilla húmeda, el esquisto, la pizarra, el aguade mar, el carbón FRP, etc.

#### b) Permitividad dieléctrica absoluta

La permitividad dieléctrica absoluta ( $\epsilon_{abs}$ ) es una constante de proporcionalidad entre la intensidad del campo eléctrico externo aplicado ( $E$ ) y el vector desplazamiento eléctrico ( $D$ ). Asimismo, la permitividad absoluta ( $\epsilon_{abs}$ ), cuyas unidades son F/m (donde F son faradios), se define como el producto entre una permitividad relativa del material ( $\epsilon_r$ ), que es una constante adimensional y la permitividad dieléctrica del vacío ( $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$  F/m).

$$\epsilon_{abs} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (\text{ec. 2.13})$$

La permitividad 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, que normalmente se define como constante dieléctrica ( $\epsilon$ ). Para la mayoría de los materiales que se pueden encontrar al realizar una prospección electromagnética, los valores de  $\epsilon_r$  se encuentran entre 1 (la del aire) y 81, siendo esta última la  $\epsilon_r$  del agua a 20°C.

La permitividad dieléctrica relativa del material también es una magnitud compleja [24] [25], en la que la componente real corresponde a la corriente en fase respecto al campo eléctrico externo, y la componente imaginaria la corriente en desfase respecto a dicho campo eléctrico.

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (\text{ec. 2.14})$$

Hay que resaltar que tanto la parte real como la imaginaria de la permitividad dieléctrica relativa del medio, varían en función de la frecuencia empleada. Hay diferentes mecanismos que caracterizan esta dependencia [26]. Para altas frecuencias (entre 10 MHz y 1GHz), en la mayor parte de los materiales del subsuelo, los fenómenos de desplazamiento (o polarización), dominan sobre los fenómenos de conductividad. De esta forma, los medios suelen caracterizarse a partir de la parte real de  $\epsilon_r$  a esta frecuencia de estudio.

Siempre que las ondas electromagnéticas pasan desde un medio con una constante dieléctrica a otro con una constante distinta, parte de la energía se refleja desde la superficie de contacto de ambos medios. La energía de la onda reflejada se determina por el contraste de impedancia dieléctrica de la interfaz que separa los dos medios. Por otro lado, la constante dieléctrica de un medio aumenta con el aumento del contenido de agua en el medio, tal y como se puede observar en la Figura 2.6, de ahí el interés de calcularla en este estudio a partir de los datos registrados con el georradar.

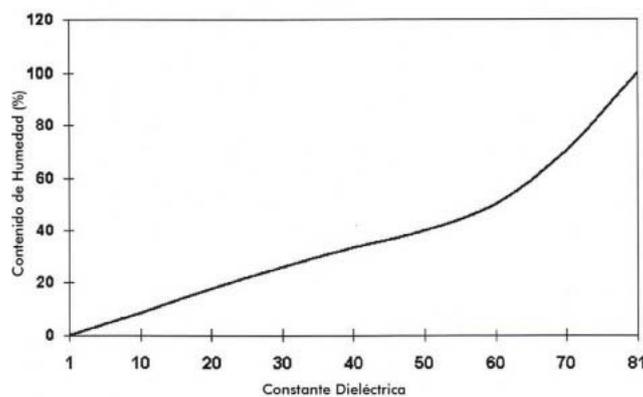


Figura 2.6. Variación de la constante dieléctrica del cemento con el aumento del contenido de agua [26]

### c) Permeabilidad magnética

La permeabilidad magnética ( $\mu$ ) es la que relaciona la inducción magnética con la intensidad del campo magnético. Se mide en Henri/metro y se puede escribir como el producto entre la permeabilidad magnética del vacío ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m) y la permeabilidad relativa del material ( $\mu_r$ ).

### 2.2.3. Teoría de propagación de ondas electromagnéticas

El georradar se basa en la propagación de ondas electromagnéticas, y su sistema se compone de antenas emisoras y receptoras. Las ondas electromagnéticas son emitidas por la antena emisora. La antena receptora registra la onda reflejada desde una interfaz. Cuando la onda detecta un cambio en la impedancia dieléctrica, se refleja parte de la energía. Estas ondas reflejadas son registradas por el sistema y las interpretaciones de éstas se basan normalmente en la amplitud y el tiempo doble de propagación de la onda reflejada.

La ecuación que define la velocidad de propagación de una onda electromagnética dependerá por tanto de los tres parámetros anteriormente explicados. Ahora bien, cuando los medios son dieléctricos o poco conductores, como es en la mayoría de materiales que se estudian, el término asociado con la conductividad ( $\sigma$ ) están pequeño que tiende a cero. Si además, el medio es no magnético, como es la mayoría de los casos, la permeabilidad magnética ( $\mu$ ) tiende a la unidad.

De esta forma, la ecuación que proporciona la velocidad de propagación se simplifica significativamente quedando la expresión que comúnmente se puede emplear como:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}} \quad (\text{ec. 2.15})$$

dónde:

- $c$  es la velocidad de propagación de la luz en el vacío; siendo este valor  $299.792.458 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 30 \text{ cm/ns}$
- $\epsilon'$  es la permitividad dieléctrica relativa del material, que en este caso, podemos denominar constante dieléctrica ( $\epsilon$ )

La velocidad más elevada se obtiene para el aire, por tener la menor constante dieléctrica ( $\epsilon = 1$ ), mientras que la menor velocidad la presenta el agua, por tener la mayor constante dieléctrica ( $\epsilon = 81$ ). El resto de materiales están situados entre estos dos valores.

Además de los tres parámetros electromagnéticos del medio, la frecuencia de emisión también influye en la velocidad de propagación de la onda electromagnética.

Asimismo durante la propagación de una onda electromagnética por un medio se producen pérdidas de energía debido a distintas causas. Esta disminución de la amplitud de la onda determina la profundidad máxima teórica de estudio que se puede alcanzar en cada caso. Otros efectos tales como una mala relación señal/ruido, problemas con los equipos o un tratamiento incorrecto (filtrados excesivos o inadecuados), harán que este valor sea, en la práctica, aún menor que el esperado.

La energía que finalmente capta la antena receptora en superficie es menor que la energía emitida en un principio, a consecuencia de: la dispersión geométrica del frente de onda, la absorción de la energía, la dispersión de la energía en elementos del orden de la longitud de onda y de las pérdidas producidas en la reflexión y refracción en cada una de las interfases electromagnéticas que atraviese la onda. Además se ha de tener en cuenta que cuanto menor es la longitud de onda, menor es la capacidad de penetración debido a todos los factores citados anteriormente.

Cuando la energía electromagnética alcanza una discontinuidad se producen los fenómenos de reflexión y de refracción. La ley de Snell relaciona los ángulos de incidencia, reflexión y refracción con las velocidades de propagación de las ondas en los dos medios que están en contacto. El porcentaje de energía reflejada depende del contraste existente entre los

parámetros electromagnéticos de los diferentes medios, es decir, del contraste de impedancias dieléctricas.

El fenómeno de la reflexión es el que se registra en la toma de datos con georradar y es el que se produce cuando una onda encuentra una separación con contraste dieléctrico entre dos medios y retrocede hacia el mismo medio del cual provenía (Figura 2.7)

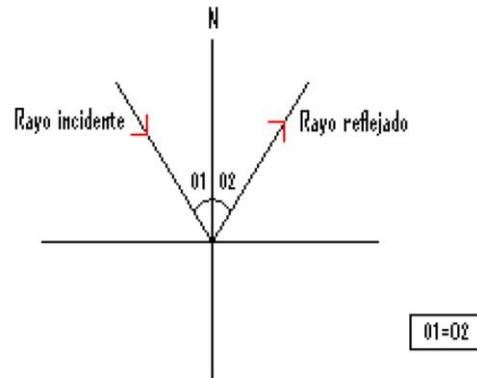


Figura 2.7. Ley de reflexión. Ángulos que forman el rayo incidente y el reflejado con la normal

En el caso en que se pasa de un medio de mayor densidad a otro de menor ( $n_1 > n_2$ ), según va aumentando el ángulo de incidencia, se llega a un punto en que toda la onda es reflejada, fenómeno conocido como Reflexión Interna Total.

El fenómeno de la refracción se da cuando el rayo pasa al segundo medio, en este caso, el ángulo de refracción dependerá de las propiedades de los medios y del ángulo de incidencia.

De manera que, cuando la onda electromagnética encuentra una interfaz que separa medios de distinta permitividad dieléctrica relativa ( $\epsilon'_1$  y  $\epsilon'_2$ ), parte de la onda se refleja, tal como se muestra en la Figura 2.8.

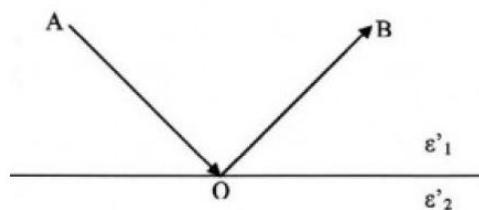


Figura 2.8. Reflexión de parte de la onda debido al contraste de impedancias dieléctricas

La energía reflejada se mide en términos del coeficiente de reflexión ( $R_{12}$ ).

$$R_{12} = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} \quad (\text{ec. 2.16})$$

Donde  $V_1$  y  $V_2$  son velocidades de propagación en el medio 1 y el medio 2, respectivamente. Cuando se considera una única frecuencia de radiación en un medio de baja conductividad, como la tierra o el cemento seco, la Ecuación 2.9 se reduce a la siguiente expresión (Daniels, 2004) [24].

$$R_{12} = \frac{\sqrt{\epsilon'_1} - \sqrt{\epsilon'_2}}{\sqrt{\epsilon'_1} + \sqrt{\epsilon'_2}} \quad (\text{ec. 2.17})$$

Cuando la ecuación anterior tiene valor negativo, es decir,  $\epsilon'_2 > \epsilon'_1$ , se va a producir un cambio de polaridad. Por tanto el coeficiente de reflexión determina la polaridad de la onda reflejada. A medida que la onda se propaga y detecta un material de constante dieléctrica mayor que la del material contenedor, se producen cambios en la polaridad de la señal reflejada. Por ejemplo, si una onda a través de una pieza de hormigón, detecta una zona con mayor contenido de humedad, el coeficiente de reflexión será negativo y aparecerá como un ciclo positivo-negativo-positivo en la forma de la onda reflejada. Del mismo modo, cuando la onda pasa desde la zona de mayor humedad a otra zona con menor humedad, habrá un coeficiente de reflexión positivo en la interfaz de zona más húmeda y zona menos húmeda, lo que significa que no hay una fase invertida con respecto al pulso original incidente, y esta reflexión aparecerá como ciclo negativo-positivo-negativo en la forma de la onda reflejada.

También se produce un cambio de polaridad cuando se utilizan reflectores metálicos, como en el caso de este estudio. Cuando la onda electromagnética incide en un reflector metálico, prácticamente toda la energía incidente es reflejada, produciéndose además un cambio de polaridad.

#### 2.2.4. Localización de anomalías o determinación de espesores

Para hallar la equivalencia entre el tiempo doble de propagación (medido en los registros) y la profundidad de un evento o de penetración ( $h$ ) es fundamental conocer la permitividad del medio o la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas:

$$v = \frac{\text{espacio}}{\text{tiempo}} = \frac{2 \cdot h}{(\Delta t)_D^R} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}} \quad (\text{ec.2.18})$$

$$h = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon'}} \cdot \Delta t \quad (\text{ec.2.19})$$

dónde:

- $h$  es la distancia al reflector o espesor del medio que se desea obtener (profundidad).
- $v$  es la velocidad a la que se propaga la onda electromagnética
- $c$  es la velocidad de propagación en el vacío (aproximadamente 30 cm/ns)
- $\epsilon'$  es la permitividad dieléctrica relativa del medio o constante dieléctrica  $\epsilon$
- $\Delta t$  es la diferencia de tiempo registrada en el radargrama entre la onda directa entre emisor y receptor ( $t_1$ ) y la reflejada ( $t_2$ ) en el reflector o la base del medio estudiado

### 2.2.5. Instrumentación del georradar

Un equipo de georradar funciona de la misma forma que cualquier otro sistema de radar, es decir, consiste en una antena emisora, una antena receptora, un sistema de control de la radiación y una unidad de almacenamiento de registros. A estas dos últimas se les denomina unidad central o unidad de control. Las tres empresas más grandes de sistemas georradar son Geophysical Survery Systems, Mala Geosciences y Sensors and Software. Los sistemas de georradar disponibles suelen utilizar antenas de frecuencias centrales de 10 MHz a 3 GHz. La Figura 2.9 ilustra un sistema de organización de medición típica por georradar.

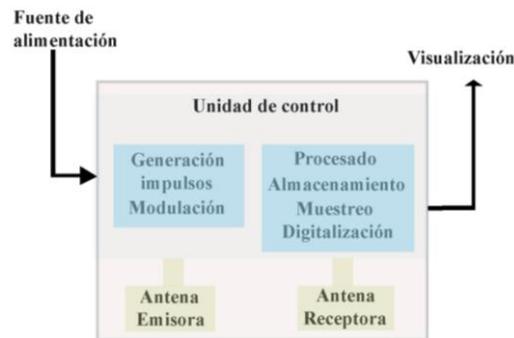


Figura 2.9. Esquema típico de un sistema de georradar [4]

A continuación se enumeran todos los componentes que forman un equipo de georradar:

#### 1. Unidad de control

Esta unidad lleva implementado un programa informático que realiza el procesado básico de la señal e incorpora utilidades que permiten actuar sobre la señal emitida y sobre los registros que se adquieren: filtrados y modificación de la ganancia del registro, entre otros procesados. La unidad de control suele ir conectada a un monitor para visualizar la señal que se está adquiriendo. Se puede seleccionar la forma de visualización del registro en campo, optando por un registro de trazas de amplitud o bien por una serie de escalas de colores o de distintos tonos de grises, donde cada tono engloba un intervalo de amplitudes de la onda registrada, tal y como se describe más adelante. La fuente de alimentación de la unidad central es de corriente continua y consiste, en muchos casos, en una batería de 12 voltios.

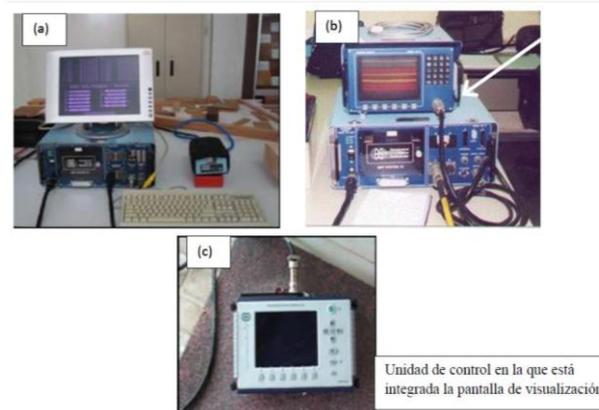


Figura 2.10. Unidades de control de varios equipos de georradar de la marca GSSI; (a) y (b) Unidad SIR 10H de GSSI con diferentes sistemas de visualización, y (c) Unidad SIR 3000 de GSSI con equipo de visualización integrado [4]

## 2. Antenas

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

Una posible clasificación de las antenas es en función de la frecuencia central de su emisión. La longitud de onda ( $\lambda$ ) del pulso emitido depende de esta frecuencia ( $f$ ) y de la velocidad de la onda en el medio ( $v$ ).

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (\text{ec. 2.20})$$

Cada tipo de antena se escoge debidamente de acuerdo con las necesidades de su utilización. En la Tabla 2.2 se presenta la división general por bandas frecuenciales y junto a la frecuencia se añade la longitud de onda en el vacío.

El georradar utiliza bandas de frecuencia situadas entre 3 GHz y los 10 MHz aproximadamente, es decir, que trabajan con las bandas de radiofrecuencias y de microondas.

Tabla 2.2. Bandas de frecuencia y longitudes de onda correspondientes a cada banda para la propagación en el vacío [23]

Frecuencia	Longitud de onda	Denominación
> 3 kHz	> 100 km	Frecuencia extremadamente baja
3 – 30 kHz	100 – 10 km	Muy baja frecuencia
30 – 300 kHz	10 - 1 km	Baja frecuencia
0,3 – 3 Mhz	1000 – 100 m	Frecuencia media
3 – 30 Mhz	100 – 10 m	Alta frecuencia
30 – 300 Mhz	10 – 1 m	Muy alta frecuencia
0,3 - 3 Ghz	100 - 10 cm	Ultra-alta frecuencia
3 – 30 Ghz	10 - 1 cm	Super-alta frecuencia
30 – 300 Ghz	10 - 1 mm	Extremadamente alta frecuencia

De esta forma la frecuencia central de una emisión es uno de los parámetros de las antenas más importantes, ya que determina la penetración de la señal emitida en el medio material a estudiar. La frecuencia central de la emisión depende del dipolo de la antena. Este parámetro limita tanto el alcance del método (rango) como su resolución. Las emisiones a bajas frecuencias se atenúan en menor medida que las altas frecuencias, pudiendo alcanzar con las primeras profundidades mayores de estudio. Por otro lado, debido a que tienen una longitud de onda mayor que las emisiones a más alta frecuencia, la resolución obtenida es menor.

Por lo anteriormente explicado, se prefieren las antenas de frecuencias más bajas para la mayor parte de obras geotécnicas. En cambio, se prefieren las antenas de frecuencia mayor para aplicaciones estructurales como por ejemplo para puentes cubiertos de cemento y madera, así como para edificación, ya que poseen mayor resolución para detectar pequeños defectos.

Otra clasificación de antenas de georradar se realiza en función del número de dipolos implementados. Se distingue entre antenas monoestáticas (primer caso) y biestáticas (segundo caso).

- a) Antenas monoestáticas son a la vez emisoras y receptoras de la energía. Pueden diferenciarse dos tipos: antenas de conmutación y antenas de dos dipolos. Las primeras tienen una única espira que puede actuar como emisora y como receptora de energía. Las antenas de dos dipolos presentan, en el interior de la carcasa, dos dipolos separados.

Uno de ellos funciona como emisor, mientras el otro es un receptor. La separación de las dos espiras es constante y éstas se desplazan juntas con una única carcasa que las cubre a ambas. Las antenas monoestáticas permiten realizar con facilidad perfiles, siendo utilizadas en trabajos que requieren mayor rapidez, un número elevado de perfiles o una estructura de malla para poder analizar el medio, es decir, agrupaciones de perfiles paralelos y cruzados.

- b) Las antenas biestáticas se componen de dos módulos separados. Por un lado se tiene la antena emisora y por otro la antena receptora. La independencia entre emisora y receptora permite variar la distancia entre ambas.

### 3. Accesorios y equipos complementarios

A estos elementos básicos del equipo se les pueden añadir algunos accesorios para facilitar las tareas de adquisición de datos. Los accesorios con los que puede complementarse este equipo básico son diversos. Se pueden separar en dos grupos: los complementos para la visualización y almacenamiento de los registros y los accesorios para situar los perfiles. Dentro de los accesorios para visualización se incluyen las impresoras, las pantallas de visualización, los programas informáticos y las unidades de registro de datos en soporte magnético (cinta o disco) u óptico.

Para situar los perfiles se suelen utilizar dos tipos de accesorios. Por una parte están los marcadores, que permiten introducir una marca en el registro cada vez que se presiona un pulsador. Esto permite introducir marcas para indicar el inicio y el final del perfil y para advertir sobre algún elemento especial dentro del perfil. Por otra parte están los odómetros. En ocasiones están implementados en un soporte con ruedas sobre el que se sitúa la antena. Este sistema permite determinar la posición de los distintos puntos del perfil con mayor precisión que en el caso de los marcadores. Los equipos de georradar de última generación llevan integrados sistemas GPS para la determinación de las coordenadas de los perfiles.

### 2.2.6. Métodos de adquisición de registros

Las adquisiciones de datos sobre superficie pueden ser mediante perfiles, o puntuales. Cada método se ha de seleccionar en función del problema que se debe estudiar y los resultados que se desean.

Para efectuar un perfil se desplaza la antena (monoestática) o las dos antenas sin variar la separación existente entre ellas (biestáticas) a lo largo de una línea. Durante el desplazamiento se emite un elevado número de pulsos por segundo. Se pueden emitir desde 1 hasta 100 pulsos cada segundo. Esto permite que la adquisición de datos, aunque sea en realidad puntual, se puede considerar continua por la cantidad de trazas que se tienen en todo el perfil, dependiendo siempre de la velocidad de desplazamiento de la antena. Este desplazamiento debe realizarse a una velocidad lo más constante posible, siendo conveniente utilizar un odómetro durante la adquisición de datos. La antena puede estar situada tocando la superficie del medio que se desea estudiar, aunque no es imprescindible. Pueden obtenerse registros largos de forma rápida colocando, por ejemplo, las antenas sujetas a un coche que se desplaza a una velocidad constante (los equipos de última generación permiten una exhaustiva adquisición de datos a una velocidad de 80 km/h). La reflexión en estos casos puede considerarse casi vertical.

La adquisición de datos de forma puntual se realiza situando la antena (antena monoestática) o las dos antenas a una determinada distancia entre sí (antena biestática), en un punto dado del área de estudio. En dicho punto, y sin efectuar ningún desplazamiento de las antenas, se realiza la emisión de energía y la adquisición de datos. De esta forma se dispone de información del interior del medio situado en la vertical del punto donde se ubica la antena. En el caso de trabajar con dos antenas biestáticas separadas entre sí una cierta distancia la información es la correspondiente a la zona central entre ambas en la que se produce la reflexión. Esta forma de adquisición de datos se suele realizar cuando el medio impide otro tipo de prospección que implique desplazamiento de las antenas.

### 2.2.7. La imagen: radargrama

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

Los parámetros que definen al radargrama se recogen en la cabecera del archivo de registro (Figura 2.11). Todos los registros contienen una cabecera de texto con información sobre cómo se realiza la adquisición. Esta información incluye entre otras informaciones el nombre del fichero, la fecha de registro y las fechas de posteriores modificaciones, el rango, la posición del inicio, el número de pulsos emitidos por segundo durante la adquisición de datos, el factor de superposición de trazas, la función de ganancia y los filtros que se han aplicado sobre el radargrama durante la adquisición o en posteriores tratamientos.

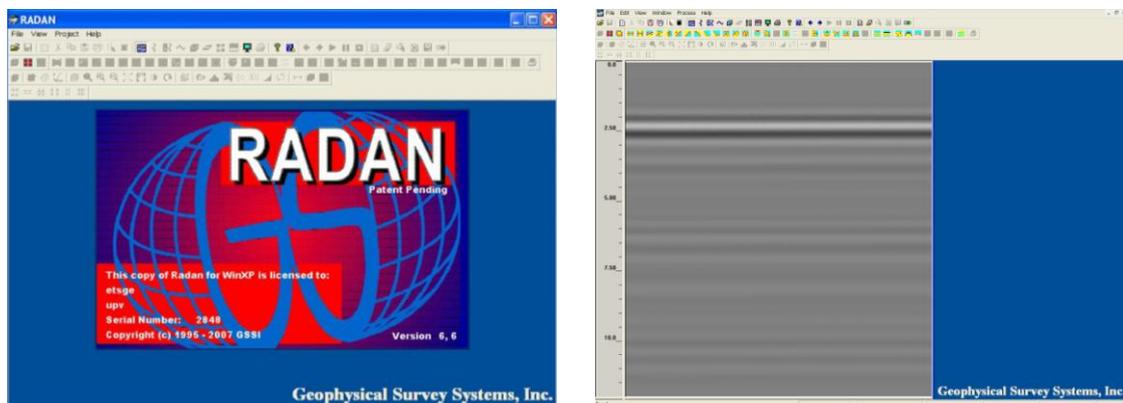


Figura 2.11. Imagen cabecera programa Radan e imagen de onda registrada

A continuación se definen los parámetros más importantes del radargrama:

#### a) Rango de un registro

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

El ajuste de  $R$  requiere, por lo tanto, un conocimiento preliminar acerca de la posible profundidad máxima de estudio y acerca de la velocidad aproximada a la que se propaga la onda electromagnética por el medio.

### b) Posición de inicio de la señal

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

### c) Puntos por traza

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

### d) Ganancia

La ganancia consiste en amplificar la señal que se recibe. Este procesado puede realizarse durante la adquisición de datos o durante el procesado posterior. El objetivo que se busca al aplicarla es el de disminuir los efectos de atenuación que se producen. Para ello, se aumenta la amplitud de las reflexiones procedentes de tiempos de propagación mayores.

El radargrama es la representación gráfica de los datos adquiridos con el georradar y está formado por un elevado número de trazas de amplitud. En el eje horizontal se representan distancias sobre la superficie del medio por el que se desliza la antena y en el eje vertical quedan representados los tiempos dobles de propagación de las ondas reflejadas en las anomalías internas a dicho medio.

El número de trazas de un radargrama depende de la longitud del registro, de la velocidad a la que se haya deslizado la antena a lo largo del perfil, del número de pulsos por segundo emitidos por la antena, del muestreo seleccionado y de la velocidad de registro del georradar.

Cada una de las trazas que forman parte del radargrama es un registro de amplitudes debidas a las reflexiones producidas en el interior del medio. El conjunto de trazas permite el seguimiento de estas amplitudes a lo largo del desplazamiento, representando a los reflectores que las han producido. Los incrementos de amplitud que se producen en las trazas son debidos al aporte de energía proveniente de las reflexiones ocasionadas durante la propagación de la señal por el medio. Los registros son, por lo tanto, de amplitudes y de tiempos de propagación.

La representación de las trazas registradas se puede presentar como un registro de amplitudes, similar a los registros de sismica de reflexión o mediante una representación con escala de colores (Figura 2.12). Con este tipo de representación se consiguen efectos visuales que pueden clarificar los resultados. Para poder realizarla se selecciona una escala que relaciona intervalos de amplitudes con una escala de colores que pueden seleccionarse. Esta escala puede ser lineal, exponencial, potencial o se puede definir según los intereses del estudio. Cada uno de estos intervalos o rangos de amplitudes queda asociado a un color, de acuerdo con la escala seleccionada (Figura 2.12).

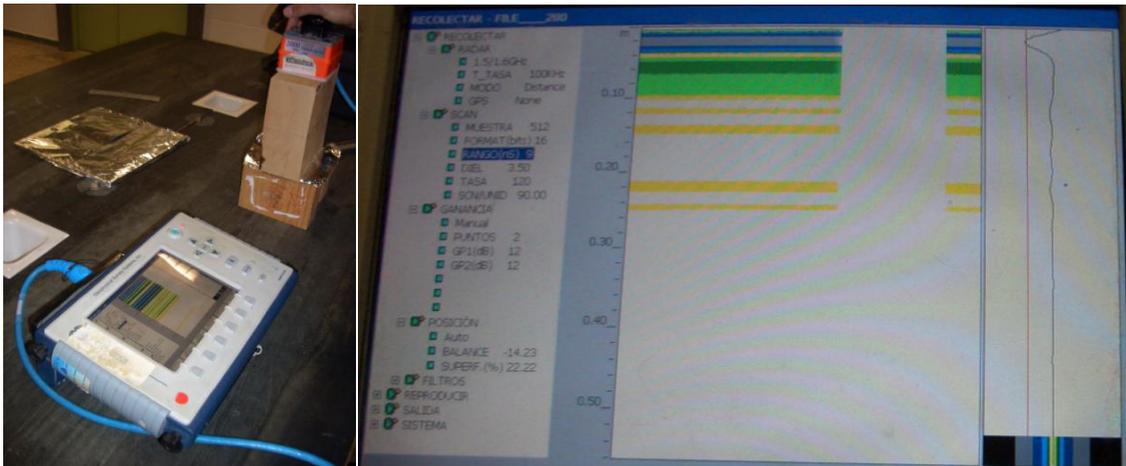


Figura 2.12. Registro estático con antena de 2000 MHz sobre muestra de madera y trazas de color del radargrama asociado

No se puede decir que una escala de colores sea más adecuada que otra. La selección depende del criterio del operador. En muchas ocasiones es preferible trabajar con registros en amplitudes o con escalas de un único color (ya sean tonos de grises o de cualquier otro color), con la variación de tonalidad aplicada de forma gradual. En la Figura 2.13, se muestra un ejemplo de traza generada por Radan.

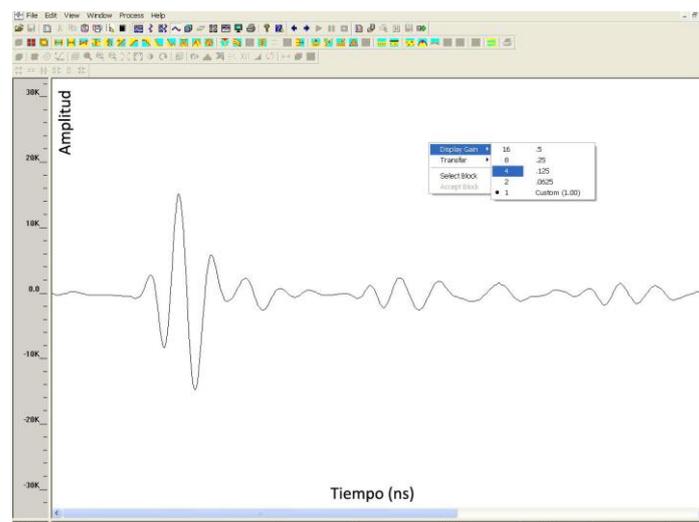


Figura 2.13. Registro de una señal generada por radan

### 2.2.8. Resolución del georradar

Se define como resolución la capacidad de las antenas de georradar para distinguir elementos diferentes en el medio, ya sea en profundidad (resolución vertical) o elementos cercanos en un mismo plano paralelo a la superficie (resolución horizontal) (Figura 2.14).

El límite de resolución vertical define el espesor mínimo de un medio para que la reflexión de la onda desde la cara superior no se solape con la reflexión de la base. Este límite depende de la longitud de onda, del contraste de la onda electromagnética y de la impedancia dieléctrica dentro de las caras delimitadoras.

La resolución de los registros de georradar depende de la frecuencia de la antena utilizada. La antena de mayor frecuencia obtiene una resolución mayor, pero a la vez, se ve limitada por una profundidad de penetración menor. Puesto que las ondas electromagnéticas emitidas por el georradar se atenúan con la profundidad, existe una compensación entre la antena de mayor frecuencia y la profundidad de penetración.

Hay diferentes criterios a la hora de calcular la resolución vertical, que son las expuestas en diferentes tesis doctorales [4] [23].

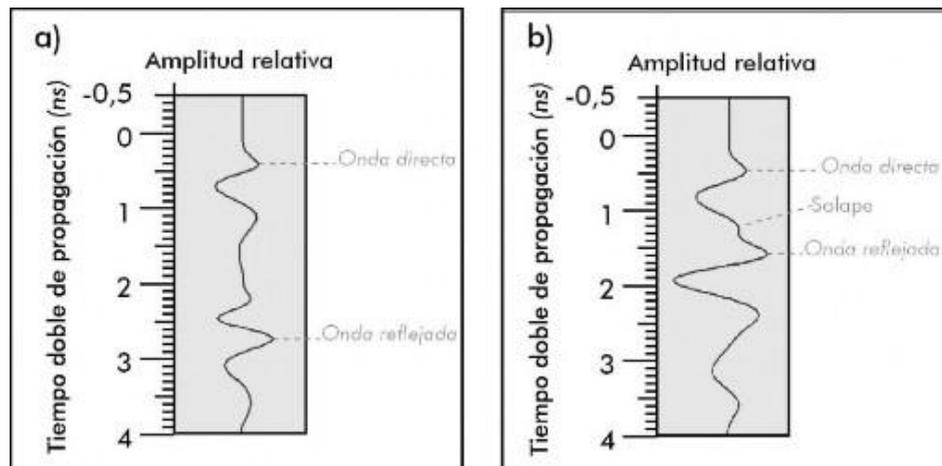


Figura 2.14. (a) Se detectan separadamente las reflexiones producidas por dos discontinuidades electromagnéticas consecutivas; (b) No se detectan separadamente

La resolución vertical ( $R_v$ ) de una antena define su capacidad para diferenciar dos señales cercanas en el tiempo, es decir, para detectar, separadamente, las reflexiones producidas por dos discontinuidades electromagnéticas consecutivas en la escala vertical (Figura 2.14).

La antena de georradar está diseñada para que se cumpla la relación entre el ancho de banda ( $B$ ) y la frecuencia central ( $f_c$ ):

$$B = f_c = \frac{1}{T} \quad (\text{ec. 2.21})$$

Siendo  $T$  la duración de la señal o pulso. El principal requerimiento de una buena antena es un ancho de banda considerable, lo cual se refleja en una mayor capacidad de resolución del equipo. El ancho de banda debería ser al menos igual a la frecuencia central de emisión [27].

Teniendo en cuenta esto, la resolución vertical ( $R_v$ ) queda definida como:

$$R_v = e_{medio} \geq \frac{v \cdot T}{2} = \frac{\lambda}{2} \quad (\text{ec. 2.22})$$

Donde  $v$  es la velocidad de propagación de las ondas en el medio y  $\lambda$  la longitud de onda de la señal en el medio estudiado.

A partir de la ecuación se puede ver que para mejorar la  $R_v$  existen dos opciones:

- Disminuir la velocidad de propagación del medio
- Disminuir la duración del pulso generado por el georradar. Esto implica un aumento del ancho de banda en el espectro de frecuencias ( $B$ ), y por tanto de la longitud de onda de la señal ( $\lambda$ )

En la Figura 2.15 se muestran los resultados al aplicar este criterio para las antenas de 1,6 GHz y 2,6 GHz.

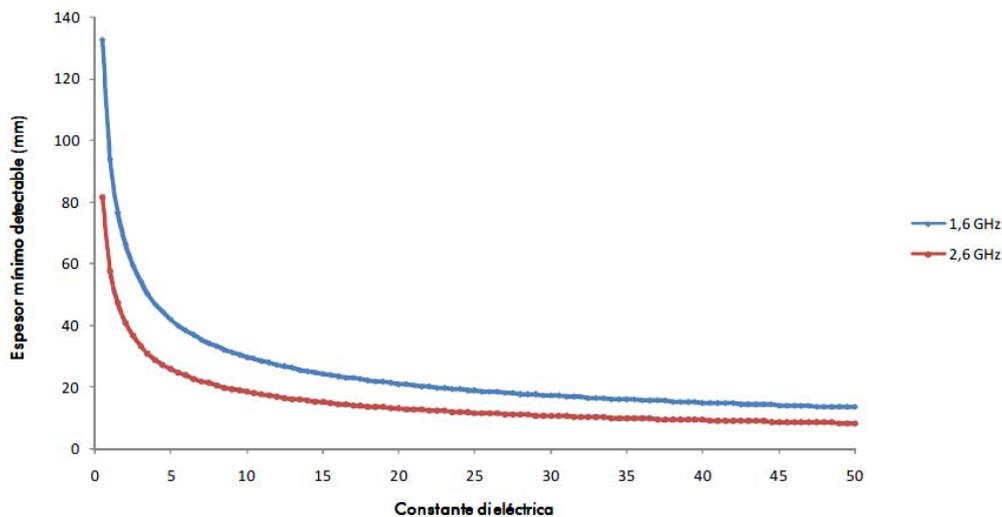


Figura 2.15. Espesor mínimo detectable de un material para antenas de 1,6 GHz y 2,6 GHz [4]

### 2.2.9. Situación actual de la aplicación de la técnica del georradar a la caracterización de materiales de construcción

Esta técnica se lleva aplicando con éxito durante décadas, en numerosos elementos del campo de la Ingeniería Civil o de la Arqueología. Pero es desde hace relativamente poco tiempo que se viene usando en el campo de la Edificación.

El método del georradar presenta una potencialidad muy elevada por distintos motivos. El primero y más importante de ellos es que se trata de una técnica absolutamente no destructiva, además de esto, se trata de un sistema que es perfectamente aplicable “in situ”, llegando incluso a los mismos lugares inaccesibles que la técnica del punzonamiento. Una vez procesados los registros mediante el correspondiente software podemos conocer con exactitud milimétrica la posición de las zonas con defectos, o con mayor densidad etc.

Otra de las grandes ventajas de la utilización de esta técnica es que arroja una serie de datos que nos permite crear una “imagen tridimensional” de la estructura interna de las piezas analizadas, y por tanto conocer el grado de funcionalidad de las mismas o de parte de ellas, sin la necesidad de abrir catas o de aplicar cualquier método destructivo como punzonamientos, eliminación de capas adyacentes, etc. Todo ello la convierte en una técnica “ideal” para el estudio, análisis y evaluación de cualquier construcción arquitectónica.

El carácter no destructivo de esta técnica, hace que se esté aplicando con éxito en numerosas actuaciones en Patrimonio Histórico, detectando humedades en el subsuelo, profundidades y espesores de zapatas de cimentación, cavidades, criptas o grutas, enterramientos, etc. [28-35].

Asimismo, en los últimos años se aplica en el estudio y caracterización de materiales de construcción (hormigón, obra de fábrica, etc.); así como en la inspección, diagnosis y estudio de las manifestaciones patológicas de los mismos como publican algunos autores [36-39]. Existen también numerosos estudios realizados con georradar cuyo objeto es analizar la variación del contenido de humedad de diferentes medios como suelos [40], de materiales como el hormigón [41-42] y de muros de obra de fábrica [43]. Incluso algunos autores [45-48] han desarrollado protocolos para el estudio de la variación del contenido de humedad en muestras de hormigón a lo largo de su proceso de curado.

También son interesantes e innovadores los resultados obtenidos sobre la potencialidad de la aplicación del georradar a diversos aspectos de la inspección, clasificación y caracterización de la madera estructural. Estos resultados se muestran en los trabajos presentados en diferentes congresos nacionales e internacionales con resultados muy prometedores [49-55]. Además es interesante destacar el trabajo realizado durante los últimos años con respecto al análisis de los parámetros de onda para caracterizar propiedades de la madera estructural como el contenido de humedad o la anisotropía que se han presentado en diversos congresos internacionales [56-57], y en revistas internacionales [4,58-59]. Destacan también experimentos recientes que caracterizan el sistema de poros de aire/agua del hormigón curado utilizando el georradar [60]; y estudios sobre algunos indicadores relacionados con la durabilidad, en particular, el agua del hormigón y el contenido de cloruro [61].

En resumen, esta técnica se ha aplicado con éxito tanto en hormigón como en madera como lo demuestran los artículos citados anteriormente, por otro lado, parece que en pétreos naturales aún no se ha investigado tan intensamente como en otros materiales de construcción. Con este trabajo se espera obtener conclusiones positivas que permitan ser útiles para futuras investigaciones.

### **CAPÍTULO III. Diseño experimental**

Materiales estudiados

Instrumentos

Estudios preliminares

Descripción de los ensayos



## CAPÍTULO III. Diseño experimental

En este apartado se describen las principales características de los materiales estudiados: madera, hormigón y pétreos naturales. Así mismo se detallan los ensayos que se realizan y los equipos que intervienen para caracterizarlos.

### 3.1. Materiales estudiados

Los materiales de construcción estudiados en este trabajo final de máster son: las maderas, el hormigón y los pétreos naturales.

#### 3.1.1. Madera

Para los ensayos tanto de termografía como de georradar se utilizaron probetas de madera de diferentes especies y densidades.

Como se observa en la Figura 3.1, todas tienen dimensiones diferentes, esto es debido a que dependiendo del tipo de madera y uso se comercializan con unas secciones u otras. Después de realizar los estudios con termografía y georradar, y analizar los resultados, se podrá observar si las dimensiones de las muestras son un factor importante a tener en cuenta a la hora de trabajar con estas técnicas.



Figura 3.1. Lote de maderas de diferentes especies y densidades

En la Tabla 3.1 se especifica el código asignado en este trabajo, el nombre normalizado en español y la especie a la que pertenecen según la norma UNE-EN 13556:2004 [83] de las 8 maderas de diferente densidad empleadas en los distintos ensayos. También se especifica a qué grupo pertenecen, al de frondosas (F) o al de las coníferas (C).

Tabla 3.1. Nomenclatura de las distintas especies de madera empleadas a lo largo de la tesis según [83]

CÓDIGO	NORMALIZADO ESPAÑOL	ESPECIE	GRUPO
<b>M1</b>	Balsa	<i>OchromalagopusSw.</i>	F
<b>M2</b>	Arce	<i>Acer campestre L.</i>	F
<b>M3</b>	Pino silvestre	<i>Pinussylvestris L.</i>	C
<b>M4</b>	Cerejeira	<i>Amburamacearensis (Fr. Allem) A. C.</i>	F
<b>M5</b>	Pino laricio nigra	<i>PinusnigraArnoldsubsp.</i>	C
<b>M6</b>	Tali	<i>Sauveolens (Guill&amp;Perr.) Brenan</i>	F
<b>M7</b>	Elondo	<i>Erythrophleumivorense A. Chev.</i>	F
<b>M8</b>	Eucalipto blanco	<i>EucalyptusglobulusLabill.</i>	F

Tras una búsqueda bibliográfica y consultadas las fuentes [71-77], se resume la información sobre los aspectos generales y características principales de cada especie (Figura 3.2):

M1. Balsa (*Ochromalagopus*Sw.)

- Origen: centroamérica
- Duramen de color: color pálido o rosado
- Durabilidad: poco durable frente a ataques de hongos o insectos
- Densidad: 100 - 200kg/m<sup>3</sup>
- Aplicaciones: aislamiento térmico, acústico y paneles sandwich

M2. Maple blando (*Acer campestre* L.)

- Origen: este de los EE.UU
- Duramen de color: rojo pálido
- Durabilidad: durable frente a la acción de los hongos y sensib a los insectos y termitas
- Densidad: 590 kg/m<sup>3</sup>
- Aplicaciones: mobiliario, carpintería y chapas decorativas

M3. Pino Silvestre (*Pinussylvestris* L)

- Origen: norte y centro de Europa, norte de Italia y Macedonia y de Portugal
- Duramen de color: rojizo
- Durabilidad: poco durable frente al ataque de los hongos y de los insectos
- Densidad: 500 -540 kg/m<sup>3</sup>
- Aplicaciones: carpintería de armar, mobiliario y construcción auxiliar

M4. Cerejeira (*Amburamacearensis* (Fr. Allem) A. C.)

- Origen: Brasil y Bolivia
- Duramen de color: color beige Amarillo a beige rosado
- Durabilidad: moderadamente resistente a organismos xilófagos; bichos, hongos.
- Densidad: 530 kg/m<sup>3</sup>
- Aplicaciones: pavimentos y cielo raso

M5. Pino Laricio Nigra (*Pinusnigra*Arnoldsubsp.)

- Origen: sur de Europa y Asia menor
- Duramen de color: rojo pálido
- Durabilidad: tolera los veranos secos, la nieve en invierno y una amplia variación de temperaturas y precipitaciones
- Densidad: 579 – 615 kg/m<sup>3</sup>
- Aplicaciones: carpinterías y construcción auxiliar (andamios y encofrados)

M6. Talí (*Sauveolens* (Guill&Perr.)Brenan)

- Origen: Mozambique
- Duramen de color: pardo amarillento a pardo rojizo
- Durabilidad: se mantiene sin cambios enterrados o expuestos a la intemperie
- Densidad: 700 – 800 kg/m<sup>3</sup>

**M7. Elondo (*Erythrophleumivorense* A. Chev)**

- Origen: oeste, en el centro y en el este de África.
- Duramen de color: café a rojizo a amarillo
- Durabilidad: la madera está clasificada como muy resistente
- frente a la acción de los hongos, no atacable por los líctidos, muy resistente a las termitas y resistente a los xilófagos marinos.
- Densidad: 820–960 kg/m<sup>3</sup>
- Aplicaciones: carpintería exterior, carpintería interior (suelos), carpintería de armar, obras hidráulicas, construcciones portuarias

**M8. Eucalipto blanco (*Eucalyptusglobulus* Labill)**

- Origen: Australia, Tasmania, España y Portugal
- Duramen de color: color café plumizo
- Durabilidad: no resiste las temperaturas bajas ni los ambientes secos, difícil secado lo que provoca deformaciones y presenta resistencia frente al ataque de hongos
- Densidad: 740-830 kg/m<sup>3</sup>
- Aplicaciones: mobiliario, carpintería, pavimento, construcción

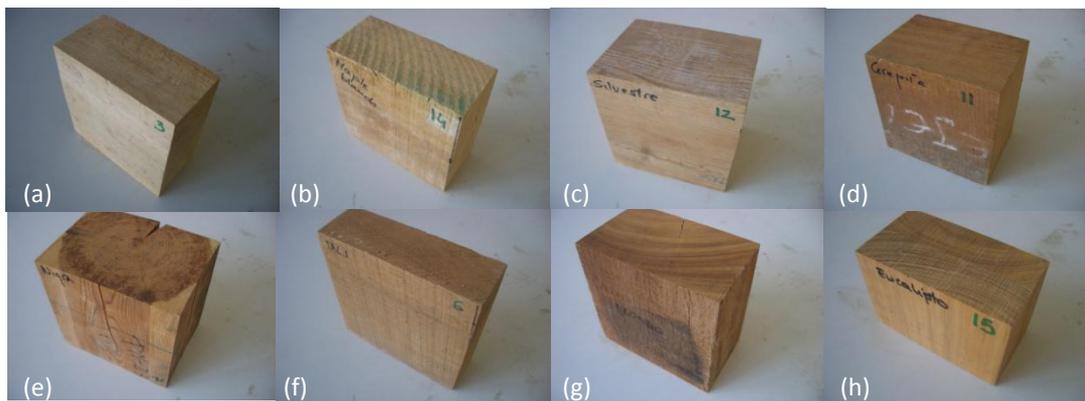


Figura 3.2. (a) Balsa. (b) Maple Blando. (c) Silvestre. (d) Cerejeira. (e) Nigra. (f) Talí. (g) Elondo. (h) Eucalipto

Una vez identificadas todas las especies con las que se van a realizar los estudios, se procede a obtener de cada una las características básicas con el fin de definir las más detalladamente (Tabla 3.2). La masa ha sido medida mediante la balanza de precisión de la marca METTLER TOLEDO modelo ICS425, y más adelante se explicará todas las características de este equipo.

Tabla 3.2. Características básicas de las distintas especies de madera empleadas

	M1	M2	M3	M4
<b>Masa (g)</b>	501,5	1449,7	2733,4	1151,3
<b>Medidas (m)</b>	0,203 x 0,205 x 0,097	0,180 x 0,180 x 0,080	0,185 x 0,195 x 0,135	0,140 x 0,145 x 0,100
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	0,0040	0,0025	0,0048	0,0020
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	124,44	559,30	561,27	567,14
	M5	M6	M7	M8
<b>Masa (g)</b>	3244,6	3487,6	3358,4	930
<b>Medidas (m)</b>	0,193 x 0,190 x 0,142	0,245 x 0,250 x 0,073	0,190 x 0,187 x 0,115	0,135 x 0,100 x 0,073
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	0,0052	0,0044	0,0040	0,0009
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	623,96	780,05	823,14	943,68

### 3.1.2. Hormigón

Otro de los materiales usados en este estudio es el hormigón. En este caso se trabajó con 8 probetas de hormigón, 4 de ellas con relación A/C= 0.5 y 4 con relación A/C= 0.8. Para este estudio fue necesario hacer las probetas más pequeñas (Figura 3.3a), dejándolas con unas dimensiones de 0,10 x 0,11 x 0,20 m<sup>3</sup> (grueso, tizón, sogá) (Figura 3.4b).

Estas probetas se fabricaron en el Laboratorio de Materiales de Construcción ubicado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Edificación (ETSIE) de la Universidad Politécnica de Valencia.

Su fabricación consistió en:

- Mezclar el árido húmedo con el Cemento Portland CEM I 42.5 R/SR y el agua en la amasadora
- A la mezcla se le añadió una cantidad medida del aditivo SikaViscocrete 3425
- Se vertió la mezcla en los moldes y se vibró para homogeneizar la masa y eliminar las burbujas de aire atrapadas en el interior
- Los moldes se taparon con un plástico para dificultar la evaporación durante 2 días
- Las probetas se retiran de los moldes y se introducen en la cámara húmeda durante 28 días
- La hidratación del cemento se hace de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-2:2009

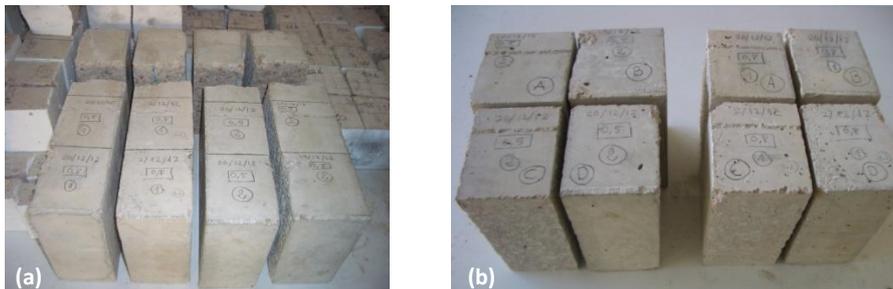


Figura 3.3. (a) Lote de probetas de hormigón iniciales. (b) Lote de probetas de hormigón cortadas

En la Tabla 3.3, se definen los parámetros básicos de cada probeta de hormigón con el fin de usarlos en los futuros ensayos.

Tabla 3.3. Características de las distintas probetas de hormigón

CÓDIGO	PROBETA DE HORMIGÓN R: A/C=0.5 H1				PROBETA DE HORMIGÓN R: A/C=0.8 H2			
	(A)	(B)	(C)	(D)	(A)	(B)	(C)	(D)
<b>Masa (g)</b>	6013,6	5976,8	5225,6	5164,7	5206,2	5264,2	5354,9	5295,2
<b>Dimensiones (m)</b>	0,107 x 0,200 x 0,117	0,117 x 0,200 x 0,108	0,115 x 0,200 x 0,093	0,115 x 0,200 x 0,095	0,115 x 0,200 x 0,098	0,115 x 0,200 x 0,098	0,117 x 0,200 x 0,100	0,115 x 0,200 x 0,100
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	0,0025038	0,00252	0,00213	0,00218	0,002254	0,002254	0,00234	0,0023
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	2401,79	2371,75	2453,33	2369,13	2309,76	2335,49	2288,42	2302,26

### 3.1.3. Pétreos naturales

Con la idea de realizar estudios en edificios patrimoniales, en un principio se intentó buscar calizas y areniscas usadas antiguamente en construcción en Valencia. Pronto se supo que las canteras de las cuales provenían los pétreos que construyeron los grandes edificios históricos estaban cerradas o convertidas en espacios protegidos.

Se procedió a buscar entre diversas empresas de Valencia y alrededores pero no resultó fácil encontrar estos pétreos y además, que puedan suministrarlo en espesores alrededor de 10 cm para que se pueda estudiar con la técnica del georradar y no sólo mediante la técnica de la termografía.

La única empresa cercana que se encontró que tuviese disponible piezas de ese espesor fue Gregorio Jerez Ballesteros S.L. localizada en Godella (Valencia). Esta empresa dispone de la piedra caliza de la variedad *Cenia* en todo tipo de formatos y la propia empresa tiene las instalaciones para cortar los propios pétreos. Esta variedad es originaria de la población de Ulldecona provincia de Tarragona, la empresa extractora es el Grupo Inmar y posee la fábrica en Vinaroz (Castellón).

Se encargó la cantidad mínima de material a esta empresa de Godella que era  $1\text{m}^2$ , de espesor 8 cm. La propia empresa se encargó de cortarlo en muestras de  $0,15 \times 0,15 \times 0,08 \text{ m}^3$ , y se obtuvieron 44 probetas de esta variedad. Posteriormente se definirá en que parte del programa experimental se podrían utilizar.

Al realizar los estudios preliminares de absorción de agua, se comprobó que el coeficiente de absorción era muy bajo y por tanto este pétreo no era apto para los ensayos planificados. Además, dado el uso actual que se le da al pétreo natural, es muy difícil encontrar piezas con espesores del entorno 8-12 cm. Todo ello supuso que la búsqueda del pétreo natural adecuado para realizar los ensayos fuese muy compleja.

Finalmente, se amplió el campo de búsqueda, se decide que los pétreos naturales no se estudiarán mediante el georradar sino sólo mediante la técnica de la termografía, por tanto no se necesitan espesores muy elevados, con 2 – 3 cm sería suficiente y se reduce la dimensión de la muestra de  $0,15 \times 0,15 \text{ m}^2$  a  $0,1 \times 0,1 \text{ m}^2$ .

Con estas nuevas premisas se sigue buscando nuevas calizas y areniscas, de la empresa Mármoles Giménez ubicada en el polígono de Bonrepòs y Mirambell (Valencia) y se adquiere la *Caliza Capri* y la *Arenisca Arcoiris*. Se logran 10 muestras de ambas de dimensiones  $0,1 \times 0,1 \times 0,02 \text{ m}^3$ .

En la localidad de Torrent (Valencia) se obtienen las muestras de piedra *Caliza Bateig Azul* de la empresa Mármoles Gradimar y se adquieren 10 muestras de dimensiones  $0,1 \times 0,1 \times 0,02 \text{ m}^3$ .

En el almacén de la firma Amado Salvador localizada en Xirivella (Valencia), se consigue una baldosa de piedra *Arenisca TeakSand* con unas medidas de  $0,3 \times 0,6 \times 0,02 \text{ m}^3$ . De esta pieza se obtuvieron también 10 probetas, fueron cortadas a través de Mármoles Gradimar.

La casa comercial La Levantina ubicada en Albal (Valencia), colaboró al proyecto de investigación facilitando dos muestras de aproximadamente  $0,5 \text{ m}^2$  de las variedades *Niwala* y *Golden Shell* ambas pertenecientes al grupo de areniscas. La pieza de la variedad *Niwala* tenía 2 cm de espesor mientras que la muestras de la variedad *Golden Shell* tenía 3 cm. Estas muestras fueron cortadas por Mármoles Gradimar.

Mármoles Alicante es una Asociación de la Comunidad Valenciana localizada en Novelda (Alicante) ha colaborado en este estudio también. A través de esta empresa se logró conseguir 5 muestras más pertenecientes al género de areniscas. La asociación se puso en contacto con diferentes empresas que querían participar en este proyecto.

La propia Asociación de la Comunidad Valenciana se encargó de enviar dos tipos de areniscas: *Rosa Villamonte* y *Lumaquela Rosa*, enviaron 5 muestras de cada tipología con medidas  $0,1 \times 0,1 \times 0,02 \text{ m}^3$ .

Las otras dos empresas colaboradoras fueron Bemarsa con sede en Elda (Alicante) y Areniscas Crema S.L. instalada en Novelda (Alicante). Bemarsa envió 5 muestras de  $0,1 \times 0,1 \times 0,02 \text{ m}^3$  de las variedades *Piedra Almorquí* y *Amarillo Fósil*, y Areniscas Crema envió 5 muestras de  $0,1 \times 0,1 \times 0,02 \text{ m}^3$  de la variedad *Dorada Villamonte*.

Todas las muestras de pétreos naturales quedan recogidas en la Figura 3.4, donde se aprecia la diferencia de composición, color, porosidad, etc.



Figura 3.4. Pétreos naturales estudiados

A continuación se define en la Tabla 3.4 un resumen de las principales características de los pétreos obtenidos:

Tabla 3.4. Tabla resumen obtención pétreos naturales

TIPO	VARIEDAD	EMPRESA SUMINISTRADORA	DIMENSIONES (m)	Nº MUESTRAS	CÓDIGO
Arenisca	Golden Shell	La Levantina (Albal)	0,1 x 0,1 x 0,029	8	P1
Arenisca	Amarillo Fósil	Bemarsa (Elda)	0,1 x 0,1 x 0,02	5	P2
Arenisca	Almorquí	Bemarsa (Elda)	0,1 x 0,1 x 0,02	5	P3
Arenisca	TeakSand	Amado Salvador (Xirivella)	0,1 x 0,1 x 0,015	10	P4
Arenisca	Niwala	La Levantina (Albal)	0,1 x 0,1 x 0,02	8	P5
Caliza	Arcoiris	Mármoles Giménez (Valencia)	0,1 x 0,1 x 0,02	10	P6
Arenisca	Rosa Villamonte	Mármoles Alicante (Novelda)	0,1 x 0,1 x 0,02	5	P7
Arenisca	Dorada Villamonte	Areniscas Crema S.L. (Novelda)	0,1 x 0,1 x 0,02	5	P8
Caliza	Bateig Azul	Mármoles Gradimar (Torrent)	0,1 x 0,1 x 0,019	10	P9
Caliza	Capri	Mármoles Giménez (Valencia)	0,1 x 0,1 x 0,02	10	P10
Arenisca	Lumaquela Rosa	Mármoles Alicante (Novelda)	0,1 x 0,1 x 0,02	5	P11
Caliza	Cenia	Jérez Ballesteros S.L. (Valencia)	0,15 x 0,15 x 0,08	44	P12

Las características técnicas de cada especie se consiguió a través de los propios proveedores de cada muestra y la imagen de cada una de ellas la presentamos en la Figura 3.5:

#### P1. Piedra arenisca variedad *Golden Shell*

- Descripción: lumaquela biocalcirrudita con calcita, cuarzo y feldespatos
- Densidad aparente: 2140 kg/m<sup>3</sup>
- Absorción de agua a presión atmosférica: 4,25 %
- Resistencia a flexión: 4,7 MPa
- Resistencia a compresión: 53,7 MPa
- Aplicaciones: interiores y exteriores, principalmente fachadas

#### P2. Piedra arenisca variedad *Amarillo Fósil*

- Descripción: lumaquela de color amarillo, con alguna sombra rosada, formada por restos fósiles con matriz carbonatada y estructura travertínica
- Absorción de agua a presión atmosférica: 2,20 %
- Resistencia a flexión: 9,1 MPa
- Resistencia a compresión: 53,7 MPa
- Aplicaciones: exteriores principalmente

#### P3. Piedra arenisca variedad *Almorquí*

- Descripción: roca carbonífera del tipo hiocalcarenita. Se extrae del área de Vinalopó Medio (Alicante, España oriental)
- Porosidad abierta: 22,3 %
- Densidad aparente: 2030 kg/m<sup>3</sup>
- Absorción de agua a presión atmosférica: 6,2 %
- Resistencia a flexión: 10,04 MPa
- Resistencia a compresión: 33,7 MPa
- Aplicaciones: interiores y exteriores, principalmente fachadas

#### P4. Piedra arenisca variedad *Teak Sand*

- Descripción: son rocas sedimentarias formadas por la superposición de granos de arena que se compactan por el paso del tiempo y la presión
- Densidad aparente: 2070 kg/m<sup>3</sup>
- Absorción de agua a presión atmosférica: 5,3 %
- Resistencia a flexión: 16 MPa
- Resistencia a compresión: 71 MPa
- Aplicaciones: interiores, exteriores con clima templado

#### P5. Piedra arenisca variedad *Niwala*

- Descripción: lumaquela biocalcirrudita porosa. Color blanco con profusión de fósiles
- Porosidad abierta: 19,3 %
- Densidad aparente: 2170 kg/m<sup>3</sup>
- Absorción de agua a presión atmosférica: 4,1 %
- Resistencia a flexión: 9 MPa
- Resistencia a compresión: 29,4 MPa
- Aplicaciones: interiores y exteriores, principalmente fachadas

#### P6. Piedra caliza variedad *Arcoiris*

- Descripción: caliza de grano medio, contiene vetas marrones, muy similares al dibujo de la madera, irregularmente repartidas por la superficie del material
- Densidad aparente: 2110 kg/m<sup>3</sup>
- Absorción de agua a presión atmosférica: 5 %
- Resistencia a flexión: 11 MPa
- Resistencia a compresión: 63 MPa
- Aplicaciones: especialmente indicado para interiores, pavimento, aplacado, escaleras y en general para cualquier solución arquitectónica

#### P7. Piedra arenisca variedad *Rosa Villamonte*

- Descripción: lumaquela con fragmentos de algas coralinas y bivalvos, equinodermos etc. Los principales minerales son calcita, cuarzo y feldespato
- Densidad aparente: 2030 kg/m<sup>3</sup>
- Absorción de agua a presión atmosférica: 6,36 %
- Resistencia a flexión: 11,77 MPa
- Resistencia a compresión: 63,8 MPa
- Aplicaciones: interiores y exteriores, principalmente fachadas

#### P8. Piedra arenisca variedad *Dorada Villamonte*

- Descripción: arenisca calcárea, formada por restos de cuarzo y feldespato
- Porosidad abierta: 17,3 %
- Densidad aparente: 2200 – 2714 kg/m<sup>3</sup>.
- Absorción de agua a presión atmosférica: 5,1 %
- Resistencia a flexión: 8 MPa
- Resistencia a compresión: 46,3 MPa
- Aplicaciones: revestimientos exteriores e interiores, pavimentos y cantería

#### P9. Piedra caliza variedad *Bateig Azul*

- Descripción: biocalcarenita extraída en la provincia de Alicante (España) y que se utiliza como roca ornamental
- Porosidad abierta: 13,5 %
- Densidad aparente: 2270 kg/m<sup>3</sup>
- Absorción de agua a presión atmosférica: 4,9 %
- Resistencia a flexión: 12,7 MPa
- Resistencia a compresión: 84 MPa
- Aplicaciones: tanto en obra nueva como para la restauración de patrimonio

#### P10. Piedra caliza variedad *Capri*

- Descripción: caliza de color blanco con presencia de algunos pequeños fósiles.
- Porosidad abierta: 9,2 %
- Densidad aparente: 2540 kg/m<sup>3</sup>
- Absorción de agua a presión atmosférica: 3,01 %
- Resistencia a flexión: 15,3 MPa
- Resistencia a compresión: 94 MPa
- Aplicaciones: interiores y exteriores

### P11. Piedra arenisca variedad *Lumaquela Rosa*

- Descripción: caliza formada por valvas fósiles de moluscos aglomerados por un cemento caliza. Color ocre anaranjado con profusión de fósiles
- Porosidad abierta: 10,4 %
- Densidad aparente: 2180 kg/m<sup>3</sup>
- Absorción de agua a presión atmosférica: 4,6 %
- Resistencia a flexión: 7,5 MPa
- Aplicaciones: exteriores principalmente

### P12. Piedra caliza variedad *Cenia*

- Descripción: piedra sedimentaria caliza extraída de Uldecona (Tarragona), recristalizada por metamorfosis y clasificable como mármol
- Densidad aparente: 2640 kg/m<sup>3</sup>.
- Absorción de agua a presión atmosférica: 0,4 %
- Resistencia a flexión: 16,3 MPa
- Resistencia a compresión: 237 MPa
- Aplicaciones: interiores y exteriores

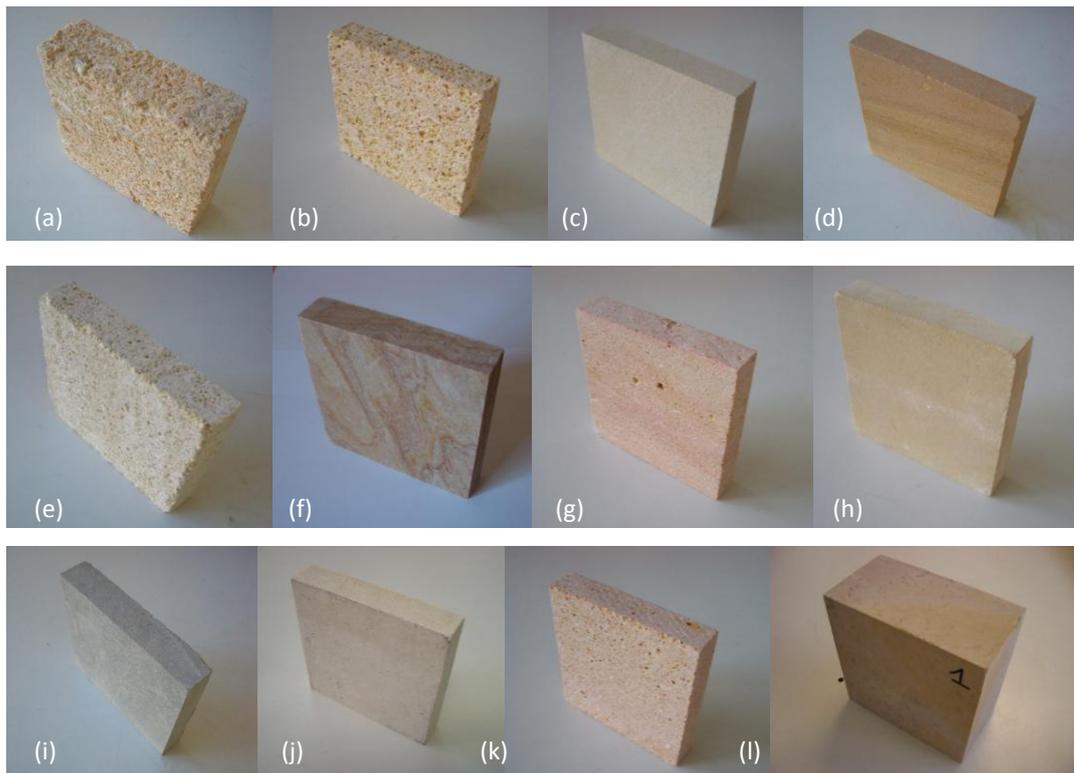


Figura 3.5. (a) *Golden Shell*. (b) *Amarillo Fósil*. (c) *Almorquí*. (d) *TeakSand*. (e) *Niwala*. (f) *Arcoiris*. (g) *Rosa Villamonte*. (h) *Dorada Villamonte*. (i) *Bateig*. (j) *Capri*. (k) *Lumaquela Rosa*. (l) *Cenia*

## 3.2. Instrumentación

### 3.2.1. Equipo de termografía

Para la realización de los ensayos se utilizó la cámara de infrarrojos i5 de FLIR Systems (Figura 3.6) perteneciente al Departamento de Física Aplicada de la Universidad Politécnica de Valencia. Hay que destacar que apenas requiere tener experiencia debido a su fácil uso y como características principales se tienen que resaltar: su sensibilidad térmica es menos de  $0,1^{\circ}\text{C}$ , resolución de radiación infrarroja (IR) de  $80 \times 80$  píxeles, pantalla 2,8 pulgadas, pequeño tamaño, batería 5 horas aproximadamente, etc.



Figura 3.6. Detalle de la cámara de infrarrojos i5

Todas las especificaciones técnicas acerca de la cámara de infrarrojos i5 que se recogen en la Tabla 3.5 se obtuvieron del portal web flir [82]:

Tabla 3.5. Características técnicas de la cámara de infrarrojos i5

<b>CÁMARA INFARROJOS I5</b>	
<b>Información gráfica y óptica</b>	
Campo de visión	17° × 17°
Sensibilidad térmica (NETD)	< 0,1 °C
Frecuencia de imagen	9 Hz
Enfoque (distancia mínima de enfoque)	Sin necesidad de enfocar (desde 0,6 m)
<b>Datos de detección</b>	
Tipo de detector	Matriz de plano focal (FPA), microbolómetro sin refrigerar
Espectro	7,5-13 μm
Resolución IR	80 × 80 píxeles
<b>Presentación de imagen</b>	
Pantalla	LCD a color de 2,8 pulg.
Ajuste de imagen	Ajuste automático (bloqueo de imagen)
<b>Medición</b>	
Rango de medida	0 °C a +250 °C
Precisión	±2 °C o ±2% de lectura
<b>Funciones de medición</b>	
Punto de medida, corrección de emisividad y temperatura reflejada	
<b>Configuración</b>	
Comandos	Gama de colores (blanco y negro, hierro y arcoíris), °C/°F, idioma, formato de fecha y hora
<b>Almacenamiento de imagen</b>	
Tipo de almacenamiento de imagen	Tarjeta miniSD
Formatos de archivo	Estándar JPEG, datos de medición en 14 bits incluido
Compatible con el software de FLIR	FLIR Reporter 8 y FLIR QuickReport
<b>Interfaces de comunicación de datos</b>	
Interfaces	USB Mini-B, intercambio de datos con PC
<b>Sistema de alimentación</b>	
Tipo de batería	Batería de litio recargable
Duración batería	5 horas aprox. a una temperatura ambiente de +25 °C
Sistema de recarga	Recarga de batería dentro de la cámara
Administración de alimentación	Apagado automático
Sistema CA	Adaptador de CA, entrada de 90-260 V CA; salida de 5 V
<b>Información ambiental</b>	
Intervalo de temperaturas para su uso	De 0 °C a +50 °C
Intervalo de temperaturas de almacenamiento	De -40 °C a +70 °C
Humedad (funcionamiento y almacenamiento)	IEC 60068-2-30/24 h; 95% de humedad relativa
Protección	Carcasa de la cámara y lente: IP 43 (IEC 60529)
Choque/vibración	25 g (IEC 60068-2-29)/2 g (IEC 60068-2-6)
<b>Características físicas</b>	
Peso	340 g
Tamaño (l x an x al)	223 x 79 x 83
<b>La cámara incluye</b>	CD con FLIR QuickReport, CD con guía de inicio y manual de usuario en 21 idiomas, cinta para mano, batería, cargador y conexión a red eléctrica compatible con UE, RU, EE. UU. y Australia, cable USB, tarjeta miniSD de 512 MB

### 3.2.2. Equipo de georradar

En esta etapa fue fundamental el equipo georradar aportado por el Instituto Tecnológico de la Construcción AIDICO. Los técnicos del laboratorio del mismo ayudaron en la toma de datos tanto del lote de maderas como de las muestras de hormigón.

El equipo de georradar empleado es el SIR 3000 de la marca comercial GSSI (Geophysical Survey SystemInc), y se compone de una unidad central y una antena. La unidad central posee el equipo de visualización integrado, consiste en una pantalla TFT de 8,4 pulgadas y con una resolución 800 x 600. La unidad de control va unida a la antena mediante una cable coaxial.

La antena se denomina “the palm antenna” y es monoestática, es la encargada de emitir y recibir la energía y posee una frecuencia central de emisión de 2 GHz. Dentro de la carcasa posee dos dipolos separados una distancia determinada, actuando cada uno de emisor y receptor. Sus reducidas dimensiones permite a los usuarios llegar a zonas con poco espacio que previamente eran inaccesibles. La antena incluye una rueda, una placa protectora reemplazable, y un asa desmontable para poder reducir la altura de la antena. En la Figura 3.7 se puede observa el equipo al completo.

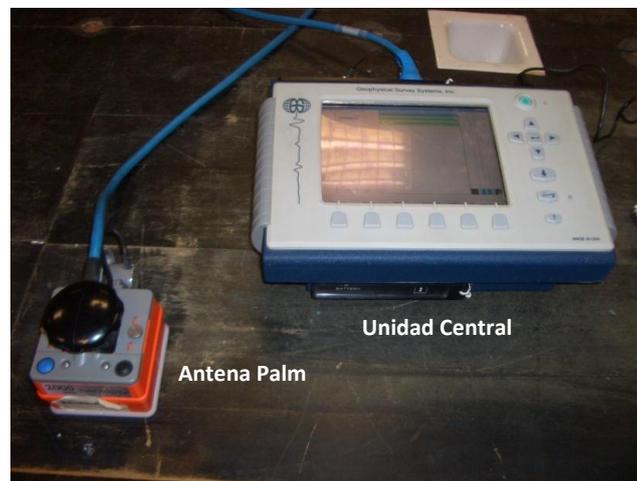


Figura 3.7. Unidad central y antena palm 2 GHz

Las principales características del equipo se obtuvieron de la página [82] y se detallan en la Tabla 3.6 y 3.7.

Tabla 3.6. Características técnicas de la antena del equipo

PALM ANTENNA	
<b>Frecuencia central</b>	2000 MHz
<b>Rango de profundidad</b>	0-12 pulgadas (0,4 m)
<b>Peso de antena con cable de control</b>	3 libras (1,3 kg) con cable de 10 pies (3 m) 4 libras (1,8 kg) con cable 22.75 pies (7 m)
<b>Dimensiones</b>	4.1x3.6x6 en (104.5x91.5x154.7 mm)
<b>Modelo</b>	62000 - 003 (3 m de cable) 62000 - 007 (7 m de cable)

Tabla 3.7. Características técnicas del georradar SIR 3000

<b>SIR 3000</b>	
<b>Sistema</b>	
<b>Antenas</b>	Compatible con todas las antenas GSSI
<b>N.úmero de canales</b>	1 (uno)
<b>Almacenamiento de datos</b>	Memoria interna: Tarjeta de memoria de 2 GB flash Puerto Compact Flash: acepta la memoria estándar de la industria CF de hasta 8GB (proporcionada por el usuario)
<b>Visualización</b>	Enhanced 8.4: TFT, resolución 800 x 600, 64K colores.
<b>Los modos de visualización</b>	Linescan, O-alcance, 3D
<b>Aquisición de datos</b>	
<b>Formato de datos</b>	RADAN (dzt)
<b>Anote ejemplos de escaneado</b>	220 lecturas / seg a 256 muestras / scan, 16 bit 120 lecturas / seg a 512 muestras
<b>Intervalo de exploración</b>	Seleccionable por el usuario
<b>Número de muestras por Scan</b>	256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192
<b>Modos de funcionamiento</b>	Funcionamiento libre, rueda encuesta, el modo de punto
<b>Intervalo de tiempo</b>	0-8,000 nanosegundo escala real, el usuario puede seleccionar Ganancia: 1-5, puntos de ganancia manual o automático (-20 hasta +80 dB)
<b>Filtros</b>	Vertical: de paso bajo y paso alto IIR y FIR Horizontal: Apilar, eliminación de fondo
<b>Idiomas</b>	
	Inglés, francés, italiano, alemán, español, japonés, chino
<b>Operativo</b>	
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	-10°C a 40°C de temperatura ambiente
<b>Requisitos de cargador de energía</b>	15 V DC, 4 amperios
<b>Batería</b>	10.8 V DC, interno
<b>Velocidad de transmisión</b>	Hasta 100 KHz
<b>Entrada / salida</b>	
<b>Puntos disponibles</b>	Entrada de antena Entrada de corriente CC Serie RS232 (puerto GPS) Compact Flash de memoria USB maestro esclavo
<b>Mecánico</b>	
<b>Dimensiones</b>	31.5 (L) x 22 (W) x 10.5 (H) cm 12.4" x 8.7" x 4.1"
<b>Peso</b>	4.1 KG (9 libras) incluyendo la batería
<b>Ambiental</b>	Resistente al agua

### 3.2.3. Otros equipos

A continuación se explican otros equipos secundarios que han sido utilizados en ciertos momentos a lo largo de la investigación (Figura 3.8). El uso de estos equipos es normalmente de forma complementaria a los ensayos. No obstante, como se verá más adelante ello no implica que sea menos importante su empleo.

#### 1. Balanza de precisión Mettler Toledo modelo ISC425

Esta báscula está diseñada para un uso prolongado en espacios industriales. Gracias a su carcasa de aluminio, la protección frente a sobrecargas y el teclado de membrana hace que la durabilidad constituya el sello distintivo de las básculas ICS425. Están diseñadas para realizar un pesaje rápido en su entorno, pudiendo escoger entre varias posiciones ergonómicas, con una fácil configuración de la báscula y hasta 15 horas de funcionamiento móvil. La capacidad máxima de la balanza es de 6.0 kg y la precisión es de 1g.

#### 2. Estufa de secado y esterilización “Conterm” modelo 2000201 del grupo Selecta

Estufa perteneciente a la serie 2000, incorpora un termostato regulador de temperatura y termómetro analógico. Puede alcanzar una temperatura máxima de 250 °C y una mínima de 40°C con una estabilidad de  $\pm 0.5$  °C. Su capacidad interior es de 150 litros, sus dimensiones son 0.7 x 0.98 x 0.68 m con un peso de 78 kg.

#### 3. Máquina de ensayo para materiales de alta resistencia a la compresión – Serie MEH de Ibertest

Máquina para ensayos de materiales tales como hormigón, rocas, bloques, ladrillos, adoquines, etc., mediante el uso de probetas normalizadas. Mediante los accesorios de ensayo adecuados, es posible realizar los siguientes ensayos:

- Ensayos de resistencia a compresión
- Ensayos de resistencia a flexión
- Ensayos de elasticidad, módulo de elasticidad estático y deformación, módulo de Young y coeficiente de Poisson, etc
- Ensayos de tracción indirecta

#### 4. Medidor de climatización multifuncional Testo 435

Con este medidor se pueden realizar mediciones necesarias para ajustar los sistemas de ventilación y climatización y para evaluar el aire interior. Para ello dispone de una amplia selección de sensores y sondas opcionales.

La sonda IAQ permite determinar la calidad del aire interior, CO<sub>2</sub>, humedad, temperatura y presión absoluta, con soporte de sobremesa (Figura 3.9.e).

#### 5. Registrador de datos de temperatura Testo 175 T2

Con este instrumento se puede supervisar la temperatura ambiente con un dispositivo y, al mismo tiempo, registrar en un segundo canal más valores de temperatura. Para realizar esta acción se requiere de una sonda.



Figura 3.8. (a) Balanza de precisión Mettler Toledo. (b) Estufa de secado "Conterm". (c) Máquina de ensayo para materiales de alta resistencia a la compresión. (d) Medidor de climatización multifuncional Testo 435. (e) Sonda IAQ. (f) Registrador de datos de temperatura Testo 175 T2

### 3.3. Estudios preliminares

En este apartado se explican los ensayos preliminares que se realizaron sobre algunas muestras. Todos los ensayos que se describirán ahora y en adelante se han realizado en el Laboratorio de Materiales de Construcción ubicado en la ETSIE, en Universitat Politècnica de València.

Fue necesario realizar estos estudios preliminares para caracterizar los pétreos, porque las empresas que nos los suministraron no nos proporcionaban valores fiables respecto a porosidad abierta.

#### 3.3.1. Determinación del coeficiente de absorción de la Caliza *Cenia*

El primer ensayo que se describe es el realizado al primer pétreo natural conseguido, se trata de la piedra caliza variedad *Cenia*. Las probetas inicialmente tenían una dimensión de 0,15 x 0,15 x 0,08 m<sup>3</sup>, pero para este estudio se decide cortar una probeta en 4 partes, esta partición se realiza en Mármol Gradimar.

Ahora las probetas tienen unas dimensiones de 0,075 x 0,075 x 0,08 m<sup>3</sup>, de las cuatro probetas obtenidas el estudio se realiza sobre dos. Las dos muestras pertenecían a la probeta número 40, y se marcan una con lápiz y otra con rotulador, a partir de ahora y en adelante se las definirá como P40\_L (probeta marcada con lápiz) y P40\_R (probeta marcada mediante rotulador).

El estudio consiste en obtener el coeficiente de absorción de esta piedra caliza. Ambas muestras se sumergen en agua pero no en su totalidad, la muestra P40\_L se sumerge 3 cm y la muestra P40\_R se sumerge 2 cm. Se pretende obtener información de cómo afecta una presión diferente de agua sobre la piedra cenia. Por último cada probeta se marca con una línea guía según si se sumerge 2 ó 3 cm, para facilitar su inmersión.

Una vez definidas y marcadas las dos muestras se mide su masa inicial, posteriormente se introduce en una estufa de secado a 100 °C durante 48 horas. Después de 24 horas de secado las muestras se sacan y se vuelve a medir la masa, con esto se obtienen valores de secado a lo largo del tiempo pudiendo comparar éste con el valor final. Con estas medidas intermedias se conoce cuando la probeta está completamente seca porque su masa apenas varía desde la medición anterior.

Al final del proceso de secado se mide por última vez la masa y se procede al inicio del estudio. Las dos muestras se introducen en agua hasta la altura definida anteriormente, en la cara inferior se colocan fichas para facilitar la succión y que no esté toda la superficie de la probeta apoyada sobre la cubeta. Durante 8 horas se estudiará como varía su masa en función del agua que absorbe cada una. Para ello, las muestras se sacan cada 20 minutos, se secan, se mide la masa y se vuelven a introducir en agua (Figura 3.9).

En la Tabla 3.8., se muestran todos los valores del estudio, así como el agua absorbida en cada momento. El cálculo del coeficiente de absorción se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$C_A = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad (\text{ec. 3.1})$$

donde:

- C<sub>A</sub>: absorción (%)
- M<sub>h</sub>: masa húmeda (g)
- M<sub>s</sub>: masa seca (g)

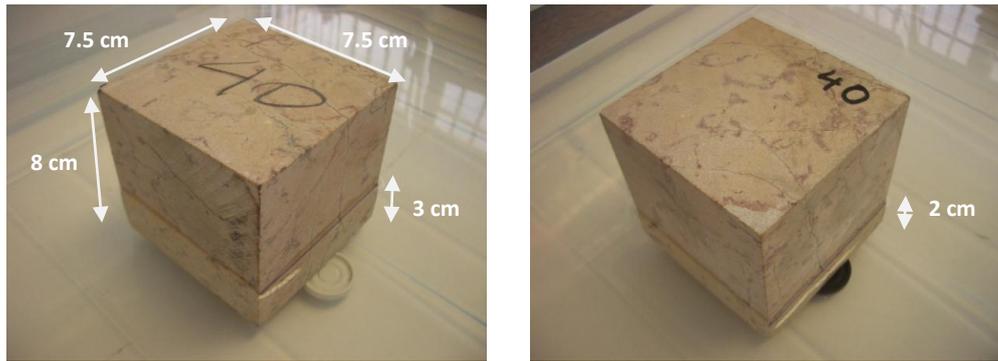


Figura 3.9. (a) Probeta sumergida 3 cm. (b) Probeta sumergida 2 cm

Tabla 3.8. Resultados ensayo de absorción piedra caliza *Cenia*

	P40_L (3 cm) (g)	P40_R (2 cm) (g)	P40_R H <sub>2</sub> O (g)	P40_L H <sub>2</sub> O (g)	P40_R C.ABSORCIÓN (%)	P40_L C.ABSORCIÓN (%)
1h	20'	1175,37	1169,24	0,66	0,90	0,06
	40'	1175,59	1169,37	0,88	1,03	0,07
	60'	1175,51	1169,28	0,80	0,94	0,07
2h	80'	1175,74	1169,48	1,03	1,14	0,09
	100'	1175,75	1169,52	1,04	1,18	0,09
	120'	1175,85	1169,54	1,14	1,20	0,10
3h	140'	1175,95	1169,62	1,24	1,28	0,11
	160'	1175,85	1169,72	1,14	1,38	0,10
	180'	1175,88	1169,79	1,17	1,45	0,10
4h	200'	1175,96	1169,92	1,25	1,58	0,11
	220'	1176,01	1169,96	1,30	1,62	0,11
	240'	1176,07	1169,95	1,36	1,61	0,12
5h	260'	1176,10	1169,92	1,39	1,58	0,12
	280'	1176,11	1169,98	1,40	1,64	0,12
	300'	1176,14	1169,96	1,43	1,62	0,12
6h	320'	1176,18	1170,05	1,47	1,71	0,13
	340'	1176,20	1170,12	1,49	1,78	0,13
	360'	1176,18	1170,11	1,47	1,77	0,13
7h	380'	1176,21	1170,13	1,50	1,79	0,13
	400'	1176,16	1170,14	1,45	1,80	0,12
	420'	1176,21	1170,15	1,50	1,81	0,13
8h	440'	1176,17	1170,17	1,46	1,83	0,12
	460'	1176,22	1170,19	1,51	1,85	0,13
	480'	1176,25	1170,2	1,54	1,86	0,13
Masa Inicial	1174,71	1168,34				
Masa 24 h antes	1175,76	1169,33				
Masa 48 h antes	1176,6	1170,28				

Se analizan los valores obtenidos en el ensayo y se demuestra que la probeta P40\_L alcanza un coeficiente de absorción superior a P40\_R, puesto que, se introdujo mayor superficie de probeta en agua y estaba sometido a una mayor presión del agua. Los valores alcanzados después de 8 horas son: 0,16 % para P40\_L y 0,13 % para P40\_R.

Ambos valores de coeficiente de absorción son muy pequeños, se sospecha que esta variedad tiene una baja porosidad y una alta densidad. Esto se confirma mirando los valores de masa inicial y después de 48 horas de secado, se comparan los datos y el agua evaporada es menor de 2 gramos en ambos casos.

En la Figura 3.10, se aprecia un aumento del coeficiente de absorción durante todo el ensayo pero es un aumento muy leve, ya que pasa de un valor inicial de 0,06 % a 0,13 % en la muestra P40\_R y de 0,08 % a 0,16 % en la muestra P40\_L. Un coeficiente de absorción de 0,16 % en un pétreo se considera que su absorción es casi inexistente.

Es por ello que este lote de caliza no se ha empleado en el estudio de la variación de densidad y análisis de absorción de agua. No obstante, como se trata de un lote muy completo de caliza se ha trabajado con él a la hora de establecer el procedimiento para determinar la emisividad.

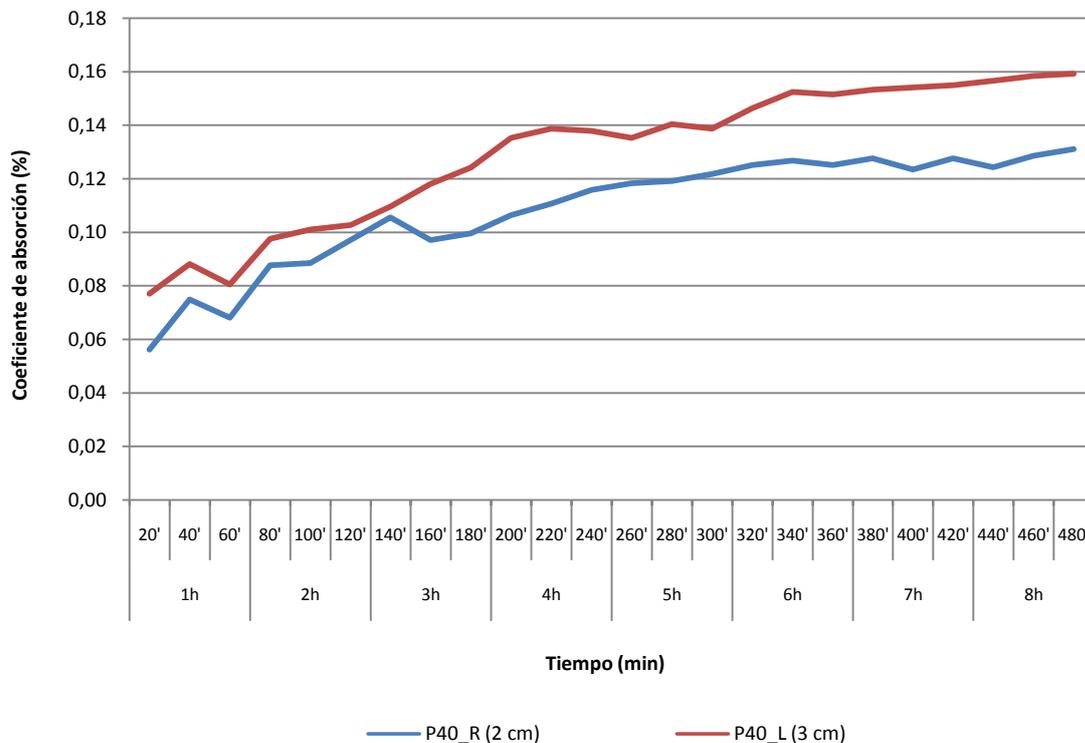


Figura 3.10. Análisis preliminar del coeficiente de absorción

### 3.3.2. Determinación del coeficiente de absorción de un lote variado de pétreo natural

En este apartado se describen los ensayos realizados para determinar el coeficiente de absorción de los 11 pétreos naturales nuevos. Este ensayo consiste en secar las probetas e introducirlas completamente en agua e ir midiendo sus masas lo largo de un periodo de tiempo.

Se coge una probeta de cada tipo de pétreo natural nuevo y se mide su masa, posteriormente se introducen en la estufa de secado durante 48 horas midiendo su masa a mitad de secado y al final. Las muestras secas se sumergen completamente y se mide su masa durante las siguientes 8 horas.

Durante las dos primeras horas se realiza la medición cada 20 minutos, en las siguientes dos horas se realiza cada 30 minutos, posteriormente se anota el peso una vez cada hora.

En las siguientes tablas, se detallan las masas iniciales en condiciones de humedad de equilibrio higroscópico (M), masa seca tras 24 de secado en horno (Ms), masa húmedas para cada medición (Mh), el agua absorbida en cada medición (H<sub>2</sub>O) y el CA calculado según ecuación 3.1.

En las Tablas 3.9, 3.10 y 3.11, se presenta la evolución del coeficiente de absorción a lo largo de las 8h que dura el estudio para cada especie.

Tabla 3.9. Resultados ensayo de absorción de las variedades: *Bateig Azul (P9)*, *Capri (P10)*, *Niwala (P5)*

		Mh P9 (g)	H <sub>2</sub> O P9 (g)	CA P9 (%)	Mh P10 (g)	H <sub>2</sub> O P10 (g)	CA P10 (%)	Mh P5 (g)	H <sub>2</sub> O P5 (g)	CA P5 (%)
1 h	20'	805,6	14,6	1,85	2054,9	58,1	2,91	444,6	19,3	4,54
	40'	810,2	4,6	2,43	2057,5	2,6	3,04	444,8	0,2	4,58
	60'	813,4	3,2	2,83	2058,1	0,6	3,07	444,9	0,1	4,61
2 h	80'	815,6	2,2	3,11	2057,9	-0,2	3,06	444,9	0,0	4,61
	100'	817,7	2,1	3,38	2058,2	0,3	3,07	444,9	0,0	4,61
	120'	819,7	2,0	3,63	2058,3	0,1	3,08	444,9	0,0	4,61
3 h	150'	822,0	2,3	3,92	2058,3	0,0	3,08	445,0	0,1	4,63
	180'	824,1	2,1	4,18	2058,6	0,3	3,09	445,1	0,1	4,66
4 h	210'	825,8	1,7	4,40	2058,7	0,1	3,10	445,0	-0,1	4,63
	240'	827,2	1,4	4,58	2058,8	0,1	3,10	445,1	0,1	4,66
5 h	300'	829,3	2,1	4,84	2059,0	0,2	3,11	445,2	0,1	4,68
6 h	360'	830,5	1,2	4,99	2059,2	0,2	3,12	445,0	-0,2	4,63
7 h	420'	831,1	0,6	5,07	2059,4	0,2	3,14	445,0	0,0	4,63
8 h	480'	831,2	0,1	5,08	2059,5	0,1	3,14	445,0	0,0	4,63
<b>Total H<sub>2</sub>O absorbido</b>		40,2			62,7			19,7		
<b>Aumento de masa tras el ensayo (%)</b>		5,0			3,1			4,6		
<b>En el ensayo, los pétreos están totalmente sumergidos en agua.</b>										
<b>M inicial</b>		799,4			1998,6			426,6		
<b>Ms</b>		791,0			1996,7			425,3		

Tabla 3.10. Resultados ensayo de absorción de las variedades: *Golden Shell (P1)*, *Teak Sand (P4)*, *Almorquí (P3)*, *Dorada Villamonte (P8)*

		Mh P1 (g)	H2O P1 (g)	CA P1 (%)	Mh P4 (g)	H2O P4 (g)	CA P4 (%)	Mh P3 (g)	H2O P3 (g)	CA P3 (%)	Mh P8 (g)	H2O P8 (g)	CA P8 (%)
1 h	20'	585,9	73,4	14,32	345,4	16,3	4,95	423,1	10,8	2,62	477,9	20,5	4,48
	40'	586,1	0,2	14,36	345,7	0,3	5,04	425,6	2,5	3,23	478,6	0,7	4,63
	60'	586,3	0,2	14,40	345,7	0,0	5,04	427,4	1,8	3,66	478,5	-0,1	4,61
2 h	80'	586,3	0,0	14,40	345,7	0,0	5,04	428,7	1,3	3,98	478,5	0,0	4,61
	100'	586,3	0,0	14,40	345,8	0,1	5,07	429,9	1,2	4,27	478,5	0,0	4,61
	120'	586,2	-0,1	14,38	345,7	-0,1	5,04	430,7	0,8	4,46	478,5	0,0	4,61
3 h	150'	586,3	0,1	14,40	345,8	0,1	5,07	431,6	0,9	4,68	478,5	0,0	4,61
	180'	586,3	0,0	14,40	345,8	0,0	5,07	432,8	1,2	4,97	478,4	-0,1	4,59
4 h	210'	586,2	-0,1	14,38	345,7	-0,1	5,04	433,5	0,7	5,14	478,5	0,1	4,61
	240'	586,3	0,1	14,40	345,8	0,1	5,07	434,4	0,9	5,36	478,6	0,1	4,63
5 h	300'	586,3	0,0	14,40	345,8	0,0	5,07	435,3	0,9	5,58	478,6	0,0	4,63
6 h	360'	586,5	0,2	14,44	345,7	-0,1	5,04	435,7	0,4	5,68	478,5	-0,1	4,61
7 h	420'	586,3	-0,2	14,40	345,7	0,0	5,04	436	0,3	5,75	478,6	0,1	4,63
8 h	480'	586,4	0,1	14,42	345,8	0,1	5,07	436,1	0,1	5,77	478,7	0,1	4,66
<b>Total H2O absorbido</b>			73,9			16,7			23,8			21,3	
<b>Aumento de masa tras el ensayo (%)</b>		14,4			5,0			5,7			4,6		
<b>En el ensayo, los pétreos están totalmente sumergidos en agua.</b>													
<b>M inicial</b>		515,5			329,4			417,6			461,9		
<b>Ms</b>		512,5			329,1			412,3			457,4		

Tabla 3.11. Resultados ensayo de absorción de las variedades: *Lumaquela Rosa (P11)*, *Rosa Villamonte (P7)*, *Amarillo Fósil (P2)*, *Arcoiris (P6)*

		Mh P11 (g)	H2O P11 (g)	CA P11 (%)	Mh P7 (g)	H2O P7 (g)	CA P7 (%)	Mh P2 (g)	H2O P2 (g)	CA P2 (%)	Mh P6 (g)	H2O P6 (g)	CA P6 (%)
1 h	20'	484,2	11,70	2,48	464,5	11,7	2,58	451	36,4	8,78	436,9	15	3,56
	40'	485	0,8	2,65	465	0,5	2,69	451,4	0,4	8,88	437,9	1	3,79
	60'	485,4	0,4	2,73	465,3	0,3	2,76	451,5	0,1	8,90	438,4	0,5	3,91
2 h	80'	485,4	0	2,73	465,3	0	2,76	451,4	-0,1	8,88	439	0,6	4,05
	100'	485,8	0,4	2,81	465,4	0,1	2,78	451,3	-0,1	8,85	439,1	0,1	4,08
	120'	486	0,2	2,86	465,5	0,1	2,80	451,3	0	8,85	439,5	0,4	4,17
3 h	150'	485,7	-0,3	2,79	465,5	0	2,80	451,8	0,5	8,97	439,6	0,1	4,20
	180'	485,8	0,1	2,81	465,5	0	2,80	451,8	0	8,97	439,9	0,3	4,27
4 h	210'	485,9	0,1	2,84	465,7	0,2	2,85	452	0,2	9,02	440	0,1	4,29
	240'	486	0,1	2,86	466,1	0,4	2,94	451,9	-0,1	9,00	440,2	0,2	4,34
5 h	300'	485,9	-0,1	2,84	466,1	0	2,94	452,1	0,2	9,04	440,4	0,2	4,38
6 h	360'	485,9	0	2,84	466	-0,1	2,92	452,2	0,1	9,07	440,5	0,1	4,41
7 h	420'	486,2	0,3	2,90	466	0	2,92	452	-0,2	9,02	440,5	0	4,41
8 h	480'	486,2	0	2,90	465,9	-0,1	2,89	452,3	0,3	9,09	440,6	0,1	4,43
<b>Total H2O absorbido</b>			13,7			13,1			37,7			18,7	
<b>Aumento de masa tras el ensayo (%)</b>		2,9			2,8			9,1			4,4		
<b>En el ensayo, los pétreos están totalmente sumergidos en agua.</b>													
<b>M inicial</b>		476,8			456,5			415,8			422,7		
<b>Ms</b>		472,5			452,8			414,6			421,9		

Finalmente, en la Figura 3.11, se detalla la evolución del coeficiente de absorción de todos los pétreos a lo largo de las 8 h de inmersión. Como se observa en la figura sólo 2 de los once tipos de pétreos tras 8 horas de inmersión sufrieron un aumento significativo de su absorción (*Arenisca Almorqui* y *la Caliza Piedra de Bateig*).

Además de las once estudiadas, nueve de ellas presentarán un coeficiente de absorción entre el 3 y el 5 % aproximadamente. Sólo la *Arenisca Golden Shell* tenía un coeficiente de absorción entorno al 15 % y la *Arenisca Amarillo Fósil* entorno al 9 %.

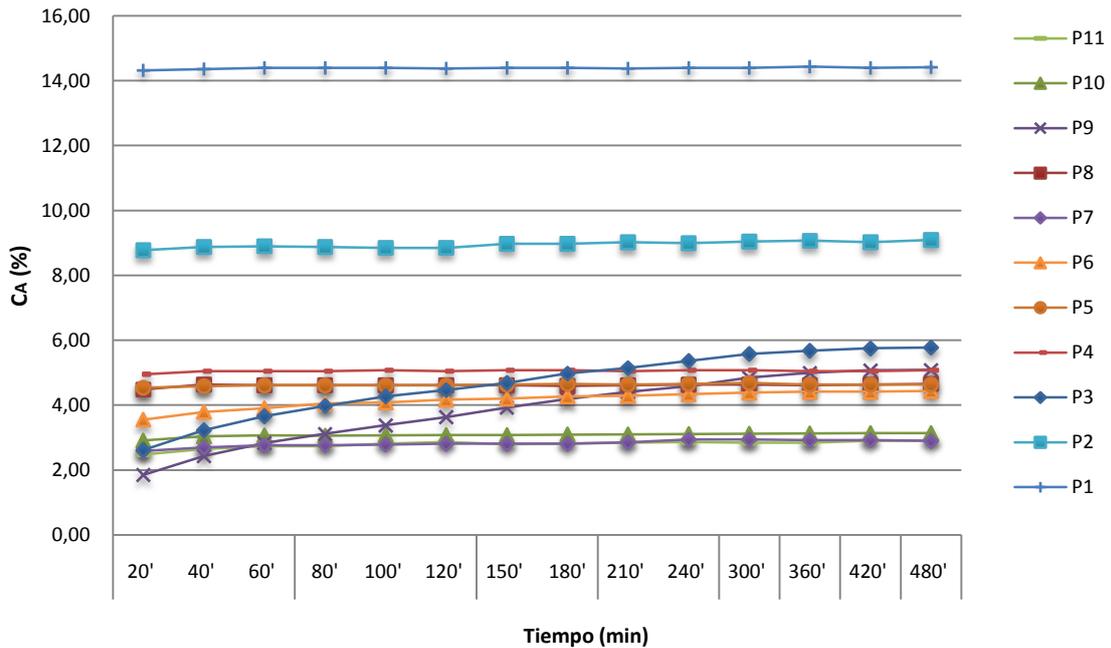


Figura 3.11. Gráfica Coeficiente de absorción de todos los pétreos naturales

### 3.4. Descripción de los ensayos

En esta sección se explican los ensayos realizados para la consecución de los objetivos planteados en este trabajo. Los ensayos son:

1. Determinación de los parámetros característicos de la técnica de georradar y de infrarrojos para cada tipo de material a estudio: emisividad y constante dieléctrica
2. Análisis y variación de densidad de los distintos materiales
3. Absorción y evaporación de agua de los distintos materiales

#### 3.4.1. Determinación de los parámetros característicos de la técnica de georradar y de infrarrojos para cada tipo de material a estudio: emisividad y constante dieléctrica

##### 1. Cálculo de la emisividad

Como se ha visto en el capítulo II, la determinación de la emisividad es necesaria, siempre y cuando se quieran obtener las temperaturas absolutas.

Por circunstancias ajenas a este estudio, sólo se pudo disponer del equipo de termopar necesario para la determinación de la emisividad durante un breve plazo de tiempo. Así que, se eligió el lote más representativo para realizar el estudio a modo de ejemplo de cómo se debería realizar en todos los casos. Finalmente, el lote elegido fue el de la *Caliza Cenia*, ya que, era el que contaba con mayor número de piezas.

El objetivo de este ensayo era el de obtener de forma experimental la emisividad del material a estudio. Para ello se empleó un termopar que nos midió la temperatura de la superficie del objeto. Así mismo, estas piezas se midieron con la cámara termográfica, pero en este caso colocando el valor de la emisividad igual a la unidad. Posteriormente se calculará matemáticamente cual es el valor de la emisividad que mejor ajuste para que ambos valores coincidan.

A continuación, se describe al completo el ensayo realizado para la determinación de la emisividad.

Para el ensayo se construye una caja con poliestireno extruido de 0,03 m con dimensiones 0,3 x 0,3 x 0,15 m<sup>3</sup> (Figura 3.12a), que aloja todas las probetas en los estudios de termografía. Mediante esta técnica se consigue que la cámara i5 capte solo la radiación emitida por la probeta y no la de los materiales adyacentes alterando los resultados.

Para el cálculo de la emisividad se necesita conocer tanto las condiciones ambientales del laboratorio como la temperatura superficial de la probeta. Para las condiciones del entorno se usa el Testo 125 T2, y se usa un termopar de temperatura cuyo material conductor es el aluminio y se realiza la medición por contacto, éste se conecta al medidor Testo 435 (Figura 3.12b). El termopar se adhiere a la probeta de estudio mediante una masilla adhesiva de la marca Imedio.

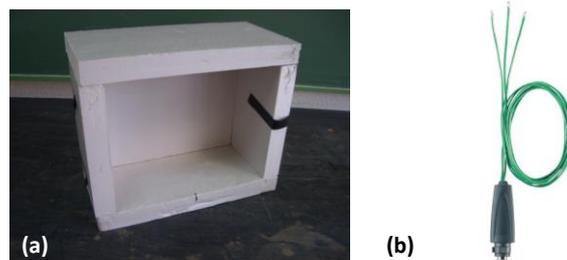


Figura 3.12. (a)Caja de XPS. (b) Detalle sonda termopar

El montaje del estudio realizado se observa en la Figura 3.13. La cámara termográfica se coloca sobre un trípode centrando la imagen de la misma sobre la probeta, la distancia entre ambas es de 1,1 m.

El estudio se inicia colocando la probeta centrada en el marco de XLP y se adhieren las sondas del termopar a la probeta. Al manipular la masilla para adherir las sondas se calientan y por tanto emiten una radiación diferente a la de la muestra, esto se refleja en la imagen termográfica. Es por tanto necesario, esperar durante un tiempo hasta que ambos materiales se equilibren y se pueda tomar la foto termográfica. En este caso, el tiempo estimado experimental es de 5 min.

Finalmente, para cada probeta se dispone de una lectura de temperatura superficial realizada con el termopar y un termograma captado con la cámara de infrarrojos.

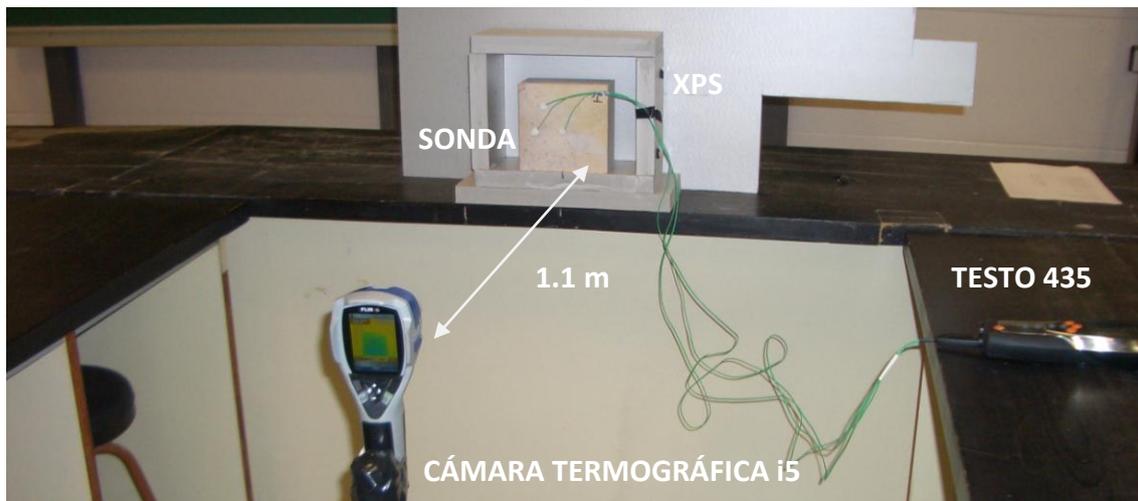


Figura 3.13. Dispositivo de medida de la emisividad

## 2. Constante dieléctrica

Dentro del apartado de caracterización de los materiales también se obtiene la constante dieléctrica mediante la técnica no destructiva del georradar, ya que es necesaria para hallar la equivalencia entre el tiempo doble de propagación (medidos en los radargramas) y la profundidad de un evento o de penetración.

El fundamento de este ensayo es que dado que en este caso se conoce el espesor del medio, podremos conocer la velocidad de propagación del medio a partir de las lecturas en el radargrama de los tiempos de propagación.

En la Figura 3.14a. se muestra el esquema de la trayectoria de propagación de las ondas y en la Figura 3.14b. se observa una traza típica que en la que se diferencian las señales recibidas. Se observan dos partes claramente diferenciadas. En primer lugar, se registra lo que recibe el nombre de onda directa y que consiste en la suma de la energía propagada directamente entre el emisor y el receptor en el aire, y la que se propaga en la parte más superficial de la probeta. En segundo lugar, se registra la onda que se refleja en el reflector metálico situado en la parte inferior de la probeta. Esta segunda parte es lo que se denomina onda reflejada. Se observa que la polaridad de la onda directa y la de la reflejada son de signo contrario como consecuencia de la colocación del reflector metálico.

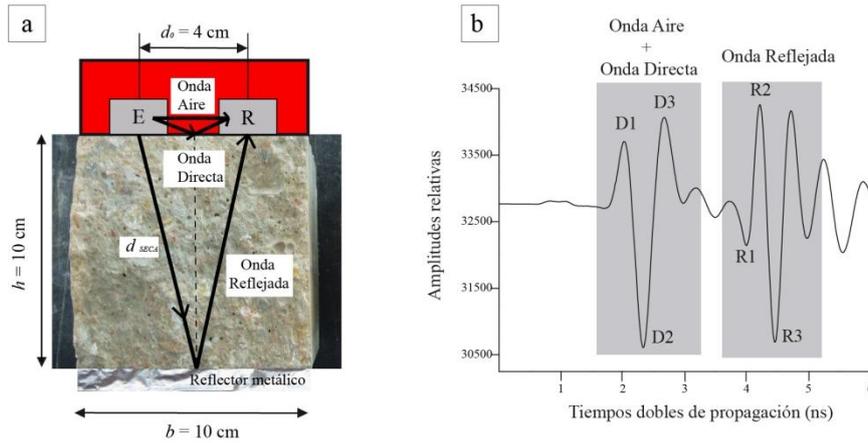


Figura 3.14. (a) Esquema de la trayectoria de propagación de las ondas; (b) Traza característica registrada con un equipo de georradar con una antena de 2 GHz

En estas trazas es donde se pueden medir los parámetros de las ondas directas y reflejadas: tiempos de llegada y amplitudes de cada uno de los máximos y mínimos que las componen. Por medio de la diferencia en los tiempos de llegada entre la onda directa y la onda reflejada ( $\Delta t_R^D$ ) se puede calcular la velocidad de propagación ( $v$ ) de las ondas por el interior del medio a estudio.

A partir de los parámetros de onda y la velocidad de propagación se pueden determinar las propiedades dieléctricas del medio, cuya variación servirá como indicador de la variación que se produce en las propiedades físicas del material. La propagación de las ondas electromagnéticas en un medio es gobernada por sus propiedades electromagnéticas: permeabilidad magnética, conductividad y constante dieléctrica. Ahora bien, en el caso de un material no magnético, de baja conductividad eléctrica y de bajas pérdidas dieléctricas, como ocurre con el hormigón curado, la constante dieléctrica relativa del material ( $\epsilon_r$ ) se puede calcular con la ec. 3.2.

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (\text{ec. 3.2})$$

dónde:

- $c$  es la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío ( $3 \cdot 10^8$  m/s)
- $\epsilon_r$  es la constante dieléctrica relativa de un medio
- $v$  es la velocidad de propagación

Como algunos autores apuntan es muy difícil establecer cuál de los máximos y mínimos que componen una onda es el que se debe elegir como representativo del tiempo de llegada inicial de la onda y son diversos los criterios que se pueden establecer. En el caso de la onda directa, al estar compuesta por la superposición de la onda en el aire y la directa propiamente, es muy complicado establecer cuál es el máximo que indica la llegada de la segunda debido a la superposición de ondas. En cuanto a la onda reflejada, al ser la onda que viaja por el interior del medio y en su trayectoria sufre atenuación y el efecto del medio propiamente, también es muy complicado estimar cual es el máximo representativo de su llegada (Figura 3.14b).

Es por ello, que en este trabajo se considera más apropiado calcular todas las velocidades posibles con las variaciones de los intervalos de tiempos de llegada de las ondas, a partir de la variación en tiempo que se producen en cada uno de sus máximos.

Para ello, en primer lugar se analizan todas las combinaciones posibles de intervalos de diferencia de llegada de la onda directa y la reflejada. Como se indica en la Figura 3.15b en la onda directa se identifican 3 máximos ( $D1$ ,  $D2$  y  $D3$ ) y en la reflejada otros 3 ( $R1$ ,  $R2$  y  $R3$ ). De esta forma, se calcularon todos los intervalos posibles entre máximos y para cada intervalo se promediaron los valores obtenidos en los tres puntos centrales de registro de georradar. A partir de ellos y por medio de la ec. 3.3 se calcularon las velocidades de propagación para cada intervalo considerado.

$$v = \frac{2 \cdot d}{\Delta t_D^R} = \frac{\left(2 \cdot \sqrt{h^2 + \frac{d_0^2}{2}}\right)}{\Delta t_D^R} \quad (\text{ec. 3.3})$$

Siendo  $d$  la semidistancia que recorre la onda reflejada,  $d_0$  la distancia entre emisor y receptor y  $h$  el espesor del medio.

Por todo ello, para el cálculo de la constante dieléctrica se realizó el siguiente ensayo. Lo primero fue tener en cuenta la resolución vertical. En este caso los ensayos se realizarán en aquellas probetas cuyas dimensiones sean mayores que la resolución de la antena con la que se trabaja, esto es más de 10 cm. En este caso se trabajó con probetas de hormigón y madera.

De esta forma el ensayo consistió en tomar los registros de georradar necesarios para el cálculo de la constante dieléctrica de distintos materiales cuando las probetas estaban secas. Para ello, se toman los datos con las muestras a temperatura ambiente. Las mediciones se realizan sobre una placa de acero de dimensiones  $0,3 \times 0,3 \times 0,01 \text{ m}^3$  envuelta en papel de aluminio (Figura 3.15a), esta refleja las ondas emitidas por la antena, también se realizan mediciones con las probetas elevadas en el aire para obtener registros alternativos que serán útiles en caso de obtener registros débiles. Se enumeran todas las caras de todas las probetas para maximizar el control de los resultados. Las mediciones se efectúan de diferente forma en las probetas de madera y en las probetas de hormigón.

En las 8 muestras de madera se coloca la antena sobre el canto, y se tiene en cuenta la dirección de las fibras ya que la velocidad de propagación varía en función de ellas. Por tanto, se realiza dos medidas por canto, con la antena paralela a las fibras y con la antena perpendicular a las fibras, obteniéndose un total de 4 registros por probeta (Figura 3.15b). En el caso de las probetas de hormigón se toma una medida en todas sus caras, así pues, se obtienen 6 registros de georradar de cada prisma (Figura 3.15c).

Una vez registrados los radargramas, se toman las lecturas de tiempos de propagación de onda directa y reflejada. A partir de ellos, se calcula la velocidad de propagación y la cte. Dieléctrica.

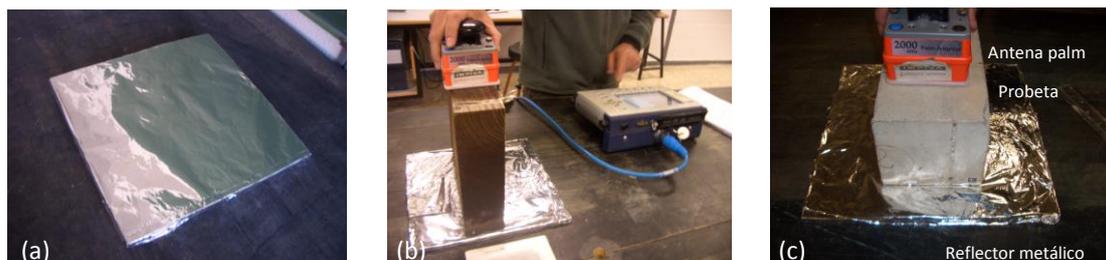


Figura 3.15. (a) Placa de acero. (b) Medición probeta de madera en canto. (c) Medición probeta de hormigón en tabla

### 3.4.2. Análisis y variación de densidad

El objetivo de estos ensayos es comprobar cuál de las 2 técnicas a estudio (georradar y termografía de infrarrojos) nos proporcionan valores más fiables sobre la densidad de los materiales y su variación.

Para ello se realizarán los ensayos con las 2 técnicas. En primer lugar, se realizó el ensayo con la termografía. El objeto era comprobar si por medio de la termografía se podían registrar las diferencias de densidades de los distintos lotes de materiales y para la consecución de este objetivo se diseñó el siguiente experimento.

La disposición de los equipos es idéntica que el ensayo de emisividad descrito anteriormente. En este caso no se precisa de termopar, las condiciones de temperatura y humedad del laboratorio se miden mediante el Testo 435.

Las probetas se introducen en la estufa de secado durante 72 horas, el lote de madera se seca a una temperatura de 60 °C y los pétreos a 100 °C. Se extraen las probetas individualmente y se colocan en la caja de XLP. Durante 60 minutos se realizan fotos termográficas y se estudia la variación de temperatura en función de la densidad de la muestra, es decir, como se produce la evaporación dependiendo de la densidad del material.

Se realiza una foto en intervalos de tiempo determinados previamente (1', 5', 10', 20', 30', 45', 60'), cada vez que se realiza una foto termográfica se anota las condiciones de temperatura y humedad del entorno y se registra un archivo.

Este proceso se repite con todas las muestras del estudio. En la Figura 3.16, se aprecia la variación de temperatura con el tiempo que se produce en una muestra y la colocación de los equipos para este estudio.

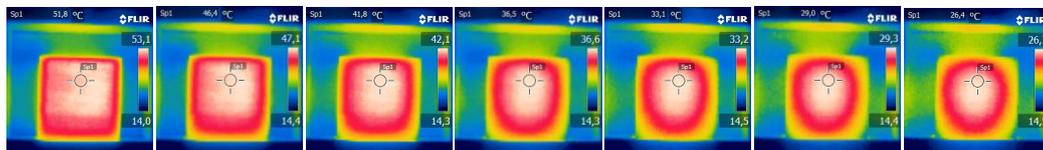


Figura 3.16. Termogramas de variación de temperatura en la probeta de madera *Cerejeira*

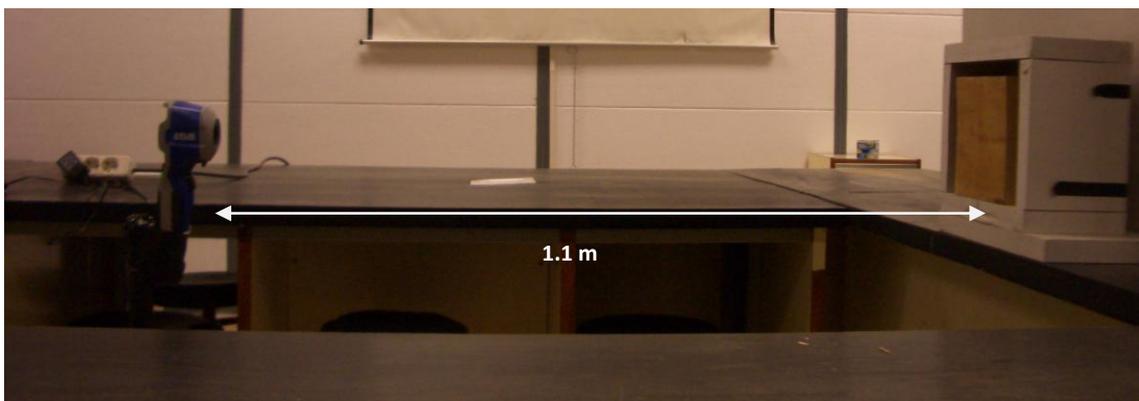


Figura 3.17. Disposición de la toma de registros termográficos para el análisis de densidad

Después de realizar el análisis de densidad mediante la técnica no destructiva de la termografía, se realiza el mismo estudio mediante el georradar.

En este caso, el objetivo es comprobar si la constante dieléctrica calculada a partir de los registros de georradar, nos permite obtener información sobre las diferencias de densidad de los distintos lotes de materiales. Para este ensayo la disposición del equipo y la toma de datos se efectúa de la misma manera descrita anteriormente en el apartado 3.4.1, la medición también se realiza en seco sin y previo secado (Figura 3.18)

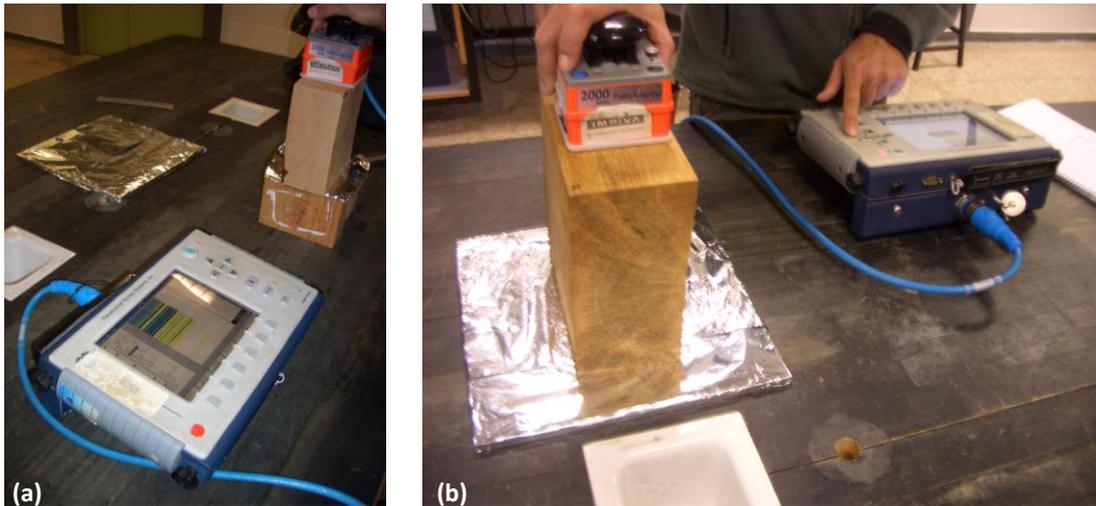


Figura 3.18. (a) Disposición del equipo de georradar para análisis de densidad (b) Análisis de densidad mediante georradar en madera seca

### 3.4.3. Absorción y evaporación de agua

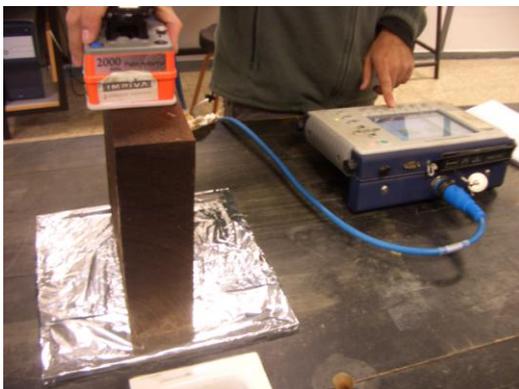
En este caso, el objetivo del estudio era evaluar cual de las dos técnicas nos proporcionan valores más fiables sobre cómo se produce la absorción de agua en el material. Primero se describe el ensayo mediante termografía, donde la disposición del equipo es idéntica a la descrita en el apartado 3.4.2.

Ahora bien, todas las probetas se introducen completamente en agua durante las 72 horas previas al estudio. Trascurrido ese tiempo, se extraen una a una, se retira el agua superficial y se colocan en la caja de XLP. Cada hora se toma una foto termográfica durante el periodo de estudio estimado, y se estudia cómo se produce la evaporación (Figura 3.19).

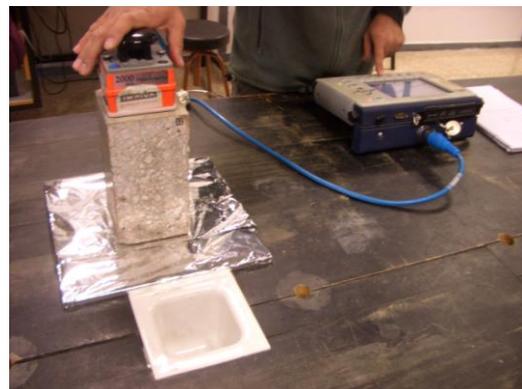


Figura 3.19. Lote de hormigón inmerso en agua

Para realizar el estudio de absorción mediante el georradar se precisa de los datos en seco y en húmedo de las probetas. Los datos en seco se obtienen del ensayo de la constante dieléctrica. Para obtener los datos en húmedo las probetas se sumergen 72 horas en agua, al extraerlas se vuelven a tomar las mismas mediciones descritas en el ensayo de la constante dieléctrica, con el fin de comparar los datos obtenidos y la variación que se produce en ésta como consecuencia de la absorción de agua.



(a)



(b)

Figura 3.20. (a) Obtención de registros en madera húmeda. (b) Obtención de registros en hormigón húmedo



## **CAPÍTULO IV. Resultados e interpretación**

Procesado preliminar de imágenes termográficas

Procesado preliminar de registros del georradar

Caracterización de los materiales

Análisis y variación de densidad

Absorción y evaporación de agua



## CAPÍTULO IV. Resultados

Esta sección recoge todos los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados en este trabajo y su posterior análisis.

### 4.1. Procesado preliminar de imágenes termográficas

Para el procesado de datos obtenidos de la cámara de infrarrojos se usó el programa *FLIR Research IR 3.4 S.P.*, con el cual se analizaron las diferentes variables, evaluando su relevancia en la obtención de la imagen digital final.

Las variables estudiadas son aquellas que el software permite modificar: paleta de colores, emisividad, temperatura reflejada, temperatura ambiente, humedad relativa y distancia.

A continuación se explica el procedimiento desarrollado para este trabajo para el procesado de los registros obtenidos mediante la cámara infrarroja, desde que se realiza la foto hasta que se convierte en un valor a interpretar. Este método se emplea en todos los ensayos que lo requieran sin modificación ninguna.

Como punto de inicio se necesita saber cuál es la calidad de imagen de la cámara empleada en los ensayos, como se describe en el apartado 3.2.1, el modelo empleado es el i5 perteneciente a la casa comercial *Flir*. Esta característica se encuentra dentro de las especificaciones técnicas de la misma [82]. En este caso obtenemos que la calidad de la imagen extraída de la cámara i5 es de 80 x 80 píxeles, con un total de 6.400 píxeles, donde cada uno representa a una unidad de temperaturas (Figura 4.1).

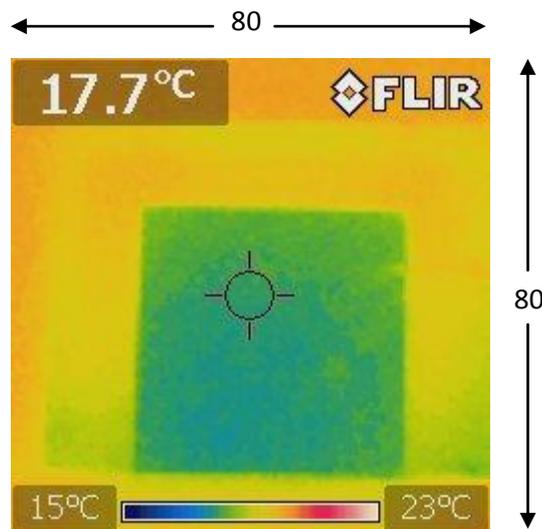


Figura 4.1. Imagen termográfica con dimensiones 80 x 80 píxeles

En el apartado 3.4.1 se explica la construcción de una caja de poliestireno extruido con el fin de captar únicamente la radiación emitida de la probeta sin que el entorno contamine los resultados. Además, esta caja será el encuadre de la cámara infrarroja debido a que la propia cámara no puede encuadrar las probetas perfectamente sin que obtengamos el entorno inmediato afectando a los resultados.

Una vez finalizado el ensayo y con todos los registros dentro de la cámara, se descargan en un ordenador a través de un cable USB. Para poder abrir y modificar los archivos se necesita de un programa apto para ello, en este caso se usó el programa de la propia casa comercial: *FLIR Research IR 3.4 S.P.* Solo disponíamos de la versión demo, por lo que el tratamiento de los datos que se pudo realizar con este programa es muy escaso. A través de este programa los registros se guardan como archivos con extensión “csv”, estos nuevos archivos contienen todos los valores de temperatura por unidad en modo de tabla y podemos trabajar con ellos mediante *Microsoft Office Excel*, en este caso se usó la versión de 2007 del mismo (4.2.a). Una vez en el programa vemos que refleja una tabla de temperaturas de 80 filas y 80 columnas en total 6.400 valores, sabemos que dentro de este cuadro se encuentran los valores pertenecientes a la probeta pero falta delimitarlos, para ello se creó el procedimiento nombrado al principio del apartado.

El método consistió en usar el programa informático *Autodesk Autocad* para definir el contorno de cada probeta y trasladar esa geometría al cuadro de valores de *Microsoft Excel*. Como las imágenes descargadas directamente desde la cámara tienen extensión “jpg” se pueden importar directamente al programa.

Una vez con la imagen dentro del programa se le crea una matriz encima de 80 líneas en eje “x” y eje “y”, imitando la calidad de la imagen (80 x 80 píxeles). Se enumeran del 0 al 80 en ambos sentidos y se determinan los dos ejes verticales que definen la probeta en vertical y los dos ejes que la definen en horizontal. Una vez identificados los 4 ejes, se definen los vértices mediante coordenadas (x,y) (Figura 4.2b); únicamente se definirán el vértice superior izquierdo y el vértice inferior derecho de cada pieza. Esto se debe a que con esos dos vértices, el programa *Microsoft Excel* mediante su expresión matemática promedio ya crearía el área correspondiente de la probeta.

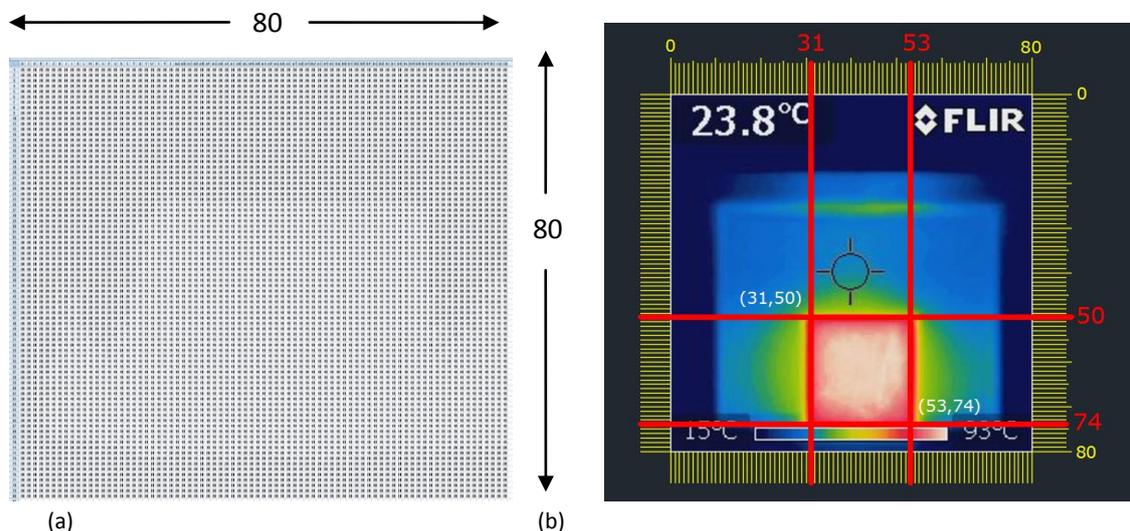


Figura 4.2. (a) Tabla de dimensiones 80 x 80 valores proveniente del archivo “csv”. (b) Delimitación de imagen termográfica mediante el programa informático *Autocad*

El último paso de este método sería identificar estos dos vértices dentro de la tabla de 80 filas y 80 columnas. Se sabe que las filas en Microsoft Excel van numeradas del 1 hasta  $\infty$  y las columnas están numeradas mediante letras (A->Z, AA->AZ, BA->BZ...), quedando una nomenclatura como ejemplo AC12.

Con estas premisas se procede a obtener el promedio de temperaturas de cada probeta a estudiar. Como ejemplo del párrafo anterior se procede a realizar un breve ejemplo del cálculo a través de *Microsoft Excel* (Figura 4.3):

- Vértice superior izquierdo: coordenadas en *Autodesk Autocad* (31,50), corresponden en Microsoft Excel a la celda (AE50) (columna 31 y fila 50)
- Vértice inferior derecho: coordenadas en *Autodesk Autocad* (53,74), corresponden en Microsoft Excel a la celda (BA74)

Para finalizar se realiza el promedio mediante esta expresión: PROMEDIO(W26:BN26), como resultado se obtendrá el promedio de temperatura de la probeta en cada instante de estudio. Si recopilamos todos los registros de termografía se han procesado más de 535 imágenes termográficas.

The image shows a screenshot of a Microsoft Excel spreadsheet. The grid is 80 columns wide and 80 rows high. The columns are labeled with letters from A to CH, and the rows are labeled with numbers from 1 to 80. The data cells contain numerical values. Two specific cells are highlighted: cell AE50 (row 50, column AE) and cell BA74 (row 74, column BA). The spreadsheet is used to identify vertices in a 'csv' record.

Figura 4.3. Identificación de vértices en registro "csv" mediante el programa *Microsoft Office Excel*

## 4.2. Procesado preliminar de registros del georradar

En este apartado se explica el procedimiento seguido para el proceso de los registros obtenidos del equipo de georradar.

El primer paso es descargar los registros que se encuentran dentro de la memoria del propio equipo de medición, esto se realiza mediante un *pendrive* debido a que el georradar posee esa conexión. Una vez se tienen todos los archivos, se necesita un *software* que nos permita trabajar con ellos, en este caso el programa que se usó fue el *Radan-NT* de la marca *GSSI* (Figura 4.4a).

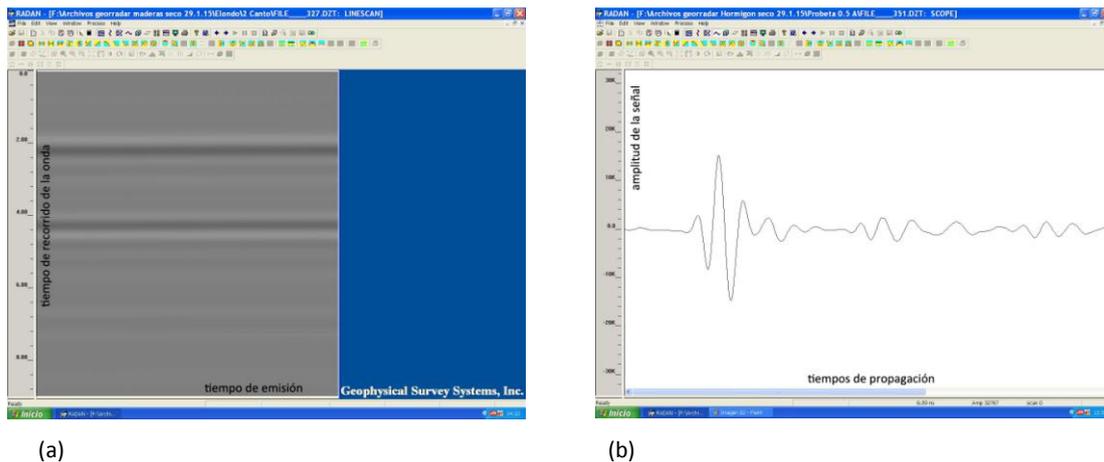


Figura 4.4. (a) Interfaz programa *Radan-NT*. (b) Ejemplo de onda registrada

Cada registro se define como una onda, tal y como podemos visualizar en la Figura 4.4b. El procesado consiste en identificar para cada registro los máximos y mínimos de la onda directa (D1, D2, D3) y de la onda reflejada (R1, R2, R3) tal como se muestra en la siguiente figura. Las ondas vienen expresadas en eje “x” por el tiempo (ns) y en eje “y” por la amplitud, para el estudio necesitamos el tiempo de cada máximo y mínimo.

Hay que tener en cuenta que los máximos y mínimos de la onda reflejada varía según las características del material y del espesor del mismo. En la Figura 4.5 se puede apreciar esa diferencia entre madera y hormigón. Esto, se tendrá en cuenta en la identificación de los puntos en cada material.

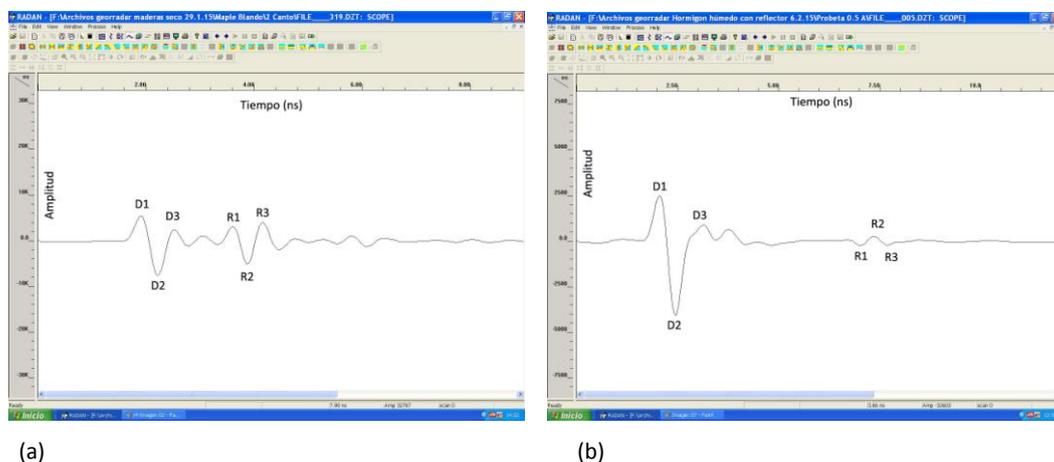


Figura 4.5. (a) Onda directa y reflejada en madera. (b) Onda directa y reflejada en hormigón

En algunas ocasiones se obtiene una señal muy débil de un probeta, lo que dificulta la identificación de la onda reflejada. Para solventar este problema se realizaron medidas con las probetas colocadas sobre un reflector metálico, que nos devolverá toda la energía recibida y por tanto facilitará la obtención de la onda reflejada.

En la siguiente figura se demuestra lo comentado en el párrafo anterior, se superpone los registros obtenidos de una misma probeta con reflector metálico y sin reflector metálico. Se observa que la onda directa obviamente no varía, pero la reflejada son opuestas en alguna sección. Para identificar los puntos R1-R2-R3 tenemos que encontrar dicha sección cuyo mínimo en la onda sin reflector tenga un máximo en la onda con reflector metálico, y así proceder con el resto.

Todo esto se hace con el objetivo de poder identificar los máximos y mínimos de las reflejadas. Al colocar un reflector metálico sobre la muestra se produce un cambio de polaridad y esto nos va a permitir identificar las llegadas de R1, R2, R3 por comparación a la medición cuando no se coloca el reflector metálico.

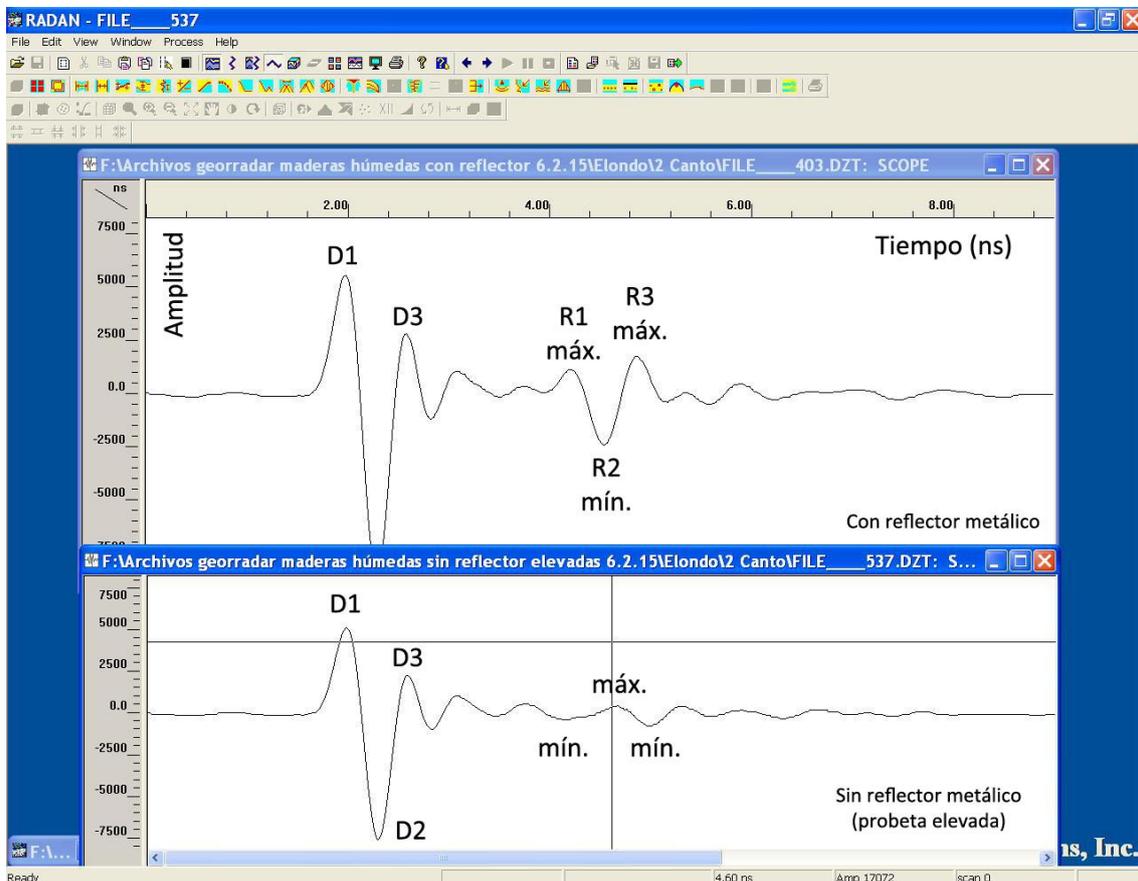


Figura 4.6. Superposición de registro obtenido de probeta sobre metal con probeta elevada

Para finalizar, ya tendríamos los máximos y mínimos de cada probeta en estado seco y húmedo, la obtención de las velocidades de propagación se realiza mediante la ecuación 3.3. Debido a que es difícil establecer cuál de los máximos es representativo de la llegada de las ondas directas y de las reflejadas. Lo que se ha realizado es calcular las velocidades de propagación con todas las combinaciones de máximos posibles. Finalmente, las velocidades calculadas son las correspondientes a estos intervalos: R1-D1, R1-D2, R1-D3, R2-D1, R2-D2, R2-D3, R3-D1, R3-D2, R3-D3.

### 4.3. Caracterización de materiales

#### 4.3.1. Termografía: emisividad

El lote empleado para el estudio y cálculo de la emisividad fue el de la caliza de variedad *Cenia*. En la tabla 4.1. se detallan los principales parámetros registrados para el desarrollo del ensayo: masa en el momento del ensayo (M), la temperatura ambiente de la sala, archivo, instante del registro, temperatura del termopar obtenida desde el medidor *Testo 435*, y temperatura de la cámara obtenida mediante el procesado explicado en el apartado 4.1.

Tabla 4.1. Parámetros termográficos registrados de la variedad *Cenia*

P12	M (g)	T.AMBIENTE (°C)	ARCHIVO	HORA	T.TERMOPAR (°C)	T.CÁMARA TERM. (°C)
1	4891,2	19,1	864	12:01	17,9	18,8
2	4913,6	19,1	865	12:08	17,9	18,8
3	4826,4	19,1	866	12:14	18,0	18,9
4	4826,6	19,0	867	12:20	17,9	18,8
5	4864,1	19,0	868	12:27	18,1	19,1
6	4952,0	18,9	869	12:35	18,3	19,2
7	4907,3	18,9	870	12:42	18,3	19,2
8	4768,3	18,9	871	12:48	18,4	19,4
9	4807,4	18,9	872	12:55	18,5	19,6
10	4826,6	18,9	873	13:01	18,6	19,5
11	4995,5	18,9	874	13:14	18,5	19,5
12	4940,4	18,9	875	13:20	18,7	19,6
13	4893,4	18,9	876	13:27	18,6	19,4
14	5001,0	18,9	877	13:35	18,7	19,6
15	4801,1	18,9	878	13:49	18,9	19,8
16	4903,1	19,0	879	14:09	18,8	19,7
17	4943,3	19,1	880	14:29	18,8	19,6
18	4864,6	19,1	882	14:46	18,7	19,5
19	4882,8	19,1	883	14:53	18,8	19,6
20	4855,5	19,2	884	14:59	18,9	19,9
21	4894,8	19,2	885	15:07	18,8	19,7
22	4969,1	19,2	886	15:13	18,7	19,7
23	4870,2	19,2	887	15:21	18,9	19,8
24	4917,2	19,2	888	15:28	18,9	19,8
25	4923,0	19,2	889	15:34	19,0	19,8
26	4822,6	19,2	890	15:41	18,9	19,7
27	5063,2	19,2	891	15:48	18,8	19,6
28	4800,3	19,2	892	15:54	18,7	19,7
29	4869,7	19,2	893	16:00	18,8	19,7
30	4877,0	19,2	894	16:25	18,9	19,8
31	5047,3	19,3	895	16:31	18,7	19,8
32	4933,2	19,3	896	16:37	18,6	19,4
33	4819,1	19,3	897	16:43	18,7	19,7
34	5109,5	19,3	898	16:49	18,9	19,9
35	5063,2	19,3	899	16:55	18,9	19,8
36	4867,1	19,3	900	17:10	18,8	19,7
37	4805,2	19,3	901	17:17	18,8	19,7
38	4845,4	19,4	902	17:24	18,9	19,7
39	4938,0	19,4	903	17:30	18,8	19,6
40	4827,8	19,4	904	17:37	18,8	19,6
41	4948,7	19,4	905	17:43	18,9	19,7
42	4832,3	19,4	906	17:55	19,0	19,9
43	4861,0	19,4	907	18:04	19,1	20,0
44	4952,3	19,4	908	18:10	19,1	20,0

Analizando las temperaturas de la Tabla 4.1. se observa que los valores máximos y mínimos registrados con el termopar varían de 17,9 °C a 19,9 °C, los del termograma varían de 18,8 °C a 20,0 °C, mientras que la temperatura ambiente varía de 19,1 °C a 19,4 °C.

Una vez obtenidas las temperaturas con el termopar y obtenido el valor promedio de la temperatura del termograma por medio del procedimiento desarrollado en este trabajo, se está en disposición de calcular la emisividad según la siguiente ecuación:

$$T_{\text{termopar}} = \varepsilon \cdot T_{\text{promedio}} \quad (\text{ec. 4.1})$$

En la Tabla 4.2 se detallan los valores de emisividad de cada probeta calculados mediante la ecuación anterior. Como valor promedio se obtiene que la emisividad es de 0,95, calculadas con una desviación típica de 0,00.

Tabla 4.2. Valores de emisividad de la variedad *Cenia*

NÚMERO PROBETA	EMISIVIDAD	NÚMERO PROBETA	EMISIVIDAD
1	0,95	23	0,95
2	0,95	24	0,95
3	0,95	25	0,96
4	0,95	26	0,96
5	0,95	27	0,96
6	0,95	28	0,95
7	0,95	29	0,95
8	0,95	30	0,95
9	0,94	31	0,94
10	0,95	32	0,96
11	0,95	33	0,95
12	0,95	34	0,95
13	0,96	35	0,95
14	0,95	36	0,95
15	0,95	37	0,95
16	0,95	38	0,96
17	0,96	39	0,96
18	0,95	40	0,96
19	0,96	41	0,96
20	0,95	42	0,95
21	0,95	43	0,95
22	0,95	44	0,95
<b>PROMEDIO</b>			<b>0,95</b>
<b>DESVIACIÓN TÍPICA</b>			<b>0,00</b>

Con objeto de confirmar la bondad de este resultado, se realiza el ajuste entre las temperaturas del termopar y las promedio (Figura 4.7). Se comprueba como la pendiente de la recta coincide con la emisividad obtenida con un coeficiente de correlación de  $R^2=0,95$ .

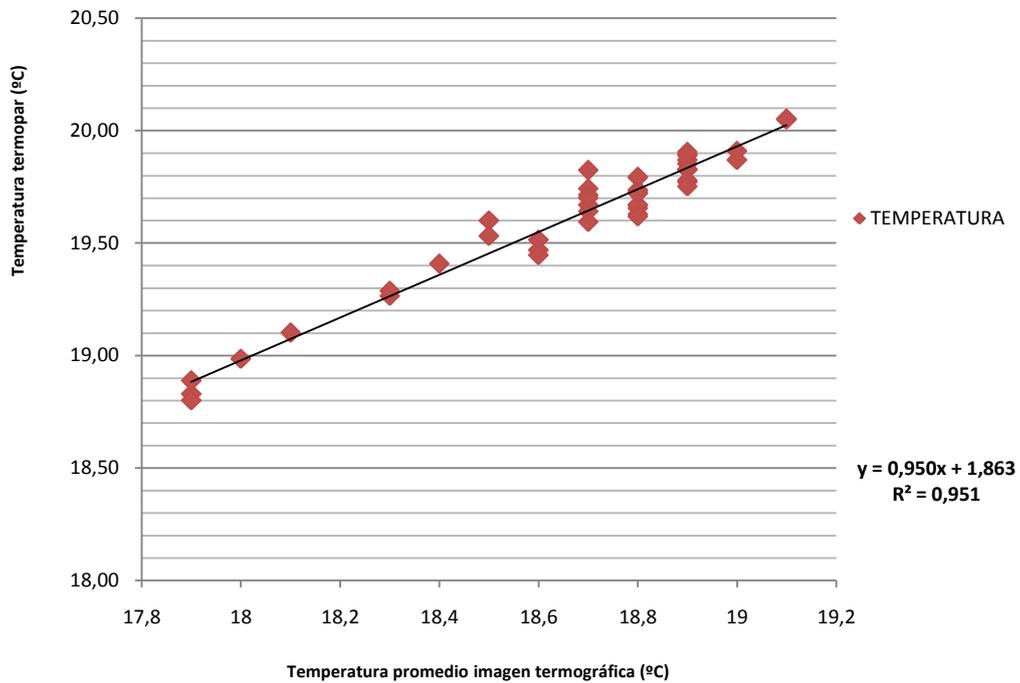


Figura 4.7. Ajuste de la temperatura obtenida con el termopar y la cámara termográfica de la variedad *Cenia*

### 4.3.2. Georradar: constante dieléctrica

Tal y como se detalla en el apartado 3.4.1. para el cálculo de la constante dieléctrica se necesita conocer la velocidad de propagación ( $v$ ) en el medio. Además para calcular la velocidad de propagación se necesita conocer los tiempos de propagación de la onda directa y la reflejada.

Estos tiempos se han medido en el radargrama por medio del software propio de la marca GSSI que se llama *Radan-NT*, y las velocidades de propagación han sido calculadas mediante el procedimiento expuesto en el apartado 4.2.

No obstante, tal y como se indica en el apartado 3.4.1, es difícil estimar cual es el máximo representativo de la llegada de la onda directa y la reflejada. Así que, las velocidades de propagación y sus respectivas constantes dieléctricas se calcularán con todas las combinaciones de máximos posibles.

Las constantes dieléctrica resultantes para las probetas de madera y hormigón se detallan en las siguientes tablas:

#### 1. Madera

Las siguientes tablas son el resultado del procesado de más de 30 registros y contienen la información necesaria para la obtención de la constante dieléctrica, y contienen los siguientes conceptos:

- Incrementos de tiempos entre la onda directa y la onda reflejada en ns ( $\Delta t$ ), medidos en el radargrama y son el promedio de las dos lecturas en canto.
- Velocidades de propagación en cm/ns ( $v$ ): calculadas mediante el procesado de registros del georradar.
- Constante dieléctrica ( $\epsilon$ ): calculadas mediante la expresión 3.2.

En el Anexo 1.1 se adjuntan las lecturas completas realizadas en cada una de las probetas.

Tabla 4.3. Constantes dieléctricas del lote de maderas

M1						
	Fibras paralelas			Fibras perpendiculares		
	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$
<b>D1-R1</b>	-1,54	26,49	1,28	-1,59	25,74	1,36
<b>D1-R2</b>	-1,79	22,79	1,73	-1,84	22,17	1,83
<b>D1-R3</b>	-2,04	20,00	2,25	-2,10	19,43	2,38
<b>D2-R1</b>	-1,25	32,64	0,84	-1,28	32,00	0,88
<b>D2-R2</b>	-1,50	27,20	1,22	-1,53	26,67	1,27
<b>D2-R3</b>	-1,75	23,31	1,66	-1,79	22,79	1,73
<b>D3-R1</b>	-0,96	42,72	0,49	-0,98	41,63	0,52
<b>D3-R2</b>	-1,21	33,86	0,79	-1,24	33,04	0,82
<b>D3-R3</b>	-1,46	28,04	1,14	-1,50	27,29	1,21

<b>M2</b>						
	<b>Fibras paralelas</b>			<b>Fibras perpendiculares</b>		
	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$
<b>D1-R1</b>	-1,60	22,57	1,77	-1,71	21,11	2,02
<b>D1-R2</b>	-1,85	28,02	1,15	-1,97	18,27	2,69
<b>D1-R3</b>	-2,13	35,82	0,70	-2,26	15,97	3,53
<b>D2-R1</b>	-1,29	19,46	2,38	-1,39	25,99	1,33
<b>D2-R2</b>	-1,54	23,38	1,65	-1,65	21,82	1,89
<b>D2-R3</b>	-1,82	28,57	1,10	-1,94	18,60	2,60
<b>D3-R1</b>	-1,01	16,90	3,15	-1,10	32,88	0,83
<b>D3-R2</b>	-1,26	19,78	2,30	-1,36	26,47	1,28
<b>D3-R3</b>	-1,54	23,38	1,65	-1,65	21,88	1,88

<b>M3</b>						
	<b>Fibras paralelas</b>			<b>Fibras perpendiculares</b>		
	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$
<b>D1-R1</b>	-1,80	21,11	2,02	-1,93	19,69	2,32
<b>D1-R2</b>	-2,07	18,40	2,66	-2,20	17,27	3,02
<b>D1-R3</b>	-2,33	16,31	3,38	-2,47	15,38	3,80
<b>D2-R1</b>	-1,50	25,33	1,40	-1,63	23,31	1,66
<b>D2-R2</b>	-1,77	21,53	1,94	-1,90	20,00	2,25
<b>D2-R3</b>	-2,03	18,72	2,57	-2,17	17,51	2,93
<b>D3-R1</b>	-1,21	31,54	0,90	-1,33	28,57	1,10
<b>D3-R2</b>	-1,47	25,85	1,35	-1,60	23,75	1,60
<b>D3-R3</b>	-1,74	21,90	1,88	-1,87	20,32	2,18

<b>M4</b>						
	<b>Fibras paralelas</b>			<b>Fibras perpendiculares</b>		
	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$
<b>D1-R1</b>	-1,30	21,54	1,94	-1,39	20,14	2,22
<b>D1-R2</b>	-1,56	17,95	2,79	-1,64	17,07	3,09
<b>D1-R3</b>	-1,81	15,51	3,74	-1,90	14,74	4,14
<b>D2-R1</b>	-1,00	28,00	1,15	-1,08	25,93	1,34
<b>D2-R2</b>	-1,26	22,22	1,82	-1,33	21,05	2,03
<b>D2-R3</b>	-1,51	18,61	2,60	-1,59	17,61	2,90
<b>D3-R1</b>	-0,73	38,36	0,61	-0,79	35,44	0,72
<b>D3-R2</b>	-0,99	28,29	1,12	-1,04	26,92	1,24
<b>D3-R3</b>	-1,24	22,68	1,75	-1,30	21,54	1,94

<b>M5</b>						
	<b>Fibras paralelas</b>			<b>Fibras perpendiculares</b>		
	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$
<b>D1-R1</b>	-1,67	23,37	1,65	-1,74	22,48	1,78
<b>D1-R2</b>	-1,94	20,11	2,23	-2,09	18,71	2,57
<b>D1-R3</b>	-2,23	17,53	2,93	-2,34	16,70	3,23
<b>D2-R1</b>	-1,39	28,18	1,13	-1,42	27,47	1,19
<b>D2-R2</b>	-1,66	23,58	1,62	-1,77	22,04	1,85
<b>D2-R3</b>	-1,94	19,59	2,35	-2,02	18,81	2,54
<b>D3-R1</b>	-1,09	36,01	0,69	-1,13	34,67	0,75
<b>D3-R2</b>	-1,36	28,81	1,08	-1,48	26,44	1,29
<b>D3-R3</b>	-1,64	23,79	1,59	-1,73	22,61	1,76

M6						
	Fibras paralelas			Fibras perpendiculares		
	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$
D1-R1	-2,23	22,42	1,79	-2,58	19,42	2,39
D1-R2	-2,54	19,69	2,32	-2,85	17,54	2,92
D1-R3	-2,82	17,73	2,86	-3,13	15,97	3,53
D2-R1	-1,93	25,91	1,34	-2,27	22,08	1,85
D2-R2	-2,24	22,32	1,81	-2,54	19,69	2,32
D2-R3	-2,52	19,84	2,29	-2,82	17,73	2,86
D3-R1	-1,64	30,49	0,97	-1,95	25,71	1,36
D3-R2	-1,95	25,64	1,37	-2,22	22,52	1,77
D3-R3	-2,23	22,42	1,79	-2,50	20,00	2,25

M7						
	Fibras paralelas			Fibras perpendiculares		
	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$
D1-R1	-1,95	19,95	2,26	-2,10	18,48	2,64
D1-R2	-2,22	17,48	2,95	-2,38	16,34	3,37
D1-R3	-2,51	15,49	3,75	-2,64	14,70	4,17
D2-R1	-1,63	23,80	1,59	-1,79	21,74	1,90
D2-R2	-1,91	20,37	2,17	-2,06	18,84	2,54
D2-R3	-2,19	17,72	2,87	-2,33	16,69	3,23
D3-R1	-1,34	29,06	1,07	-1,50	25,87	1,35
D3-R2	-1,61	24,10	1,55	-1,78	21,86	1,88
D3-R3	-1,90	20,48	2,15	-2,04	19,02	2,49

M8						
	Fibras paralelas			Fibras perpendiculares		
	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$
D1-R1	-1,35	20,67	2,11	-1,39	20,00	2,25
D1-R2	-1,61	17,32	3,00	-1,67	16,70	3,23
D1-R3	-1,86	14,99	4,01	-1,95	14,29	4,41
D2-R1	-1,01	27,52	1,19	-1,08	25,74	1,36
D2-R2	-1,27	21,89	1,88	-1,36	20,52	2,14
D2-R3	-1,52	18,29	2,69	-1,64	17,00	3,11
D3-R1	-0,73	38,35	0,61	-0,77	36,11	0,69
D3-R2	-0,99	28,22	1,13	-1,05	26,60	1,27
D3-R3	-1,24	22,51	1,78	-1,33	20,98	2,04

Si analizamos las tablas anteriores se puede observar como la constante dieléctrica de la madera si situamos las fibras paralelas a la antena, los valores varían entre 1,27 a 2,26 mientras si se sitúan las fibras perpendicular a la antena los valores varían entre 1,16 a 2,62.

En todas las especies de madera se confirma que la constante dieléctrica es menor cuando la antena del georradar se coloca paralelamente a la dirección de las fibras menos en la madera de *Balsa* debido a su baja densidad, en cambio cuando la antena se sitúa perpendicularmente a las fibras la constante dieléctrica es mayor. Esto se debe a que la velocidad de la onda viaja más rápidamente con las fibras paralelas que perpendiculares.

De esta forma se comprueba como la anisotropía de la constante dieléctrica de las maderas se puede registrar con una antena comercial de 2 GHz, cuando éstas se encuentran a su humedad de equilibrio higroscópico.

## 2. Hormigón

La Tabla 4.4 es el resultado del procesado de los registros y contienen los parámetros para la obtención de la constante dieléctrica, y se incluyen los siguientes conceptos:

- Incrementos de tiempos entre la onda directa y la onda reflejada en ns ( $\Delta t$ ), medidos en el radargrama y son el promedio de las cuatro lecturas obtenidas por probeta. de un total de cuatro probetas por relación agua cemento. Las lecturas son realizadas en cara, despreciando el registro en canto
- Velocidades de propagación en cm/ns ( $v$ ): calculadas mediante el procesado de registros del georradar, el valor de velocidad en cada máximo es el resultado de promediar los valores obtenidos en ese máximo en cada una de las 4 probetas (A, B, C, D) que conforman el grupo de relación agua cemento igual a 0,5 y 0,8.
- Constante dieléctrica ( $\epsilon$ ): calculadas mediante la expresión 3.2

En el Anexo 1.2 se adjuntan las lecturas completas realizadas en cada una de las probetas.

Tabla 4.4. Constantes dieléctricas del lote de hormigón

	HORMIGÓN 0.5 SECO			HORMIGÓN 0.8 SECO		
	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$	$\Delta t$	$v$	$\epsilon$
<b>D1-R1</b>	-3,77	10,60	8,01	-3,72	10,77	7,76
<b>D1-R2</b>	-4,00	9,99	9,01	-3,93	10,18	8,68
<b>D1-R3</b>	-4,24	9,44	10,09	-4,16	9,62	9,72
<b>D2-R1</b>	-3,53	11,35	6,99	-3,48	11,49	6,82
<b>D2-R2</b>	-3,75	10,66	7,93	-3,69	10,83	7,67
<b>D2-R3</b>	-3,99	10,03	8,94	-3,92	10,19	8,66
<b>D3-R1</b>	-3,27	12,23	6,02	-3,22	12,42	5,84
<b>D3-R2</b>	-3,50	11,43	6,89	-3,43	11,65	6,63
<b>D3-R3</b>	-3,73	10,71	7,84	-3,66	10,92	7,55

Si comparamos la constante dieléctrica de los dos hormigones vemos como el hormigón con mayor densidad (velocidad de propagación inferior) tiene la mayor constante. Es importante resaltar que esto se produce independientemente del máximo empleado para calcular la constante dieléctrica.

Así mismo, como era de esperar el hormigón, independientemente de su relación A/C, obtiene valores de constante dieléctrica muy superiores a la madera. Esto nos indica que el hormigón es un medio que se polariza mucho más que la madera, es decir, es más sensible a la radiación y propagación de un campo electromagnético.

## 4.4. Análisis y variación de densidad

### 4.4.1. Termografía

#### 1. Maderas

En este estudio se busca obtener información sobre el enfriamiento de las maderas y si la densidad influye en esa disminución de temperatura. Las temperaturas son obtenidas por el procedimiento descrito en el apartado 4.1. Como el enfriamiento lo tenemos como una línea de puntos, se aproxima a una expresión matemática para obtener más datos, es decir, buscamos la ecuación matemática que mejor represente la variación de temperatura durante el ensayo.

En la Figura 4.8 se muestra la evolución de los incrementos de temperaturas producidos en cada instante y para cada probeta durante todo el ensayo. Para ello, se han procesado un total de 55 termogramas para obtener la siguiente gráfica. El incremento de temperatura inicial del minuto 1 se obtiene al hacer la diferencia entre la temperatura inicial de la probeta frente a la temperatura ambiente. Posteriormente, se introducen los incrementos de temperatura de cada medición con respecto al total. Como se observa en la figura, todas las probetas disminuyen su temperatura conforme transcurre el tiempo.

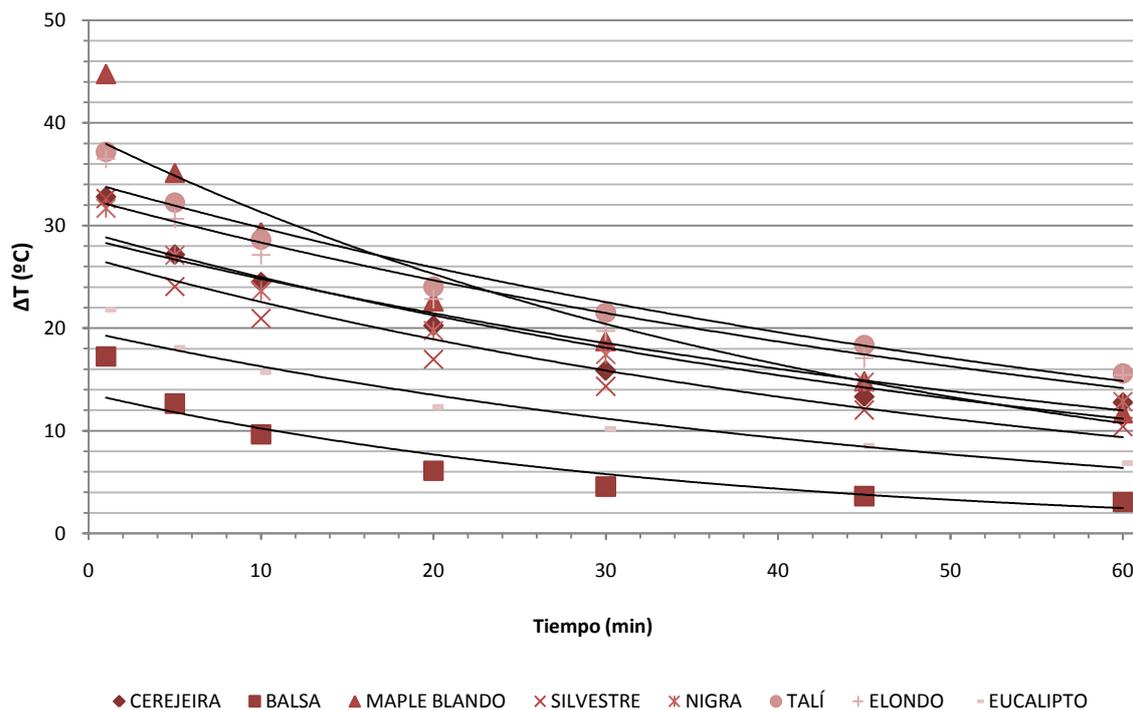


Figura 4.8. Disminución de temperatura con el tiempo de exposición en maderas

Se ha realizado el ajuste entre el tiempo de registro y la temperatura, con la idea de definir el comportamiento del enfriamiento que se produce. Los resultados de dicho ajuste se muestran en la Tabla 4.5. Además las tablas contienen los siguientes resultados:

- Densidad de cada especie de madera
- $T_{\text{inicial}}$ : temperatura inicial de cada probeta
- $T_{\text{ambiente}}$ : temperatura ambiente durante el ensayo para cada probeta
- $\Delta T$ : es la diferencia entre la temperatura inicial y la temperatura ambiente
- Función: ecuación exponencial que define el enfriamiento de las maderas
- $R^2$ : coeficiente de correlación

Tabla 4.5. Resultados obtenidos del estudio de densidad mediante termografía en maderas

	M1	M2	M3	M4
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	112,9	516,7	526,7	539,8
<b>Función</b>	$13,5e^{-0,028599x}$	$38,7e^{-0,021390x}$	$26,8e^{-0,017586x}$	$29,2e^{-0,016078x}$
<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	90,9	95,7	91,3	92,7
<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>	42,6	34,6	34,3	34,0

	M5	M6	M7	M8
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	600,5	733,0	783,4	879,5
<b>Función</b>	$28,6e^{-0,014566x}$	$34,2e^{-0,013933x}$	$32,5e^{-0,013894x}$	$19,6e^{-0,018755x}$
<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	95,1	96,3	93,3	96,2
<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>	32,4	30,3	30,1	39,7

El resultado fue el previsto ya que se puede afirmar que la densidad en las maderas influye directamente en el enfriamiento de las mismas. Los datos obtenidos se recogen en la Tabla 4.5, estudiándolos se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- Las maderas poseen un enfriamiento de tipo exponencial como se demuestra en la Figura 4.5. Además estas funciones exponenciales reproducen el comportamiento del enfriamiento de la madera con gran fiabilidad ya que se obtienen coeficientes de determinación en todos los casos superiores a 90%
- Si ordenamos las especies de madera de menor a mayor densidad, se comprueba que el exponente de correlación de la función exponencial que representa el enfriamiento disminuye conforme aumenta la densidad (Tabla 4.5)
- Los incrementos de temperatura vemos que es mayor cuanto menor es la densidad, esto se produce en casi todos los tipos como se observa en la Tabla 4.5

La única madera que no ha dado los resultados esperados según su densidad ha sido la especie *Eucalipto*. Se piensa que sus resultados no han sido satisfactorios debido a sus reducidas dimensiones que son muy diferentes a las del resto de probetas. No obstante el resultado general ha sido muy interesante.

Para concluir decir que se han procesado más de 55 archivos para la obtención de los resultados, todas las lecturas de este estudio están adjuntadas en el Anexo 2.1.

## 2.Hormigón

En esta parte se busca información acerca de cómo la densidad puede afectar al enfriamiento del hormigón. Las temperaturas son obtenidas mediante el procesamiento de imágenes termográficas, tal y como se ha descrito en el apartado 4.1 del presente trabajo.

En la figura 4.9 se muestra la evolución de los incrementos de temperaturas producidos en cada instante durante todo el ensayo. El valor del minuto 1 es el incremento de temperatura total que se obtiene al hacer la diferencia entre la temperatura inicial de la probeta frente a la temperatura ambiente. Posteriormente, se van introduciendo los incrementos de temperatura de cada medición con respecto al total. Como se aprecia en la figura, en ambos casos, tanto en las probetas de 0,5 como de 0,8 la temperatura de las mismas desciende como transcurre el tiempo.

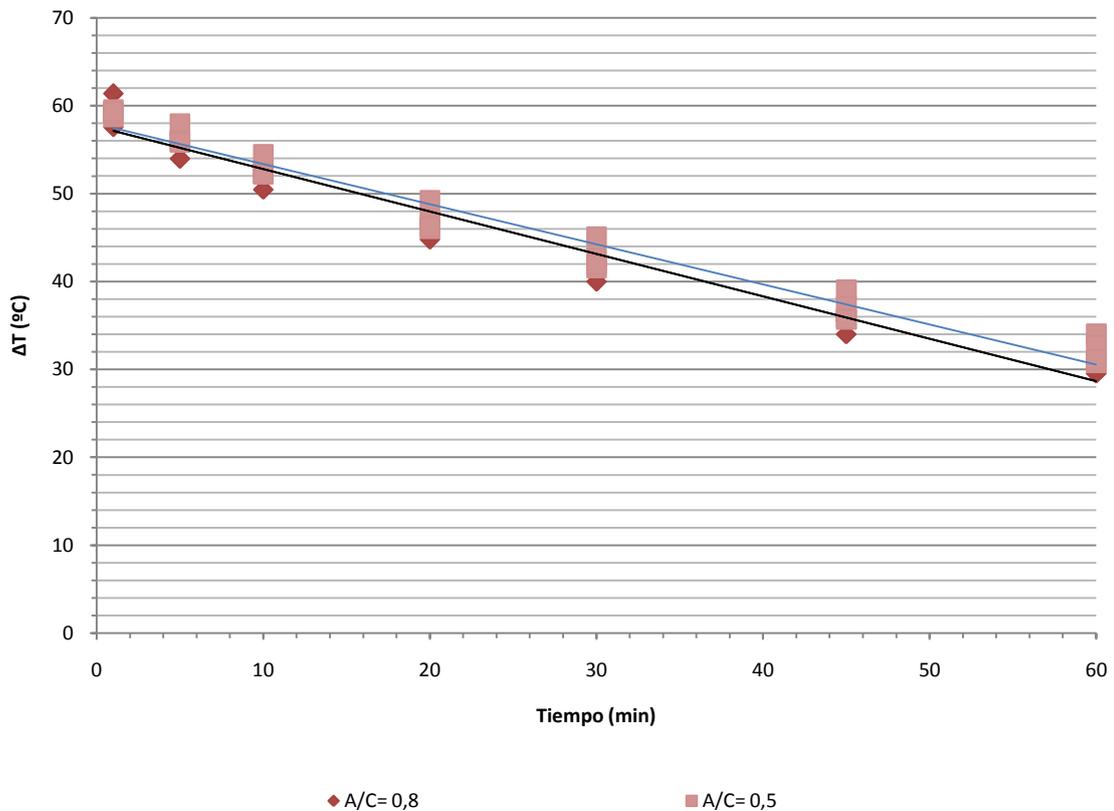


Figura 4.9. Disminución de temperatura con el tiempo de exposición en hormigón

Con la idea de definir el comportamiento del enfriamiento que se produce, se ha realizado el ajuste entre el tiempo de registro y la temperatura. Los resultados de dicho ajuste se muestran en la Tabla 4.6. Además la tabla contiene los siguientes resultados:

- Densidad: el valor es el obtenido al realizar la media de las 4 probetas de cada relación agua cemento
- $T_{\text{inicial}}$ : promedio de las temperaturas iniciales para cada grupo de probetas
- $T_{\text{ambiente}}$ : promedio de las temperaturas ambiente para cada grupo de probetas
- $\Delta T$ : es la diferencia entre la temperatura inicial y la temperatura ambiente
- Función: ecuación lineal que define el enfriamiento del hormigón
- $R^2$ : coeficiente de correlación

Tabla 4.6. Resultados obtenidos del estudio de densidad mediante termografía en hormigón

	HORMIGÓN A/C=0.8	HORMIGÓN A/C=0.5
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	2273,6	2350,1
T <sub>inicial</sub> (°C)	71,7	72,0
T <sub>ambiente</sub> (°C)	12,5	12,7
ΔT (°C)	56,6	55,3
Función	-0,483x + 57,62	-0,455x + 25,75
R <sup>2</sup> (%)	96,8	97,5

Analizando la Figura 4.9 se examina como el hormigón “a priori” presenta un comportamiento lineal durante su evaporación diferenciándose así de la del comportamiento de la madera. No obstante, se comprueba como para las probetas de mayor densidad el descenso de temperatura es menor, siguiendo en este caso el mismo patrón que las maderas.

En la Tabla 4.6 se incluyen los incrementos de temperatura sufridos por cada tipo de hormigón. Se cumple que el hormigón con una relación agua-cemento de 0,8, el cual posee menor densidad, tiene un incremento de temperatura de 56,6 °C, mayor que el incremento sufrido por el hormigón con relación 0,5, el cual posee un incremento de 55,3 °C.

Si comparamos las ecuaciones que definen la variación de temperatura, se observa como la pendiente de la recta es inferior en el hormigón más denso, reforzando la conclusión de a mayor densidad menor incremento de temperatura. Sabemos que su comportamiento es correcto debido a que los coeficientes de determinación son superiores al 95%.

Como consecuencia se puede finalizar diciendo que pese a que se ha obtenido un enfriamiento lineal, se puede considerar que este tendería a ser exponencial si se hubiera registrado durante más tiempo de temperatura superficial, sólo que debido a las dimensiones y masa de la probetas estamos viendo únicamente una parte del total y sobre todo, la velocidad de enfriamiento del material, que debido a las propias características del material no es la misma que la de la madera.

Para la obtención de todas las temperaturas se han procesado más de 65 imágenes termográficas, todas las tablas se adjuntan en el Anexo 2.2.

### 3. Pétreos naturales

En este apartado como en los dos anteriores se busca una relación entre enfriamiento y densidad. En la Figura 4.7. están superpuestas las temperaturas de cada instante para cada tipología de pétreo natural, posteriormente se ajustan matemáticamente para determinar su comportamiento. Todos los datos obtenidos de este ensayo se incluyen en la Tabla 4.7.

En la Figura 4.10 se muestra la evolución de los incrementos de temperaturas producidos en cada instante durante todo el ensayo, estos valores son el promedio de las 4 probetas correspondiente a cada tipo de pétreo natural. El valor del minuto 1 es el incremento de temperatura total que se obtiene al hacer la diferencia entre la temperatura inicial de la probeta frente a la temperatura ambiente. Posteriormente, se van introduciendo los incrementos de temperatura de cada medición con respecto al total. Como se aprecia en la figura, la temperatura de los pétreos naturales descienden con el tiempo.

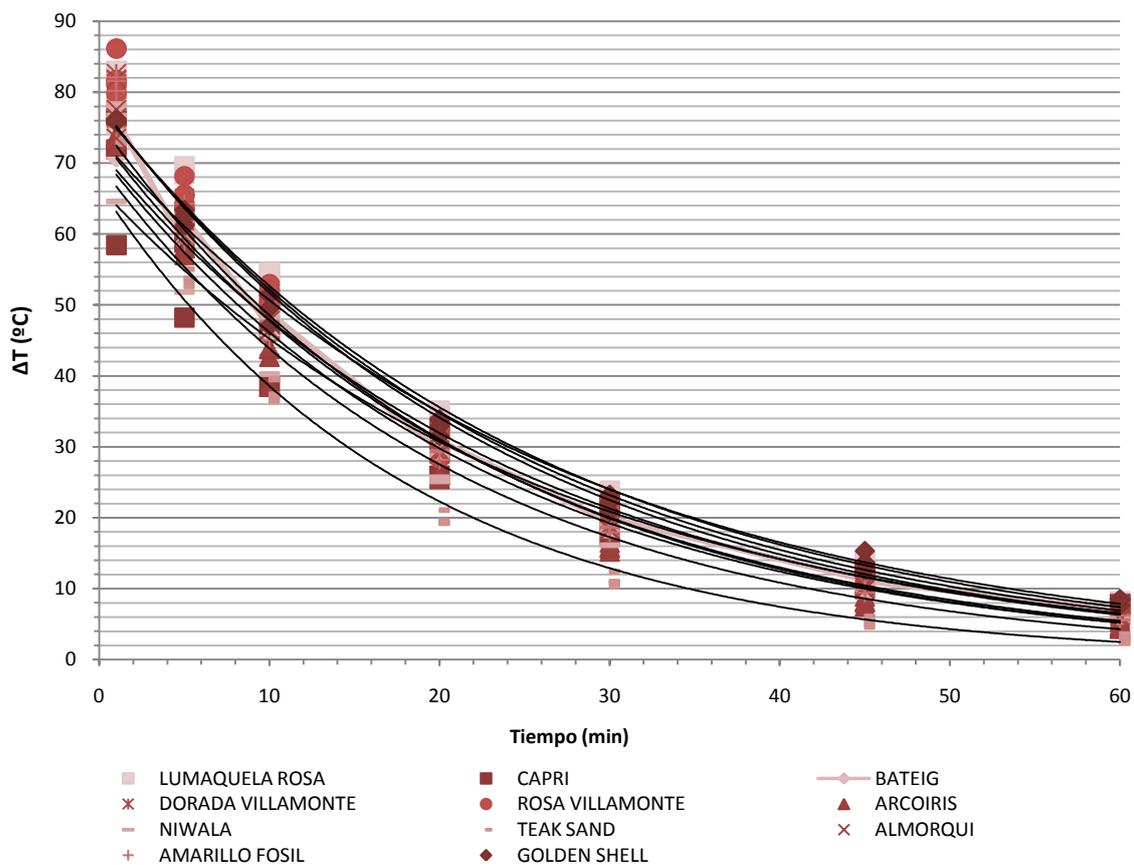


Figura 4.10. Disminución de temperatura con el tiempo de exposición en los pétreos naturales

Con la idea de definir el comportamiento del enfriamiento que se produce, se ha realizado el ajuste entre el tiempo de registro y la temperatura. Los resultados de dicho ajuste se muestran en la Tabla 4.6. Además la tabla contiene los siguientes resultados:

- Densidad: el valor es el obtenido al realizar la media de las 4 probetas especie
- $T_{\text{inicial}}$ : promedio de las temperaturas iniciales para cada grupo de probetas
- $T_{\text{ambiente}}$ : promedio de las temperaturas ambiente para cada grupo de probetas
- $\Delta T$ : es la diferencia entre la temperatura inicial y la temperatura ambiente
- Función: ecuación lineal que define el enfriamiento del hormigón
- $R^2$ : coeficiente de correlación

Tabla 4.7. Valores del estudio de densidad mediante termografía en pétreos naturales

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	1738,2	2048,8	2060,9	2074,7	2105,0	2114,9
<b>Función</b>	$73,6e^{-0,037389x}$	$75,7e^{-0,044545x}$	$73,7e^{-0,043475x}$	$66,7e^{-0,054788x}$	$71,4e^{-0,043766x}$	$69,8e^{-0,046634x}$
<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	99,3	99,3	99,4	98,4	98,8	99,1
<b>Δ T (°C)</b>	78,3	80,	79,3	83,	81,9	80,7

	P7	P8	P9	P10	P11
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	2267,9	2277,9	2296,7	2348,1	2396,1
<b>Función</b>	$78,24e^{-0,040539x}$	$78,4e^{-0,041612x}$	$71,8e^{-0,040531x}$	$66,5e^{-0,038668x}$	$77,9e^{-0,039262x}$
<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	99,1	99,4	99,3	97,9	99,4
<b>Δ T (°C)</b>	80,2	78,1	80,5	79,6	79,6

Al igual que la madera su enfriamiento tiende a una función exponencial. Es muy interesante comprobar cómo los pétreos analizados tienden a comportarse de igual forma que la madera, es decir, pierden temperatura de forma exponencial.

Se puede observar en la Figura 4.7 que el exponente de correlación de la función exponencial no disminuye conforme aumenta la densidad. Tampoco se cumple como en los casos anteriores que el incremento de temperatura se reduzca a medida que aumentan las densidades de los pétreos (Tabla 4.7).

Ahora bien, en este caso no se han ordenado los exponentes de las funciones con la densidad de las piezas. Se considera que esto es consecuencia de que la variación de densidad entre las piezas es muy pequeña; además de tratarse de probetas de pequeñas dimensiones.

Por todo ello la diferencia de calor acumulado es muy pequeña y por tanto en su enfriamiento es difícil apreciar diferencias. Esto no significa que en probetas de mayor diferencia de densidad esta ordenación de coeficientes no se vaya a producir.

En este caso se necesitaron procesar más de de 300 registros para concluir el estudio, todas esas lecturas se encuentran en el Anexo 2.3.

#### 4.4.2. Georradar

En este apartado se buscan resultados sobre cómo afecta la densidad en la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas producida en el interior de cada material a estudio.

##### 1. Maderas

En esta sección se analizan los valores obtenidos mediante el georradar sobre el lote de maderas. Los registros del georradar son procesados de la forma descrita en el apartado 4.2, una vez identificados los máximos y mínimos de la onda directa (D1, D2, D3) y de la reflejada (R1, R2, R3) mediante la ecuación 3.3 se obtienen las velocidades de propagación.

Las lecturas de tiempos de propagación de la onda directa y reflejada para cada una de las probetas se adjuntan en el Anexo 3.1. Para cada probeta se promedian las 2 caras medidas (medición en canto) y finalmente se obtienen los valores de velocidad de propagación para cada madera de dos formas, cuando la antena está colocada paralelas y perpendicular a la dirección de las fibras. Esto se realiza porque hay que tener en cuenta el carácter anisótropo de la madera al comparar velocidades en diferentes direcciones respecto a la fibra.

En la Tabla 4.8 se encuentran todas las velocidades de propagación para todas las especies de maderas en condiciones de humedad en equilibrio higroscópico. Se calculan las velocidades para diferentes parejas de máximos (R1-D1, R1-D2, R1-D3, R2-D1, R2-D2, R2-D3, R3-D1, R3-D2, R3-D3) así como para las dos direcciones de fibras.

Tabla 4.8. Velocidades de propagación en las maderas cuando están a humedad de equilibrio higroscópico

TIPOLOGÍA	DIRECC. FIBRAS	VELOCIDADES PROPAGACIÓN (cm/ns)								
		R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
M1	para	26,4	32,6	42,7	22,7	27,2	33,8	20,0	23,3	28,0
	perp	25,7	32,0	41,6	22,1	26,6	33,0	19,4	22,7	27,2
M2	para	22,5	28,0	35,8	19,4	23,3	28,5	16,9	19,7	23,3
	perp	21,1	25,9	32,8	18,2	21,8	26,4	15,9	18,6	21,8
M3	para	21,1	25,3	31,5	18,4	21,5	25,8	16,3	18,7	21,9
	perp	19,6	23,3	28,5	17,2	20,0	23,7	15,3	17,5	20,3
M4	para	21,5	28,0	38,3	17,9	22,2	28,2	15,5	18,6	22,6
	perp	20,1	25,9	35,4	17,0	21,0	26,9	14,7	17,6	21,5
M5	para	23,3	28,1	36,0	20,1	23,5	28,8	17,5	19,5	23,7
	perp	22,4	27,4	34,6	18,7	22,0	26,4	16,7	18,8	22,6
M6	para	22,4	25,9	30,4	19,6	22,3	25,6	17,7	19,8	22,4
	perp	19,4	22,0	25,7	17,5	19,6	22,5	15,9	17,7	20,0
M7	para	19,9	23,8	29,0	17,4	20,3	24,1	15,4	17,7	20,4
	perp	18,4	21,7	25,8	16,3	18,8	21,8	14,7	16,6	19,0
M8	para	20,6	27,5	38,3	17,3	21,8	28,2	14,9	18,2	22,5
	perp	20,0	25,7	36,1	16,7	20,5	26,6	14,2	17,0	20,9

Una vez obtenidos los resultados, éstos se analizan desde distintos puntos de vista:

1. Como punto de partida se estudia la relación entre el coeficiente de absorción de agua y la densidad del material.

Tabla 4.9. Coeficiente de absorción y densidad de lote de maderas

	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )	CA (%)
<b>M1</b>	124,4	77,4
<b>M2</b>	559,3	17,9
<b>M3</b>	561,2	27,3
<b>M4</b>	567,1	4,8
<b>M5</b>	623,9	4,2
<b>M6</b>	780,0	3,5
<b>M7</b>	823,1	2,0
<b>M8</b>	943,8	3,4

En la Tabla 4.9 se han ordenado las muestras de madera según densidad de menor a mayor valor, también se han incorporado el coeficiente de absorción de cada una. De forma general cabe esperar que cuanto menos densa es una madera, mayor será su grado de absorción. Esta tendencia se comprueba en el estudio realizado, ya que a pesar de haber estado el mismo tiempo las probetas sumergidas en el agua, la cantidad de agua absorbida ha ido disminuyendo conforme ha aumentado la densidad.

No obstante, el grado de absorción de agua no se puede relacionar directamente con la densidad, ya que depende de otros muchos factores como son el tipo de madera al que pertenecen (conífera o frondosa) y de cómo se organiza su estructura interna (disposición de su microestructura).

2. En este apartado se analiza el efecto de la anisotropía dieléctrica de la madera cuando se encuentran a la humedad de equilibrio higroscópico.

En la Tabla 4.10 se presentan los coeficientes derivados de la relación  $\frac{v_{perpendicular}}{v_{paralelo}}$ .

Tabla 4.10. Comportamiento anisótropo de la velocidad de propagación respecto a las fibras

	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
<b>M1</b>	0,97	0,98	0,97	0,97	0,98	0,98	0,97	0,98	0,97
<b>M2</b>	0,94	0,93	0,92	0,94	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94
<b>M3</b>	0,93	0,92	0,91	0,94	0,93	0,92	0,94	0,94	0,93
<b>M4</b>	0,94	0,93	0,92	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
<b>M5</b>	0,96	0,97	0,96	0,93	0,93	0,92	0,95	0,96	0,95
<b>M6</b>	0,87	0,85	0,84	0,89	0,88	0,88	0,90	0,89	0,89
<b>M7</b>	0,93	0,91	0,89	0,93	0,92	0,91	0,95	0,94	0,93
<b>M8</b>	0,97	0,94	0,94	0,96	0,94	0,94	0,95	0,93	0,93

Se comprueba como la anisotropía, es decir, la variación de velocidad con respecto a la fibra se registra perfectamente en los distintos tipos de madera y su valor no está asociado, como era previsible al valor de la densidad. Sino que éste dependerá de cómo está constituida la materia leñosa en su interior. Además este fenómeno se identifica independientemente de los máximos considerados para el cálculo de la velocidad.

3. A continuación se estudia el efecto de la densidad de la madera en las velocidades de propagación de las ondas electromagnéticas.

En este análisis se compara la velocidad de propagación con la madera en condiciones de humedad en equilibrio higroscópico con el parámetro densidad, para ver si se relacionan. En las Tabla 4.11 se incorporan las velocidades de propagación de cada tipología de madera correspondiente a los intervalos estudiados, a su vez, se han ordenado de menor a mayor densidad.

Tabla 4.11. Comparación de velocidades de propagación en madera a humedad en equilibrio higroscópico con densidad, según dirección de las fibras

ESPECIE	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )	DIRECC FIBRAS	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3	
M1	124,4	PARALELO	PROMEDIO	26,4	32,6	42,7	22,7	27,2	33,8	20,0	23,3	28,0
M2	559,3			22,5	28,0	35,8	19,4	23,3	28,5	16,9	19,7	23,3
M3	561,2			21,1	25,3	31,5	18,4	21,5	25,8	16,3	18,7	21,9
M4	567,1			21,5	28,0	38,3	17,9	22,2	28,2	15,5	18,6	22,6
M5	623,6			23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3
M6	780,0			22,4	25,9	30,4	19,6	22,3	25,6	17,7	19,8	22,4
M7	823,1			19,9	23,8	29,0	17,4	20,3	24,1	15,4	17,7	20,4
M8	943,8			20,6	27,5	38,3	17,3	21,8	28,2	14,9	18,2	22,5

ESPECIE	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )	DIRECC FIBRAS	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3	
M1	124,4	PERPENDICULAR	PROMEDIO	25,7	32,0	41,6	22,1	26,6	33,0	19,4	22,7	27,2
M2	559,3			21,1	25,9	32,8	18,2	21,8	26,4	15,9	18,6	21,8
M3	561,2			19,6	23,3	28,5	17,2	20,0	23,7	15,3	17,5	20,3
M4	567,1			20,1	25,9	35,4	17,0	21,0	26,9	14,7	17,6	21,5
M5	623,6			22,4	27,4	34,6	18,7	22,0	26,4	16,7	18,8	22,6
M6	780,0			19,4	22,0	25,7	17,5	19,6	22,5	15,9	17,7	20,0
M7	823,1			18,4	21,7	25,8	16,3	18,8	21,8	14,7	16,6	19,0
M8	943,8			20,0	25,7	36,1	16,7	20,5	26,6	14,2	17,0	20,9

En las Tablas 4.12 se recogen las funciones lineales calculadas mediante el programa informático *Microsoft Excel*, así como el coeficiente de correlación para cada intervalo de máximos.

Tabla 4.12. Ajuste entre la velocidad de propagación y la densidad de las maderas, considerando los máximos R1 para su cálculo

ESPECIE	R1-D1	R1-D2	R1-D3
M1			
M2			
M3			
M4	$y = -0,006x + 26,5$	$y = -0,008x + 31,8$	$y = -0,011x + 40,5$
M5	$R^2 = 0,71$	$R^2 = 0,46$	$R^2 = 0,19$
M6			
M7			
M8			

ESPECIE	R2-D1	R2-D2	R2-D3
M1			
M2			
M3			
M4	$y = -0,006x + 23,2$	$y = -0,007x + 27,1$	$y = -0,009x + 32,9$
M5	$R^2 = 0,3$	$R^2 = 0,71$	$R^2 = 0,46$
M6			
M7			
M8			

ESPECIE	R3-D1	R3-D2	R3-D3
M1			
M2			
M3			
M4	$y = -0,005x + 20,7$	$y = -0,005x + 23,6$	$y = -0,007x + 27,7$
M5	$R^2 = 0,19$	$R^2 = 0,43$	$R^2 = 0,70$
M6			
M7			
M8			

En la Tabla 4.11 se observa cómo se produce una ordenación de la velocidad en función de la densidad, independientemente del máximo considerado para calcular la velocidad de propagación.

Con el objetivo de comprobar cuál es la tendencia o relación entre la densidad y la velocidad de propagación se ha realizado el ajuste entre ambas variables. Como se comprueba en la Tabla 4.12, no todos los máximos se ajustan con la misma precisión.

En este caso, se observa que no todos los máximos podrían ser igual de representativos ya que el grado de coeficiente de correlación varían de  $R^2 = 0,73$  hasta  $0,37$ . Los máximos más representativos, es decir con un  $R^2 > 0,70$ , los encontramos cuando se calculan las velocidades con R1-D1, R2-D2 y R3-D3.

Como ejemplo en la siguiente figura se han representado los ajustes de densidades y velocidades de propagación correspondientes al intervalo R2-D2. Se ha escogido representar este intervalo de máximos debido a que posee un mayor coeficiente de correlación como se demuestra en la Tabla 4.12, superior al 70 %.

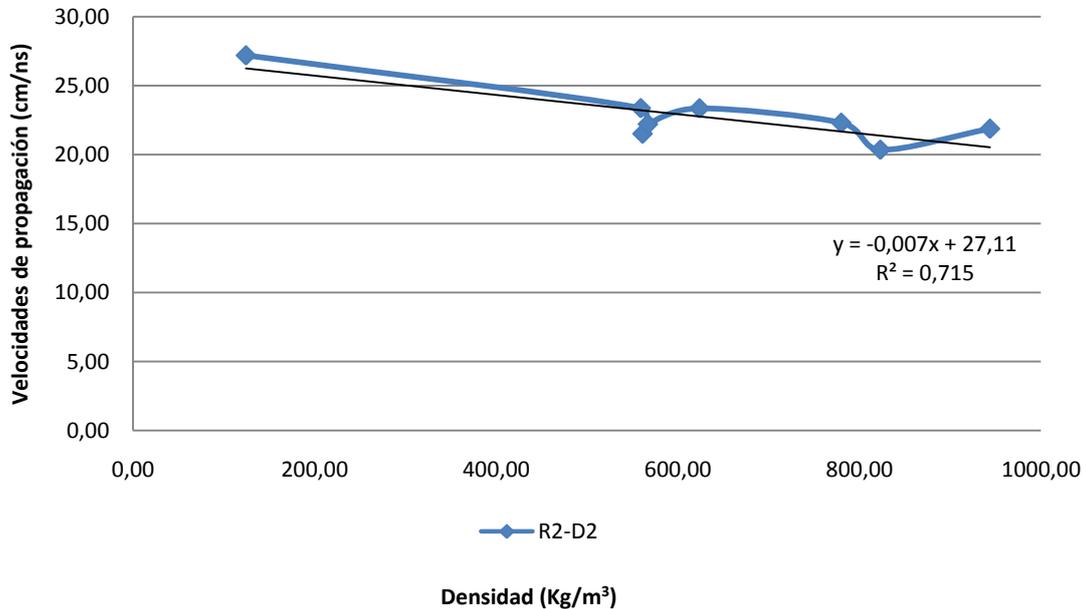


Figura 4.11. Ajuste entre densidades y velocidades de propagación

La madera es un material con una variación de densidad muy elevada no solo entre especies, sino también dentro de la misma especie e incluso en la misma especie, existe una gran variabilidad de densidad dependiendo de la parte del árbol de donde se ha extraído la viga. No obstante los resultados obtenidos en este trabajo son bastante prometedores.

En este estudio se ha trabajado con un lote de maderas de diferente densidad. Es difícil establecer un resultado significativo con respecto a la densidad con este lote. No obstante, los resultados apuntan a que si se consideraran lotes de madera más grandes el georradar podría aportar información significativa respecto a este parámetro.

Por último hay que decir que este ensayo del análisis de la densidad en maderas mediante la técnica no destructiva del georradar, ha sido muy laborioso debido al gran número de registros a procesar (132 registros).

## 2.Hormigón

En esta sección se analizan los valores obtenidos mediante el georradar sobre el lote de hormigón. Los registros del georradar son procesados de la forma descrita en el apartado 4.2. Una vez identificados los máximos y mínimos de la onda directa (D1, D2, D3) y de la reflejada (R1, R2, R3) mediante la ecuación 3.3 se obtienen las velocidades de propagación.

Se toman 4 registros por probeta excluyéndose las mediciones en canto. Posteriormente se calcula el promedio de la velocidad obtenida en las 4 caras, ya que, la distancia de separación es la misma. Por último, las lecturas completas de los tiempos de propagación de este estudio en concreto se encuentran en el Anexo 3.2.

La Tabla 4.13 contienen los las velocidades de propagación de cada intervalo por probeta, además se realiza para cada máximo su promedio. Esta operación se ha realizado para las 4 probetas de relación 0,5 y 0,8.

Tabla 4.13. Comparación de velocidades en cm/ns, obtenidas mediante georradar en hormigón 0,5 y 0,8 con humedad de equilibrio higroscópico en análisis de densidad

	PROBETA	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
0,5	A	10,60	11,33	12,25	9,95	10,60	11,40	9,40	9,98	10,68
	B	10,58	11,36	12,23	9,98	10,67	11,43	9,41	10,03	10,70
	C	10,58	11,32	12,20	10,00	10,65	11,43	9,47	10,05	10,74
	D	10,64	11,38	12,23	10,05	10,71	11,46	9,49	10,08	10,74

	PROBETA	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
0,8	A	10,84	11,56	12,48	10,20	10,84	11,64	9,63	10,19	10,90
	B	10,75	11,46	12,36	10,20	10,84	11,64	9,62	10,18	10,88
	C	10,75	11,49	12,44	10,20	10,87	11,71	9,62	10,20	10,94
	D	10,72	11,44	12,38	10,13	10,77	11,59	9,63	10,20	10,94

Tabla 4.14. Promedio de velocidades de propagación en cm/ns para cada máximo, en hormigón 0,5 y 0,8 con humedad de equilibrio higroscópico en análisis de densidad

		R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
0,5	Promedio	10,60	11,35	12,23	9,99	10,66	11,43	9,44	10,03	10,71
	Desv.	0,03	0,03	0,02	0,04	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03
0,8	Promedio	10,77	11,49	12,42	10,18	10,83	11,65	9,62	10,19	10,92
	Desv.	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,01	0,01	0,03

De la Tabla 4.13, podemos afirmar varias conclusiones. Se ha comprobado que la velocidad de propagación se ordena con la densidad y que a mayor densidad de la muestra, la velocidad de propagación disminuye en cualquier máximo, esto se reafirma al comparar los promedios de ambos hormigones (Tabla 4.14).

A pesar de haber promediado y calculado los valores de velocidades con los máximos R1-D3. Es importante resaltar que éstos no se deberían tener en cuenta. Debido a la forma rectangular de la probeta, durante la propagación de ondas por el interior de las mismas, se producen muchas reflexiones en los bordes. Esto da lugar a que los máximos D3 y R1, sean muy difíciles de identificar. Con lo cual las velocidades derivadas de ellos, no se deberían considerar en los resultados.

## 4.5. Absorción y evaporación de agua

En este apartado se incluyen los resultados obtenidos del ensayo de absorción y evaporación de agua, realizados mediante la técnica de la termografía infarroja y georradar. Se analiza como se ve afectado el comportamiento y composición de la madera y hormigón debido a la absorción y evaporación de agua.

### 4.5.1. Termografía

#### 1. Maderas

En este estudio se busca obtener información sobre la evaporación de agua en las maderas y si la absorción y densidad influye en su comportamiento. Las temperaturas son obtenidas por el procedimiento descrito en el apartado 4.1.

En la Tabla 4.15 se encuentran los valores procesados de temperatura para cada registro tomado durante el ensayo. Las diferentes maderas se han ordenado en la primera tabla por densidad y en la segunda tabla por coeficiente de absorción. La ordenación siempre se realiza de menor a mayor valor.

Tabla 4.15. Valores de temperatura (°C) para cada probeta de madera durante el ensayo de evaporación

Densidad (menor-mayor)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
Dia 1	11:30 h	9,7	9,4	8,9	9,0	9,5	9,3	9,2	9,6
	13:00 h	10,1	9,8	9,3	10,1	10,5	10,0	9,5	9,8
	14:30 h	10,3	10,1	11,2	11,2	11,0	11,2	10,9	10,4
	16:00 h	10,3	10,2	11,3	11,7	11,6	11,7	11,1	11,4
	17:30 h	11,0	10,4	11,6	12,4	11,7	12,5	11,5	11,5
	19:00 h	11,2	11,5	11,8	12,6	12,0	12,6	11,7	12,2
	20:30 h	12,5	11,6	12,1	13,1	12,9	13,3	11,9	12,5
Dia 2	13:30 h	12,6	12,4	12,8	13,3	13,2	13,4	12,8	12,7

C.Abs. (menor-mayor)	M7	M6	M8	M5	M4	M2	M3	M1	
Dia 1	11:30 h	9,2	9,3	9,6	9,5	9,0	9,4	8,9	9,7
	13:00 h	9,5	10,0	9,8	10,5	10,1	9,8	9,3	10,1
	14:30 h	10,9	11,2	10,4	11,0	11,2	10,1	11,2	10,3
	16:00 h	11,1	11,7	11,4	11,6	11,7	10,2	11,3	10,3
	17:30 h	11,5	12,5	11,5	11,7	12,4	10,4	11,6	11,0
	19:00 h	11,7	12,6	12,2	12,0	12,6	11,5	11,8	11,2
	20:30 h	11,9	13,3	12,5	12,9	13,1	11,6	12,1	12,5
Dia 2	13:30 h	12,8	13,4	12,7	13,2	13,3	12,4	12,8	12,6

Si se estudian los valores de las tablas anteriores, se observa que los incrementos de temperatura no disminuyen conforme aumenta la densidad de la especie, ni se incrementan conforme aumenta el coeficiente de absorción de la especie. Por tanto, se suponen que en la evaporación no sólo influye la densidad y la absorción sino también de la naturaleza de la madera: si es conífera o frondosa, número de fibras, nudos,... etc.

En la siguientes tablas resumen se han incluido los incrementos de temperatura producidos por la evaporación durante las primeras 9,5 horas y hasta el final del ensayo (26 h). Además de la masa inicial con humedad en equilibrio higroscópico (M), masa húmeda (Mh) y el coeficiente de absorción de cada especie de madera expresado en porcentaje.

Tabla 4.16. Valores del estudio de absorción y evaporación de la madera

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	124,4	559,3	561,2	567,1	623,9	780,0	823,1	943,8
<b>ΔT (°C) tras 9,5 h de evaporación</b>	2,8	2,1	3,2	4,0	3,4	4,0	2,6	2,9
<b>ΔT (°C) tras 26 h de evaporación</b>	2,9	2,9	3,8	4,2	3,7	4,1	3,6	3,1
<b>M (g)</b>	501,3	1449,7	2733,4	1151,3	3244,6	3387,6	3358,4	930,0
<b>Mh tras 72 h Inmersa en agua (g)</b>	889,7	1710,1	3481,6	1207,1	3383,1	3480,4	3425,6	962,1
<b>CA (%)</b>	77,4	17,9	27,3	4,8	4,2	2,7	2,0	3,4

	M7	M6	M8	M5	M4	M2	M3	M1
<b>CA (%)</b>	2,0	2,7	3,4	4,2	4,8	17,9	27,3	77,4
<b>ΔT (°C) tras 9,5 h de evaporación</b>	2,6	4,0	2,9	3,4	4,0	2,1	3,2	2,8
<b>ΔT (°C) tras 26 h de evaporación</b>	3,6	4,1	3,1	3,7	4,2	2,9	3,8	2,9
<b>M (g)</b>	3358,4	3387,6	930,0	3244,6	1151,3	1449,7	2733,4	501,3
<b>Mh tras 72 h Inmersa en agua (g)</b>	3425,6	3480,4	962,1	3383,1	1207,1	1710,1	3481,6	889,7
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	823,1	780,0	943,8	623,9	567,1	559,3	561,2	124,4

De la Tabla 4.16 podemos decir que el coeficiente de absorción está directamente relacionado con el parámetro densidad. Se produce una ordenación de los valores, conforme aumenta la densidad en la madera disminuye su coeficiente de absorción. La única especie que no cumple esta condición es la especie *Eucalipto*, al igual que en algún otro estudio se piensa que sus resultados no son óptimos debido a sus reducidas dimensiones.

En la Figura 4.12 se muestra la evolución de temperaturas producidos en cada instante y para cada probeta durante las 26 horas que duró el ensayo. Como punto de partida en la figura, se observa que todas las probetas aumentan su temperatura conforme transcurre el tiempo, como consecuencia de la evaporación de agua.

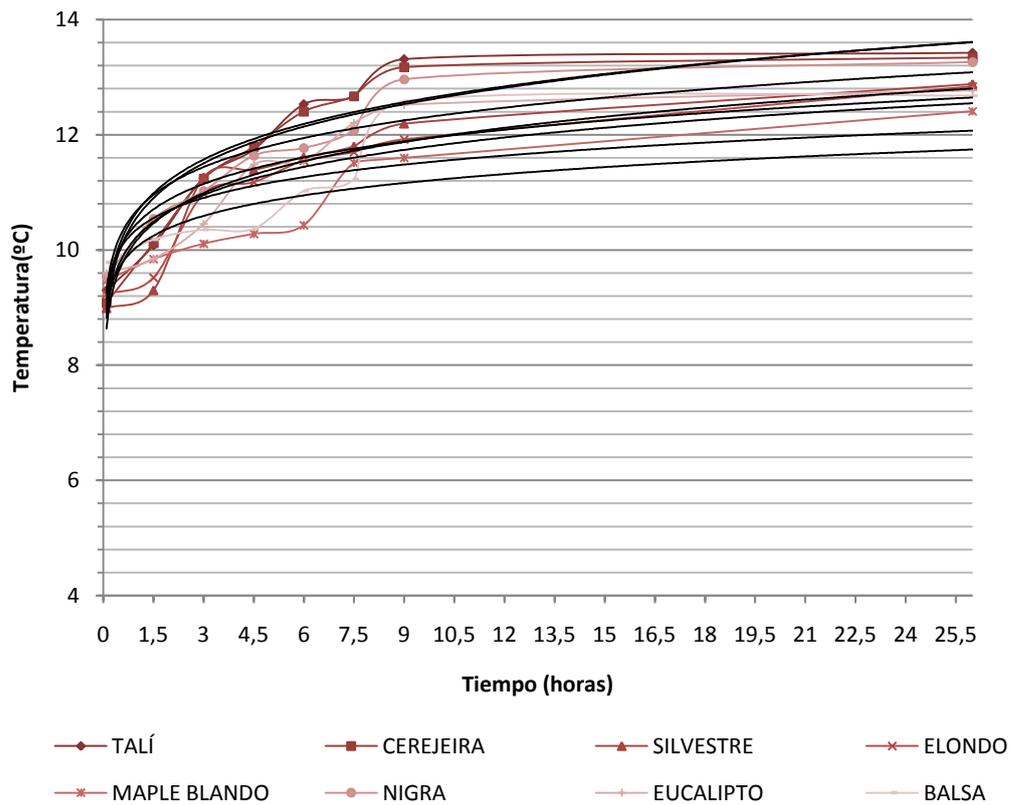


Figura 4.12. Gráfico tiempo-temperatura evaporación de la madera

La figura anterior muestra el comportamiento de cada especie al evaporarse. Si se estudian las primeras 9,5 horas de evaporación vemos como todas las especies tienden a una función exponencial bastante pronunciada. Como promedio se puede decir las maderas aumentan 0,5 °C cada hora.

Con la idea de definir el comportamiento de evaporación que se produce, se ha realizado el ajuste entre el tiempo de registro y la temperatura. Los resultados de dicho ajuste se muestran en las Tablas 4.17. Estas tablas están ordenadas por densidad y coeficiente de absorción, además contiene los siguientes resultados:

- Función: ecuación lineal que define el cambio de temperatura en la madera
- $R^2$ : coeficiente de correlación

Tabla 4.17. Temperatura de evaporación de las maderas expresada mediante funciones exponenciales

Densidad	ECUACIÓN	$R^2$ (%)
M1	$y = 10,35x^{0,047}$	0,65
M2	$y = 10,04x^{0,047}$	0,71
M3	$y = 10,16x^{0,070}$	0,85
M4	$y = 10,55x^{0,077}$	0,91
M5	$y = 10,68x^{0,062}$	0,90
M6	$y = 10,65x^{0,062}$	0,88
M7	$y = 10,22x^{0,062}$	0,86
M8	$y = 10,45x^{0,058}$	0,78

<b>C<sub>A</sub></b>	<b>ECUACIÓN</b>	<b>R<sup>2</sup> (%)</b>
<b>M1</b>	$y = 10,35x^{0,047}$	0,65
<b>M3</b>	$y = 10,16x^{0,070}$	0,85
<b>M2</b>	$y = 10,04x^{0,047}$	0,71
<b>M4</b>	$y = 10,55x^{0,077}$	0,91
<b>M5</b>	$y = 10,68x^{0,062}$	0,90
<b>M8</b>	$y = 10,45x^{0,058}$	0,78
<b>M6</b>	$y = 10,65x^{0,062}$	0,88
<b>M7</b>	$y = 10,22x^{0,062}$	0,86

A pesar de la gran variabilidad que puede haber entre probetas de la misma especie, los resultados de ajuste entre las temperaturas de evaporación de agua y el coeficiente de absorción o densidad son bastante elevados.

Se han ordenado las especies de madera de menor a mayor densidad y coeficiente de absorción. Analizando la tabla de densidad vemos como el exponente de las ecuaciones no se ordena, por lo que se reafirma que el proceso de evaporación no está influido únicamente por la densidad sino por más variables provenientes del origen de la especie. En cambio, analizando la tabla ordenada según la absorción de cada madera se intuye que las especies con mayor coeficiente absorción poseen un exponente mayor y por tanto una evaporación más rápida.

Como conclusión se puede decir que el proceso de evaporación no solo es influido por la absorción del material y la densidad sino por más factores internos de cada especie. Por último decir que el ensayo ha sido muy satisfactorio pese a la gran cantidad de archivos procesados. El resto de lecturas realizadas durante la ejecución de este estudio están reflejadas en el Anexo 4.1.

## 2.Hormigón

Mediante este estudio se han buscado respuestas acerca de la evaporación del agua libre del hormigón y si la absorción y densidad influye en su comportamiento. Las temperaturas obtenidas para la compresión de los resultados han sido realizadas mediante el proceso descrito en el apartado 4.1.

En la Tabla 4.18 se encuentran los valores procesados de temperatura para cada registro tomado durante el ensayo. Se ha realizado el promedio de temperaturas para cada instante en cada uno de los hormigones estudiados, para así poder comparar los resultados finales.

Tabla 4.18. Valores de temperatura (°C) para cada probeta de hormigón durante el ensayo de evaporación

		PROBETA 0.5					PROBETA 0.8				
		A	B	C	D	PROMEDIO	A	B	C	D	PROMEDIO
Dia 1	11:30 h	10,0	9,8	9,8	10,0	<b>9,9</b>	9,1	9,12	9,13	9,4	<b>9,20</b>
	13:00 h	10,2	10,3	10,5	10,4	<b>10,4</b>	10,1	10,03	10,26	10,28	<b>10,17</b>
	14:30 h	11,3	10,8	11,1	11,2	<b>11,1</b>	10,6	10,88	11	10,92	<b>10,85</b>
	16:00 h	11,4	11,2	11,3	11,4	<b>11,3</b>	10,9	11,01	11,29	11,16	<b>11,09</b>
	17:30 h	11,5	11,4	11,4	11,5	<b>11,5</b>	11,1	11,15	11,41	11,33	<b>11,25</b>
	19:00 h	11,6	11,5	11,5	11,6	<b>11,5</b>	11,3	11,31	11,55	11,49	<b>11,42</b>
	20:30 h	11,7	11,6	11,6	11,8	<b>11,7</b>	11,5	11,54	11,71	11,6	<b>11,59</b>
Dia 2	13:30 h	11,9	11,6	11,7	11,6	<b>11,7</b>	11,3	11,21	11,29	11,45	<b>11,32</b>

Si se estudia la tabla anterior podemos decir que el proceso de evaporación en el hormigón se produce de forma continuada pero a una velocidad muy inferior a la evaporación en las maderas.

En la Tabla 4.19 se recogen resultados y características de los lotes de hormigón. En primer lugar se define la masa inicial cuando la humedad esta en equilibrio higroscópico, la masa húmeda después de sumergir las muestras completamente 72 horas en agua, el coeficiente de absorción, el incremento de temperatura sufrido durante el proceso de evaporación y la densidad de cada probeta.

Tabla 4.19. Valores del estudio de absorción y evaporación del hormigón

		PROBETA 0.5					PROBETA 0.8				
		A	B	C	D	PROMEDIO	A	B	C	D	PROMEDIO
M inicial (g)		6013,6	5976,8	5225,6	5164,7	<b>5595,1</b>	5206,2	5264,2	5354,9	5295,2	<b>5280,1</b>
Mh tras 72 h en agua (g)		6205,8	6178,8	5395,4	5340,0	<b>5780,0</b>	5427,0	5492,6	5578,1	5518,8	<b>5504,1</b>
$\Delta T$ (°C) tras 26 h de evaporación		1,9	1,8	1,9	1,6	<b>1,8</b>	2,2	2,1	2,2	2,1	<b>2,15</b>
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )		2401,7	2371,7	2453,3	2369,1	<b>2399,0</b>	2309,7	2335,4	2288,4	2302,2	<b>2308,9</b>
Ca (%)		3,1	3,3	3,2	3,3	<b>3,3</b>	4,2	4,3	4,1	4,2	<b>4,2</b>

Con todos los datos recogidos de la tabla anterior, se realiza una nueva tabla introduciendo únicamente los promedios y datos más importantes para evaluar el resultados final del estudio.

Tabla 4.20. Valores promediados para cada lote de hormigón estudiado por medio de termografía la evaporación del agua

	PROBETA0.5	PROBETA 0.8
<b>M inicial (g)</b>	5595,1	5280,1
<b>Mh tras 72 h en agua (g)</b>	5780,0	5504,1
<b><math>\Delta T</math> (<math>^{\circ}C</math>) tras 26 h de evaporación</b>	1,8	2,15
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	2399,0	2308,9
<b>CA (%)</b>	3,3	4,2

Interpretando la Tabla 4.20 se pueden formalizar las siguientes conclusiones. Se afirma que se cumple con la teoría de que a mayor densidad se posee un menor coeficiente de absorción. Además el incremento de temperatura es menor en probetas de hormigón con mayor densidad como se comprueba al comparar los valores del hormigón 0,5 y 0,8. Por otro lado, estudiando los valores de evaporación respecto a la absorción, nos damos cuenta de que a mayor coeficiente de absorción obtenemos una evaporación mayor también.

En la figura 4.13 se muestra la evolución de temperaturas producidas en cada instante y para cada probeta durante las 26 horas que duró el ensayo. Como punto de partida en la figura, se observa que todas las probetas aumentan su temperatura conforme transcurre el tiempo.

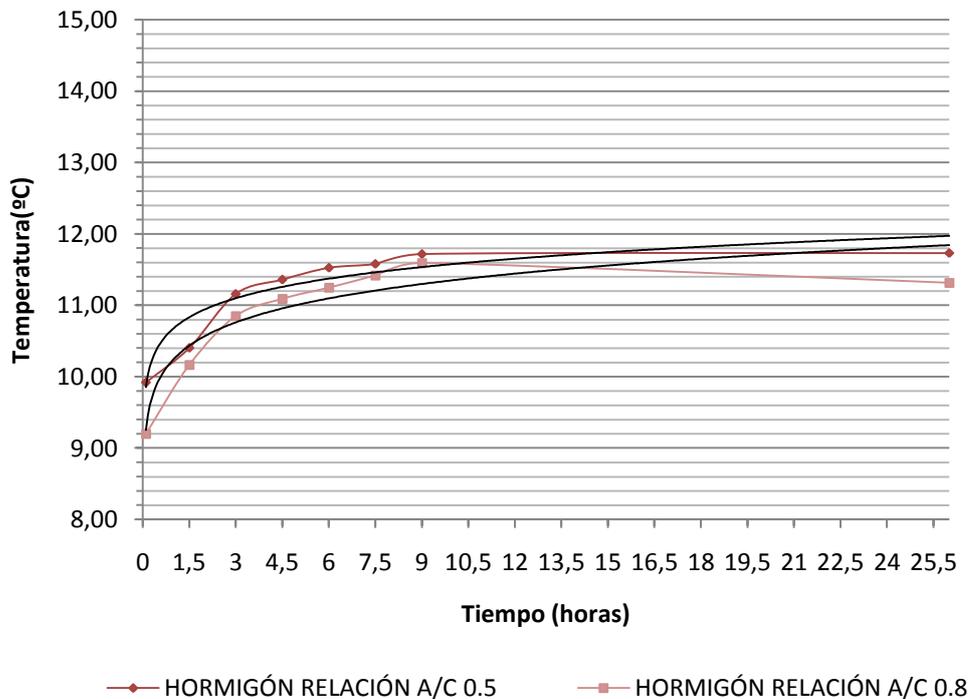


Figura 4.13. Gráfico tiempo-temperatura evaporación de agua del hormigón por termografía

Al estudiarla se puede decir que el hormigón y la madera tienen un comportamiento al evaporarse similar, ambas tienen una evaporación exponencial pero con ciertas diferencias. La evaporación de la madera es mucho más pronunciada que la del hormigón en las horas iniciales, ésta se presenta como una función exponencial mucho más suave. Estas afirmaciones se obtienen de analizar las primeras 9,5 h de estudio, ya que, en las siguientes horas la temperatura ambiente disminuye.

Finalmente en la Tabla 4.21 se ajustan los valores de la temperatura de evaporación con el tiempo. A pesar de tratarse de muy pocas probetas los resultados son muy interesantes. Se ha ordenado el hormigón de mayor a menor coeficiente de absorción. Centrándose en las ecuaciones vemos como el hormigón de mayor coeficiente de absorción tiene el exponente menor al igual que ocurriría en el ensayo de las maderas. No obstante para reafirmar esta hipótesis deberíamos tener más probetas con diferentes relaciones agua cemento que nos verifiquen esta conclusión.

Tabla 4.21. Evaporación del hormigón expresada mediante funciones matemáticas

	ECUACIÓN	R <sup>2</sup> (%)
<b>H 0.8</b>	$y = 10,68x^{0,035}$	0,90
<b>H 0.5</b>	$y = 10,25x^{0,044}$	0,90

## 4.5.2. Georradar

### 1. Maderas

Los datos de las siguientes tablas han sido procesados de la misma forma que se han descrito en el apartado 4.2. En este apartado se busca una posible relación entre las velocidades de propagación de las maderas tanto secas como húmedas con el coeficiente de absorción y la densidad.

En la Tabla 4.22 se definen las velocidades de propagación para cada especie en seco (humedad en equilibrio higroscópico) y húmedas, además de con la antena situada paralela y perpendicular a las fibras. En la siguiente tabla se han ordenado las especies de menor a mayor densidad y en la segunda de menor a mayor coeficiente de absorción para estudiar los resultados.

Todas las lecturas de este estudio se encuentran en el Anexo 5.1.

Tabla 4.22. Valores de velocidades de propagación (cm/ns) maderas seca-húmedas para el estudio de absorción-evaporación con georradar

			R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
M1	SECO	para	26,49	32,64	42,72	22,79	27,20	33,86	20,00	23,31	28,04
		perp	25,74	32,00	41,63	22,17	26,67	33,04	19,43	22,79	27,29
	HUMEDO	para	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		perp	x	x	x	x	x	x	x	x	x
M2	SECO	para	22,57	28,02	35,82	19,46	23,38	28,57	16,90	19,78	23,38
		perp	21,11	25,99	32,88	18,27	21,82	26,47	15,97	18,60	21,88
	HUMEDO	para	20,45	24,74	31,03	18,32	21,69	26,37	16,18	18,75	22,15
		perp	17,03	19,95	23,85	14,52	16,59	19,20	12,48	13,98	15,79
M3	SECO	para	21,11	25,33	31,54	18,40	21,53	25,85	16,31	18,72	21,90
		perp	19,69	23,31	28,57	17,27	20,00	23,75	15,38	17,51	20,32
	HUMEDO	para	9,37	10,24	11,23	8,02	8,65	9,35	7,00	7,48	8,00
		perp	x	x	x	x	x	x	x	x	x
M4	SECO	para	21,54	28,00	38,36	17,95	22,22	28,29	15,51	18,61	22,68
		perp	20,14	25,93	35,44	17,07	21,05	26,92	14,74	17,61	21,54
	HUMEDO	para	13,49	15,78	18,79	11,86	13,59	15,77	10,67	12,04	13,73
		perp	18,60	23,05	30,11	15,56	18,54	22,86	13,30	15,43	18,30
M5	SECO	para	23,37	28,18	36,01	20,11	23,58	28,81	17,53	19,59	23,79
		perp	22,48	27,47	34,67	18,71	22,04	26,44	16,70	18,81	22,61
	HUMEDO	para	19,75	23,35	28,36	17,11	19,75	23,21	15,09	16,67	19,65
		perp	18,10	21,20	25,24	15,92	18,27	21,20	13,73	15,05	17,49
M6	SECO	para	22,42	25,91	30,49	19,69	22,32	25,64	17,73	19,84	22,42
		perp	19,42	22,08	25,71	17,54	19,69	22,52	15,97	17,73	20,00
	HUMEDO	para	22,17	25,64	30,12	19,69	22,37	25,71	17,79	19,96	22,57
		perp	18,94	21,46	24,45	16,84	18,80	21,06	14,97	16,50	18,22
M7	SECO	para	19,95	23,80	29,06	17,48	20,37	24,10	15,49	17,72	20,48
		perp	18,48	21,74	25,87	16,34	18,84	21,86	14,70	16,69	19,02
	HUMEDO	para	19,55	23,16	28,12	17,21	19,95	23,52	15,65	17,88	20,69
		perp	17,28	20,05	23,88	15,19	17,28	20,05	13,43	15,04	17,09
M8	SECO	para	20,67	27,52	38,35	17,32	21,89	28,22	14,99	18,29	22,51
		perp	20,00	25,74	36,11	16,70	20,52	26,60	14,29	17,00	20,98
	HUMEDO	para	18,23	22,70	29,59	15,19	18,17	22,33	12,96	15,07	17,82
		perp	16,70	20,83	26,75	13,97	16,75	20,40	11,66	13,54	15,85



Con todo ello y después de procesar y clasificar todos los registros se decide abordar los resultados desde diferentes puntos de vista que desarrollarán en las siguientes páginas.

1. Se quiere analizar la relación entre los incrementos de las velocidades de propagación de las ondas electromagnéticas registradas mediante georradar con los distintos contenidos de humedad.

Analizando la Tabla 4.21. podemos afirmar que a pesar de la atenuación que sufren las señales como consecuencia de la absorción de agua se registra perfectamente que se produce una variación de la velocidad de propagación como consecuencia del agua. Es importante resaltar como a la frecuencia de estudio (2 GHz), en la gran mayoría de los casos se registra perfectamente. Sólo en algunos casos como en la madera de *Balsa* y en *Silvestre* en el que la atenuación por el efecto del agua es tal que no se puede identificar la reflejada (Figura 4.14).

En esos casos, deberíamos emplear antenas de mayor frecuencia, por ejemplo 1,6 GHz, cuya señal se atenuará menos y nos facilitará la identificación de la señal.

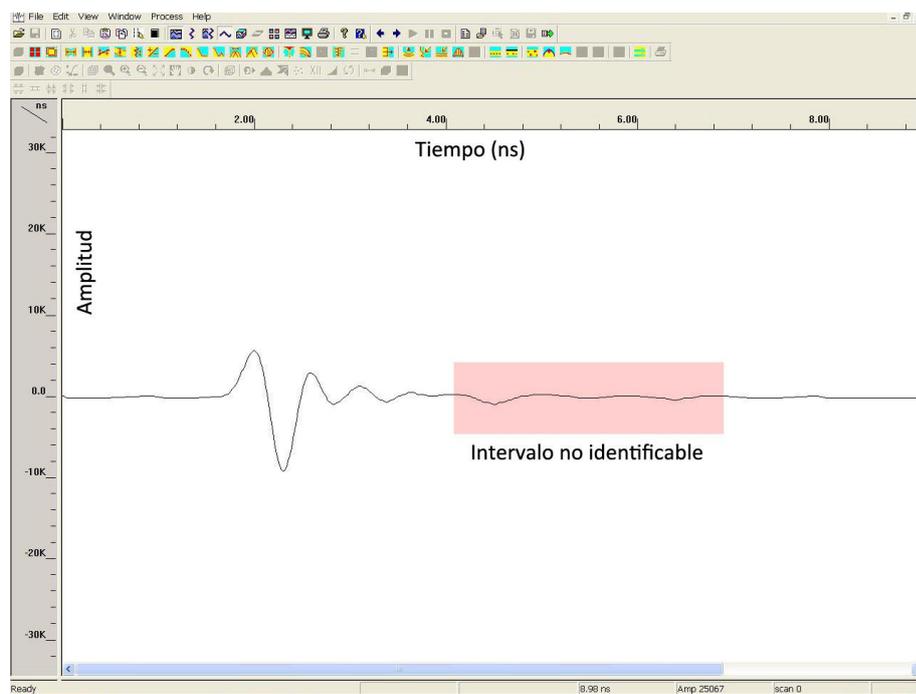


Figura 4.14. Ejemplo de una traza con onda reflejada no identificable



Se comprueba como la anisotropía, es decir, la variación de velocidad con respecto a la fibra se registra perfectamente en los distintos tipos de madera y su valor no está asociado, como era previsible al valor de la densidad. Sino que éste dependerá de cómo está constituida la materia leñosa en su interior. Además este fenómeno se identifica independientemente de los máximos considerados para el cálculo de la velocidad. Además se comprueba que la velocidad cuando la antena está situada paralela a la dirección de las fibras es siempre mayor que perpendicular, en estado de humedad de equilibrio higroscópico y húmeda.

En la siguiente tabla se establece la diferencia entre el valor absoluto de anisotropía entre seca y húmeda para cada especie. Se ha obtenido al realizar la relación del coeficiente en madera con humedad en equilibrio higroscópico entre el coeficiente de madera húmeda representados en la Tabla 4.23 para cada especie de madera. Como en todas las tablas de este estudio primero se ordenan los resultados por densidad y posteriormente por absorción.

Tabla 4.24. Diferencia entre valores absolutos de anisotropía entre madera en condiciones de humedad de equilibrio higroscópico y húmeda

	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
<b>M1</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<b>M2</b>	0,10	0,12	0,15	0,15	0,17	0,20	0,17	0,19	0,22
<b>M3</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<b>M4</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<b>M5</b>	0,05	0,07	0,07	0,00	0,01	0,00	0,04	0,06	0,06
<b>M6</b>	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,06	0,06	0,07	0,08
<b>M7</b>	0,04	0,05	0,04	0,05	0,06	0,05	0,09	0,10	0,10
<b>M8</b>	0,05	0,02	0,04	0,04	0,02	0,03	0,05	0,03	0,04
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,07</b>	<b>0,06</b>	<b>0,06</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,10</b>
	<b>7,02 %</b>								

	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
<b>M7</b>	0,04	0,05	0,04	0,05	0,06	0,05	0,09	0,10	0,10
<b>M6</b>	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,06	0,06	0,07	0,08
<b>M8</b>	0,05	0,02	0,04	0,04	0,02	0,03	0,05	0,03	0,04
<b>M5</b>	0,05	0,07	0,07	0,00	0,01	0,00	0,04	0,06	0,06
<b>M4</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<b>M2</b>	0,10	0,12	0,15	0,15	0,17	0,20	0,17	0,19	0,22
<b>M3</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<b>M1</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,07</b>	<b>0,06</b>	<b>0,06</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,10</b>
	<b>7,02 %</b>								

Es importante destacar que aunque la anisotropía es perfectamente identificable cuando las maderas están secas y húmedas, en el estado húmedo se potencia este fenómeno. Ya que de forma promedio para todas las maderas estudiadas nos encontramos con que la anisotropía aumenta un 7%.

Esto significa, que cuando las maderas están sometidas a algún proceso de deterioro como consecuencia de la presencia de agua, los valores de velocidad que se registran no serán comparables dependiendo de la dirección de registro, es decir, de la posición de la antena con respecto a las fibras.

3. En este último enfoque se estudia el efecto de la absorción de agua en las velocidades de propagación de las ondas electromagnéticas.

En la Tabla 4.25 se definen las diferencias de velocidad de propagación (cm/ns) húmedo-seco de cada probeta, manteniendo la misma dirección de fibras. Estas diferencias son obtenidas mediante la relación de la velocidad de propagación en húmedo entre la velocidad en condiciones de humedad de equilibrio higroscópico para una misma dirección de fibras.

Para facilitar el análisis de resultados primero se han ordenado los valores por densidad y después por el coeficiente de absorción de cada una de las especies estudiadas.

Tabla 4.25. Efecto de absorción de agua en la madera con las fibras paralelas y perpendiculares

ESPECIE	DIRECC FIBRAS	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3	
Incremento de velocidades (cm/ns)											
M2	PARALELA	PROMEDIO	-2,12	-3,28	-4,79	-1,14	-1,69	-2,20	-0,72	-1,03	-1,22
M3			-11,74	-15,09	-20,31	-10,38	-12,88	-16,50	-9,31	-11,24	-13,91
M4			-8,04	-12,23	-19,57	-6,08	-8,63	-12,51	-4,85	-6,56	-8,95
M5			-3,62	-4,82	-7,64	-3,01	-3,83	-5,60	-2,44	-2,92	-4,14
M6			-0,25	-0,27	-0,37	0,00	0,05	0,06	0,06	0,12	0,15
M7			-0,40	-0,64	-0,95	-0,27	-0,42	-0,58	0,16	0,16	0,22
M8			-2,44	-4,82	-8,76	-2,13	-3,72	-5,89	-2,03	-3,22	-4,69

ESPECIE	DIRECC FIBRAS	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3	
Incremento de velocidades (cm/ns)											
M2	PERPENDICULAR	PROMEDIO	-4,09	-6,05	-9,03	-3,75	-5,23	-7,27	-3,49	-4,62	-6,09
M3			X	X	X	X	X	X	X	X	X
M4			-1,54	-2,88	-5,33	-1,52	-2,51	-4,06	-1,44	-2,18	-3,24
M5			-4,38	-6,27	-9,42	-2,79	-3,77	-5,25	-2,97	-3,76	-5,12
M6			-0,48	-0,62	-1,26	-0,71	-0,88	-1,46	-1,00	-1,23	-1,78
M7			-1,19	-1,68	-1,99	-1,15	-1,55	-1,81	-1,27	-1,65	-1,93
M8			-3,30	-4,92	-9,36	-2,73	-3,77	-6,20	-2,63	-3,47	-5,13

ESPECIE	DIRECC FIBRAS	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3	
Incremento de velocidades (cm/ns)											
M7	PARALELA	PROMEDIO	-0,40	-0,64	-0,95	-0,27	-0,42	-0,58	0,16	0,16	0,22
M8			-2,44	-4,82	-8,76	-2,13	-3,72	-5,89	-2,03	-3,22	-4,69
M6			-0,25	-0,27	-0,37	0,00	0,05	0,06	0,06	0,12	0,15
M5			-3,62	-4,82	-7,64	-3,01	-3,83	-5,60	-2,44	-2,92	-4,14
M4			-8,04	-12,23	-19,57	-6,08	-8,63	-12,51	-4,85	-6,56	-8,95
M2			-2,12	-3,28	-4,79	-1,14	-1,69	-2,20	-0,72	-1,03	-1,22
M3			-11,74	-15,09	-20,31	-10,38	-12,88	-16,50	-9,31	-11,24	-13,91

ESPECIE	DIRECC FIBRAS	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3	
Incremento de velocidades (cm/ns)											
<b>M7</b>	PERPENDICULAR	PROMEDIO	-1,19	-1,68	-1,99	-1,15	-1,55	-1,81	-1,27	-1,65	-1,93
<b>M8</b>			-3,30	-4,92	-9,36	-2,73	-3,77	-6,20	-2,63	-3,47	-5,13
<b>M6</b>			-0,48	-0,62	-1,26	-0,71	-0,88	-1,46	-1,00	-1,23	-1,78
<b>M5</b>			-4,38	-6,27	-9,42	-2,79	-3,77	-5,25	-2,97	-3,76	-5,12
<b>M4</b>			-1,54	-2,88	-5,33	-1,52	-2,51	-4,06	-1,44	-2,18	-3,24
<b>M2</b>			-4,09	-6,05	-9,03	-3,75	-5,23	-7,27	-3,49	-4,62	-6,09
<b>M3</b>			X	X	X	X	X	X	X	X	X

El ensayo ha sido un éxito, ya que se comprueba que independientemente de los máximos considerados y de la dirección de radiación con respecto a la fibra, siempre se comprueba cómo se produce una reducción de la velocidad (incrementos negativos) debido al aumento de agua. Además como patrón general de comportamiento, a pesar de la diversidad de especies y variación de características de las maderas estudiadas se produce una ordenación de una disminución de la velocidad mayor cuanto mayor es el grado de absorción de agua.

Este fenómeno se hace patente con mayor relevancia cuando la radiación del campo se realiza perpendicular a la fibra, ya que excepto para la madera *Tali*, la disminución de la velocidad está ordenada según el coeficiente de absorción de agua. Además, se observa que cuando el grado de absorción es muy elevado como es el caso del *Silvestre* o la *Balsa*, la señal se ve tan atenuada como consecuencia de la alta polarización del medio que es muy difícil registrar la señal reflejada. Para estos casos, sería más aconsejable trabajar con antenas de menor frecuencia que durante su trayecto por el interior del medio sufrirán menor atenuación.

## 2.Hormigón

Las tablas siguientes son el resultado del procesado de datos del georradar, tal como se ha explicado en el apartado 4.2. del presente trabajo. La finalidad de esta sección es buscar relaciones entre el incremento de velocidad como consecuencia de la absorción de agua y el coeficiente de absorción.

En la Tabla 4.26 se incluyen las velocidades de propagación para cada intervalo de máximos, así como para cada probeta de hormigón 0,5 ó 0,8. Después, se ha realizado un promedio de las velocidades de las probetas que componen cada lote para unificar los datos. La desviación típica confirma que los datos han sido registrados correctamente.

Tabla 4.26. Velocidades de propagación obtenidas mediante georradar para hormigón con relación A/C de 0,5 y 0,8

HUMEDAD DE EQUILIBRIO HIGROSCÓPICO										
Incremento de velocidades (cm/ns)										
	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3	
0,5	A	10,60	11,33	12,25	9,95	10,60	11,40	9,40	9,98	10,68
	B	10,58	11,36	12,23	9,98	10,67	11,43	9,41	10,03	10,70
	C	10,58	11,32	12,20	10,00	10,65	11,43	9,47	10,05	10,74
	D	10,64	11,38	12,23	10,05	10,71	11,46	9,49	10,08	10,74
<b>promedio</b>	10,60	11,35	12,23	9,99	10,66	11,43	9,44	10,03	10,71	
<b>desv</b>	0,03	0,03	0,02	0,04	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	

HÚMEDO										
Incremento de velocidades (cm/ns)										
	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3	
0,5	A	8,33	9,72	11,59	7,49	8,57	9,97	6,83	7,70	8,81
	B	8,25	9,61	11,78	7,47	8,54	10,19	6,81	7,68	8,98
	C	8,32	9,65	11,81	7,54	8,60	10,23	6,87	7,71	8,97
	D	8,43	9,84	11,98	7,66	8,78	10,41	6,94	7,83	9,07
<b>promedio</b>	8,33	9,71	11,79	7,54	8,62	10,20	6,86	7,73	8,96	
<b>desv</b>	0,08	0,10	0,16	0,09	0,11	0,18	0,06	0,07	0,11	

HUMEDAD DE EQUILIBRIO HIGROSCÓPICO										
Incremento de velocidades (cm/ns)										
	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3	
0,8	A	10,84	11,56	12,48	10,20	10,84	11,64	9,63	10,19	10,90
	B	10,75	11,46	12,36	10,20	10,84	11,64	9,62	10,18	10,88
	C	10,75	11,49	12,44	10,20	10,87	11,71	9,62	10,20	10,94
	D	10,72	11,44	12,38	10,13	10,77	11,59	9,63	10,20	10,94
<b>promedio</b>	10,77	11,49	12,42	10,18	10,83	11,65	9,62	10,19	10,92	
<b>desv</b>	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,01	0,01	0,03	

<b>HÚMEDO</b>										
Incremento de velocidades (cm/ns)										
		<b>R1-D1</b>	<b>R1-D2</b>	<b>R1-D3</b>	<b>R2-D1</b>	<b>R2-D2</b>	<b>R2-D3</b>	<b>R3-D1</b>	<b>R3-D2</b>	<b>R3-D3</b>
<b>0,8</b>	<b>A</b>	8,33	9,71	11,98	7,52	8,60	10,27	6,85	7,71	9,00
	<b>B</b>	8,32	9,69	11,71	7,54	8,62	10,15	6,89	7,77	8,96
	<b>C</b>	8,16	9,42	11,28	7,43	8,45	9,88	6,76	7,58	8,70
	<b>D</b>	8,23	9,55	11,53	7,49	8,55	10,06	6,81	7,66	8,82
	<b>promedio</b>	8,26	9,59	11,63	7,49	8,55	10,09	6,83	7,68	8,87
	<b>desv</b>	0,08	0,13	0,29	0,05	0,08	0,17	0,05	0,08	0,14

En las tablas anteriores se examina como la velocidad de propagación cuando el hormigón se encuentra en humedad de equilibrio higroscópico es mucho mayor que cuando está húmedo. Este fenómeno se confirma para cualquiera de los intervalos de máximos estudiados.

La Tabla 4.27 incluye la diferencia de velocidades producida entre el promedio de hormigón húmedo y el hormigón con humedad de equilibrio higroscópico, para cada tipo de hormigón.

Tabla 4.27. Diferencia de velocidades en absorción- evaporación mediante georradar en hormigón 0,5 y 0,8

<b>DIFERENCIA VELOCIDADES</b>										
Incremento de velocidades (cm/ns)										
		<b>R1-D1</b>	<b>R1-D2</b>	<b>R1-D3</b>	<b>R2-D1</b>	<b>R2-D2</b>	<b>R2-D3</b>	<b>R3-D1</b>	<b>R3-D2</b>	<b>R3-D3</b>
<b>0,5</b>	<b>A</b>	-2,27	-1,61	-0,66	-2,46	-2,02	-1,43	-2,57	-2,27	-1,87
	<b>B</b>	-2,33	-1,75	-0,46	-2,51	-2,12	-1,24	-2,60	-2,34	-1,72
	<b>C</b>	-2,26	-1,66	-0,39	-2,46	-2,05	-1,20	-2,60	-2,34	-1,77
	<b>D</b>	-2,21	-1,54	-0,25	-2,39	-1,93	-1,05	-2,55	-2,24	-1,67
	<b>promedio</b>	-2,27	-1,64	-0,44	-2,45	-2,03	-1,23	-2,58	-2,30	-1,76
	<b>desv</b>	0,05	0,09	0,17	0,05	0,08	0,15	0,03	0,05	0,09

<b>DIFERENCIA VELOCIDADES</b>										
Incremento de velocidades (cm/ns)										
		<b>R1-D1</b>	<b>R1-D2</b>	<b>R1-D3</b>	<b>R2-D1</b>	<b>R2-D2</b>	<b>R2-D3</b>	<b>R3-D1</b>	<b>R3-D2</b>	<b>R3-D3</b>
<b>0,8</b>	<b>A</b>	-2,51	-1,85	-0,50	-2,69	-2,24	-1,37	-2,78	-2,48	-1,90
	<b>B</b>	-2,43	-1,77	-0,65	-2,67	-2,22	-1,49	-2,73	-2,41	-1,93
	<b>C</b>	-2,60	-2,07	-1,16	-2,78	-2,42	-1,84	-2,85	-2,62	-2,25
	<b>D</b>	-2,49	-1,89	-0,85	-2,64	-2,22	-1,54	-2,81	-2,54	-2,12
	<b>promedio</b>	-2,51	-1,90	-0,79	-2,69	-2,28	-1,56	-2,79	-2,51	-2,05
	<b>desv</b>	0,07	0,13	0,29	0,06	0,10	0,20	0,05	0,09	0,16

Las diferencias de velocidades mostradas en las tablas anteriores, revelan que el hormigón 0,5 al ser más denso tiene una menor diferencia que el hormigón de 0,8.

Por último se recogen en la siguiente tabla los valores para comparar el efecto del agua en las dos relaciones agua cemento. Los datos son obtenidos de la diferencia de promedios humedad de equilibrio higroscópico-húmeda para cada máximo.

Tabla 4.28. Comparación de velocidades en absorción- evaporación mediante georradar en el hormigón

HORMIGÓN		R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
<b>0,8</b>	promedio	2,10	1,90	0,79	2,69	2,28	1,56	2,79	2,51	2,05
<b>0,5</b>	promedio	2,27	1,64	0,44	2,45	2,03	1,23	2,58	2,30	1,76

Tal y como se observan en las Tablas 4.26, 4.27 y 4.28 para las dos relaciones agua cemento del efecto de la absorción de agua libre en el hormigón podemos establecer que:.

- Se ha comprobado exitosamente que se produce una disminución muy significativa de la velocidad debido al aumento de agua
- Tal y como se comprueba en la Tabla 4.27. cuanto más agua ha absorbido, la reducción de la velocidad será mayor y por lo tanto un incremento (húmeda-seca) más grande, independientemente del pico elegido para el cálculo de la velocidad

Al comparar el efecto del agua en las dos relaciones A/C se puede observar que:

- La variación de la velocidad es menor para la de 0,5 porque al ser menos porosa ha debido entrar menos cantidad de agua

Por último concluir con que el ensayo ha sido un éxito, pese al gran número de registros a procesar e interpretar. Además, todas las lecturas producidas durante el ensayo están incorporadas en el Anexo 5.2.



## **CAPÍTULO VI. Conclusiones**

El objetivo principal de la investigación realizada era obtener un conocimiento teórico y práctico de dos técnicas de ensayo no destructivo (termografía infrarroja y georradar), y aplicarlas a la caracterización de materiales de construcción. En concreto, se trataba de comprobar la capacidad de estas técnicas para aportar información sobre la densidad de los materiales y el coeficiente de absorción de agua. Con el desarrollo del trabajo presentado en función de los objetivos iniciales se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La termografía es una técnica que permite conocer la temperatura de las superficies por medio del registro de la radiación de ondas electromagnéticas. Se basa en el principio de que cualquier cuerpo cuya temperatura absoluta sea mayor que cero (-273.15 °C) emite radiación electromagnética. La radiación de calor es detectada electrónicamente y se representan sus valores diferenciales por medio de escalas de color.

La cámara utilizada en este trabajo, la Flir i5, permitió comprobar que para la toma de imágenes a una distancia entre 0,6 y 2 m, los resultados obtenidos con la cámara Flir i5 son muy precisos.

- La técnica del georradar se sustenta en la teoría de campos electromagnéticos y en la óptica geométrica. Las ondas del georradar se propagan por un medio hasta que se produce un cambio en las propiedades dieléctricas del medio. En ese instante, parte de la energía de la emisión del georradar se refleja, mientras que el resto de la onda sigue propagándose hasta que la energía se pierde por atenuación

El equipo de georradar empleado es el SIR 3000 de la marca comercial GSSI (Geophysical Survey SystemInc), y se compone de una unidad central y una antena de 2 GHz. La unidad central posee el equipo de visualización integrado, consiste en una pantalla TFT de 8,4 pulgadas y con una resolución 800 x 600.

Se comprobó que, la antena de 2 GHz ofrecía resultados más que satisfactorios en casi todos los casos. Sin embargo, en ciertas probetas necesitaríamos disminuir la resolución para tener un mejor registro de onda como consecuencia del aumento de la frecuencia de registro de la antena y así nos aportara suficiente información.

- En los aspectos referidos al apartado experimental, se describen los 3 ensayos:

Para la determinación del parámetro emisividad mediante termografía se inicia colocando la probeta centrada en el marco de XLP y se adhieren las sondas del termopar a la probeta. Es necesario, esperar durante un tiempo hasta que ambos materiales se equilibren y se pueda tomar la foto termográfica. En este caso, el tiempo estimado experimental es de 5 min.

Para la determinación del parámetro constante dieléctrica mediante georradar se coloca la antena sobre el canto de la probeta cuando ésta está en condiciones de humedad de equilibrio higroscópico. Se realizan 4 registros en las probetas de madera y 2 en las probetas de hormigón.

En el ensayo de análisis y variación de densidad las probetas se introducen en la estufa de secado durante 72 horas, el lote de madera se seca a una temperatura de 60 °C y los pétreos a 100 °C. Se extraen las probetas individualmente y se colocan en la caja de XLP. Durante 60 minutos se realizan fotos termográficas y se estudia la variación de temperatura en función de la densidad de la muestra.

Para el estudio de absorción y evaporación de agua las probetas se introducen completamente en agua durante las 72 horas previas al estudio. Trascorrido ese tiempo, se extraen una a una, se retira el agua superficial y se colocan en la caja de XLP. Cada hora se toma una foto termográfica durante el periodo de estudio estimado, y se estudia cómo se produce la evaporación.

- Las conclusiones acerca de los resultados obtenidos en cada ensayo y para cada material se exponen a continuación.

En la obtención del parámetro emisividad para la variedad *Cenia* mediante la termografía se obtuvieron unos resultados excelentes. Los valores obtenidos para todas las probetas coincidían reafirmando el ensayo mediante el ajuste entre las temperaturas del termopar y las promedio, obteniendo un coeficiente de correlación muy elevado.

Al determinar la constante dieléctrica en madera y hormigón, se puede concluir que los valores siempre son mayores en hormigón que en madera. Además en madera es menor cuando la antena del georradar se coloca paralelamente a la dirección de las fibras, la onda viaja más rápidamente con las fibras paralelas que perpendiculares. De esta forma se confirma la capacidad de la técnica para registrar la anisotropía dieléctrica de la madera.

En el estudio de análisis y variación de densidad de maderas, hormigón y pétreos naturales mediante termografía podemos decir que el método nos permite saber que comportamiento sufre la muestra al enfriarse, así como reafirmar que a mayor densidad se obtiene un enfriamiento menor entre otros aspectos. Los buenos resultados de las curvas de ajuste así lo indican.

Como conclusión del análisis y variación de densidad mediante el georradar, se puede decir que con esta técnica podemos comparar la densidad con las velocidades de propagación y obtener resultados muy satisfactorios.

En el ensayo de absorción y evaporación de agua mediante la termografía se puede obtener el enfriamiento sufrido por cada material. Se comprueba como la técnica es capaz de representar con gran fiabilidad el proceso de evaporación del agua. Ahora bien, no se ha podido establecer un patrón de comportamiento relacionándolo con la densidad.

Al estudiar la absorción y evaporación mediante el georradar, se ve como se obtienen unos resultados muy buenos, ya que se comprueba como independientemente del material la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas se ven muy afectadas.

- En cuanto a la comparación de ambas técnicas y registros, claramente la técnica de la termografía tiene un uso y una obtención de registros mucho más fácil que el georradar.

En el procesado de datos las dos tienen su propio método, por tanto, una vez se domina la técnica la obtención de información si hablamos de tiempo y complejidad es similar. En mi experiencia los datos procesados de la termografía son más fáciles de comprender y de interpretar que los obtenidos de un radargrama.

Como conclusión final, la termografía ha proporcionado mucha más información en el estudio de análisis y variación de densidad. En cambio el georradar ha aportado más información en el ensayo de absorción y evaporación de agua.

- Como futuras líneas de investigación se proponen las siguientes:

Como propuesta de continuidad de investigación de la aplicación de la termografía se propone la búsqueda de anomalías superficiales en fachadas, ya que se sabe que el alcance de la cámara termográfica infrarroja es de una profundidad de hasta 3 cm. El interés de futuras investigaciones estará en validar esta técnica como una medida de control sobre diferentes patologías en revestimientos de no más de 3 cm de profundidad, se podrían estudiar la inclusión de cloruros en fachadas, fisuración, humedades, etc.

Otra línea de investigación para la técnica del georradar, sería ampliar este trabajo profundizando en el estudio de la densidad y absorción de agua en los pétreos naturales. También se podría estudiar la inclusión de cloruros en los pétreos naturales y como afecta a la densidad y a la velocidad de propagación.

## **CAPÍTULO VI. Referencias bibliográficas**

- [1] Lorenzo E. (1994) *"Prospección geofísica de alta resolución mediante georradar. Aplicación a obras civiles"*. Tesis Doctoral de la Universidad Complutense de Madrid, España.
- [2] García F. (1997) *"Aplicaciones de la técnica geofísica de prospección por georradar en ingeniería civil y glaciología"*. Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- [3] Pérez V. (2001) *"Radar del subsuelo. Evaluación en arqueología y en patrimonio histórico-artístico"*. Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- [4] Rodríguez-Abad I. (2010) *"Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera"*, PhD Tesis de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- [5] De la Puente J., Rodríguez J. (2004), *"Inspección termográfica de fachadas de edificios. Comentarios a la norma europea EN 13187"*. Congreso Ibérico de aislamiento térmico y acústico, Gijón, España
- [6] González Fernández. Daniel. (2006) *"Contribuciones a las técnicas no destructivas para evaluación y prueba de procesos y materiales basadas en radiaciones infrarrojas"*, Ph.D. diss. Universidad de Cantabria, Tesis dirigida por José Miguel López Higuera.
- [7] Grinzato E., Vavilov V., Kauppinen T. (1998), *"Quantitative infrared thermography in buildings"*, Energy and Buildings, vol. 29, 1-9,
- [8] Kenneth R., Maser (2009), *"Integration of Ground Penetrating Radar and Infrared Thermography for Bridge Deck Condition Evaluation"*, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France.
- [9] Maldague, Xavier (2001), *"Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive"* , ed. Wiley-Interscience publication, Canada.
- [10] Maldague Xavier, Galmiche F., Ziadi M. (2002), *"Advance in pulse phase thermography"* , Journal of Infrared Physics and Technology, vol. 43.
- [11] López Rodríguez G. (2010), *"Aplicaciones de la termografía infrarroja en la evolución no destructiva de estructuras de madera"* , Ph.D. diss. Universidad de valladolid, Tesis dirigida por Alonso Basterra Otero.
- [12] Fike GM, Abedi J, Banerjee S (2004). *"Imaging the drying of surfaces by infrared thermography"* Ind Eng Chem Res

- [13] Wyckhuysen A, Maldague X (2011). *"A study of wood inspection by infrared thermography. Part I: Wood pole inspection by infrared thermography"*. Res Nondestruct Eval.
- [14] Wyckhuysen A, Maldague X (2011). *"A study of wood inspection by infrared thermography. Part II: Thermography for wood defects detection"*. Res Nondestruct Eval.
- [15] Kandemir-Yucel A, Tavukcuoglu A, Caner-Saltik EN (2007). *"In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity"*. Infrared Phys Technol.
- [16] Plescanu C, Cochior MT, Klein C, Ibarra-Castaneda A, Bendada A, Maldague X (2008). *"Localization of Wood floors structure by infrared thermography"*. In: Proceedings of the 30<sup>th</sup> SPIE (Thermosense XXX), USA: Orlando, March 18-20 .
- [17] Spencer M, Nychka J, Penn L, Boyer I, Everlade L, Liebertz J.(2008) *"Applying infrared thermography for the purpose of identifying concealed wood framing member type and subsurface anomalies with intended application towards historic structures"*. USA: National Center for Preservation Technology and Training.
- [18] López G, Basterra LA, Ramón-Cueto G, De Diego A, *"Detection of singularities and subsurface defects in wood by infrared thermography"*. Int J Archit Heritage: Conserv, Anal, Restor, in press.
- [19] Luong, M. P. (1996): *"Change of thermal images of lumber including knots, finger joints and metal connectors"*. Bull Kyoto Univ For 69
- [20] Danese M, M.; Demsar, U.; Masini, N.; Charlton, M. (2010). *"Investigating material decay of historic buildings using visual analytics with multi-temporal infrared thermographic data"*.
- [21] Campbell, J.B. (1996). *"Introduction to remote sensing"*.
- [22] Clark, M. R, McCann, D. M., Forde, M. C.: *"Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridge"*s. NDT&E International 36 (2003).
- [23] Pyakurel S. (2009) *"2D and 3D GPR imaging of wood and fiber reinforced polymer composites"* Ph.D., West Virginia University.
- [24] Daniels, D.J. (2004) *"Ground Penetrating Radar (Second edition)"*. The Institution of Electrical Engineers: London.

- [24] Marshall, Stanley V., Richard E. y Skitek G. (1982) *"Electromagnetic concepts and applications"*. Editorial Prentice Hall Intemational, 734 pp.
- [25] Turner G. y Siggins A.F. (1994) *"Constant Q-Attenuation of Subsurface Radar Pulses"*. Geophysics, vol. 59, no. 8, pp. 1192-1200.
- [26] Robert A. (1996) *"Dielectric permittivity of concrete between 50 MHz and 1 GHz and GPR measurements for building materials evaluation"*. Actas del 6th Internacional Conference on Ground Penetrating Radar, Sendai, Japón.
- [27] Annan A.P. (2003) *"Ground Penetrating Radar: Principles, Procedures and Applications"*. Sensors and Software Inc. Mississauga.
- [28] Spagnolini U. (1997) *"Permittivity measurements of multilayered media with monostatic pulse radar"*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, no. 2, pp. 454-463.
- [28] Gracia V.P., Canas J.A., Pujades L.G., Clapes J., Caselles O., García F. y Osorio R. (2000) *"GPR survey to confirm the location of ancient structures under the Valencian Cathedral (Spain)"*. Journal of Applied Geophysics, vol. 43, no. 2-4, pp. 167-174.
- [29] Pérez V. (2001) *"Radar del subsuelo. Evaluación en arqueología y en patrimonio histórico-artístico"*. Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- [30] Ranalli D., Scozzafava M. y Tallini M. (2004) *"Ground penetrating radar investigations for the restoration of historic buildings: the case study of the Collemaggio Basilica (L'Aquila, Italy)"*. Journal of Cultural Heritage, vol. 5, no. 1, pp. 91-99.
- [31] García F., Ramírez M., Ballester M.C y Benlloch J. (2004) *"Study of the archaeological structures of the subsurface in churches of the Society of Jesus, city of Valencia (Spain), derived from the GPR technique"*. Actas del 10th International Conference on Ground Penetrating Radar, Delft, Holanda.
- [32] García F., Blanco M.R., Abad I.R., Sala R.M., Ausina I.T., Marco J.B. y Conesa J.L.M. (2007) *"GPR technique as a tool for cultural heritage restoration: San Miguel de los Reyes Hieronymite Monastery, 16th century (Valencia, Spain)"*. Journal of Cultural Heritage, vol. 8, no. 1, pp. 87-92.
- [33] Ramírez M., García F., Rodríguez I., Martínez R. y Benlloch J. (2008) *"Groundpenetrating radar survey for subfloor mapping and analysis of structural damage in the Sagrado Corazón de Jesús Church, Spain"*. Archaeological Prospection, vol. 15, no. 4, pp. 285-292.

- [34] Pérez V., García F.G. y Abad I.R. (2008) *"GPR evaluation of the damage found in the reinforced concrete base of a block of flats: A case study"*. NDT & E International, vol. 41, no. 5, pp. 341-353.
- [35] Capuz Lafarga L., Capuz-Lladro R., García-García F., Rodríguez Abad I., Martínez Sala R., Díez Barra R. (2011) *"Evaluación de la madera estructural para la rehabilitación de las Naves Cros. (Valencia España) por medio de diferentes técnicas no destructivas"*. 1º Congreso Ibero-Latinoamericano de la madera en construcción. Coimbra, Portugal.
- [36] Lualdi M., Zanzi L. y Binda L. (2003) *"Acquisition and processing requirements for high quality 3D reconstruction from GPR investigations"*. Actas del International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Berlin, Alemania.
- [37] Maierhofer C. (2003) *"Nondestructive evaluation of concrete infrastructure with ground penetrating radar"*. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 15, no. 3, pp. 287- 97.
- [38] Porsani J.L., Sauck W.A. y Junior A.O.S. (2006) *"GPR for mapping fractures and as a guide for the extraction of ornamental granite from a quarry: A case study from southern Brazil"*. Journal of Applied Geophysics, vol. 58, no. 3, pp. 177-187.
- [39] Benedetto A. y Pensa S. (2007) *"Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques"*. Journal of Applied Geophysics, vol. 62, no. 2, pp. 107-123.
- [40] Laurens S., Balayssac J.P., Rhazi J., Klysz G. y Arliguie G. (2005) *"Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modeling"*. Materials and Structures, vol. 38, no. 283, pp. 827-832.
- [41] Huisman J.A., Snepvangers J.J.J.C., Bouten W. y Heuvelink G.B.M. (2003) *"Monitoring temporal development of spatial soil water content variation: comparison of ground penetrating radar and time domain reflectometry"*. Vadose Zone Journal, vol. 2, pp. 519- 529.
- [42] Zagoskin V., Iljushenko V.N., Lighthart L.P., Kataev S.G. y Yarovoy A.G. (2006) *"Dielectric properties of moist soils"*. Actas del 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, Ohio, EEUU.
- [43] Maierhofer C., Leipold S. y Wiggenhausere H. (1998) *"Investigations of the influence of moisture and salt content on the dielectric properties of brick materials using radar"*. Actas del 7th International Conference on Ground Penetrating Radar, Kansas, EEUU.
- [44] Maierhofer C., Leipold S. (2001) *"Radar investigation of masonry structures"*. NDT & E International. 34. 139-147.

- [45] Sbartai Z.M., Laurens S., Balayssac J.P., Arliguie G. y Ballivy G. (2006a) "*Ability of the direct wave of radar ground-coupled antenna for NDT of concrete structures*". NDT & E International, vol. 39, no. 5, pp. 400-407.
- [46] Sbartai Z.M., Laurens S., Balayssac J.P., Ballivy G. y Arliguie G. (2006b) "*Effect of concrete moisture on radar signal amplitude*". ACI Materials Journal, vol. 103, no. 6, p. 419-426.
- [47] Klysz G. y Balayssac J.P. (2007) "*Determination of volumetric water content of concrete using ground-penetrating radar*". Cement and Concrete Research, vol. 37, no. 8, pp. 1164-1171.
- [48] Viriyametanont K., Laurens S., Klysz G., Balayssac J.P. y Arliguie G. (2008) "*Radar survey of concrete elements: Effect of concrete properties on propagation velocity and time zero*". NDT & E International, vol. 41, no. 3, pp. 198-207.
- [49] Capuz-Lladro R., Díez R., Rodríguez-Abad I., García-García F., Martínez-Sala R. y Tort I. (2007) "*Comparación de técnicas no destructivas en la caracterización de vigas de madera estructural de diferentes especies*". Actas del I Jornada Nacional de Investigación en Edificación, Madrid, España.
- [50] Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., García-García F., Capuz-Lladro R., Díez R. y Tort I. (2007a) "*Use of Ground Penetrating Radar Technique for Structural Timber Grading-Comparision analysis of grading methods*". Actas del 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Near Surface Geophysics, Estambul, Turquía.
- [51] Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., Tort I., García-García F., Díez R. y Capuz-Lladro R. (2007b) "*Estudio del contenido de humedad de vigas de madera de distintas especies por medio de la técnica no destructiva de georradar*". Actas del IV Congreso Nacional y I Congreso Ibérico de Agroingeniería, Albacete, España.
- [52] Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., García-García F., Capuz-Lladro R. y Díez R. (2008a) "*A non-destructive method for the evaluation of density and moisture content in sawn timber structures by GPR*". Actas del 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, Birmingham, Reino Unido.
- [53] Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., Capuz-Lladro R., García-García F. y Díez R. (2008b) "*Estudio de la variación del contenido de humedad en vigas de pino gallego por medio de la técnica no destructiva del georradar*". Actas del II Jornadas de Investigación en Construcción, Madrid, España.
- [54] Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., Capuz-Lladro R. y García-García F. (2009a) "*Analysis of dielectric anisotropy in Pinus pinaster Ait by the GPR technique*". Actas del 5th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, Granada, Spain.

- [55] Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., Capuz-Lladró R., García-García F. y Cabrelles L (2009b) *“Application of the Non-Destructive Ground-Penetrating Radar (GPR) Technique to the Restoration Works of a Timber Structure”*. Actas del I Congreso Internacional de Investigación en Edificación, Madrid, España.
- [56] Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., García-García F., Capuz-Lladró R., Díez Barra R. (2011a) *“Nondestructive characterization of Maritime Pine sawn timber dielectric anisotropy by means of GPR”*. International Workshop on Ground-penetrating radar , Aachen, Germany.
- [57] Martínez-Sala R., Rodríguez-Abad I., Tapia J. (2012a) *“Analysis of the reflected wave arrival position in timber specimens emitted by GPR with an antenna of 1,6 GHz.”*. International Conference on Construction and Building Research, Valencia, Spain.
- [58] Rodríguez-Abad I.; Martínez-Sala R.; Capuz Lladró R.; Díez Barra R.; García-García, F. (2011b) *“Assessment of the variation of the moisture content in the Pinus pinaster ait using the non destructive GPR technique”*. Materiales de Construcción, vol. 61, nº 301, 143-156.
- [59] Martínez-Sala R.; Rodríguez-Abad I.; Díez Barra R.; Capuz Lladró R. (2012b) *“Assessment of the dielectric anisotropy in timber using the nondestructive GPR technique”*. Construction & Building Materials, nº 38, 903-911.
- [60] Lai W. L. and Tsang W. F. (2008) *“Characterization of pore systems of air/water-cured concrete using ground penetrating radar (GPR) through continuous water injection”*. Construction and Building Materials, 22, 250-256.
- [61] Villain G., Derobert X., Sbartai M. and Balayssac J.P. (2010) *“Evaluation of concrete water content and other durability indicators by electromagnetic measurements”*. Proceedings of the 13th International Conference on Ground Penetrating Radar, Lecce, Italia.
- [62] Gamaliel López, Luis Alfonso Bastera, Luis Acuña, *“Estimation of wood density using infrared thermography”*, Construction and Materials 42 (2013) 29-32.
- [63] M. Rosselló Mesquida, *“El yacimiento de València la Vella (Riba-roja de Tútia, Valencia). Algunas consideraciones para su atribución cronológica y cultural,”* Quad, Preh. Arq.Cast. 17. 1996.
- [64] Rodríguez-Abad, Martínez-Sala R., Capuz Lladró R., Díez Barra, García- García, *“Estudio de la variación del contenido de humedad en el Pinus pinaster Ait por medio de la técnica no destructiva del georradar”*], Materiales de la construcción, Vol. 61, 301, 143-156, 2011.

- [65] Rodríguez-Liñan C., Morales-Conde M. J., Rubio-de Hita P., Pérez-Gálvez F.; *"Analysis of the influence of density on infrared thermography and of the scope of this technique in the detection of internal defects in Wood"*, *Materiales de construcción* 62 (2012).
- [66] Lerma C., Mas Á., Gil E., Vercher J., Peñalver M.J., *"Pathology of building materials in historic building. Relationship between laboratory testing and infrared thermography"*. *Materiales de construcción* 64 (2014).
- [67] Yenes-Varela, González-Moreno, Becerril-García, González-Martín, Rodríguez-Saiz, González-Rubio, Martín-Para, de la Fuente-Alonso, *"Termografía infrarroja, END en patología y rehabilitación de edificación: usos documentados"*. *Rehabend* (2014).
- [68] Gómez-Heras, McAllister, Gómez-Flechoso, Fort, García-Morales, *"Ejemplos de análisis cuantitativo de imágenes de infrarrojos obtenidas por termografía activa para la detección de patologías de humedades"*. *Rehabend* (2014).
- [70] Carosena Meola, Giovanni M. Carlomagno, Luca Giorleo, *"The use of infrared thermography for materiales characterization"*. *Journal of Materials Processing Technology* 155-156 (2004).
- [71] [http://www.cuadromaderas.com/productos/coniferas\\_resultados\\_15387\\_0\\_1.html](http://www.cuadromaderas.com/productos/coniferas_resultados_15387_0_1.html)
- [72] <http://www.maderas.com/eucalip-car.htm>
- [73] [http://www.astumasa.com/index1\\_7.html](http://www.astumasa.com/index1_7.html)
- [74] <http://normadera.tknika.net/es/content/ficha/elondo-o-tali>
- [75] <http://www.casadelatierra.com/ASR002002.pdf>
- [76] <http://www.maderasdelrio.com/data/productos/ficheros/22082008121930.pdf>
- [77] [http://www.ecobalsa.com/descargar/FICHA\\_TECNICA\\_DE\\_LA\\_MADERA\\_BALSA.pdf](http://www.ecobalsa.com/descargar/FICHA_TECNICA_DE_LA_MADERA_BALSA.pdf)
- [78] <http://www.aidico.es/lcli-74-50-segmentacion-f-10-138-1023/>
- [79] <http://www.levantina.com/es/>
- [80] <http://amadosalvador.es/coleccion/piedras-naturales/>
- [81] <http://www.gomezgrau.com/web.html#/CatalogoNuestraColeccion>
- [81] <http://www.stonecontact.com/stone/spain-pink/2>
- [82] <http://www.flir.es/home/>
- [83] <http://www.aenor.es/>



## Anexo 1

### 1.1. Registros de georradar para el cálculo de cte. Dieléctrica: Madera

Cerejeira seco															
medición	Tiempos						Velocidades								
	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,92	2,23	2,50	3,22	3,48	3,72	21,54	28,28	38,89	17,95	22,40	28,57	15,56	18,79	22,95
para	1,92	2,21	2,48	3,22	3,48	3,73	21,54	27,72	37,84	17,95	22,05	28,00	15,47	18,42	22,40
<b>promedio</b>	<b>1,92</b>	<b>2,22</b>	<b>2,49</b>	<b>3,22</b>	<b>3,48</b>	<b>3,73</b>	<b>21,54</b>	<b>28,00</b>	<b>38,36</b>	<b>17,95</b>	<b>22,22</b>	<b>28,29</b>	<b>15,51</b>	<b>18,61</b>	<b>22,68</b>
perp	1,92	2,23	2,52	3,31	3,56	3,82	20,14	25,93	35,44	17,07	21,05	26,92	14,74	17,61	21,54
perp	1,92	2,23	2,52	3,31	3,56	3,82	20,14	25,93	35,44	17,07	21,05	26,92	14,74	17,61	21,54
<b>promedio</b>	<b>1,92</b>	<b>2,23</b>	<b>2,52</b>	<b>3,31</b>	<b>3,56</b>	<b>3,82</b>	<b>20,14</b>	<b>25,93</b>	<b>35,44</b>	<b>17,07</b>	<b>21,05</b>	<b>26,92</b>	<b>14,74</b>	<b>17,61</b>	<b>21,54</b>

Silvestre seco															
medición	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,90	2,19	2,50	3,69	3,96	4,23	21,23	25,33	31,93	18,45	21,47	26,03	16,31	18,63	21,97
para	1,90	2,21	2,49	3,71	3,97	4,23	20,99	25,33	31,15	18,36	21,59	25,68	16,31	18,81	21,84
<b>promedio</b>	<b>1,90</b>	<b>2,20</b>	<b>2,50</b>	<b>3,70</b>	<b>3,97</b>	<b>4,23</b>	<b>21,11</b>	<b>25,33</b>	<b>31,54</b>	<b>18,40</b>	<b>21,53</b>	<b>25,85</b>	<b>16,31</b>	<b>18,72</b>	<b>21,90</b>
perp	1,90	2,21	2,50	3,84	4,11	4,38	19,59	23,31	28,36	17,19	20,00	23,60	15,32	17,51	20,21
perp	1,92	2,21	2,52	3,84	4,11	4,38	19,79	23,31	28,79	17,35	20,00	23,90	15,45	17,51	20,43
<b>promedio</b>	<b>1,91</b>	<b>2,21</b>	<b>2,51</b>	<b>3,84</b>	<b>4,11</b>	<b>4,38</b>	<b>19,69</b>	<b>23,31</b>	<b>28,57</b>	<b>17,27</b>	<b>20,00</b>	<b>23,75</b>	<b>15,38</b>	<b>17,51</b>	<b>20,32</b>

Nigra seco															
medición	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,89	2,18	2,47	3,60	3,87	4,14	22,81	27,46	34,51	19,70	23,08	27,86	17,33	19,39	23,35
para	1,90	2,18	2,49	3,53	3,80	4,10	23,93	28,89	37,50	20,53	24,07	29,77	17,73	19,79	24,22
<b>promedio</b>	<b>1,90</b>	<b>2,18</b>	<b>2,48</b>	<b>3,57</b>	<b>3,84</b>	<b>4,12</b>	<b>23,37</b>	<b>28,18</b>	<b>36,01</b>	<b>20,11</b>	<b>23,58</b>	<b>28,81</b>	<b>17,53</b>	<b>19,59</b>	<b>23,79</b>
perp	1,91	2,22	2,51	3,63	3,97	4,22	22,67	27,66	34,82	18,93	22,29	26,71	16,88	19,00	22,81
perp	1,89	2,21	2,51	3,64	4,00	4,25	22,29	27,27	34,51	18,48	21,79	26,17	16,53	18,63	22,41
<b>promedio</b>	<b>1,90</b>	<b>2,22</b>	<b>2,51</b>	<b>3,64</b>	<b>3,99</b>	<b>4,24</b>	<b>22,48</b>	<b>27,47</b>	<b>34,67</b>	<b>18,71</b>	<b>22,04</b>	<b>26,44</b>	<b>16,70</b>	<b>18,81</b>	<b>22,61</b>

Eucalipto seco															
medición	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,89	2,23	2,52	3,24	3,51	3,74	20,59	27,52	38,61	17,16	21,72	28,08	15,03	18,41	22,79
para	1,90	2,23	2,51	3,24	3,49	3,76	20,75	27,52	38,08	17,48	22,06	28,37	14,95	18,17	22,24
<b>promedio</b>	<b>1,90</b>	<b>2,23</b>	<b>2,52</b>	<b>3,24</b>	<b>3,50</b>	<b>3,75</b>	<b>20,67</b>	<b>27,52</b>	<b>38,35</b>	<b>17,32</b>	<b>21,89</b>	<b>28,22</b>	<b>14,99</b>	<b>18,29</b>	<b>22,51</b>
perp	1,91	2,23	2,54	3,30	3,59	3,86	20,00	25,98	36,58	16,55	20,44	26,48	14,26	17,06	21,06
perp	1,93	2,23	2,54	3,32	3,58	3,87	20,00	25,50	35,64	16,85	20,59	26,73	14,33	16,95	20,90
<b>promedio</b>	<b>1,92</b>	<b>2,23</b>	<b>2,54</b>	<b>3,31</b>	<b>3,59</b>	<b>3,87</b>	<b>20,00</b>	<b>25,74</b>	<b>36,11</b>	<b>16,70</b>	<b>20,52</b>	<b>26,60</b>	<b>14,29</b>	<b>17,00</b>	<b>20,98</b>

Elondo seco															
	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,89	2,22	2,51	3,84	4,11	4,41	19,90	23,95	29,17	17,48	20,53	24,25	15,40	17,72	20,42
para	1,91	2,21	2,51	3,85	4,13	4,40	20,00	23,66	28,96	17,48	20,21	23,95	15,58	17,72	20,53
<b>promedio</b>	<b>1,90</b>	<b>2,22</b>	<b>2,51</b>	<b>3,85</b>	<b>4,12</b>	<b>4,41</b>	<b>19,95</b>	<b>23,80</b>	<b>29,06</b>	<b>17,48</b>	<b>20,37</b>	<b>24,10</b>	<b>15,49</b>	<b>17,72</b>	<b>20,48</b>
perp	1,91	2,23	2,51	4,02	4,30	4,56	18,39	21,68	25,70	16,23	18,74	21,68	14,64	16,65	18,93
perp	1,92	2,23	2,52	4,01	4,28	4,55	18,56	21,80	26,04	16,44	18,93	22,05	14,75	16,72	19,11
<b>promedio</b>	<b>1,92</b>	<b>2,23</b>	<b>2,52</b>	<b>4,02</b>	<b>4,29</b>	<b>4,56</b>	<b>18,48</b>	<b>21,74</b>	<b>25,87</b>	<b>16,34</b>	<b>18,84</b>	<b>21,86</b>	<b>14,70</b>	<b>16,69</b>	<b>19,02</b>

Talí seco															
	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,93	2,23	2,51	4,16	4,48	4,76	22,42	25,91	30,30	19,61	22,22	25,38	17,67	19,76	22,22
para	1,92	2,22	2,52	4,15	4,45	4,73	22,42	25,91	30,67	19,76	22,42	25,91	17,79	19,92	22,62
<b>promedio</b>	<b>1,93</b>	<b>2,23</b>	<b>2,52</b>	<b>4,16</b>	<b>4,47</b>	<b>4,75</b>	<b>22,42</b>	<b>25,91</b>	<b>30,49</b>	<b>19,69</b>	<b>22,32</b>	<b>25,64</b>	<b>17,73</b>	<b>19,84</b>	<b>22,42</b>
perp	1,94	2,25	2,57	4,53	4,80	5,08	19,31	21,93	25,51	17,48	19,61	22,42	15,92	17,67	19,92
perp	1,93	2,24	2,56	4,49	4,77	5,05	19,53	22,22	25,91	17,61	19,76	22,62	16,03	17,79	20,08
<b>promedio</b>	<b>1,94</b>	<b>2,25</b>	<b>2,57</b>	<b>4,51</b>	<b>4,79</b>	<b>5,07</b>	<b>19,42</b>	<b>22,08</b>	<b>25,71</b>	<b>17,54</b>	<b>19,69</b>	<b>22,52</b>	<b>15,97</b>	<b>17,73</b>	<b>20,00</b>

Maple seco															
	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,91	2,23	2,49	3,50	3,76	4,04	22,64	28,35	35,64	19,46	23,53	28,35	16,90	19,89	23,23
para	1,91	2,21	2,51	3,51	3,76	4,04	22,50	27,69	36,00	19,46	23,23	28,80	16,90	19,67	23,53
<b>promedio</b>	<b>1,91</b>	<b>2,22</b>	<b>2,50</b>	<b>3,51</b>	<b>3,76</b>	<b>4,04</b>	<b>22,57</b>	<b>28,02</b>	<b>35,82</b>	<b>19,46</b>	<b>23,38</b>	<b>28,57</b>	<b>16,90</b>	<b>19,78</b>	<b>23,38</b>
perp	1,92	2,23	2,52	3,62	3,88	4,16	21,18	25,90	32,73	18,37	21,82	26,47	16,07	18,65	21,95
perp	1,90	2,23	2,52	3,61	3,88	4,17	21,05	26,09	33,03	18,18	21,82	26,47	15,86	18,56	21,82
<b>promedio</b>	<b>1,91</b>	<b>2,23</b>	<b>2,52</b>	<b>3,62</b>	<b>3,88</b>	<b>4,17</b>	<b>21,11</b>	<b>25,99</b>	<b>32,88</b>	<b>18,27</b>	<b>21,82</b>	<b>26,47</b>	<b>15,97</b>	<b>18,60</b>	<b>21,88</b>

Balsa seco															
	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,93	2,22	2,51	3,46	3,72	3,97	26,67	32,90	42,95	22,79	27,20	33,72	20,00	23,31	27,95
para	1,91	2,20	2,50	3,46	3,70	3,95	26,32	32,38	42,50	22,79	27,20	34,00	20,00	23,31	28,14
<b>promedio</b>	<b>1,92</b>	<b>2,21</b>	<b>2,51</b>	<b>3,46</b>	<b>3,71</b>	<b>3,96</b>	<b>26,49</b>	<b>32,64</b>	<b>42,72</b>	<b>22,79</b>	<b>27,20</b>	<b>33,86</b>	<b>20,00</b>	<b>23,31</b>	<b>28,04</b>
perp	1,90	2,22	2,51	3,49	3,75	4,01	25,66	32,13	41,63	22,05	26,67	32,90	19,34	22,79	27,20
perp	1,91	2,21	2,51	3,49	3,74	4,00	25,82	31,88	41,63	22,30	26,67	33,17	19,52	22,79	27,38
<b>promedio</b>	<b>1,91</b>	<b>2,22</b>	<b>2,51</b>	<b>3,49</b>	<b>3,75</b>	<b>4,01</b>	<b>25,74</b>	<b>32,00</b>	<b>41,63</b>	<b>22,17</b>	<b>26,67</b>	<b>33,04</b>	<b>19,43</b>	<b>22,79</b>	<b>27,29</b>

## 1.2. Registros de georradar para el cálculo de cte. Dieléctrica: Hormigón

HORMIGÓN SECO 0.5																
		Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
	medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
A	6	1,80	2,05	2,30	5,58	5,83	6,04	10,58	11,33	12,20	9,93	10,58	11,33	9,43	10,03	10,70
	5	1,80	2,04	2,32	5,57	5,81	6,07	10,61	11,33	12,31	9,98	10,61	11,46	9,37	9,93	10,67
	promedio	1,80	2,05	2,31	5,58	5,82	6,06	10,60	11,33	12,25	9,95	10,60	11,40	9,40	9,98	10,68
B	6	1,80	2,05	2,30	5,58	5,81	6,04	10,58	11,33	12,20	9,98	10,64	11,40	9,43	10,03	10,70
	5	1,78	2,05	2,30	5,56	5,79	6,04	10,58	11,40	12,27	9,98	10,70	11,46	9,39	10,03	10,70
	promedio	1,79	2,05	2,30	5,57	5,80	6,04	10,58	11,36	12,23	9,98	10,67	11,43	9,41	10,03	10,70
C	6	1,75	1,99	2,26	5,52	5,76	5,97	10,61	11,33	12,27	9,98	10,61	11,43	9,48	10,05	10,78
	5	1,75	2,00	2,24	5,54	5,74	5,98	10,55	11,30	12,12	10,03	10,70	11,43	9,46	10,05	10,70
	promedio	1,75	2,00	2,25	5,53	5,75	5,98	10,58	11,32	12,20	10,00	10,65	11,43	9,47	10,05	10,74
D	6	1,75	1,99	2,23	5,50	5,73	5,95	10,67	11,40	12,23	10,05	10,70	11,43	9,52	10,10	10,75
	5	1,74	1,99	2,24	5,51	5,72	5,97	10,61	11,36	12,23	10,05	10,72	11,49	9,46	10,05	10,72
	promedio	1,75	1,99	2,24	5,51	5,73	5,96	10,64	11,38	12,23	10,05	10,71	11,46	9,49	10,08	10,74

HORMIGÓN SECO 0.8																
		Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
	medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
A	6	1,69	1,93	2,18	5,39	5,62	5,85	10,81	11,56	12,46	10,18	10,84	11,63	9,62	10,20	10,90
	5	1,70	1,92	2,18	5,38	5,61	5,85	10,87	11,56	12,50	10,23	10,84	11,66	9,64	10,18	10,90
	promedio	1,70	1,93	2,18	5,39	5,62	5,85	10,84	11,56	12,48	10,20	10,84	11,64	9,63	10,19	10,90
	desv							0,04	0,00	0,03	0,04	0,00	0,02	0,02	0,02	0,00
B	6	1,69	1,93	2,19	5,42	5,62	5,87	10,72	11,46	12,38	10,18	10,84	11,66	9,57	10,15	10,87
	5	1,71	1,93	2,18	5,42	5,62	5,85	10,78	11,46	12,35	10,23	10,84	11,63	9,66	10,20	10,90
	promedio	1,70	1,93	2,19	5,42	5,62	5,86	10,75	11,46	12,36	10,20	10,84	11,64	9,62	10,18	10,88
	desv							0,04	0,00	0,03	0,04	0,00	0,02	0,07	0,04	0,02
C	6	1,69	1,94	2,21	5,40	5,61	5,84	10,78	11,56	12,54	10,20	10,90	11,76	9,64	10,26	11,02
	5	1,69	1,92	2,18	5,42	5,61	5,86	10,72	11,43	12,35	10,20	10,84	11,66	9,59	10,15	10,87
	promedio	1,69	1,93	2,20	5,41	5,61	5,85	10,75	11,49	12,44	10,20	10,87	11,71	9,62	10,20	10,94
	desv							0,04	0,09	0,14	0,00	0,04	0,07	0,03	0,07	0,11
D	6	1,70	1,94	2,21	5,44	5,66	5,86	10,70	11,43	12,38	10,10	10,75	11,59	9,62	10,20	10,96
	5	1,72	1,95	2,21	5,44	5,66	5,87	10,75	11,46	12,38	10,15	10,78	11,59	9,64	10,20	10,93
	promedio	1,71	1,95	2,21	5,44	5,66	5,87	10,72	11,44	12,38	10,13	10,77	11,59	9,63	10,20	10,94
	desv							0,04	0,02	0,00	0,04	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02

## Anexo 2

### 2.1. Registros cámara termográfica para el estudio de análisis y variación de densidad: madera

ENSAYO DE LA DENSIDAD DE LAS MADERAS EXÓTICAS MEDIANTE LA TERMOGRAFÍA																
Inicio 9:46h Fin 18:00	CEREJEIRA 9:46h		EUCALIPTO 10:47		MAPLE BLANDO 11:49h		TALI 12:55h		BALSA 13:56		ELONDO 14:58		NIGRA 15:59		SILVESTRE 17:00	
ENSAYO 26.12.14	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C
1'	916	37,9	923	35,2	931	58,4	938	51,2	945	31,5	952	50,9	959	46,3	966	43,8
5'	917	36,3	924	31,4	932	48,8	939	46,3	946	26,9	953	45,0	960	41,8	967	39,2
10'	918	32,6	925	29,1	933	43,0	940	42,7	947	23,9	954	41,5	961	38,3	968	36,1
1h 20'	919	28,4	927	25,7	934	36,3	941	38,1	948	20,4	955	37,2	962	34,4	969	32,1
30'	920	26,0	928	23,5	935	32,4	942	35,6	949	18,8	956	34,1	963	32,1	970	29,5
45'	921	23,5	929	21,9	936	28,5	943	32,4	950	17,9	957	31,4	964	29,4	971	27,2
60'	922	21,9	930	20,2	937	25,4	944	29,6	951	17,3	958	29,8	965	27,5	972	25,6
Masa Inicial 23.12.14	1151.3		930		1449.7		3487.6		501.5		3358.4		3244.6		2733.4	
Masa tras 72h de secado a 60°C 26.12.14	1095.8		866.8		1339.5		3277.3		455.2		3196.4		3122.7		2565.2	
Tº ambiente (°C)	9:46h - 13.1º		10:47h - 13.3º		11:49h - 13.5º		12:55h - 14º		13:56h - 14.2º		14:58h - 14.3º		15:59 - 14.6º		17:00 - 14.8º	
HR (%)	9:46h - 54.6 %		10:47h - 54.5%		11:49h - 55.1%		12:55h - 53.8%		13:56h - 54%		14:58h - 54.4%		15:59 - 54.8%		17:00 - 55.5%	
Medidas (m)	0.14 x 0.145 x 0.1		0.135 x 0.1 x 0.073		0.18 x 0.18 x 0.08		0.245 x 0.25 x 0.073		0.203 x 0.205 x 0.097		0.19 x 0.187 x 0.115		0.193 x 0.19 x 0.142		0.185 x 0.195 x 0.135	
Volumen (m3)	0.00203		0.0009855		0.002592		0.004471		0.00403		0.00408		0.0052		0.00487	
Densidad (Kg/m3)	539.8		879.5		516.78		733.01		112.95		783.43		600.52		526.73	

	BALSA	MAPLE BLANDO	SILVESTRE	CEREJEIRA	NIGRA	TALI	ELONDO	EUCALIPTO
Densidad	112.95	516.78	526.73	539.8	600.52	733.01	783.43	879.5
Función	$13,923e^{-0,053964x}$	$32,541e^{-0,053695x}$	$18,374e^{-0,052562x}$	$18,127e^{-0,052418x}$	$18,890e^{-0,050085x}$	$21,532e^{-0,045417x}$	$21,101e^{-0,054774x}$	$14,643e^{-0,04830x}$
R²	98,4615%	99,5995%	99,8681%	99,7207%	99,7686%	99,8080%	99,7509%	99,8734%

	BALSA	MAPLE BLANDO	SILVESTRE	CEREJEIRA	NIGRA	TALI	ELONDO	EUCALIPTO
Densidad	112.95	516.78	526.73	539.8	600.52	733.01	783.43	879.5
T inicio (°C)	60	60	60	60	60	60	60	60
T final (°C)	17,34	25,4	25,61	21,94	27,54	29,68	29,83	20,25
Δ T (°C)	42,66	34,6	34,39	38,06	32,46	30,32	30,17	39,75

## 2.2. Registros cámara termográfica para el estudio de análisis y variación de densidad: hormigón

ENSAYO DE DENSIDAD DEL HORMIGÓN MEDIANTE LA TERMOGRAFÍA																		
Inicio 10:00h Fin 18:00	PROBETA DE HORMIGÓN RELACIÓN A/C=0.5								PROBETA DE HORMIGÓN RELACIÓN A/C=0.8									
	(A) 10:00h	(B) 12:00h	(C) 14:00h	(D) 16:00h	(A) 11:00h	(B) 13:00h	(C) 15:00h	(D) 17:00h	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C
ENSAYO 30.12.14	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C
1'	973	71,5	987	70,8	1001	71,8	1015	72,5	980	73,5	994	69,9	1008	72,8	1022	71,7		
5'	974	69,9	988	68,2	1002	68,5	1016	69,0	981	68,8	995	66,3	1009	70,0	1023	69,0		
10'	975	66,4	989	64,6	1003	64,8	1017	65,3	982	65,4	996	62,8	1010	65,5	1024	65,6		
1h 20'	976	61,2	990	59,2	1004	58,6	1018	59,4	983	59,2	997	57,1	1011	59,6	1025	60		
30'	977	57,1	991	54,9	1005	54,2	1019	55,1	984	54,4	998	52,3	1012	54,7	1026	55,1		
45'	978	51,0	992	49,4	1006	48,4	1020	48,8	985	48,0	999	46,4	1013	48,6	1027	48,9		
60'	979	46,0	993	44,9	1007	43,4	1021	44,3	986	43,1	1000	41,9	1014	43,8	1028	44,3		
Masa Inicial 23.12.14	6013.6		5976.8		5225.6		5164.7		5206.2		5264.2		5354.9		5295.2			
Masa tras 72h de secado a 100°C 30.12.14	5879.3		5858.6		5115.4		5070.4		5122.5		5193.6		5263.1		5217.8			
Tª ambiente (°C)	10:00h - 11.9º		12:00h - 12.2º		14:00h - 12.5º		16:00h - 13º		11:00h - 12.2º		13:00h - 12.3º		15:00 - 13º		17:00 - 13.3º			
HR (%)	10:00h - 32.4 %		12:00h - 32%		14:00h - 32%		16:00h - 32.2%		11:00h - 31.6%		13:00h - 32.1%		15:00 - 31.4%		17:00 - 32.9%			
Medidas (m)	0.107 x 0.20 x 0.117		0.117 x 0.20 x 0.108		0.115 x 0.20 x 0.093		0.115 x 0.20 x 0.095		0.115 x 0.20 x 0.098		0.115 x 0.20 x 0.098		0.117 x 0.20 x 0.1		0.115 x 0.20 x 0.1			
Volumen (m3)	0.0025038		0.00252		0.00213		0.00218		0.002254		0.002254		0.00234		0.0023			
Densidad (Kg/m3)	2348.15		2324.84		2401.59		2325.87		2272.62		2304.17		2249.18		2268.60			

	PROBETA DE HORMIGÓN RELACIÓN A/C=0.8					PROBETA DE HORMIGÓN RELACIÓN A/C=0.5				
	C	D	A	B	PROMEDIO	B	D	A	C	PROMEDIO
Densidad	2249,18	2268,6	2272,62	2304,17	<b>2273,6425</b>	2324,84	2325,87	2348,15	2401,59	<b>2350,1125</b>
Función	-0,490x + 27,48	-0,466x + 26,31	-0,500x + 28,09	-0,469x + 26,27	<b>-0,481x + 27,04</b>	-0,437x + 24,62	-0,471x + 26,45	-0,437x + 25,14	-0,474x + 26,73	<b>-0,455x + 25,75</b>
R²	97,50%	98,30%	97,20%	97,50%	<b>97,30%</b>	97,80%	97,50%	98,90%	97,60%	<b>97,50%</b>

	PROBETA DE HORMIGÓN RELACIÓN A/C=0.8					PROBETA DE HORMIGÓN RELACIÓN A/C=0.5				
	C	D	A	B	PROMEDIO	B	D	A	C	PROMEDIO
Densidad	2249,18	2268,6	2272,62	2304,17	<b>2273,6425</b>	2324,84	2325,87	2348,15	2401,59	<b>2350,1125</b>
T inicio (°C)	100	100	100	100		100	100	100	100	
T final (°C)	43,85	44,37	43,11	41,92		44,96	44,33	46,05	43,43	
Δ T (°C)	56,15	55,63	56,89	58,08	<b>56,6875</b>	55,04	55,67	53,95	56,57	<b>55,3075</b>

### 2.3. Registros cámara termográfica para el estudio de análisis y variación de densidad: pétreos naturales

ENSAYO DE LA DENSIDAD DE PÉTREOS NATURALES MEDIANTE LA TERMOGRAFÍA																
Inicio 9:08h Fin 17:16	ARCOIRIS								GOLDEN SHELL							
	AI.1 13:13		AI.2 14:14		AI.3 15:15		AI.4 16:16		GS.1		GS.2		GS.3		GS.4	
ENSAYO 19.1.15	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C
1	1065	86,55	1072	87,72	1079	88,38	1086	88,61	1177	89,1	1184	89,07	1191	89,55	1198	89,82
5	1066	71,24	1073	72,39	1080	72,81	1087	72,89	1178	76,26	1185	75,84	1192	74,71	1199	76,31
10	1067	56,89	1074	58,16	1081	58,58	1088	53,24	1179	64,31	1186	64,72	1193	60,55	1200	63,31
1h 20	1068	39,65	1075	39,94	1082	40,80	1089	40,92	1180	46,76	1187	47,15	1194	45	1201	46,69
30	1069	29,42	1076	30,13	1083	30,55	1090	31,26	1181	36,13	1188	36,36	1195	34,3	1202	36
45	1070	21,68	1077	22,46	1084	22,90	1091	23,67	1182	26,57	1189	26,87	1196	26,07	1203	29,1
60	1071	18,53	1078	18,96	1085	19,46	1092	20,13	1183	21,4	1190	21,69	1197	21,16	1204	22,22
Masa Inicial 16.1.15	427,9		422,6		424,4		422,5		518,7		526,8		487,1		489,6	
Masa tras 48h de secado a 100°C 19.1.15	427		421,4		422,7		420,8		517,2		524,9		485,9		488,3	
Tº ambiente (°C)	14,2		14,4		14,7		14,8		12,9		13,3		13,5		13,8	
HR (%)	54,3		55		54,2		54,8		36,9		35,6		35		34,7	
Medidas (m)	0,1 x 0,1 x 0,02				0,1 x 0,1 x 0,029											
Volumen (m3)	0,0002				0,00029											
Densidad (Kg/m3)	2135		2107		2113,5		2104		1783,4		1810,0		1675,5		1683,8	

	ARCOIRIS					GOLDEN SHELL				
	AL.4	AL.2	AL.3	AL.1	PROMEDIO	GS.3	GS.4	GS.1	GS.2	PROMEDIO
Densidad	2104	2107	2113,5	2135	<b>2114,9</b>	1675,5	1683,8	1783,4	1810,0	<b>1738,2</b>
Función	$78,5e^{-0,072103x}$	$76,2e^{-0,066775x}$	$83,1e^{-0,073470x}$	$80,1e^{-0,072142x}$	<b><math>79,4e^{-0,071122x}</math></b>	$85,2e^{-0,070762x}$	$85,8e^{-0,068330x}$	$87,4e^{-0,069086x}$	$81,7e^{-0,064132x}$	<b><math>85,0e^{-0,068078x}</math></b>
R²	98,9%	99,8%	99,1%	99,5%	<b>99,1%</b>	97,3%	95,0%	97,2%	98,7%	<b>96,8%</b>

	ARCOIRIS					GOLDEN SHELL				
	AL.4	AL.2	AL.3	AL.1	PROMEDIO	GS.3	GS.4	GS.1	GS.2	PROMEDIO
Densidad	2104	2107	2113,5	2135	<b>2114,9</b>	1675,5	1683,8	1783,4	1810,0	<b>1738,2</b>
T inicio (°C)	100	100	100	100		100	100	100	100	
T final (°C)	20,13	18,96	19,46	18,53		21,16	22,22	21,4	21,69	
Δ T (°C)	79,87	81,04	80,54	81,47	<b>80,73</b>	78,84	77,78	78,60	78,31	<b>78,38</b>

ENSAYO DE LA DENSIDAD DE PÉTREOS NATURALES MEDIANTE LA TERMOGRAFÍA																	
Inicio 9:25h Fin 18:25	ALMORQUI								DORADA VILLAMONTE								
	AL.1 9:25		AL.2		AL.3		AL.4		DV.1		DV.2		DV.3		DV.4		
ENSAYO 4.2.15	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	
	1	1205	88,49	1212	91,19	1219	92,15	1226	96,54	1233	95,92	1240	95,33	1247	97,57	1254	96,67
5	1206	74,72	1213	75,94	1220	75,35	1227	76,57	1234	79,73	1241	79,19	1248	81,59	1255	79,98	
10	1207	61,45	1214	59,01	1221	61,03	1228	62,49	1235	65,62	1242	65,29	1249	66,93	1256	65,19	
1h	20	1208	43,97	1215	43,89	1222	43,62	1229	44,21	1236	45,62	1243	46,79	1250	47,82	1257	46,68
30	1209	33,47	1216	33,72	1223	32,84	1230	33,62	1237	35,59	1244	35,74	1251	36,21	1258	35,71	
45	1210	25,4	1217	25,11	1224	24,44	1231	24,72	1238	26,29	1245	26,72	1252	26,85	1259	26,75	
60	1211	20,98	1218	20,97	1225	20,31	1232	20,38	1239	21,51	1246	21,85	1253	22,07	1260	21,93	
Masa Inicial 2.2.15	425		421,2		419,8		405,2		457,6		460,7		457,1		462,4		
Masa tras 48h de secado a 100°C 4.2.15	419,2		415,4		414,2		399,9		453,5		456,7		454,2		457,9		
Tº ambiente (°C)	15		14,8		14,8		14,7		14,7		14,9		14,9		15		
HR (%)	37		35,6		33,8		31		31,8		30,5		28,8		27,7		
Medidas (m)	0,1 x 0,1 x 0,02 (ESPESOR ENTRE 1,9 Y 2 CM)								0,1 x 0,1 x 0,02								
Volumen (m3)	0,0002								0,0002								
Densidad (Kg/m3)	2096		2077		2071		1999,5		2267,5		2283,5		2271,0		2289,5		

	ALMORQUI					DORADA VILLAMONTE				
	AL.4	AL.3	AL.2	AL.1	PROMEDIO	DV.1	DV.3	DV.2	DV.4	PROMEDIO
Densidad	1999,5	2071	2077	2096	<b>2060,9</b>	2267,5	2271,0	2283,5	2289,5	<b>2277,9</b>
Función	91,622e <sup>-</sup> 0,0730183x	87,943e <sup>-</sup> 0,0728118x	78,631e <sup>-</sup> 0,0656657x	83,069e <sup>-</sup> 0,0699210x	<b>85,175e<sup>-</sup></b> <b>0,0703542x</b>	91,653e <sup>-</sup> 0,0709687x	96,383e <sup>-</sup> 0,0731049x	85,350e <sup>-</sup> 0,0657892x	93,290e <sup>-</sup> 0,0724503x	<b>91,582e<sup>-</sup></b> <b>0,0705788x</b>
R²	98,2774%	98,4299%	99,6268%	98,5405%	<b>98,4712%</b>	98,2167%	97,6745%	99,3394%	97,7394%	<b>97,9868%</b>

	ALMORQUI					DORADA VILLAMONTE				
	AL.4	AL.3	AL.2	AL.1	PROMEDIO	DV.1	DV.3	DV.2	DV.4	PROMEDIO
Densidad	1999,5	2071	2077	2096	<b>2060,9</b>	2267,5	2271,0	2283,5	2289,5	<b>2277,9</b>
T inicio (°C)	100	100	100	100		100	100	100	100	
T final (°C)	20,38	20,31	20,97	20,98		21,51	22,07	21,85	21,93	
Δ T (°C)	79,62	79,69	79,03	79,02	<b>79,34</b>	78,49	77,93	78,15	78,07	<b>78,16</b>

ENSAYO DE LA DENSIDAD DE PÉTREOS NATURALES MEDIANTE LA TERMOGRAFÍA																	
Inicio 8:45h Fin 16:45	ROSA VILLAMONTE								AMARILLO FÓSIL								
	RV.1		RV.2		RV.3		RV.4		AF.1		AF.2		AF.3		AF.4		
ENSAYO 10.2.15	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	
1	1449	91,15	1456	97,75	1463	94,12	1470	94,82	1478	95,31	1485	95,05	1492	88,54	1499	93,85	
5	1450	75,47	1457	79,77	1464	78,41	1471	78,70	1479	77,46	1486	76,3	1493	72,22	1500	75,21	
10	1451	61,82	1458	64,55	1465	65,10	1472	63,40	1480	62,75	1487	61,17	1494	58,53	1501	61,45	
1h 20	1452	43,71	1459	39,99	1466	46,44	1473	45,61	1481	42,43	1488	42,82	1495	41,63	1502	43,22	
30	1453	32,23	1460	33,86	1467	35,32	1475	34,43	1482	31,9	1489	32,04	1496	31,41	1503	32,47	
45	1454	23,33	1461	23,98	1468	25,76	1476	24,98	1483	23,09	1490	23,41	1497	22,91	1504	23,79	
60	1455	18,6	1462	19,67	1469	20,76	1477	19,96	1484	18,72	1491	19,03	1498	19,16	1505	19,9	
LUZ ENCENDIDA LUZ ENCENDIDA																	
Masa Inicial 16.1.15	456,4		458,6		453,1		459,5		416		407,4		412,7		407,7		
Masa tras 48h de secado a 100°C 19.1.15	451,9		456,5		449,6		456,3		414,9		406,1		411,5		406,5		
Tº ambiente (°C)	11,3		11,6		13		13,1		13,2		13,5		13,5		13,7		
HR (%)	37,3		37,3		37,6		38,3		40,7		44,4		45,5		47,3		
Medidas (m)	0,1 x 0,1 x 0,02								0,1 x 0,1 x 0,02								
Volumen (m3)	0,0002								0,0002								
Densidad (Kg/m3)	2259,5		2282,5		2248		2281,5		2074,5		2030,5		2057,5		2032,5		

	ROSA VILLAMONTE					AMARILLO FÓSIL				
	RV.3	RV.1	RV.4	RV.2	PROMEDIO	AF.2	AF.4	AF.3	AF.1	PROMEDIO
Densidad	2248	2259,5	2281,5	2282,5	<b>2267,9</b>	2030,5	2032,5	2057,5	2074,5	<b>2048,8</b>
Función	94,296e <sup>-0,0722131x</sup>	90,133e <sup>-0,0707022x</sup>	94,710e <sup>-0,0722334x</sup>	86,457e <sup>-0,0672831x</sup>	<b>91,336e<sup>-0,0706079x</sup></b>	84,654e <sup>-0,0667187x</sup>	89,463e <sup>-0,0734552x</sup>	84,677e <sup>-0,0727890x</sup>	92,175e <sup>-0,0719993x</sup>	<b>87,683e<sup>-0,0712406x</sup></b>
R <sup>2</sup>	97,2%	98,1%	97,3%	99,4%	<b>97,9%</b>	99,6%	98,6%	98,6%	98,7%	<b>98,6%</b>

	ROSA VILLAMONTE					AMARILLO FÓSIL				
	RV.3	RV.1	RV.4	RV.2	PROMEDIO	AF.2	AF.4	AF.3	AF.1	PROMEDIO
Densidad	2248	2259,5	2281,5	2282,5	<b>2267,9</b>	2030,5	2032,5	2057,5	2074,5	<b>2048,8</b>
T inicio (°C)	100	100	100	100		100	100	100	100	
T final (°C)	20,76	18,6	19,96	19,67		19,03	19,9	19,16	18,72	
Δ T (°C)	79,24	81,4	80,04	80,33	<b>80,25</b>	80,97	80,1	80,84	81,28	<b>80,80</b>

ENSAYO DE LA DENSIDAD DE PÉTREOS NATURALES MEDIANTE LA TERMOGRAFÍA																
Inicio 12:28h Fin 16:28	TEAK SAND								NIWALA							
	TS.1		TS.2		TS.3		TS.4		NW.1		NW.2		NW.3		NW.4	
ENSAYO 21.1.15	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C
1	1121	86,62	1128	85,9	1135	86,98	1142	86,75	1149	76,98	1156	88,99	1163	90,72	1170	90,59
5	1122	66,47	1129	65,8	1136	67,26	1143	68,87	1150	64,19	1157	74,3	1164	75,29	1171	75,64
10	1123	50,01	1130	49,66	1137	50,89	1144	53,27	1151	52,62	1158	60,49	1165	59,56	1172	61,9
1h 20	1124	32,35	1131	32,48	1138	33,02	1145	34,86	1152	37,52	1159	40,85	1166	38,1	1173	41,8
30	1125	23,45	1132	24,07	1139	24,47	1146	26,24	1153	28,52	1160	29,76	1167	31,25	1174	30,8
45	1126	17,74	1133	18,31	1140	18,91	1147	19,89	1154	21,37	1161	22,74	1168	22,39	1175	22,7
60	1127	15,49	1134	16,16	1141	16,56	1148	17,4	1155	17,69	1162	18,3	1169	18,04	1176	18,36
Masa Inicial 19.1.15	305,3		308,8		304,8		327,2		418,1		425,5		421,5		422,2	
Masa tras 48h de secado a 100°C 21.1.15	305		308,4		304,6		326,8		417,5		424,5		420,7		421,3	
Tº ambiente (°C)	13,1		13,2		13,5		13,9		12,4		12,3		12,4		12,8	
HR (%)	44,2		44,4		44,7		44,2		38,1		37,6		37,5		36,6	
Medidas (m)	0,1 x 0,1 x 0,015				0,1 x 0,1 x 0,02											
Volumen (m3)	0,00015				0,0002											
Densidad (Kg/m3)	2033,3		2056,0		2030,7		2178,7		2087,5		2122,5		2103,5		2106,5	

	TEAK SAND					NIWALA				
	TS.1	TS.3	TS.2	TS.4	PROMEDIO	NW.1	NW.3	NW.4	NW.2	PROMEDIO
Densidad	2033,3	2030,7	2056,0	2178,7	<b>2074,7</b>	2087,5	2103,5	2106,5	2122,5	<b>2105,0</b>
Función	81,646e <sup>-0,0822350x</sup>	74,628e <sup>-0,0757806x</sup>	69,048e <sup>-0,0711942x</sup>	77,244e <sup>-0,0757486x</sup>	<b>75,503e<sup>-0,0762396x</sup></b>	70,610e <sup>-0,0685053x</sup>	87,728e <sup>-0,0725651x</sup>	90,465e <sup>-0,0729004x</sup>	80,230e <sup>-0,0660465x</sup>	<b>81,885e<sup>-0,0700043x</sup></b>
R²	99,6411%	99,9730%	99,1338%	99,9014%	<b>99,3394%</b>	99,1187%	98,2536%	98,3888%	99,8113%	<b>98,4433%</b>

	TEAK SAND					NIWALA				
	TS.1	TS.3	TS.2	TS.4	PROMEDIO	NW.1	NW.3	NW.4	NW.2	PROMEDIO
Densidad	2033,3	2030,7	2056,0	2178,7	<b>2074,7</b>	2087,5	2103,5	2106,5	2122,5	<b>2105,0</b>
T inicio (°C)	100	100	100	100		100	100	100	100	
T final (°C)	15,49	16,56	16,16	17,4		17,69	18,04	18,36	18,3	
Δ T (°C)	84,51	83,44	83,84	82,6	<b>83,60</b>	82,31	81,96	81,64	81,7	<b>81,9</b>

ENSAYO DE LA DENSIDAD DE PÉTREOS NATURALES MEDIANTE LA TERMOGRAFÍA																
Inicio 9:08h Fin 17:16	CAPRI								BATEIG AZUL							
	CA.1 9:08		CA.2 10:09 Problema con horno		CA.3 11:10		CA.4 12:12		BA.1 8:28		BA.2		BA.3		BA.4	
ENSAYO 19.1.15	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C
1	1037	72,04	1044	53,41	1051	85,73	1058	90,56	1093	83,34	1100	83,29	1107	89,17	1114	89,12
5	1038	61,82	1045	46,92	1052	72,61	1059	76,32	1094	71,15	1101	69,12	1108	75,47	1115	75,17
10	1039	52,09	1046	40,43	1053	60,09	1060	64,16	1095	59,56	1102	58,15	1109	62,28	1116	61,8
1h 20	1040	39,51	1047	32,36	1054	42,92	1061	46,35	1096	41,97	1103	41,43	1110	44,15	1117	43,75
30	1041	31,03	1048	26,89	1055	33,79	1062	35,57	1097	31,97	1104	31,69	1111	33,28	1118	32,85
45	1042	23,66	1049	21,69	1056	25,23	1063	26,36	1098	23,72	1105	23,53	1112	24,54	1119	23,93
60	1043	20,04	1050	19,06	1057	20,79	1064	21,72	1099	19,42	1106	19,29	1113	19,93	1120	19,08
Masa Inicial 16.1.15	474,3		481,6		457,5		471,2		446,6		438,9		440,4		436,9	
Masa tras 48h de secado a 100°C 19.1.15	472,7		480,2		456,1		469,5		442,4		434,6		436		432,5	
Tº ambiente (°C)	13,6		13,5		13,8		13,9		12,5		12,5		12,6		12,9	
HR (%)	51,3		52,8		53,7		53,8		43,1		43,4		43,7		44	
Medidas (m)	0,1 x 0,1 x 0,02								0,1 x 0,1 x 0,019							
Volumen (m3)	0,0002								0,00019							
Densidad (Kg/m3)	2363,5		2401		2280,5		2347,5		2328,4		2287,4		2294,7		2276,3	

	CAPRI					BATEIG AZUL				
	CA.3	CA.4	CA.1	CA.2	PROMEDIO	BA.4	BA.2	BA.3	BA.1	PROMEDIO
Densidad	2280,5	2347,5	2363,5	2401	<b>2348,1</b>	2276,3	2287,4	2294,7	2328,4	<b>2296,7</b>
Función	82,100e <sup>-0,0708851x</sup>	89,330e <sup>-0,0721361x</sup>	70,513e <sup>-0,0741550x</sup>	38,511e <sup>-0,0575202x</sup>	<b>80,267e<sup>-0,0723921x</sup></b>	89,903e <sup>-0,0715775x</sup>	73,612e <sup>-0,0641827x</sup>	88,831e <sup>-0,0719186x</sup>	80,232e <sup>-0,0693347x</sup>	<b>86,211e<sup>-0,0709436x</sup></b>
R <sup>2</sup>	97,7099%	97,3292%	96,1327%	99,5877%	<b>96,3261%</b>	97,4756%	99,5513%	97,7237%	98,4495%	<b>97,8155%</b>

	CAPRI					BATEIG AZUL				
	CA.3	CA.4	CA.1	CA.2	PROMEDIO	BA.4	BA.2	BA.3	BA.1	PROMEDIO
Densidad	2280,5	2347,5	2363,5	2401	<b>2348,1</b>	2276,3	2287,4	2294,7	2328,4	<b>2296,7</b>
T inicio (°C)	100	100	100	100		100	100	100	100	
T final (°C)	20,79	21,72	20,04	19,06		19,08	19,29	19,93	19,42	
Δ T (°C)	79,21	78,28	79,96	80,94	<b>79,60</b>	80,92	80,71	80,07	80,58	<b>80,57</b>

ENSAYO DE LA DENSIDAD DE PÉTREOS NATURALES MEDIANTE LA TERMOGRAFÍA								
Inicio 8:25h		LUMAQUELA ROSA						
Fin	LR.1		LR.2		LR.3		LR.4	
ENSAYO 4.2.15	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C	ARCHIVO	TEMP. CÁMARA °C
1	1261	90,24	1396	95,5	1403	88,05	1426	95,12
5	1262	75,51	1397	82,05	1404	74,08	1427	81,48
10	1263	62,75	1398	66,91	1405	61,33	1428	67,60
1h 20	1264	45,58	1399	47,62	1406	44,39	1429	47,38
30	1265	34,66	1400	36,29	1407	34,24	1430	35,94
45	1266	25,16	1401	26,28	1408	25,17	1431	25,87
60	1267	20,14	1402	20,69	1409	20,49	1432	20,40
<b>Masa Inicial 2.2.15</b>	485		483,1		487,2		476,8	
<b>Masa tras 48h de secado a 100°C 4.2.15</b>	481,5		479,2		482,6		473,6	
<b>Tº ambiente (°C)</b>	12,2		12,5		12,6		13	
<b>HR (%)</b>	26,4		31,3		33,2		33	
<b>Medidas (m)</b>	0,1 x 0,1 x 0,02(ESPESOR ENTRE 1,9 Y 2 CM)							
<b>Volumen (m3)</b>	0,0002							
<b>Densidad (Kg/m3)</b>	2407,5		2396		2413		2368	

LUMAQUELA ROSA					
	LR.4	LR.2	LR.1	LR.3	PROMEDIO
<b>Densidad</b>	2368	2396	2407,5	2413	<b>2396,13</b>
<b>Función</b>	$99,230e^{-0,0722241x}$	$90,992e^{-0,0656112x}$	$88,590e^{-0,0696416x}$	$86,282e^{-0,0711088x}$	<b><math>91,146e^{-0,0696464x}</math></b>
<b>R²</b>	96,7397%	98,7303%	97,5685%	97,4089%	<b>97,2066%</b>

LUMAQUELA ROSA					
	LR.4	LR.2	LR.1	LR.3	PROMEDIO
<b>Densidad</b>	2368	2396	2407,5	2413	<b>2396,13</b>
<b>T inicio (°C)</b>	100	100	100	100	
<b>T final (°C)</b>	20,40	20,69	20,14	20,49	
<b>Δ T (°C)</b>	79,6	79,31	79,86	79,51	<b>79,6</b>

## Anexo 3

### 3.1. Registros georradar para el estudio de análisis de densidad: madera

Cerejeira seco															
medición	Tiempos						Velocidades								
	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,92	2,23	2,50	3,22	3,48	3,72	21,54	28,28	38,89	17,95	22,40	28,57	15,56	18,79	22,95
para	1,92	2,21	2,48	3,22	3,48	3,73	21,54	27,72	37,84	17,95	22,05	28,00	15,47	18,42	22,40
<b>promedio</b>	<b>1,92</b>	<b>2,22</b>	<b>2,49</b>	<b>3,22</b>	<b>3,48</b>	<b>3,73</b>	<b>21,54</b>	<b>28,00</b>	<b>38,36</b>	<b>17,95</b>	<b>22,22</b>	<b>28,29</b>	<b>15,51</b>	<b>18,61</b>	<b>22,68</b>
perp	1,92	2,23	2,52	3,31	3,56	3,82	20,14	25,93	35,44	17,07	21,05	26,92	14,74	17,61	21,54
perp	1,92	2,23	2,52	3,31	3,56	3,82	20,14	25,93	35,44	17,07	21,05	26,92	14,74	17,61	21,54
<b>promedio</b>	<b>1,92</b>	<b>2,23</b>	<b>2,52</b>	<b>3,31</b>	<b>3,56</b>	<b>3,82</b>	<b>20,14</b>	<b>25,93</b>	<b>35,44</b>	<b>17,07</b>	<b>21,05</b>	<b>26,92</b>	<b>14,74</b>	<b>17,61</b>	<b>21,54</b>

Silvestre seco															
medición	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,90	2,19	2,50	3,69	3,96	4,23	21,23	25,33	31,93	18,45	21,47	26,03	16,31	18,63	21,97
para	1,90	2,21	2,49	3,71	3,97	4,23	20,99	25,33	31,15	18,36	21,59	25,68	16,31	18,81	21,84
<b>promedio</b>	<b>1,90</b>	<b>2,20</b>	<b>2,50</b>	<b>3,70</b>	<b>3,97</b>	<b>4,23</b>	<b>21,11</b>	<b>25,33</b>	<b>31,54</b>	<b>18,40</b>	<b>21,53</b>	<b>25,85</b>	<b>16,31</b>	<b>18,72</b>	<b>21,90</b>
perp	1,90	2,21	2,50	3,84	4,11	4,38	19,59	23,31	28,36	17,19	20,00	23,60	15,32	17,51	20,21
perp	1,92	2,21	2,52	3,84	4,11	4,38	19,79	23,31	28,79	17,35	20,00	23,90	15,45	17,51	20,43
<b>promedio</b>	<b>1,91</b>	<b>2,21</b>	<b>2,51</b>	<b>3,84</b>	<b>4,11</b>	<b>4,38</b>	<b>19,69</b>	<b>23,31</b>	<b>28,57</b>	<b>17,27</b>	<b>20,00</b>	<b>23,75</b>	<b>15,38</b>	<b>17,51</b>	<b>20,32</b>

Nigra seco															
medición	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,89	2,18	2,47	3,60	3,87	4,14	22,81	27,46	34,51	19,70	23,08	27,86	17,33	19,39	23,35
para	1,90	2,18	2,49	3,53	3,80	4,10	23,93	28,89	37,50	20,53	24,07	29,77	17,73	19,79	24,22
<b>promedio</b>	<b>1,90</b>	<b>2,18</b>	<b>2,48</b>	<b>3,57</b>	<b>3,84</b>	<b>4,12</b>	<b>23,37</b>	<b>28,18</b>	<b>36,01</b>	<b>20,11</b>	<b>23,58</b>	<b>28,81</b>	<b>17,53</b>	<b>19,59</b>	<b>23,79</b>
perp	1,91	2,22	2,51	3,63	3,97	4,22	22,67	27,66	34,82	18,93	22,29	26,71	16,88	19,00	22,81
perp	1,89	2,21	2,51	3,64	4,00	4,25	22,29	27,27	34,51	18,48	21,79	26,17	16,53	18,63	22,41
<b>promedio</b>	<b>1,90</b>	<b>2,22</b>	<b>2,51</b>	<b>3,64</b>	<b>3,99</b>	<b>4,24</b>	<b>22,48</b>	<b>27,47</b>	<b>34,67</b>	<b>18,71</b>	<b>22,04</b>	<b>26,44</b>	<b>16,70</b>	<b>18,81</b>	<b>22,61</b>

Eucalipto seco															
medición	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,89	2,23	2,52	3,24	3,51	3,74	20,59	27,52	38,61	17,16	21,72	28,08	15,03	18,41	22,79
para	1,90	2,23	2,51	3,24	3,49	3,76	20,75	27,52	38,08	17,48	22,06	28,37	14,95	18,17	22,24
<b>promedio</b>	<b>1,90</b>	<b>2,23</b>	<b>2,52</b>	<b>3,24</b>	<b>3,50</b>	<b>3,75</b>	<b>20,67</b>	<b>27,52</b>	<b>38,35</b>	<b>17,32</b>	<b>21,89</b>	<b>28,22</b>	<b>14,99</b>	<b>18,29</b>	<b>22,51</b>
perp	1,91	2,23	2,54	3,30	3,59	3,86	20,00	25,98	36,58	16,55	20,44	26,48	14,26	17,06	21,06
perp	1,93	2,23	2,54	3,32	3,58	3,87	20,00	25,50	35,64	16,85	20,59	26,73	14,33	16,95	20,90
<b>promedio</b>	<b>1,92</b>	<b>2,23</b>	<b>2,54</b>	<b>3,31</b>	<b>3,59</b>	<b>3,87</b>	<b>20,00</b>	<b>25,74</b>	<b>36,11</b>	<b>16,70</b>	<b>20,52</b>	<b>26,60</b>	<b>14,29</b>	<b>17,00</b>	<b>20,98</b>

Elondo seco															
	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,89	2,22	2,51	3,84	4,11	4,41	19,90	23,95	29,17	17,48	20,53	24,25	15,40	17,72	20,42
para	1,91	2,21	2,51	3,85	4,13	4,40	20,00	23,66	28,96	17,48	20,21	23,95	15,58	17,72	20,53
<b>promedio</b>	<b>1,90</b>	<b>2,22</b>	<b>2,51</b>	<b>3,85</b>	<b>4,12</b>	<b>4,41</b>	<b>19,95</b>	<b>23,80</b>	<b>29,06</b>	<b>17,48</b>	<b>20,37</b>	<b>24,10</b>	<b>15,49</b>	<b>17,72</b>	<b>20,48</b>
perp	1,91	2,23	2,51	4,02	4,30	4,56	18,39	21,68	25,70	16,23	18,74	21,68	14,64	16,65	18,93
perp	1,92	2,23	2,52	4,01	4,28	4,55	18,56	21,80	26,04	16,44	18,93	22,05	14,75	16,72	19,11
<b>promedio</b>	<b>1,92</b>	<b>2,23</b>	<b>2,52</b>	<b>4,02</b>	<b>4,29</b>	<b>4,56</b>	<b>18,48</b>	<b>21,74</b>	<b>25,87</b>	<b>16,34</b>	<b>18,84</b>	<b>21,86</b>	<b>14,70</b>	<b>16,69</b>	<b>19,02</b>

Talí seco															
	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,93	2,23	2,51	4,16	4,48	4,76	22,42	25,91	30,30	19,61	22,22	25,38	17,67	19,76	22,22
para	1,92	2,22	2,52	4,15	4,45	4,73	22,42	25,91	30,67	19,76	22,42	25,91	17,79	19,92	22,62
<b>promedio</b>	<b>1,93</b>	<b>2,23</b>	<b>2,52</b>	<b>4,16</b>	<b>4,47</b>	<b>4,75</b>	<b>22,42</b>	<b>25,91</b>	<b>30,49</b>	<b>19,69</b>	<b>22,32</b>	<b>25,64</b>	<b>17,73</b>	<b>19,84</b>	<b>22,42</b>
perp	1,94	2,25	2,57	4,53	4,80	5,08	19,31	21,93	25,51	17,48	19,61	22,42	15,92	17,67	19,92
perp	1,93	2,24	2,56	4,49	4,77	5,05	19,53	22,22	25,91	17,61	19,76	22,62	16,03	17,79	20,08
<b>promedio</b>	<b>1,94</b>	<b>2,25</b>	<b>2,57</b>	<b>4,51</b>	<b>4,79</b>	<b>5,07</b>	<b>19,42</b>	<b>22,08</b>	<b>25,71</b>	<b>17,54</b>	<b>19,69</b>	<b>22,52</b>	<b>15,97</b>	<b>17,73</b>	<b>20,00</b>

Maple seco															
	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,91	2,23	2,49	3,50	3,76	4,04	22,64	28,35	35,64	19,46	23,53	28,35	16,90	19,89	23,23
para	1,91	2,21	2,51	3,51	3,76	4,04	22,50	27,69	36,00	19,46	23,23	28,80	16,90	19,67	23,53
<b>promedio</b>	<b>1,91</b>	<b>2,22</b>	<b>2,50</b>	<b>3,51</b>	<b>3,76</b>	<b>4,04</b>	<b>22,57</b>	<b>28,02</b>	<b>35,82</b>	<b>19,46</b>	<b>23,38</b>	<b>28,57</b>	<b>16,90</b>	<b>19,78</b>	<b>23,38</b>
perp	1,92	2,23	2,52	3,62	3,88	4,16	21,18	25,90	32,73	18,37	21,82	26,47	16,07	18,65	21,95
perp	1,90	2,23	2,52	3,61	3,88	4,17	21,05	26,09	33,03	18,18	21,82	26,47	15,86	18,56	21,82
<b>promedio</b>	<b>1,91</b>	<b>2,23</b>	<b>2,52</b>	<b>3,62</b>	<b>3,88</b>	<b>4,17</b>	<b>21,11</b>	<b>25,99</b>	<b>32,88</b>	<b>18,27</b>	<b>21,82</b>	<b>26,47</b>	<b>15,97</b>	<b>18,60</b>	<b>21,88</b>

Balsa seco															
	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,93	2,22	2,51	3,46	3,72	3,97	26,67	32,90	42,95	22,79	27,20	33,72	20,00	23,31	27,95
para	1,91	2,20	2,50	3,46	3,70	3,95	26,32	32,38	42,50	22,79	27,20	34,00	20,00	23,31	28,14
<b>promedio</b>	<b>1,92</b>	<b>2,21</b>	<b>2,51</b>	<b>3,46</b>	<b>3,71</b>	<b>3,96</b>	<b>26,49</b>	<b>32,64</b>	<b>42,72</b>	<b>22,79</b>	<b>27,20</b>	<b>33,86</b>	<b>20,00</b>	<b>23,31</b>	<b>28,04</b>
perp	1,90	2,22	2,51	3,49	3,75	4,01	25,66	32,13	41,63	22,05	26,67	32,90	19,34	22,79	27,20
perp	1,91	2,21	2,51	3,49	3,74	4,00	25,82	31,88	41,63	22,30	26,67	33,17	19,52	22,79	27,38
<b>promedio</b>	<b>1,91</b>	<b>2,22</b>	<b>2,51</b>	<b>3,49</b>	<b>3,75</b>	<b>4,01</b>	<b>25,74</b>	<b>32,00</b>	<b>41,63</b>	<b>22,17</b>	<b>26,67</b>	<b>33,04</b>	<b>19,43</b>	<b>22,79</b>	<b>27,29</b>

### 3.2. Registros georradar para el estudio de análisis de densidad: hormigón

HORMIGÓN SECO 0.5																
	medición	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
		D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
0.5 A	6	1,80	2,05	2,30	5,58	5,83	6,04	10,58	11,33	12,20	9,93	10,58	11,33	9,43	10,03	10,70
	5	1,80	2,04	2,32	5,57	5,81	6,07	10,61	11,33	12,31	9,98	10,61	11,46	9,37	9,93	10,67
	<b>promedio</b>							<b>10,60</b>	<b>11,33</b>	<b>12,25</b>	<b>9,95</b>	<b>10,60</b>	<b>11,40</b>	<b>9,40</b>	<b>9,98</b>	<b>10,68</b>
0.5 B	6	1,80	2,05	2,30	5,58	5,81	6,04	10,58	11,33	12,20	9,98	10,64	11,40	9,43	10,03	10,70
	5	1,78	2,05	2,30	5,56	5,79	6,04	10,58	11,40	12,27	9,98	10,70	11,46	9,39	10,03	10,70
	<b>promedio</b>							<b>10,58</b>	<b>11,36</b>	<b>12,23</b>	<b>9,98</b>	<b>10,67</b>	<b>11,43</b>	<b>9,41</b>	<b>10,03</b>	<b>10,70</b>
0.5 C	6	1,75	1,99	2,26	5,52	5,76	5,97	10,61	11,33	12,27	9,98	10,61	11,43	9,48	10,05	10,78
	5	1,75	2,00	2,24	5,54	5,74	5,98	10,55	11,30	12,12	10,03	10,70	11,43	9,46	10,05	10,70
	<b>promedio</b>							<b>10,58</b>	<b>11,32</b>	<b>12,20</b>	<b>10,00</b>	<b>10,65</b>	<b>11,43</b>	<b>9,47</b>	<b>10,05</b>	<b>10,74</b>
0.5 D	6	1,75	1,99	2,23	5,50	5,73	5,95	10,67	11,40	12,23	10,05	10,70	11,43	9,52	10,10	10,75
	5	1,74	1,99	2,24	5,51	5,72	5,97	10,61	11,36	12,23	10,05	10,72	11,49	9,46	10,05	10,72
	<b>promedio</b>							<b>10,64</b>	<b>11,38</b>	<b>12,23</b>	<b>10,05</b>	<b>10,71</b>	<b>11,46</b>	<b>9,49</b>	<b>10,08</b>	<b>10,74</b>

HORMIGÓN SECO 0.8																
	medición	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
		D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
0.8 A	6	1,69	1,93	2,18	5,39	5,62	5,85	10,81	11,56	12,46	10,18	10,84	11,63	9,62	10,20	10,90
	5	1,70	1,92	2,18	5,38	5,61	5,85	10,87	11,56	12,50	10,23	10,84	11,66	9,64	10,18	10,90
	<b>promedio</b>							10,84	11,56	12,48	10,20	10,84	11,64	9,63	10,19	10,90
	<b>desv</b>							0,04	0,00	0,03	0,04	0,00	0,02	0,02	0,02	0,00
0.8 B	6	1,69	1,93	2,19	5,42	5,62	5,87	10,72	11,46	12,38	10,18	10,84	11,66	9,57	10,15	10,87
	5	1,71	1,93	2,18	5,42	5,62	5,85	10,78	11,46	12,35	10,23	10,84	11,63	9,66	10,20	10,90
	<b>promedio</b>							10,75	11,46	12,36	10,20	10,84	11,64	9,62	10,18	10,88
	<b>desv</b>							0,04	0,00	0,03	0,04	0,00	0,02	0,07	0,04	0,02
0.8 C	6	1,69	1,94	2,21	5,40	5,61	5,84	10,78	11,56	12,54	10,20	10,90	11,76	9,64	10,26	11,02
	5	1,69	1,92	2,18	5,42	5,61	5,86	10,72	11,43	12,35	10,20	10,84	11,66	9,59	10,15	10,87
	<b>promedio</b>							10,75	11,49	12,44	10,20	10,87	11,71	9,62	10,20	10,94
	<b>desv</b>							0,04	0,09	0,14	0,00	0,04	0,07	0,03	0,07	0,11
0.8 D	6	1,70	1,94	2,21	5,44	5,66	5,86	10,70	11,43	12,38	10,10	10,75	11,59	9,62	10,20	10,96
	5	1,72	1,95	2,21	5,44	5,66	5,87	10,75	11,46	12,38	10,15	10,78	11,59	9,64	10,20	10,93
	<b>promedio</b>							10,72	11,44	12,38	10,13	10,77	11,59	9,63	10,20	10,94
	<b>desv</b>							0,04	0,02	0,00	0,04	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02

<b>HORMIGÓN HÚMEDO 0.5</b>																
<b>Tiempos</b>										<b>Velocidades sin tener d0 en cuenta</b>						
	<b>medición</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R1-D1</b>	<b>R1-D2</b>	<b>R1-D3</b>	<b>R2-D1</b>	<b>R2-D2</b>	<b>R2-D3</b>	<b>R3-D1</b>	<b>R3-D2</b>	<b>R3-D3</b>
<b>0.5 A</b>	6	2,03	2,44	3,10	7,03	7,34	7,69	8,00	8,71	10,18	7,53	8,16	9,43	7,07	7,62	8,71
	5	2,05	2,45	3,13	7,01	7,36	7,66	8,06	8,77	10,31	7,53	8,15	9,46	7,13	7,68	8,83
	1	2,07	2,46	2,81	4,52	4,84	5,15	8,16	9,71	11,70	7,22	8,40	9,85	6,49	7,43	8,55
	3	2,07	2,46	2,56	4,55	4,85	5,14	8,06	9,57	10,05	7,19	8,37	8,73	6,51	7,46	7,75
	2	2,06	2,46	2,85	4,33	4,66	4,96	8,81	10,70	13,51	7,69	9,09	11,05	6,90	8,00	9,48
	4	2,05	2,47	2,86	4,31	4,63	4,96	8,85	10,87	13,79	7,75	9,26	11,30	6,87	8,03	9,52
	<b>promedio</b>								8,33	9,72	11,59	7,49	8,57	9,97	6,83	7,70
<b>desv</b>								0,39	0,92	1,71	0,23	0,48	1,00	0,27	0,26	0,66
<b>0.5 B</b>	6	2,05	2,43	3,12	7,01	7,33	7,66	8,06	8,73	10,28	7,58	8,16	9,50	7,13	7,65	8,81
	5	2,04	2,42	3,12	6,99	7,33	7,67	8,08	8,75	10,34	7,56	8,15	9,50	7,10	7,62	8,79
	1	2,05	2,44	2,82	4,52	4,81	5,11	8,10	9,62	11,76	7,25	8,44	10,05	6,54	7,49	8,73
	3	2,04	2,42	2,76	4,51	4,80	5,08	8,10	9,57	11,43	7,25	8,40	9,80	6,58	7,52	8,62
	2	2,04	2,45	2,87	4,35	4,64	4,98	8,66	10,53	13,51	7,69	9,13	11,30	6,80	7,91	9,48
	4	2,00	2,44	2,85	4,35	4,67	4,97	8,51	10,47	13,33	7,49	8,97	10,99	6,73	7,91	9,43
	<b>promedio</b>								8,25	9,61	11,78	7,47	8,54	10,19	6,81	7,68
<b>desv</b>								0,26	0,79	1,40	0,18	0,41	0,77	0,25	0,18	0,38
<b>0.5 C</b>	6	2,01	2,40	2,85	6,92	7,25	7,55	8,15	8,85	9,83	7,63	8,25	9,09	7,22	7,77	8,51
	5	2,04	2,32	2,87	6,92	7,26	7,57	8,20	8,70	9,88	7,66	8,10	9,11	7,23	7,62	8,51
	1	2,04	2,44	2,80	4,51	4,78	5,09	8,10	9,66	11,70	7,30	8,55	10,10	6,56	7,55	8,73
	3	2,04	2,42	2,86	4,47	4,78	5,09	8,23	9,76	12,42	7,30	8,47	10,42	6,56	7,49	8,97
	2	2,01	2,44	2,85	4,34	4,63	4,96	8,58	10,53	13,42	7,63	9,13	11,24	6,78	7,94	9,48
	4	2,05	2,44	2,89	4,36	4,64	4,97	8,66	10,42	13,61	7,72	9,09	11,43	6,85	7,91	9,62
	<b>promedio</b>								8,32	9,65	11,81	7,54	8,60	10,23	6,87	7,71
<b>desv</b>								0,24	0,76	1,67	0,19	0,43	1,00	0,30	0,19	0,48
<b>0.5 D</b>	6	2,03	2,40	2,85	6,90	7,22	7,53	8,21	8,89	9,88	7,71	8,30	9,15	7,27	7,80	8,55
	5	2,04	2,41	2,86	6,89	7,21	7,53	8,25	8,93	9,93	7,74	8,33	9,20	7,29	7,81	8,57
	1	2,03	2,45	2,82	4,43	4,72	5,04	8,33	10,10	12,42	7,43	8,81	10,53	6,64	7,72	9,01
	3	2,03	2,42	2,82	4,44	4,69	5,04	8,30	9,90	12,35	7,52	8,81	10,70	6,64	7,63	9,01
	2	2,01	2,40	2,87	4,30	4,58	4,91	8,73	10,53	13,99	7,78	9,17	11,70	6,90	7,97	9,80
	4	2,04	2,45	2,82	4,32	4,61	4,93	8,77	10,70	13,33	7,78	9,26	11,17	6,92	8,06	9,48
	<b>promedio</b>								8,43	9,84	11,98	7,66	8,78	10,41	6,94	7,83
								0,25	0,78	1,72	0,15	0,40	1,04	0,29	0,16	0,50

<b>HORMIGÓN HÚMEDO 0.8</b>																
	<b>Tiempos</b>						<b>Velocidades sin tener d0 en cuenta</b>									
<b>medición</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R1-D1</b>	<b>R1-D2</b>	<b>R1-D3</b>	<b>R2-D1</b>	<b>R2-D2</b>	<b>R2-D3</b>	<b>R3-D1</b>	<b>R3-D2</b>	<b>R3-D3</b>	
<b>0.8 A</b>	6	2,03	2,41	2,83	6,92	7,22	7,54	8,18	8,87	9,78	7,71	8,32	9,11	7,26	7,80	8,49
	5	2,03	2,42	2,85	6,92	7,25	7,56	8,18	8,89	9,83	7,66	8,28	9,09	7,23	7,78	8,49
	1	2,04	2,44	2,86	4,46	4,73	5,05	8,26	9,90	12,50	7,43	8,73	10,70	6,64	7,66	9,13
	3	2,01	2,42	2,91	4,43	4,73	5,05	8,26	9,95	13,16	7,35	8,66	10,99	6,58	7,60	9,35
	2	2,04	2,44	2,86	4,31	4,71	5,02	8,81	10,70	13,79	7,49	8,81	10,81	6,71	7,75	9,26
	4	2,01	2,41	2,86	4,42	4,69	5,02	8,30	9,95	12,82	7,46	8,77	10,93	6,64	7,66	9,26
	pro							8,33	9,71	11,98	7,52	8,60	10,27	6,85	7,71	9,00
des							0,24	0,71	1,74	0,14	0,24	0,91	0,31	0,08	0,40	
<b>0.8 B</b>	6	2,04	2,42	2,83	6,90	7,25	7,55	8,23	8,93	9,83	7,68	8,28	9,05	7,26	7,80	8,47
	5	2,04	2,44	2,86	6,91	7,24	7,55	8,21	8,95	9,88	7,69	8,33	9,13	7,26	7,83	8,53
	1	2,01	2,45	2,86	4,43	4,74	5,02	8,26	10,10	12,74	7,33	8,73	10,64	6,64	7,78	9,26
	3	2,05	2,45	2,83	4,47	4,75	5,05	8,26	9,90	12,20	7,41	8,70	10,42	6,67	7,69	9,01
	2	2,03	2,41	2,85	4,39	4,68	5,00	8,47	10,10	12,99	7,55	8,81	10,93	6,73	7,72	9,30
	4	2,03	2,42	2,81	4,39	4,67	4,99	8,47	10,15	12,66	7,58	8,89	10,75	6,76	7,78	9,17
	pro							8,32	9,69	11,71	7,54	8,62	10,15	6,89	7,77	8,96
des							0,12	0,59	1,46	0,15	0,25	0,84	0,29	0,05	0,37	
<b>0.8 C</b>	6	2,03	2,41	2,88	6,96	7,24	7,60	8,11	8,79	9,80	7,68	8,28	9,17	7,18	7,71	8,47
	5	2,01	2,35	2,82	6,93	7,25	7,59	8,13	8,73	9,73	7,63	8,16	9,03	7,17	7,63	8,39
	1	2,03	2,41	2,86	4,46	4,76	5,08	8,23	9,76	12,50	7,33	8,51	10,53	6,56	7,49	9,01
	3	2,01	2,42	2,79	4,47	4,74	5,08	8,13	9,76	11,90	7,33	8,62	10,26	6,51	7,52	8,73
	2	2,01	2,42	2,83	4,48	4,76	5,06	8,10	9,71	12,12	7,27	8,55	10,36	6,56	7,58	8,97
	4	2,03	2,42	2,74	4,46	4,76	5,06	8,23	9,80	11,63	7,33	8,55	9,90	6,60	7,58	8,62
	pro							8,16	9,42	11,28	7,43	8,45	9,88	6,76	7,58	8,70
des							0,06	0,51	1,21	0,18	0,18	0,63	0,32	0,08	0,25	
<b>0.8 D</b>	6	2,01	2,40	2,81	6,90	7,22	7,55	8,18	8,89	9,78	7,68	8,30	9,07	7,22	7,77	8,44
	5	2,03	2,41	2,77	6,92	7,22	7,54	8,18	8,87	9,64	7,71	8,32	8,99	7,26	7,80	8,39
	1	2,00	2,42	2,86	4,47	4,76	5,08	8,10	9,76	12,42	7,25	8,55	10,53	6,49	7,52	9,01
	3	2,01	2,41	2,83	4,45	4,74	5,08	8,20	9,80	12,35	7,33	8,58	10,47	6,51	7,49	8,89
	2	2,01	2,41	2,81	4,42	4,69	4,99	8,30	9,95	12,42	7,46	8,77	10,64	6,71	7,75	9,17
	4	2,03	2,41	2,81	4,40	4,69	5,02	8,44	10,05	12,58	7,52	8,77	10,64	6,69	7,66	9,05
	pro							8,23	9,55	11,53	7,49	8,55	10,06	6,81	7,66	8,82
des							0,12	0,53	1,41	0,18	0,21	0,80	0,34	0,13	0,33	

## Anexo 4

### 4.1. Registros cámara termográfica para el estudio de absorción y evaporación: madera

ENSAYO DE EVAPORACIÓN MADERAS MEDIANTE LA TERMOGRAFÍA									
Inicio 11:30h									
Fin	TALÍ	CEREJEIRA	SILVESTRE	ELONDO	MAPLE BLANDO	NIGRA	EUCALIPTO	BALSA	
ENSAYO 4.2.15	TEMP. CÁMARA °C								
	11:30	9,3	9,08	8,99	9,23	9,47	9,54	9,6	9,78
	13:00	10,08	10,12	9,30	9,52	9,84	10,54	9,84	10,18
	14:30	11,25	11,24	11,26	10,98	10,11	11,02	10,45	10,35
<b>Día 1</b>	16:00	11,74	11,79	11,39	11,18	10,28	11,64	11,48	10,37
	17:30	12,53	12,4	11,61	11,55	10,43	11,77	11,53	11,02
	19:00	12,66	12,67	11,80	11,70	11,51	12,08	12,2	11,23
	20:30	13,31	13,17	12,19	11,92	11,6	12,96	12,52	12,58
<b>Día 2</b>	13:30	13,42	13,34	12,88	12,84	12,41	13,26	12,77	12,68

## 4.2. Registros cámara termográfica para el estudio de absorción y evaporación: hormigón

ENSAYO DE EVAPORACIÓN DEL HORMIGÓN MEDIANTE LA TERMOGRAFÍA											
	HORMIGÓN RELACIÓN A/C 0.5					HORMIGÓN RELACIÓN A/C 0.8					
	A	B	C	D	PROMEDIO	A	B	C	D	PROMEDIO	
<b>ENSAYO</b> <b>4.2.15</b>	<b>TEMP. CÁMARA °C</b>										
	<b>11:30</b>	10,04	9,8	9,82	10,02	<b>9,92</b>	9,15	9,12	9,13	9,4	<b>9,20</b>
	<b>13:00</b>	10,29	10,34	10,53	10,46	<b>10,41</b>	10,1	10,03	10,26	10,28	<b>10,17</b>
	<b>14:30</b>	11,32	10,89	11,14	11,29	<b>11,16</b>	10,6	10,88	11	10,92	<b>10,85</b>
<b>Día 1</b>	<b>16:00</b>	11,46	11,21	11,37	11,41	<b>11,36</b>	10,91	11,01	11,29	11,16	<b>11,09</b>
	<b>17:30</b>	11,55	11,48	11,48	11,59	<b>11,53</b>	11,1	11,15	11,41	11,33	<b>11,25</b>
	<b>19:00</b>	11,63	11,52	11,51	11,66	<b>11,58</b>	11,32	11,31	11,55	11,49	<b>11,42</b>
	<b>20:30</b>	11,71	11,67	11,68	11,82	<b>11,72</b>	11,52	11,54	11,71	11,6	<b>11,59</b>
<b>Día 2</b>	<b>13:30</b>	11,95	11,62	11,73	11,63	<b>11,73</b>	11,32	11,21	11,29	11,45	<b>11,32</b>

## Anexo 5

### 5.1. Registros georradar para el estudio de absorción y evaporación: madera

Cerejeira seco															
	Tiempos						Velocidades								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,92	2,23	2,50	3,22	3,48	3,72	21,54	28,28	38,89	17,95	22,40	28,57	15,56	18,79	22,95
para	1,92	2,21	2,48	3,22	3,48	3,73	21,54	27,72	37,84	17,95	22,05	28,00	15,47	18,42	22,40
<b>promedio</b>	<b>1,92</b>	<b>2,22</b>	<b>2,49</b>	<b>3,22</b>	<b>3,48</b>	<b>3,73</b>	<b>21,54</b>	<b>28,00</b>	<b>38,36</b>	<b>17,95</b>	<b>22,22</b>	<b>28,29</b>	<b>15,51</b>	<b>18,61</b>	<b>22,68</b>
perp	1,92	2,23	2,52	3,31	3,56	3,82	20,14	25,93	35,44	17,07	21,05	26,92	14,74	17,61	21,54
perp	1,92	2,23	2,52	3,31	3,56	3,82	20,14	25,93	35,44	17,07	21,05	26,92	14,74	17,61	21,54
<b>promedio</b>	<b>1,92</b>	<b>2,23</b>	<b>2,52</b>	<b>3,31</b>	<b>3,56</b>	<b>3,82</b>	<b>20,14</b>	<b>25,93</b>	<b>35,44</b>	<b>17,07</b>	<b>21,05</b>	<b>26,92</b>	<b>14,74</b>	<b>17,61</b>	<b>21,54</b>

Cerejeira humedo															
	Tiempos						Velocidades								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,95	2,25	2,55	4,04	4,32	4,58	13,40	15,64	18,79	11,81	13,53	15,82	10,65	12,02	13,79
para	1,95	2,25	2,52	4,01	4,30	4,57	13,59	15,91	18,79	11,91	13,66	15,73	10,69	12,07	13,66
						promedio	13,49	15,78	18,79	11,86	13,59	15,77	10,67	12,04	13,73
per	1,97	2,26	2,56	3,48	3,77	4,08	18,54	22,95	30,43	15,56	18,54	23,14	13,27	15,38	18,42
per	1,97	2,26	2,53	3,47	3,77	4,07	18,67	23,14	29,79	15,56	18,54	22,58	13,33	15,47	18,18
						promedio	18,60	23,05	30,11	15,56	18,54	22,86	13,30	15,43	18,30

Silvestre seco															
	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,90	2,19	2,50	3,69	3,96	4,23	21,23	25,33	31,93	18,45	21,47	26,03	16,31	18,63	21,97
para	1,90	2,21	2,49	3,71	3,97	4,23	20,99	25,33	31,15	18,36	21,59	25,68	16,31	18,81	21,84
<b>promedio</b>	<b>1,90</b>	<b>2,20</b>	<b>2,50</b>	<b>3,70</b>	<b>3,97</b>	<b>4,23</b>	<b>21,11</b>	<b>25,33</b>	<b>31,54</b>	<b>18,40</b>	<b>21,53</b>	<b>25,85</b>	<b>16,31</b>	<b>18,72</b>	<b>21,90</b>
perp	1,90	2,21	2,50	3,84	4,11	4,38	19,59	23,31	28,36	17,19	20,00	23,60	15,32	17,51	20,21
perp	1,92	2,21	2,52	3,84	4,11	4,38	19,79	23,31	28,79	17,35	20,00	23,90	15,45	17,51	20,43
<b>promedio</b>	<b>1,91</b>	<b>2,21</b>	<b>2,51</b>	<b>3,84</b>	<b>4,11</b>	<b>4,38</b>	<b>19,69</b>	<b>23,31</b>	<b>28,57</b>	<b>17,27</b>	<b>20,00</b>	<b>23,75</b>	<b>15,38</b>	<b>17,51</b>	<b>20,32</b>

Silvestre humedo															
	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,99	2,37	2,75	6,06	6,65	7,32	9,34	10,30	11,48	8,15	8,88	9,74	7,13	7,68	8,32
para	1,99	2,30	2,57	6,03	6,81	7,52	9,41	10,19	10,98	7,88	8,43	8,96	6,87	7,28	7,68
						promedio	9,37	10,24	11,23	8,02	8,65	9,35	7,00	7,48	8,00

Nigra seco															
Tiempos							Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,89	2,18	2,47	3,60	3,87	4,14	22,81	27,46	34,51	19,70	23,08	27,86	17,33	19,39	23,35
para	1,90	2,18	2,49	3,53	3,80	4,10	23,93	28,89	37,50	20,53	24,07	29,77	17,73	19,79	24,22
<b>promedio</b>	<b>1,90</b>	<b>2,18</b>	<b>2,48</b>	<b>3,57</b>	<b>3,84</b>	<b>4,12</b>	<b>23,37</b>	<b>28,18</b>	<b>36,01</b>	<b>20,11</b>	<b>23,58</b>	<b>28,81</b>	<b>17,53</b>	<b>19,59</b>	<b>23,79</b>
perp	1,91	2,22	2,51	3,63	3,97	4,22	22,67	27,66	34,82	18,93	22,29	26,71	16,88	19,00	22,81
perp	1,89	2,21	2,51	3,64	4,00	4,25	22,29	27,27	34,51	18,48	21,79	26,17	16,53	18,63	22,41
<b>promedio</b>	<b>1,90</b>	<b>2,22</b>	<b>2,51</b>	<b>3,64</b>	<b>3,99</b>	<b>4,24</b>	<b>22,48</b>	<b>27,47</b>	<b>34,67</b>	<b>18,71</b>	<b>22,04</b>	<b>26,44</b>	<b>16,70</b>	<b>18,81</b>	<b>22,61</b>

Nigra humedo																
Tiempos							Velocidades sin tener d0 en cuenta									
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3	
para	1,94	2,24	2,53	3,90	4,21	4,50	19,90	23,49	28,47	17,18	19,80	23,21	15,23	16,81	19,80	
para	1,94	2,25	2,55	3,93	4,23	4,55	19,60	23,21	28,26	17,03	19,70	23,21	14,94	16,52	19,50	
							promedio	19,75	23,35	28,36	17,11	19,75	23,21	15,09	16,67	19,65
per	1,96	2,27	2,57	4,12	4,42	4,79	18,06	21,08	25,16	15,85	18,14	21,08	13,78	15,08	17,57	
per	1,96	2,28	2,57	4,11	4,40	4,81	18,14	21,31	25,32	15,98	18,40	21,31	13,68	15,02	17,41	
							promedio	18,10	21,20	25,24	15,92	18,27	21,20	13,73	15,05	17,49

Eucalipto seco															
Tiempos							Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,89	2,23	2,52	3,24	3,51	3,74	20,59	27,52	38,61	17,16	21,72	28,08	15,03	18,41	22,79
para	1,90	2,23	2,51	3,24	3,49	3,76	20,75	27,52	38,08	17,48	22,06	28,37	14,95	18,17	22,24
<b>promedio</b>	<b>1,90</b>	<b>2,23</b>	<b>2,52</b>	<b>3,24</b>	<b>3,50</b>	<b>3,75</b>	<b>20,67</b>	<b>27,52</b>	<b>38,35</b>	<b>17,32</b>	<b>21,89</b>	<b>28,22</b>	<b>14,99</b>	<b>18,29</b>	<b>22,51</b>
perp	1,91	2,23	2,54	3,30	3,59	3,86	20,00	25,98	36,58	16,55	20,44	26,48	14,26	17,06	21,06
perp	1,93	2,23	2,54	3,32	3,58	3,87	20,00	25,50	35,64	16,85	20,59	26,73	14,33	16,95	20,90
<b>promedio</b>	<b>1,92</b>	<b>2,23</b>	<b>2,54</b>	<b>3,31</b>	<b>3,59</b>	<b>3,87</b>	<b>20,00</b>	<b>25,74</b>	<b>36,11</b>	<b>16,70</b>	<b>20,52</b>	<b>26,60</b>	<b>14,29</b>	<b>17,00</b>	<b>20,98</b>

Eucalipto humedo																
Tiempos							Velocidades sin tener d0 en cuenta									
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3	
para	1,94	2,24	2,52	3,44	3,76	4,10	18,53	23,17	30,22	15,27	18,29	22,42	12,87	14,95	17,59	
para	1,96	2,26	2,55	3,51	3,80	4,09	17,94	22,24	28,96	15,11	18,05	22,24	13,05	15,19	18,05	
							promedio	18,23	22,70	29,59	15,19	18,17	22,33	12,96	15,07	17,82
per	1,96	2,28	2,53	3,60	3,95	4,39	16,95	21,06	25,98	13,97	16,65	19,58	11,44	13,18	14,95	
per	1,99	2,33	2,67	3,68	3,98	4,33	16,45	20,59	27,52	13,97	16,85	21,22	11,88	13,90	16,75	
							promedio	16,70	20,83	26,75	13,97	16,75	20,40	11,66	13,54	15,85

Elondo seco															
	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,89	2,22	2,51	3,84	4,11	4,41	19,90	23,95	29,17	17,48	20,53	24,25	15,40	17,72	20,42
para	1,91	2,21	2,51	3,85	4,13	4,40	20,00	23,66	28,96	17,48	20,21	23,95	15,58	17,72	20,53
<b>promedio</b>	<b>1,90</b>	<b>2,22</b>	<b>2,51</b>	<b>3,85</b>	<b>4,12</b>	<b>4,41</b>	<b>19,95</b>	<b>23,80</b>	<b>29,06</b>	<b>17,48</b>	<b>20,37</b>	<b>24,10</b>	<b>15,49</b>	<b>17,72</b>	<b>20,48</b>
perp	1,91	2,23	2,51	4,02	4,30	4,56	18,39	21,68	25,70	16,23	18,74	21,68	14,64	16,65	18,93
perp	1,92	2,23	2,52	4,01	4,28	4,55	18,56	21,80	26,04	16,44	18,93	22,05	14,75	16,72	19,11
<b>promedio</b>	<b>1,92</b>	<b>2,23</b>	<b>2,52</b>	<b>4,02</b>	<b>4,29</b>	<b>4,56</b>	<b>18,48</b>	<b>21,74</b>	<b>25,87</b>	<b>16,34</b>	<b>18,84</b>	<b>21,86</b>	<b>14,70</b>	<b>16,69</b>	<b>19,02</b>

Elondo humedo															
	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,94	2,25	2,54	3,93	4,20	4,43	19,50	23,10	27,91	17,17	19,90	23,37	15,58	17,80	20,53
para	1,95	2,26	2,56	3,93	4,20	4,42	19,60	23,23	28,32	17,24	20,00	23,66	15,71	17,96	20,86
						promedio	19,55	23,16	28,12	17,21	19,95	23,52	15,65	17,88	20,69
per	1,95	2,26	2,57	4,18	4,50	4,82	17,40	20,21	24,10	15,22	17,32	20,10	13,52	15,16	17,24
per	1,96	2,27	2,58	4,22	4,52	4,87	17,17	19,90	23,66	15,16	17,24	20,00	13,33	14,92	16,94
						<b>promedio</b>	<b>17,28</b>	<b>20,05</b>	<b>23,88</b>	<b>15,19</b>	<b>17,28</b>	<b>20,05</b>	<b>13,43</b>	<b>15,04</b>	<b>17,09</b>

Talí seco															
	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,93	2,23	2,51	4,16	4,48	4,76	22,42	25,91	30,30	19,61	22,22	25,38	17,67	19,76	22,22
para	1,92	2,22	2,52	4,15	4,45	4,73	22,42	25,91	30,67	19,76	22,42	25,91	17,79	19,92	22,62
<b>promedio</b>	<b>1,93</b>	<b>2,23</b>	<b>2,52</b>	<b>4,16</b>	<b>4,47</b>	<b>4,75</b>	<b>22,42</b>	<b>25,91</b>	<b>30,49</b>	<b>19,69</b>	<b>22,32</b>	<b>25,64</b>	<b>17,73</b>	<b>19,84</b>	<b>22,42</b>
perp	1,94	2,25	2,57	4,53	4,80	5,08	19,31	21,93	25,51	17,48	19,61	22,42	15,92	17,67	19,92
perp	1,93	2,24	2,56	4,49	4,77	5,05	19,53	22,22	25,91	17,61	19,76	22,62	16,03	17,79	20,08
<b>promedio</b>	<b>1,94</b>	<b>2,25</b>	<b>2,57</b>	<b>4,51</b>	<b>4,79</b>	<b>5,07</b>	<b>19,42</b>	<b>22,08</b>	<b>25,71</b>	<b>17,54</b>	<b>19,69</b>	<b>22,52</b>	<b>15,97</b>	<b>17,73</b>	<b>20,00</b>

Talí humedo															
	Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
para	1,94	2,25	2,54	4,21	4,48	4,75	22,03	25,51	29,94	19,69	22,42	25,77	17,79	20,00	22,62
para	1,96	2,26	2,55	4,20	4,50	4,77	22,32	25,77	30,30	19,69	22,32	25,64	17,79	19,92	22,52
						promedio	22,17	25,64	30,12	19,69	22,37	25,71	17,79	19,96	22,57
per	1,96	2,26	2,54	4,59	4,96	5,33	19,01	21,46	24,39	16,67	18,52	20,66	14,84	16,29	17,92
per	1,97	2,29	2,58	4,62	4,91	5,28	18,87	21,46	24,51	17,01	19,08	21,46	15,11	16,72	18,52
						<b>promedio</b>	<b>18,94</b>	<b>21,46</b>	<b>24,45</b>	<b>16,84</b>	<b>18,80</b>	<b>21,06</b>	<b>14,97</b>	<b>16,50</b>	<b>18,22</b>

<b>Maple seco</b>															
	<b>Tiempos</b>						<b>Velocidades sin tener d0 en cuenta</b>								
<b>medición</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R1-D1</b>	<b>R1-D2</b>	<b>R1-D3</b>	<b>R2-D1</b>	<b>R2-D2</b>	<b>R2-D3</b>	<b>R3-D1</b>	<b>R3-D2</b>	<b>R3-D3</b>
<b>para</b>	1,91	2,23	2,49	3,50	3,76	4,04	22,64	28,35	35,64	19,46	23,53	28,35	16,90	19,89	23,23
<b>para</b>	1,91	2,21	2,51	3,51	3,76	4,04	22,50	27,69	36,00	19,46	23,23	28,80	16,90	19,67	23,53
<b>promedio</b>	<b>1,91</b>	<b>2,22</b>	<b>2,50</b>	<b>3,51</b>	<b>3,76</b>	<b>4,04</b>	<b>22,57</b>	<b>28,02</b>	<b>35,82</b>	<b>19,46</b>	<b>23,38</b>	<b>28,57</b>	<b>16,90</b>	<b>19,78</b>	<b>23,38</b>
<b>perp</b>	1,92	2,23	2,52	3,62	3,88	4,16	21,18	25,90	32,73	18,37	21,82	26,47	16,07	18,65	21,95
<b>perp</b>	1,90	2,23	2,52	3,61	3,88	4,17	21,05	26,09	33,03	18,18	21,82	26,47	15,86	18,56	21,82
<b>promedio</b>	<b>1,91</b>	<b>2,23</b>	<b>2,52</b>	<b>3,62</b>	<b>3,88</b>	<b>4,17</b>	<b>21,11</b>	<b>25,99</b>	<b>32,88</b>	<b>18,27</b>	<b>21,82</b>	<b>26,47</b>	<b>15,97</b>	<b>18,60</b>	<b>21,88</b>

<b>Maple humedo</b>															
	<b>Tiempos</b>						<b>Velocidades sin tener d0 en cuenta</b>								
<b>medición</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R1-D1</b>	<b>R1-D2</b>	<b>R1-D3</b>	<b>R2-D1</b>	<b>R2-D2</b>	<b>R2-D3</b>	<b>R3-D1</b>	<b>R3-D2</b>	<b>R3-D3</b>
<b>para</b>	1,96	2,26	2,56	3,72	3,93	4,18	20,45	24,66	31,03	18,27	21,56	26,28	16,22	18,75	22,22
<b>para</b>	1,96	2,27	2,56	3,72	3,92	4,19	20,45	24,83	31,03	18,37	21,82	26,47	16,14	18,75	22,09
						<b>promedio</b>	20,45	24,74	31,03	18,32	21,69	26,37	16,18	18,75	22,15
<b>per</b>	1,99	2,28	2,58	4,07	4,43	4,84	17,31	20,11	24,16	14,75	16,74	19,46	12,63	14,06	15,93
<b>per</b>	1,98	2,31	2,60	4,13	4,50	4,90	16,74	19,78	23,53	14,29	16,44	18,95	12,33	13,90	15,65
						<b>promedio</b>	17,03	19,95	23,85	14,52	16,59	19,20	12,48	13,98	15,79

<b>Balsa seco</b>															
	<b>Tiempos</b>						<b>Velocidades sin tener d0 en cuenta</b>								
<b>medición</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R1-D1</b>	<b>R1-D2</b>	<b>R1-D3</b>	<b>R2-D1</b>	<b>R2-D2</b>	<b>R2-D3</b>	<b>R3-D1</b>	<b>R3-D2</b>	<b>R3-D3</b>
<b>para</b>	1,93	2,22	2,51	3,46	3,72	3,97	26,67	32,90	42,95	22,79	27,20	33,72	20,00	23,31	27,95
<b>para</b>	1,91	2,20	2,50	3,46	3,70	3,95	26,32	32,38	42,50	22,79	27,20	34,00	20,00	23,31	28,14
<b>promedio</b>	<b>1,92</b>	<b>2,21</b>	<b>2,51</b>	<b>3,46</b>	<b>3,71</b>	<b>3,96</b>	<b>26,49</b>	<b>32,64</b>	<b>42,72</b>	<b>22,79</b>	<b>27,20</b>	<b>33,86</b>	<b>20,00</b>	<b>23,31</b>	<b>28,04</b>
<b>perp</b>	1,90	2,22	2,51	3,49	3,75	4,01	25,66	32,13	41,63	22,05	26,67	32,90	19,34	22,79	27,20
<b>perp</b>	1,91	2,21	2,51	3,49	3,74	4,00	25,82	31,88	41,63	22,30	26,67	33,17	19,52	22,79	27,38
<b>promedio</b>	<b>1,91</b>	<b>2,22</b>	<b>2,51</b>	<b>3,49</b>	<b>3,75</b>	<b>4,01</b>	<b>25,74</b>	<b>32,00</b>	<b>41,63</b>	<b>22,17</b>	<b>26,67</b>	<b>33,04</b>	<b>19,43</b>	<b>22,79</b>	<b>27,29</b>

## 5.2. Registros georradar para el estudio de absorción y evaporación: hormigón

HORMIGÓN SECO 0.5																
		Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
	medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
A	6	1,80	2,05	2,30	5,58	5,83	6,04	10,58	11,33	12,20	9,93	10,58	11,33	9,43	10,03	10,70
	5	1,80	2,04	2,32	5,57	5,81	6,07	10,61	11,33	12,31	9,98	10,61	11,46	9,37	9,93	10,67
	promedio	1,80	2,05	2,31	5,58	5,82	6,06	10,60	11,33	12,25	9,95	10,60	11,40	9,40	9,98	10,68
B	6	1,80	2,05	2,30	5,58	5,81	6,04	10,58	11,33	12,20	9,98	10,64	11,40	9,43	10,03	10,70
	5	1,78	2,05	2,30	5,56	5,79	6,04	10,58	11,40	12,27	9,98	10,70	11,46	9,39	10,03	10,70
	promedio	1,79	2,05	2,30	5,57	5,80	6,04	10,58	11,36	12,23	9,98	10,67	11,43	9,41	10,03	10,70
C	6	1,75	1,99	2,26	5,52	5,76	5,97	10,61	11,33	12,27	9,98	10,61	11,43	9,48	10,05	10,78
	5	1,75	2,00	2,24	5,54	5,74	5,98	10,55	11,30	12,12	10,03	10,70	11,43	9,46	10,05	10,70
	promedio	1,75	2,00	2,25	5,53	5,75	5,98	10,58	11,32	12,20	10,00	10,65	11,43	9,47	10,05	10,74
D	6	1,75	1,99	2,23	5,50	5,73	5,95	10,67	11,40	12,23	10,05	10,70	11,43	9,52	10,10	10,75
	5	1,74	1,99	2,24	5,51	5,72	5,97	10,61	11,36	12,23	10,05	10,72	11,49	9,46	10,05	10,72
	promedio	1,75	1,99	2,24	5,51	5,73	5,96	10,64	11,38	12,23	10,05	10,71	11,46	9,49	10,08	10,74

HORMIGÓN HÚMEDO 0.5																
		Tiempos						Velocidades sin tener d0 en cuenta								
	medición	D1	D2	D3	R1	R2	R3	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R3-D1	R3-D2	R3-D3
A	6	2,03	2,44	3,10	7,03	7,34	7,69	8,00	8,71	10,18	7,53	8,16	9,43	7,07	7,62	8,71
	5	2,05	2,45	3,13	7,01	7,36	7,66	8,06	8,77	10,31	7,53	8,15	9,46	7,13	7,68	8,83
	promedio							8,33	9,72	11,59	7,49	8,57	9,97	6,83	7,70	8,81
	desv							0,39	0,92	1,71	0,23	0,48	1,00	0,27	0,26	0,66
B	6	2,05	2,43	3,12	7,01	7,33	7,66	8,06	8,73	10,28	7,58	8,16	9,50	7,13	7,65	8,81
	5	2,04	2,42	3,12	6,99	7,33	7,67	8,08	8,75	10,34	7,56	8,15	9,50	7,10	7,62	8,79
	promedio							8,25	9,61	11,78	7,47	8,54	10,19	6,81	7,68	8,98
	desv							0,26	0,79	1,40	0,18	0,41	0,77	0,25	0,18	0,38
C	6	2,01	2,40	2,85	6,92	7,25	7,55	8,15	8,85	9,83	7,63	8,25	9,09	7,22	7,77	8,51
	5	2,04	2,32	2,87	6,92	7,26	7,57	8,20	8,70	9,88	7,66	8,10	9,11	7,23	7,62	8,51
	promedio							8,32	9,65	11,81	7,54	8,60	10,23	6,87	7,71	8,97
	desv							0,24	0,76	1,67	0,19	0,43	1,00	0,30	0,19	0,48
D	6	2,03	2,40	2,85	6,90	7,22	7,53	8,21	8,89	9,88	7,71	8,30	9,15	7,27	7,80	8,55
	5	2,04	2,41	2,86	6,89	7,21	7,53	8,25	8,93	9,93	7,74	8,33	9,20	7,29	7,81	8,57
	promedio							8,43	9,84	11,98	7,66	8,78	10,41	6,94	7,83	9,07
	desv							0,25	0,78	1,72	0,15	0,40	1,04	0,29	0,16	0,50



## Anexo 6

### PRELIMINARY BUILDING MATERIALS CHARACTERIZATION BY MEANS OF INFRARED THERMOGRAPHY

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

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación  
Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, Spain  
e-mail: isrodab@upvnet.upv.es

*Keywords: Building materials, density, infrared thermography, nondestructive technique*

**1. Introduction** –Density expresses the relationship between the amount of material and volume. In particular, when building materials are analyzed is one of the most important physical parameters. This is due to fact that density provides information of the material condition and it is closely related with other physical, mechanical and technological properties. In addition, many building materials pathologies are caused by loss of density, leading to a deterioration of the material that might cause the loss of its reliable structural behavior. Therefore, to be able to assess density and its variation is of great importance when building materials are analyzed.

Currently, densities are calculated following the standard [1]. But the onsite evaluation when the building material is part of a building structure following the standard method is complex, since it implies cores extracting. An alternative to currently available expensive and time consuming destructive tests to determine density lay on nondestructive techniques. This fact has promoted the search for other nondestructive methods that would be simpler, faster and that it can be used to investigate large surfaces in a relatively short time. In the last years, some applications of infrared thermography technique in the area of building and construction engineering are being studied and developed [2-3]. In particular, its application in the building materials characterization area is providing very promising and interesting results [4-6].

For all of these reasons, this research evaluated the potential of the infrared thermography for the onsite physical assessment of density of different building materials. For this purpose, laboratory experiments were conducted on three types of building materials: timber, concrete and stone and measurements were performed with a FLIR infrared camera.

**2. Methods** –Infrared thermography is a non-destructive technique that measures the temperature distribution at the surface of objects. Some properties of those objects can be detected by analyzing the temperature distribution of their surface. An infrared imaging system (an infrared camera) collects the flow of energy, infrared electromagnetic radiation, emitted by a target surface and transforms this energy initially into an electric signal and then into a digital image, called thermogram. Afterwards, with the use of specific software, the surface temperature of objects captured by the camera can be determined. In inspection terms, this type of instrument has certain advantages, since it does not inflict any damage upon the studied material. The inspection is very quick compared to other techniques, and the results are relatively easy to interpret.

Measurements were recorded with a FLIR i5 camera. This camera produces thermograms at a resolution of 80 x 80 pixels with an accuracy of 0.1°C (NETD) and then these images were exported to Excel format to be processed. The experiment was conducted on three batches of

materials: timber, concrete and stone. Every batch consisted of different samples that had different density.

Prior to images recording, all samples were heated in an oven for 72 h. After that, the samples were cooled for ambient temperature for 1 h and a thermogram was acquired at seven occasions: at minutes 1, 5, 10, 20, 30, 45 and 60 (Figure 1).

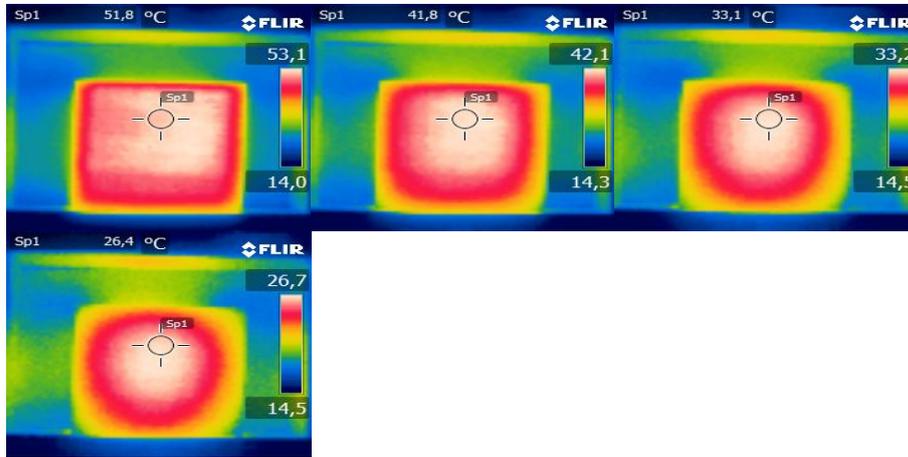


Figure 1 Thermograms acquired after cooling for 1, 10, 30 and 60 minutes a timber sample

**3. Results and conclusions** –The average temperature registered during cooling for every sample was calculated. After that, the average temperature for every sample was fitted with cooling time. As it can be observed in Table 1 as an example of the general behavior, the variation in the excess of temperature were found to follow an exponential function, regardless of the material under study (timber, concrete or stone) with a high correlation coefficient ( $R^2$ ). This is in agreement with the concept of a regular thermal regime.

Type of stone	GOLDEN SHELL	AMARILLO FÓSIL	ALMORQUÍ	TEAK SAND	NIWALA	ARCOIRIS
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1738,2	2048,8	2060,9	2074,7	2105,0	2114,9
Funcion	$85,0e^{-0,070x}$	$87,6e^{-0,071x}$	$85,1e^{-0,070x}$	$75,503e^{-0,076x}$	$81,8e^{-0,070x}$	$79,4e^{-0,071x}$
R <sup>2</sup>	97%	99%	98%	99%	98%	99%
Δ T (°C)	78,38	80,8	79,34	83,6	81,9	80,73

Table 2 Temperature behaviour versus cooling time for 6 types of stones of different densities

In addition, the total difference of the temperature of the sample was observed to decrease with increasing density. This phenomenon was observed in timber and concrete samples, but not in stone samples. We consider this was due to the laboratory experiment design. Due to the small density and porosity difference of stone samples, it would have been necessary to perform the test with bigger dimension samples.

As conclusions, it can be stated that the results of this survey show that infrared thermography is a non-destructive technique with capability to characterize materials commonly used as building materials; such as stone, wood and concrete.

We found that the cooling process of these three materials, tested by means of a Flir camera, may be described in great approximation by functions of time which are exponential decreasing. These cooling curves could be very useful to detect hidden defects but further research is needed in order to know in what extent and manner different anomalies have effect on these curves.

### References

- [1] UNE 56531:1977. Physical-mechanical characteristics of wood. Determination of specific weight.
- [2] Chia-Chi Cheng, Tao-Ming Cheng, Chih-Hung Chiang, (2008). Defect detection of concrete structures using both infrared thermography and elastic waves, *Automation in Construction*, 18, 87 – 92.
- [3] E. Barreira, V. de Freitas, (2007) Evaluation of building materials using infrared thermography, *Construction and building materials*, 21, 218-224.
- [4] López Gamaliel, Basterra, Luis-Alfonso, Ramón-Cueto, Gemma (2014). Alcance de la termografía en la evaluación no destructiva de las estructuras de madera. Proceedings of the Congreso Iberoamericano REHABEND, Santander, Spain.
- [5] Gamaliel López, Luis Alfonso Basterra, Luis Acuña (2013). Estimation of wood density using infrared thermography. *Construction and Building Materials*, vol. 42, 29-32.
- [6] Lerma C., Más A., Gil E., Vercher J., Peñalver J.M. (2014). Pathology of buildings materials in historic building. Relationship between laboratory testing and infrared thermography. *Materiales de Construcción*, vol. 64, nº 313, 1-11.