

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría



**UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA**

**EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA DEL
GEORRADAR PARA LA INSPECCIÓN, DIAGNÓSTICO Y
ANÁLISIS RESISTENTE DE LA MADERA**

TESIS DOCTORAL

PRESENTADA POR:

DÑA. ISABEL RODRÍGUEZ ABAD

DIRIGIDA POR:

DR. D. FRANCISCO GARCÍA GARCÍA

DR. D. RAFAEL CAPUZ LLADRÓ

VALENCIA, 2009

RESUMEN

Actualmente, la técnica del georradar, que utiliza radiación electromagnética en el espectro de las microondas, tiene muchas aplicaciones en diversos campos y es un método de prospección no destructivo que permite el estudio rápido de estructuras de edificación. De hecho es una técnica que se emplea cada vez más en la inspección y diagnóstico de estructuras de edificación y materiales de construcción como por ejemplo el hormigón o la piedra.

El principio general de la prospección con georradar se basa en la propagación de impulsos electromagnéticos. Una antena situada sobre la superficie de un material transmite una onda que se propaga hacia el interior de éste, siendo parcialmente reflejada en las interfases donde existe un contraste dieléctrico. La respuesta del material, constituida por todas las ondas reflejadas, es registrada, procesada y analizada con el objeto de caracterizar y/o estudiar el medio por el que se propaga.

En esta tesis se analiza la aplicación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural. El carácter no destructivo de esta técnica hace que sea especialmente adecuada para el análisis de la madera cuando ésta forma parte de una estructura.

*La tesis está dividida en cuatro partes. En la **primera parte** se introducen todos aquellos aspectos necesarios para la comprensión del fundamento básico de la técnica de georradar. De igual forma se repasan las principales propiedades físicas de la madera estructural así como la normativa vigente sobre su uso estructural. Posteriormente se detallan los ensayos realizados para calibrar el funcionamiento y comportamiento de la antena empleada (frecuencia central de 1.6 GHz) tanto en el aire como en la madera.*

*En la **segunda** se estudian por medio de georradar las principales propiedades físicas de la madera, en concreto aquellas que afectan de forma determinante a la resistencia mecánica de la misma. En primer lugar, se estudia la anisotropía dieléctrica de la madera y con ello se calibra la capacidad de inspección del georradar frente a las distintas direcciones de la fibra. En segundo lugar, se analiza en detalle como afecta la variación del contenido de humedad de la madera a la radiación electromagnética, ya que el contenido de humedad es uno de los principales factores que influyen en la degradación o deterioro de una pieza. Por último, se evalúa la capacidad de la técnica para diferenciar o caracterizar maderas de diferentes especies a partir del análisis de la densidad. En el estudio de cada uno de estos parámetros, habida cuenta de lo novedoso de esta aplicación, se abordan tanto aspectos metodológicos como de calidad y fiabilidad de los resultados obtenidos.*

*En la **tercera parte** de la tesis, se comparan los resultados obtenidos con el georradar al evaluar la anisotropía dieléctrica, el contenido de humedad y la densidad con dos técnicas no destructivas emergentes en el campo de estudio de la madera estructural (el resistógrafo y la técnica de ultrasonidos). Los resultados apuntan que el georradar es una técnica más fiable para el análisis propuesto. No obstante, una combinación de todas ellas proporciona datos muy interesantes para evaluar el estado de la madera y poder hacer un diagnóstico de la misma.*

*En la **cuarta** y última parte se establecen los criterios básicos para emplear la técnica del georradar en la clasificación resistente de la madera aserrada nueva. Actualmente las líneas de investigación en este ámbito se orientan hacia la búsqueda de métodos de clasificación de la madera aserrada que no sean destructivos y que aporten datos de variables que puedan asociarse con los parámetros resistentes. En este sentido, se realiza un estudio pormenorizado comparativo de las distintas técnicas existentes en la actualidad y la*

*clasificación realizada por medio de georradar a partir de unos criterios
iniciales definidos por primera vez en esta tesis.*

RESUM

Actualment, la tècnica del georadar, que utilitza radiació electromagnètica a l'espectre de les microones, té moltes aplicacions a diversos àmbits i és un mètode de prospecció no destructiu que permet l'estudi ràpid d'estructures d'edificació. De fet, és una tècnica que s'empra cada vegada més a la inspecció i diagnòstic d'estructures d'edificació i materials de construcció com, per exemple, el formigó o la pedra.

El principi general de la prospecció amb georadar es basa en la propagació d'impulsos electromagnètics. Una antena disposada sobre la superfície d'un material transmet una ona que es propaga cap al seu interior i és parcialment reflectida a les interfases en les quals existeix un contrast dielèctric. La resposta del material, constituïda per totes les ones reflectides, és registrada, processada i analitzada amb l'objectiu de caracteritzar i estudiar el medi pel qual es propaga.

A aquesta tesi s'analitza l'aplicació de la tècnica no destructiva del georadar per a la inspecció, diagnòstic i anàlisi resistent de la fusta estructural. La característica no destructiva d'aquesta tècnica fa que siga especialment adequada per a l'anàlisi de la fusta quan aquesta forma part d'una estructura.

*La tesi es divideix en quatre parts. A la **primera** s'han introduït tots aquells aspectes necessaris per a la comprensió del fonament bàsic de la tècnica del georadar. De la mateixa manera es repassen les principals propietats físiques de la fusta estructural així com la normativa vigent al voltant del seu ús estructural. Tot seguit es detallen els assaigs realitzats per a calibrar el funcionament i comportament de l'antena utilitzada (freqüència central de 1.6 GHz) tant a l'aire com a la fusta.*

*A la **segona part** s'estudien mitjançant el georadar les principals propietats físiques de la fusta, en concret aquelles que afecten de manera determinant a la seua resistència mecànica. En primer lloc, s'estudia la anisotropia dielèctrica de la fusta i així es calibra la capacitat d'inspecció del georadar front les diferents direccions de la fibra. En segon lloc, s'analitza amb detall com afecta la variació del contingut d'humitat de la fusta a la radiació electromagnètica, ja que el contingut d'humitat és un dels factors principals que influeixen a la degradació o deteriorament d'una peça. En darrer lloc, s'avalua la capacitat de la tècnica per a diferenciar o caracteritzar fustes de diferents tipus a partir de l'anàlisi de la densitat. A l'estudi de cadascun d'aquests paràmetres, com es tracta de una aplicació nova, s'aborden tant aspectes metodològics com de qualitat i fiabilitat dels resultats obtinguts.*

*A la **tercera part** de la tesi, es fa una comparació dels resultats obtinguts amb el georadar a l'hora d'avaluar l'anisotropia dielèctrica, el contingut d'humitat i la densitat amb dues tècniques no destructives emergents en el camp d'estudi de la fusta estructural (el resistògraf i la tècnica d'ultrasons). Els resultats suggereixen que el georadar és una tècnica més fiable per a l'anàlisi proposat. No obstant això, una combinació de totes aquestes tècniques proporciona dades molt interessants per a avaluar l'estat de la fusta i poder fer-ne un diagnòstic*

*A la **quarta** i darrera part s'estableixen els criteris bàsics per a utilitzar la tècnica del georadar a la classificació resistent de la fusta nova. Actualment les línies d'investigació en aquest àmbit cerquen mètodes de classificació de la fusta no destructius i que aporten dades de variables associables amb els paràmetres resistents. En aquesta línia es realitza un estudi exhaustiu comparatiu de les diferents tècniques existents actualment i la classificació realitzada mitjançant el georadar a partir d'uns criteris inicials definits per primera vegada a aquesta tesi.*

ABSTRACT

Currently, Ground-penetrating radar technology, that uses electromagnetic radiation in the microwave spectrum, has many applications in several fields and it is a non-destructive testing method that allows the rapid prospecting of building structures. In fact, in the last years Ground-penetrating radar technique has gained remarkable popularity for the assessment of physical conditions and diagnose of building structures and materials, such as concrete or stone.

The general principle of prospecting with Ground-penetrating radar is based on the propagation of electromagnetic pulses. An antenna located on the material surface radiates energy downward into the material. This energy is partially reflected at interfaces where there is a dielectric contrast. The response of the material, consisting of all the reflected waves, is then recorded, processed and analyzed in order to characterize and/or study the material or medium by which they travel.

This thesis deals with the ability of the Ground-penetrating radar, as a non-destructive testing technique, to prospect, diagnose and analyze the strength of structural timber. The non-destructive nature of this technique makes it particularly suitable for prospecting timber on site when it is part of a structure.

*The thesis is divided into four parts. The **first part** introduces all the necessary aspects for understanding the basis of Ground-penetrating radar technique. Likewise, the main physical properties of timber as well as the current standards for structural use are reviewed. After that, the tests undertaken to calibrate the performance and behaviour of the employed antenna (of 1.6 GHz central frequency) both in the air and on timber are described.*

*In the **second part**, the main physical properties of wood are prospected by means of Ground-penetrating radar. In particular, in this part of the thesis, these properties which decisively affect the mechanical strength of timber are analysed. Firstly, the dielectric anisotropy of wood is studied and thereby the aptitude of Ground-penetrating radar to reveal the dielectric anisotropy due to the different grain directions. Secondly, tests are conducted to assess how the electromagnetic radiation is affected by the moisture content variation of timber, since the moisture content is one of key factors influencing the degradation or deterioration of a piece. Finally, the ability of Ground-penetrating radar to distinguish different species of wood from the density analysis is tested. In the study of each of these properties, given the novelty of this application, both methodological aspects and quality and reliability of the results are thoroughly discussed.*

*In the **third part** of the thesis, the results, obtained from the Ground-penetrating radar study to evaluate the dielectric anisotropy, the moisture content and the density, are compared with those obtained with two emerging non-destructive techniques in the structural timber field of study (the resistograph and ultrasound technique). The results show that the Ground-penetrating radar is a more reliable technique for the thesis target. However, a combination of all of them might provide interesting data for evaluating the wood condition and for assessing a diagnosis.*

*In the **fourth** and last part, the basic criteria for using Ground-penetrating radar technique as a strength grading tool are established. Currently the research agenda is focussed on developing non destructive grading methods of timber and on providing records on variables that might be associated with strength parameters. Regarding this, a thoroughly study comparing the different techniques available currently and the grading defined by means of Ground-penetrating radar is performed. The defined criteria to carry out the Ground-penetrating grading are established for the very first time in this thesis.*

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría hacer constar mi más profundo reconocimiento a todas aquellas personas que han colaborado directa o indirectamente en la elaboración de esta Tesis. Ante todo, quiero agradecer a mis directores Dr. D. Francisco García García y Dr. D. Rafael Capuz Lladró, por confiar en mi trabajo y su colaboración durante todo el proceso de elaboración de esta tesis doctoral.

Me gustaría también dar las gracias a la Dra. Dña. Rosa Martínez Sala, por su ayuda e interés durante el desarrollo de este trabajo. Su claridad de juicio y su perseverancia son un ejemplo, un referente para mí, y no sólo en su labor como investigadora y profesora, sino también en su calidad humana.

A Dr. D. Rafael Díez Barra del Laboratorio CIFOR (INIA) le estoy realmente agradecida por su interés en este trabajo, apoyo constante y palabras de ánimo en todo momento.

Esta tesis se inscribe dentro del proyecto “Integración de técnicas avanzadas no destructivas de evaluación de madera estructural” (BIA2008-00342) financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia y por tanto mi agradecimiento al investigador principal Dr. D. Javier Benloch Marco por su interés en el desarrollo de este trabajo; así como a los compañeros del Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Gestión de la Edificación.

Otro modo de gratitud a mis compañeros de Forum UNESCO Universidad y Patrimonio y en especial a su director Dr. José Luis Montalvá Conesa por el apoyo prestado desde el inicio.

Por último y no por ello menos importante, me gustaría agradecer a mi madre, mis hermanas, mis tíos, mis primas y amigos por todo el apoyo y cariño mostrado a lo largo de todo este duro trabajo. Sin todos ellos hubiera sido muy

difícil hacer este camino... a todos vosotros muchas gracias por estar siempre a mi lado.

ÍNDICE

Índice	1
Listado de figuras	7
Listado de tablas	17

Parte 1. Introducción

Capítulo 1. Introducción	23
1.1.Objetivos.....	25
1.2.Situación actual del empleo de madera estructural en edificación.....	29
1.3.Técnicas semi-destructivas de inspección y diagnóstico de la madera estructural.....	33
1.4.Técnicas no destructivas de inspección y diagnóstico de la madera estructural.....	37
1.5.Resumen del contenido de la tesis.....	43
Capítulo 2. El georradar	47
2.1.Fundamentos de la propagación electromagnética.....	51
2.1.1.Parámetros electromagnéticos de un medio.....	52
2.1.2.Velocidad de propagación, longitud de onda y atenuación.....	56
2.1.3.Parámetros efectivos.....	60
2.1.4.Reflexión y refracción.....	61
2.2.Características de la propagación de las ondas electromagnéticas en medios materiales.....	63
2.3.Instrumentación y métodos de adquisición de registros.....	67
2.3.1.Componentes del equipo de georradar.....	67
2.3.2.Métodos de adquisición de registros.....	74
2.4.Tratamiento de datos e interpretación de registros.....	75
2.4.1.Parámetros de un registro. Información en la cabecera de una traza.....	75
2.4.2.Registros de amplitudes.....	81
2.4.3.Obtención de los parámetros necesarios para la interpretación de radargramas.....	86

Capítulo 3. Principales propiedades de la madera estructural.	89
3.1. Estructura interna de la madera.....	91
3.2. Principales propiedades físicas de la madera.....	95
3.3. Determinación de la densidad.....	97
3.4. Determinación del contenido de humedad.....	99
3.5. Proceso de secado de la madera	101
3.6. Propiedades dieléctricas.....	105
3.6.1. Conductividad.....	105
3.6.2. Constante dieléctrica.....	106
3.6.3. Factor de pérdida.....	109
3.7. Propiedades mecánicas y normas de clasificación resistente de la madera.....	111

Capítulo 4. Calibración del equipo y métodos de adquisición de registros	115
4.1. Descripción del equipo de georradar empleado.....	119
4.2. Calibración de la antena empleada.....	123
4.2.1. Análisis del cero de la antena.....	123
4.2.2. Cálculo de la distancia mínima de no interferencia	127
4.2.3. Estudio de la atenuación de la propagación de las ondas.....	129
4.2.4. Zona de incidencia de radiación.....	131
4.2.5. Estudio de las pérdidas por efecto de contorno.....	134
4.2.6. Capacidad de resolución de la antena de 1.6 GHz..	137
4.3. Análisis del cambio de polaridad de las ondas al reflejarse en diferentes interfases.....	143
4.4. Descripción de la tipología de adquisición de registros.....	149

Parte 2. Análisis de las principales propiedades físicas de la madera mediante georradar

Capítulo 5. Anisotropía dieléctrica	157
5.1. Comportamiento dieléctrico anisótropo de la madera.....	163
5.2. Descripción de las probetas.....	165
5.3. Anisotropía dieléctrica paralela versus perpendicular	169
5.3.1. Estudio del caso del <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	171
5.3.2. Estudio del comportamiento sobre distintas	

especies.....	177
5.3.3.Síntesis de resultados.....	185
5.4.Anisotropía dieléctrica perpendicular en diferentes direcciones	189
5.4.1.Controversia con la resolución vertical.....	190
5.4.2.Estudio del caso del <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	193
5.4.3.Estudio del comportamiento sobre distintas especies.....	198
5.4.4.Síntesis de resultados.....	204
Capítulo 6. Estudio de la variación del contenido de humedad	207
6.1.Efecto de la variación del contenido de humedad en las propiedades electromagnéticas del <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	211
6.1.1.Descripción de los ensayos.....	211
6.1.2.Análisis cualitativo de los registros.....	217
6.1.3.Análisis cuantitativo de los registros.....	220
6.1.3.1.Tiempos de llegadas	220
6.1.3.2.Velocidades de propagación.....	223
6.1.3.3.Análisis de amplitudes.....	229
6.1.3.4.Análisis espectral.....	236
6.2.Efecto de la variación del contenido de humedad en las propiedades electromagnéticas de maderas de distinta densidad.....	239
6.2.1.Descripción de los ensayos.....	239
6.2.2.Análisis cualitativo de los registros.....	242
6.2.3.Análisis cuantitativo de los registros.....	243
6.2.3.1.Velocidades de propagación.....	244
6.2.3.2.Análisis de amplitudes.....	245
6.2.3.3.Análisis espectral.....	246
6.3.Síntesis de resultados.....	249
Capítulo 7. Caracterización electromagnética de la madera de diferente densidad	255
7.1.Descripción de los ensayos.....	259
7.2.Análisis cualitativos de los registros.....	261
7.3.Análisis cuantitativo de los registros.....	263
7.3.1.Velocidades de propagación.....	263
7.3.2.Análisis de amplitudes.....	265
7.3.3.Análisis espectral.....	275
7.4. Síntesis de resultados.....	277

Parte 3. Evaluación de las principales propiedades físicas de la madera con el resistógrafo y la técnica de ultrasonidos

Capítulo 8. Evaluación de las principales propiedades físicas de la madera con el resistógrafo y la técnica de ultrasonidos.

Comparación de resultados con el georradar.....	285
8.1.El resistógrafo.....	287
8.2.La técnica de ultrasonidos.....	291
8.3.Análisis de la variación del contenido de humedad en viguetas de diferente densidad.....	297
8.4.Análisis de la variación del contenido de humedad en viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	303
8.5.Análisis de la variación de la densidad.....	311
8.6.Comparación de los resultados obtenidos con el resistógrafo, la técnica de ultrasonidos y el georradar.....	315

Parte 4. El georradar y la calidad resistente de la madera

Capítulo 9. Primeros resultados de la aplicación del georradar a la clasificación resistente de viguetas de madera de *Pinus Radiata* D. Don.....

9.1.Contexto normativo de la clasificación resistente de la madera estructural.....	323
9.1.1.Norma de clasificación visual de la madera aserrada de uso estructural.....	327
9.1.2.Clasificación no destructiva por métodos automáticos: clasificación mecánica por máquina.....	329
9.1.3.Clasificación resistente por la técnica de ultrasonidos.....	333
9.1.3.Clasificación resistente por la técnica de ultrasonidos.....	334
9.2.Descripción de los ensayos.....	335
9.3.Clasificación resistente de la madera por distintos métodos: ensayos a rotura, visual y por ultrasonidos.....	339
9.4.Clasificación resistente por la técnica del georradar.....	343
9.5.Comparación de la clasificación resistente por distintos métodos.....	349

9.6.Síntesis de resultados.....	353
Capítulo 10. Conclusiones y líneas de investigación futuras....	357
10.1.Conclusiones.....	361
10.1.1.Conclusiones sobre el estudio de las principales propiedades físicas de la madera mediante georradar.....	361
10.1.2.Conclusiones de la comparación con otras técnicas no destructivas en la evaluación de las principales propiedades físicas.....	366
10.1.3.Conclusiones del análisis de la calidad resistente de la madera por medio de georradar.....	367
10.2.Futuros trabajos y líneas de investigación.....	369
Reseñas bibliográficas.....	375
Normas de referencia.....	393
Anexo A. Nomenclatura de las maderas empleadas según la norma UNE-EN 13556:2004.....	397
Anexo B. Tablas de codificación, densidad, contenido de humedad y clasificación resistente por diferentes métodos para el lote de viguetas de <i>Pinus Radiata</i> D. Don.	401

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1.- (a) Esquema simplificado de las diferentes componentes de un equipo de georradar; (b) Antena de 1.6 GHz emitiendo sobre madera; (c) Radargrama obtenido en una adquisición puntual de registros.....	69
Figura 2.2.- Cabecera de un registro obtenido con el georradar SIR10-H (GSSI), en el que se detallan los principales parámetros del registro: modelo de la antena (5100), frecuencia central de emisión según GSSI (1500 MHz), rango del registro (Range $R=5$ ns), posición de inicio de la señal (Position $P=-0.5$ ns), puntos por traza (samp/scan 512), función de ganancia (Range gain (dB), función de 4 puntos (0, 12, 20, 20).....	76
Figura 2.3.- (a) Ventana de dialogo del programa RADANT-NT para la selección de la escala de color para la visualización del radargrama; (b) Radargrama con escala de color 6 y <i>Xform</i> 1 de una vigueta sobre un trípode metálico; (c) Radargrama anterior al que se le superponen las trazas.....	84
Figura 2.4.- Radargrama registrado con la antena de 1.6 GHz de frecuencia central al desplazar la antena por una vigueta apoyada sobre un trípode metálico representado con la tabla de color 11 y la función <i>Xform</i> 11 (a) y con la tabla de color 4 y la función <i>Xform</i> 11(b).....	85
Figura 2.5.- (a) Radargrama de adquisición estática sobre vigueta de madera visualizado con dos tablas de color diferentes; (b) Tablas de color de los radargramas; (c) Traza característica del radargrama en el que se indican los tiempos dobles de propagación; (d) Cálculo de la velocidad de propagación y de la permitividad dieléctrica efectiva.....	87
Figura 3.1.- Sección de un árbol en la que se aprecia su estructura macroscópica: la corteza, el cambium, el líber, la albura, el duramen y la médula.....	92
Figura 3.2.- Principales direcciones de estudio respecto a la fibra en la madera estructural: eje longitudinal (<i>L</i>) que es paralelo a la fibra; el eje radial (<i>R</i>) perpendicular a la dirección de la fibra en la dirección normal al crecimiento de los anillos; el eje tangencial (<i>T</i>) perpendicular a la dirección a la fibra y tangente a los anillos de crecimiento.....	95

Figura 4.1.- Componentes del equipo de georradar modelo SIR-10H de GSSI: (a) unidad de control; (b) dispositivo de visualización; (c) antena de 1.6GHz de frecuencia central; (d) detalle de la unidad central.....	119
Figura 4.2.- Espectro de frecuencia de la emisión al aire de la antena modelo 5100 (GSSI) de frecuencia central 1.6 GHz.....	120
Figura 4.3.- (a) Localización del emisor y receptor en la antena de 1.6 GHz de frecuencia central de GSSI y (b) sus dimensiones.....	122
Figura 4.4.- Esquema de una traza donde se indican los tiempos medidos como cero de la antena: (a) primera ruptura de tendencia; (b) punto de amplitud cero y (c) primer máximo positivo.....	124
Figura 4.5.- Criterio establecido de la lectura de tiempos de llegada de la onda directa (D) y de la onda reflejada (R). En ambos casos se toma la lectura en el primer máximo positivo de la fase.....	126
Figura 4.6.- Pulso de la antena de 1.6 GHz (GSSI) con una duración de $T_0=2.23$ ns al realizar una emisión al aire.....	127
Figura 4.7.- Trazas de los radargramas colocando la antena a diferentes distancias de separación entre la antena y la placa metálica: (a) distancias de separación desde 10 cm hasta 1 m; (b) distancias de separación desde 10 cm hasta 40 cm.....	128
Figura 4.8.- (a) Trazas de los radargramas colocando la antena a diferentes distancias de la placa metálica $x=[0.10-1$ m]; (b) Función de ajuste de la atenuación de las ondas al propagarse por el aire.....	130
Figura 4.9.- Esquema del área iluminada por la antena, cuyo radio es ra , a una distancia x del medio reflector de constante dieléctrica ϵ_2	132
Figura 4.10.- Amplitudes registradas en las tres placas metálicas de diferente tamaño a diferentes distancias de separación ($x=[0.20-1$ m].....	137
Figura 4.11.- Posiciones de la antena en la adquisición de registros: (a) adquisición en la que las ondas recorren la cara y (b) el canto.....	146

Figura 4.12.- Cambio de fase de la onda reflejada en la base de una muestra de <i>Pinus nigra Arn, var. Salzmannii</i> al apoyar la antena sobre el canto con un reflector metálico bajo la muestra (a) y sin el reflector (b)...	147
Figura 4.13.- Cambio de fase de la onda reflejada en la base de una muestra de <i>Pinus nigra Arn, var. Salzmannii</i> al apoyar la antena sobre la cara con un reflector metálico bajo la muestra (a) y sin el reflector (b).....	148
Figura 4.14.- Diagrama de tipos de adquisiciones de registros estáticas o dinámicas con una antena direccional monoestática con o sin reflector metálico bajo la muestra.....	149
Figura 4.15.- Esquema de la secciones de una vigueta: Longitud (<i>L</i>), cara (<i>Cr</i>) y canto (<i>Ct</i>).....	151
Figura 4.16.- Posiciones de la antena y nomenclatura del dispositivo de registro: (a) antena sobre canto; (b) sobre testa; (c) sobre la cara orientada paralela a la dirección de las fibras y (d) orientada perpendicular a la dirección de las fibras.....	152
Figura 5.1.- Polarización del campo eléctrico paralela (a) y perpendicular (b). Polarización perpendicular del campo eléctrico que oscila perpendicular a las fibras (c) y paralela a las mismas (d).....	161
Figura 5.2.- Secciones en testa de 22 probetas de 20 x 7.5 x 20 cm <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	166
Figura 5.3.- Secciones en testa de las distintas especies de diferente densidad.....	167
Figura 5.4.- Posiciones de la antena apoyada sobre la cara en direcciones ortogonales del campo eléctrico respecto a las fibras.....	170
Figura 5.5.- (a) Trayectoria de onda directa (<i>D</i>) y onda reflejada (<i>R</i>); (b) Comparación de las trazas típicas con el dispositivo de registro <i>Cara_PerpendicularF</i> (línea azul) y <i>Cara_ParalelaF</i> (línea gris).....	172
Figura 5.6.- Velocidades de propagación de las ondas (a) y constantes dieléctricas (b) de las 22 muestras de <i>Pinus pinaster</i> Ait. En ambos casos	

se representa con un punto gris cuando el campo eléctrico es paralelo a las fibras (dispositivo *Cara_PerpendicularF*) y verde cuando es perpendicular (*dispositivo Cara_ParalelaF*)..... 173

Figura 5.7.- Amplitudes normalizadas de las ondas directas (A_D) y reflejadas (A_R) en direcciones paralela (L) y perpendicular (T) de las muestras de *Pinus pinaster* Ait..... 174

Figura 5.8.- Espectro de frecuencia cuando el campo eléctrico es paralelo y perpendicular a las fibras de las muestras 3, 6 ,11 de *Pinus pinaster* Ait..... 176

Figura 5.9.- Comparación de las trazas típicas con el dispositivo de registro *Cara_PerpendicularF* (línea gris) y *Cara_ParalelaF* (línea negra) de la muestra 14 (a) y de la muestra 2(b)..... 178

Figura 5.10.- (a) Velocidades de propagación de las ondas y (b) constante dieléctrica con el dispositivo *Cara_PerpendicularF* (punto gris) y *Cara_ParalelaF* (punto verde)..... 179

Figura 5.11.- Amplitudes normalizadas de las ondas directas (A_D) y reflejadas (A_R) cuando el campo es paralelo (L) y perpendicular (T) frente a las fibras de 20 especies diferentes..... 181

Figura 5.12.- Espectro de frecuencia de las señales cuando el campo eléctrico es paralelo y perpendicular a las fibras de la muestra 1(a), de la 6 (b) y de la 15 (c) del lote de maderas de diferentes densidades..... 184

Figura 5.13.- Dispositivos de registro *Canto* (a) y *Testa* (b)..... 190

Figura 5.14.- Comparación de trazas con el dispositivo *Testa* en muestras de diferente longitud del *Pinus pinaster* Ait.: (a) 7.5 cm; (b) 11 cm; (c) 20 cm..... 192

Figura 5.15.- Trazas características del *Pinus pinaster* Ait. registradas con el dispositivo *Canto* en la muestra 16 (a) y con el dispositivo *Testa* en la muestra 19 (b)..... 193

Figura 5.16.- Amplitudes normalizadas del las ondas directas (A_D) y

reflejadas (A_R) con el dispositivo de registro <i>Canto</i> (<i>C</i>) y <i>Testa</i> (<i>T</i>) de las muestras de <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	195
Figura 5.17.- Espectros de frecuencia de las señales con dispositivo <i>Canto</i> y con el dispositivo <i>Testa</i> de la muestra 16 (a) y de la muestra 19 (b) del lote de maderas de diferentes densidades.....	197
Figura 5.18.- Trazas características con el dispositivo de registro <i>Canto</i> (a) y <i>Testa</i> (b) en la muestra 3 del lote de maderas de diferentes especies.....	199
Figura 5.19.- (a) Amplitudes normalizadas de las ondas directas (A_D) y (b) reflejadas medidas en el primer máximo positivo (A_{R1}) y en el segundo máximo positivo (A_{R2}) con los dispositivos de registro <i>Canto</i> (<i>C</i>) y <i>Testa</i> (<i>T</i>) de 20 especies diferentes.....	201
Figura 5.20.- Espectros de frecuencia con el dispositivo <i>Canto</i> y <i>Testa</i> de la muestra 11(a) y de la 19 (b).....	203
Figura 6.1.- Densidad promedio de las 22 viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait. a lo largo del proceso de secado.....	212
Figura 6.2.- Contenido de humedad de cada vigueta de <i>Pinus pinaster</i> Ait. en cada una de las 13 sesiones de registro con georradar.....	213
Figura 6.3.- Dispositivos de registro: (a) <i>Canto</i> , (b) <i>Testa</i> y (c) <i>Cara_ParalelaF</i>	215
Figura 6.4.- (a) Señal típica registrada con el dispositivo <i>Canto</i> y (b) con el <i>Cara_ParalelaF</i> en viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	216
Figura 6.5.- Variación de los tiempos de propagación con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i> como consecuencia de la variación del <i>CH</i> : (a) Radargrama obtenido tras la sesión S1 (<i>CH</i> =115%); (b) la sesión S7 (<i>CH</i> =31%) y (c) la sesión S12 (<i>CH</i> =14%).....	218
Figura 6.6.- Trazas correspondientes a dos momentos de medición con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i> con 20 días de diferencia (línea gris <i>CH</i> =70% y línea azul <i>CH</i> =25%).....	219

Figura 6.7.- Tiempos de llegada promedio de la sesión de la onda directa con el dispositivo de registro <i>Testa</i> en las viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait..	221
Figura 6.8.- Ajuste de tiempos de llegada promedio de la sesión de la onda directa con el $CH_{promedio}$ de la sesión con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i> en las viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	222
Figura 6.9.- Efecto del proceso de secado en las velocidades de propagación con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i>	227
Figura 6.10.- Efecto de la variación del CH en la velocidad de propagación (a) y en la constante dieléctrica (b) en las viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	229
Figura 6.11.- (a) Ajuste de amplitudes normalizadas <i>peak to peak</i> de la onda reflejada con el dispositivo <i>Canto</i> con el CH ; (b) Ajuste de amplitudes normalizadas del primer máximo positivo de la onda reflejada con el dispositivo <i>Canto</i> con el CH	231
Figura 6.12.- Amplitud normalizada de la onda directa versus CH con el dispositivo <i>Canto</i> (a), <i>Cara_ParalelaF</i> (b) y <i>Testa</i> (c) en las viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	233
Figura 6.13.- Amplitudes normalizadas de la onda reflejada versus CH con el dispositivo <i>Canto</i> (a) y <i>Cara_ParalelaF</i> (b) en las viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	234
Figura 6.14.- (a) Espectro de frecuencia de la traza característica de la vigueta 2 de <i>Pinus pinaster</i> Ait. con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i> en diferentes sesiones de registro; (b) Espectro de frecuencia de la traza característica de la vigueta 1 de <i>Pinus Pinaster</i> Ait. con el dispositivo <i>Canto</i> en diferentes sesiones de registro.....	238
Figura 6.15.- (a) Variación de la densidad para diferentes CH y especies de madera; (b) variación del CH para madera de diferente densidad.....	241
Figura 6.16.- Variación de los tiempos de propagación de la onda reflejada con el dispositivo de registro <i>Canto</i> de la vigueta 2 como consecuencia de la variación del CH : (a) Radargrama obtenido tras el secado ($CH_{SECA}=1\%$) y (b) tras la primera humidificación ($CH_{SEMI}=37\%$)	243

Figura 6.17.- Efecto de la variación del <i>CH</i> en la velocidad de propagación de viguetas de diferentes densidades con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i>	245
Figura 6.18.- Amplitudes normalizadas de la onda reflejada en viguetas de diferente densidad en los distintos estados de <i>CH</i> de maderas de diferentes especies con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i>	246
Figura 6.19.- Espectro de frecuencia de la traza característica de la vigueta 13 (a) y de la 11 (b) al apoyar con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i> para diferentes <i>CH</i> del lote de maderas de distintas especies con diferentes contenidos de humedad.....	247
Figura 7.1.- Variación de los tiempos de propagación con el dispositivo de registro <i>Cara_PerpendicularF</i> en viguetas de diferente densidad: (a) Radargrama en la vigueta 4 ($\rho= 0.75 \text{ g/cm}^3$) y (b) en la vigueta 18 ($\rho= 0.52 \text{ g/cm}^3$).....	262
Figura 7.2.- Efecto de la diferencia de densidad en la velocidad de propagación (a) y en la constante dieléctrica (b) con el dispositivo <i>Cara_PerpendicularF</i>	265
Figura 7.3.- Ajuste de amplitudes normalizadas de la onda directa con el dispositivo <i>Cara_PerpendicularF</i>	267
Figura 7.4.- Traza característica al adquirir los registros con el dispositivo <i>Cara_PerpendicularF</i>	267
Figura 7.5.- Traza característica del radargrama de la vigueta 2 representada por la línea gris y la vigueta 18 representada por la línea azul al adquirir los registros con el dispositivo <i>Cara_PerpendicularF</i>	269
Figura 7.6.- Traza característica del radargrama de la vigueta 1 ($\rho= 0.90 \text{ g/cm}^3$) representada por la línea azul y la vigueta 19 ($\rho= 0.50 \text{ g/cm}^3$) representada por la línea gris al adquirir los registros situando la antena a 35 cm de distancia de las viguetas.....	270
Figura 7.7.- Ajuste de amplitudes normalizadas de la onda reflejada al colocar al antena a 35 cm de separación de la vigueta del lote de viguetas	

de diferente densidad cuya huella esté cubierta como mínimo por un 35% de madera.....	274
Figura 7.8.- (a) Espectros de frecuencia de las viguetas 4, 14 y 20 con el dispositivo de adquisición de datos <i>Cara_PerpendicularF</i> ; (b) Espectros de frecuencia de las viguetas 1, 8 y 14 colocando la antena a 35 cm de la vigueta.....	276
Figura 8.1.- Componentes del resistógrafo: (a) Instrumento de perforación; (b) aguja perforadora; (c) cable conexión a la unidad electrónica; (d) unidad electrónica de registro.....	288
Figura 8.2.- (a) Perforación de una pieza; (b) Sección en testa de una muestra de <i>Pinus pinaster</i> Ait., donde se aprecian los anillos de crecimiento en el que se superpone el resistograma obtenido.....	289
Figura 8.3.- Esquema dispositivos de registro con ultrasonidos en el estudio de la madera de forma longitudinal a las fibras: (a) Transmisión directa; (b) transmisión indirecta paralela; (c) transmisión indirecta cruzada.....	294
Figura 8.4.- (a) Equipo Sylvatest DUO de ultrasonidos: (a) palpadores; (b) unidad de control; (c) sistema de almacenamiento de registros.....	296
Figura 8.5.- (a) Perforación en cara en la dirección radial a las fibras; (b) Perforación en canto la dirección tangencial a las fibras; (c) Resistogramas de la vigueta 6 al atravesar el canto y la cara.....	299
Figura 8.6.- (a) Perforaciones realizadas en el canto de la vigueta 6 cada 15 cm; (b) Efecto de la variación del <i>CH</i> en las amplitudes promedio por vigueta del resistógrafo (AR_{mv}) en viguetas de diferente densidad.....	300
Figura 8.7.- (a) Medición por transmisión directa en la dirección longitudinal con el equipo de ultrasonidos Sylvatest; (b) detalles de los palpadores en los que se aprecia su punta cónica.....	301
Figura 8.8.- Efecto de la variación del <i>CH</i> en la velocidad de propagación de ultrasonidos en viguetas de diferente densidad.....	302
Figura 8.9.- (a) Resistogramas en el punto central de la vigueta 1 en la sesión S8 y en la sesión S13; (b) Ajuste entre la variación del <i>CH</i> y la	

<i>AR_{mv}</i> del <i>Pinus pinaster</i> Ait	305
Figura 8.10.- Contenido de humedad de cada vigueta de <i>Pinus Pinaster</i> Ait. en cada una de las sesiones de registro con ultrasonidos.....	306
Figura 8.11.- (a) Variación de la velocidad de propagación media por sesión de los ultrasonidos y (b) variación del módulo de elasticidad dinámico en las distintas sesiones de medición para el <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	307
Figura 8.12.- (a) Efecto de la variación del <i>CH</i> en la velocidad de propagación de los ultrasonidos y (b) en el módulo de elasticidad dinámico en viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait	309
Figura 8.13.- Ajuste entre la densidad (ρ) de las viguetas con (a) la amplitud del resistógrafo media de vigueta (<i>AR_{mv}</i>), (b) con las velocidades de propagación de los ultrasonidos (<i>v_p</i>) y (c) con el módulo de elasticidad dinámico (<i>E_d</i>).....	312
Figura 9.1.- Principales singularidades de la madera que afectan a su resistencia. (a-f) Nudos en diferentes posiciones en la vigueta y con diferentes grados de adherencia; (g) fenda; (h) bolsa de resina; (i) azulado y hongo blanco.....	330
Figura 9.2.- Máquina clasificadora mecánica Cook-Bolinder (Laboratorio de estructuras de maderas CIFOR - INIA).....	334
Figura 9.3.- Toma de lectura del <i>CH</i> con el higrómetro de puntos en el lote de 100 viguetas de <i>Pinus radiata</i> D. Don.....	336
Figura 9.4.- Viguetas de <i>Pinus radiata</i> D. Don. clasificadas por la norma UNE 56544:2007. En la imagen se muestran las viguetas <i>R4136</i> , <i>R4135</i> , <i>R4134</i> , <i>R4133</i> en las que se marca el resultado de la clasificación: Rechazo (<i>R</i>).....	337
Figura 9.5.- Equipo de georradar SIR-3000 (GSSI) en el que se encuentra integrado el sistema de visualización con la unidad de control conectado a una antena de 1.6 GHz de frecuencia central.....	337
Figura 9.6.- Adquisición de registros con la antena de frecuencia central de	

1.6 GHz (GSSI) en el Laboratorio de Estructuras de Madera de CIFOR-INIA (Madrid, España)..... 338

Figura 9.7.- Sección de un radargrama de una vigueta de *Pinus radiata* D. Don. apoyada en un extremo en una base de madera (a) y la superposición de las trazas características con y sin la base de madera (b); criterio de toma de lecturas de tiempos de llegada de la onda directa y reflejada (c)..... 344

Figura 9.8.- Radargrama obtenido al desplazar la antena a lo largo de la cara de la vigueta de *Pinus radiata* D. Don. *R4143* perteneciente al grupo *GI* (a) y de las viguetas *R4138* y *R4193* pertenecientes al grupo *G-R*..... 347

Figura 9.9.- Relación entre velocidades de propagación longitudinal de las ondas ultrasónicas con el módulo de resistencia a flexión. Las vigas de la clasificación por medio de georradar pertenecientes al grupo *GI* se representan con un punto gris y las del grupo *G-R* con uno verde..... 352

Figura 9.10.- Radargramas de las viguetas *R4118* y *R4103* clasificadas dentro del grupo *G-R* mediante georradar..... 354

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1.- Bandas de frecuencia y longitudes de onda correspondientes a cada banda para la propagación en el vacío.....	72
Tabla 3.1.- Valores de humedad y resistividad aproximados de la madera (Vignote y Martínez, 2006).....	106
Tabla 3.2.- Clases resistentes y valores característicos correspondientes según la norma UNE-EN 338:2003 para las coníferas y el chopo.....	113
Tabla 4.1.- Diferencias de tiempos teóricos $\Delta t_{(teórico)}$ y medidos $\Delta t_{(medido)}$ al propagarse la onda por el aire emitida con la antena de 1.6 GHz.....	125
Tabla 4.2.- Superficie que cubre la huella a diferentes distancias, según la 1ª zona de Fresnel y según Conyers y Goodman (1997).....	133
Tabla 4.3.- Dimensiones de las placas metálicas 1, 2 y 3 para el estudio de las pérdidas por efecto de contorno.....	135
Tabla 4.4.- Porcentaje de la huella de la antena que queda fuera de cada una de las placas metálicas empleadas en el estudio de las pérdidas por efecto de contorno calculadas según la 1ª zona de Fresnel y según Conyers y Goodman (1997).....	136
Tabla 4.5.- Constantes dieléctricas, velocidades de propagación y resolución vertical máxima y mínima para diferentes medios con la antena de 1.6 GHz (GSSI).....	139
Tabla 4.6.- Velocidades de propagación y constante dieléctrica del hormigón a los 90 días de fabricación en probetas de diferentes tamaños..	140
Tabla 4.7.- Cambios de fase en las reflexiones en las interfases de diferentes medios: aire-reflector metálico, aire-madera, madera-aire y madera-reflector metálico.....	145
Tabla 4.8.- Posiciones de la antena y nomenclatura del dispositivo de registro.....	151

Tabla 5.1.- Dimensiones, densidades y contenidos de humedad del lote de maderas de diferentes especies.....	168
Tabla 5.2.- Velocidades y constantes de las 20 especies distintas obtenidas con los dispositivos de registro <i>Cara_PerpendicularF (L)</i> y <i>Cara_ParalelaF(T)</i>	180
Tabla 5.3.- Relación de amplitudes normalizadas cuando el campo es paralelo o perpendicular de las ondas directas y reflejadas de 20 especies distintas.....	182
Tabla 5.4.- Amplitudes normalizadas promedio y desviación típica de las muestras de <i>Pinus pinaster</i> Ait. con el dispositivo de registro <i>Canto</i> y <i>Testa</i>	196
Tabla 5.5.- Velocidades de propagación y constante dieléctrica promedio de las 20 especies con el dispositivo de registro <i>Canto</i> y <i>Testa</i>	200
Tabla 5.6.- Amplitudes de la onda directa, del primer y segundo máximo positivo de la onda reflejada normalizadas con el dispositivo de registro <i>Canto (C)</i> y <i>Testa (T)</i>	202
Tabla 6.1.- Contenido de humedad (%) promedio, máximo y mínimo de las 22 viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait. en cada sesión.....	214
Tabla 6.2.- Parámetros de los ajustes del <i>CH</i> con los tiempos de llegada de la onda directa. Función exponencial de ajuste: $CH(\%) = \exp^{(a-bt)}$	222
Tabla 6.3.- Resumen de ajustes entre amplitudes normalizadas en cada sección versus el <i>CH</i> registradas con distintos dispositivos.....	236
Tabla 6.4.- Dimensiones, densidades y <i>CH</i> iniciales de las viguetas de madera de diferentes especies.....	240
Tabla 7.1.- Dimensiones, densidades y contenido de humedad del lote de viguetas de diferente densidad.....	260

Tabla 7.2.- Ajustes de la densidad con las velocidades de propagación y constantes dieléctricas para los 4 dispositivos de adquisición de registros.	264
Tabla 7.3.- Ajustes de la densidad con las amplitudes normalizadas de las ondas directas para los 4 dispositivos de adquisición de registros.....	266
Tabla 7.4.- Amplitudes normalizadas de los máximos en las maderas de diferente densidad al adquirir los registros con el dispositivo <i>Cara_PerpendicularF</i>	268
Tabla 7.5.- Amplitudes de la onda directa, reflejada y reflejada normalizada en las maderas de diferente densidad al adquirir los registros colocando la antena a 35 cm de separación de la vigueta.....	271
Tabla 7.6.- Porcentaje de área de la vigueta que queda incluida en la huella de la antena a 35 cm de separación.....	273
Tabla 8.1.- Variación del <i>CH</i> (%) del lote de maderas de diferente densidad.....	298
Tabla 8.2.- Módulos de elasticidad dinámicos (E_d) y velocidades longitudinales de propagación de ultrasonidos (v_p) en diferentes estados de <i>CH</i> para maderas de distinta densidad.....	301
Tabla 8.3.- Contenido de humedad (%) promedio, máximo y mínimo de las 22 viguetas de <i>Pinus Pinaster</i> Ait. en cada sesión con el resistógrafo.	304
Tabla 8.4.- Módulo de elasticidad dinámico promedio por sesión (E_{d_medio}) en MPa y desviación (σ) del promedio en cada sesión en MPa.	308
Tabla 8.5.- Comparación de ajustes y correlaciones al estudiar el efecto que produce la variación del <i>CH</i> en viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait. en los registros del resistógrafo, de la técnica de ultrasonidos y del georradar....	317
Tabla 8.6.- Comparación de ajuste realizados y correlaciones obtenidas al estudiar el efecto que produce la variación de la densidad en 20 viguetas en los registros del resistógrafo, de la técnica de ultrasonidos y del georradar.....	318

Tabla 9.1.- Ejemplo de correspondencia de clases resistentes (UNE-EN 338:2003) y calidades visuales (UNE 56544:2007) de las maderas de procedencia españolas dadas en UNE-EN 1912:2005+A2:2008.....	332
Tabla 9.2.- Propiedades mecánicas del lote de <i>Pinus radiata</i> D. Don diferenciado entre el grupo de viguetas que cumplen con la clase <i>C18</i> de la norma UNE-EN 338:2003 y las que no la cumplen (<i>R</i>).....	340
Tabla 9.3.- Propiedades mecánicas del lote de <i>Pinus radiata</i> D. clasificado en los grupos <i>ME-1 + ME-2</i> y <i>R</i> según la norma UNE 56544:2007.....	341
Tabla 9.4.- Propiedades mecánicas del lote de <i>Pinus radiata</i> D. clasificado en los grupos <i>US-C18</i> y <i>US-R</i> a partir de la velocidad de corte.....	343
Tabla 9.5.- Propiedades mecánicas del lote de <i>Pinus radiata</i> D. clasificado en los grupos <i>G1</i> y <i>G-R</i> por medio de georradar a partir de la identificación de singularidades en el interior de la vigueta.....	348
Tabla 9.6.- Comparación de clases resistentes asignadas según la norma UNE-EN 338:2003 al lote de viguetas de <i>Pinus radiata</i> D. a partir de diferentes procedimientos de clasificación: visual, ultrasonidos y georradar.....	349
Tabla 9.7.- Porcentajes de las viguetas que son de clase <i>C18</i> de cada uno de los grupos obtenidos y el error que se comete por los diferentes métodos de clasificación aplicados: visual, ultrasonidos y georradar.....	350
Tabla A.1.- Nomenclatura de las distintas especies de madera empleadas a lo largo de la tesis según la norma UNE-EN 13556:2004.....	399
Tabla B.1.- Código, dimensiones y parámetros registrados durante los ensayos de flexión a rotura y con la técnica de ultrasonidos del lote de <i>Pinus radiata</i> D. Don	404
Tabla B.2.- Grupo de clasificación resistente al que pertenece cada vigueta del lote de <i>Pinus radiata</i> D. Don según los distintos métodos.....	407

PARTE 1
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se describen los objetivos del estudio recogido en esta tesis y la justificación de los mismos. Se hace una revisión del empleo de la madera estructural en edificación, poniéndose de manifiesto que en las últimas décadas su utilización ha experimentado un incremento significativo. Asimismo, se introducen una serie de técnicas tanto semi-destructivas como no destructivas, que actualmente se están empleando en la caracterización e inspección de estructuras de edificación o bien se encuentran en fase de experimentación.

1.1.-OBJETIVOS

En los trabajos de rehabilitación y conservación de edificios históricos es necesario hacer un estudio previo de los elementos estructurales que los componen. La estimación de la seguridad estructural y la evaluación de los daños físicos de las estructuras de madera se realizan en la actualidad mediante inspección visual y con la toma de pequeñas muestras que posteriormente son analizadas en laboratorio. Por este motivo, los resultados que se obtienen no son muy fiables o proporcionan datos que son muy puntuales. Por tanto, el **objetivo fundamental** de esta tesis es buscar una metodología de adquisición y procesado de registros adecuada para la aplicación de la técnica del georradar al análisis y diagnóstico de los problemas que presenta la madera estructural y mejorar de este modo el grado de fiabilidad de su estudio. Esta técnica presenta una serie de ventajas frente a otras más convencionales ya que elimina el traslado de los elementos que se estudian hasta un taller especializado y, lo que es más importante, no se producen daños como consecuencia de las perforaciones que en muchas ocasiones hay que realizar con el objeto de examinarlos o manipularlos.

La tendencia actual en el estudio de la madera estructural es la del desarrollo o aplicación de técnicas no destructivas para la evaluación y análisis del estado de la pieza (Bertolini et al., 1998), (Bucur, 2003), (Baradit et al., 2006), (Daian, 2006) y (Mariño, 2007). En concreto, existen líneas de investigación interesantes que se centran en la aplicación de métodos no destructivos al estudio de la madera como son el resistógrafo y los ultrasonidos. Los resultados de estos estudios han sido publicados en varias tesis doctorales como la de Capuz (2003), Hermoso (2001) e Íñiguez (2006) y en diversos artículos (Rinn, 1994), (Rodríguez et al., 1998), (Harald, 2000). No obstante, en la mayoría de los casos la fiabilidad o precisión de los resultados es mejorable.

En los últimos diez años entre las técnicas que se han aplicado al estudio de la madera estructural se ha incorporado la técnica de las microondas, es decir, se utiliza la propagación de las ondas electromagnéticas en la zona del espectro de las microondas para la caracterización de la madera. Para un correcto desarrollo de la aplicación de esta técnica es necesario conocer la respuesta del material cuando se somete a un campo electromagnético. De esta forma, el avance en el conocimiento de las principales propiedades electromagnéticas de la madera permite nuevas y mejores aplicaciones de la técnica de microondas con el objeto de implantarse a nivel industrial. Las primeras aplicaciones industriales estaban orientadas hacia la mejora en los procesos de secado y pegado de la madera. Actualmente las aplicaciones se orientan a la caracterización de las principales propiedades físicas de la madera y la detección de las principales singularidades de la madera (nudos, desviación de la fibra, etc.).

La relación entre las principales propiedades físicas y los cambios que se producen en la onda emitida en el rango de las microondas para distintas especies, diferentes contenidos de humedad, diferentes ángulos de incidencia con respecto a la fibra y a diferentes frecuencias de emisión ha sido analizada a diferentes frecuencias de emisión dentro de las microondas por varios autores, cuyos principales resultados están resumidos en (Bucur, 2003).

Actualmente, la tecnología del georradar, que utiliza radiación electromagnética en el espectro de las microondas, tiene muchas aplicaciones en diversos campos y es un método de prospección no destructivo que permite el estudio rápido de estructuras de edificación. De hecho es una técnica que se emplea cada vez más en la inspección y diagnóstico de estructuras de edificación y materiales de construcción como por ejemplo el hormigón.

El principio general de la prospección con georradar se basa en la propagación de impulsos electromagnéticos. Una antena situada sobre la superficie de un material transmite una onda que se propaga hacia el interior de éste, siendo parcialmente reflejada en las interfases donde existe un contraste dieléctrico. La respuesta del material, constituida por todas las ondas reflejadas, es registrada, procesada y analizada con el objeto de caracterizar y/o estudiar el medio por el que se propaga.

Por todo ello, para la consecución del objetivo fundamental de esta tesis se realiza una serie de ensayos por medio de georradar sobre distintos lotes de madera estructural con una antena de frecuencia central de emisión de 1.6 GHz desarrollada por Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI). El trabajo se concreta atendiendo a los siguientes objetivos particulares:

Objetivo 1

En primer lugar, es necesario calibrar la capacidad de la técnica para caracterizar las propiedades físicas de la madera que afectan de forma determinante a su resistencia mecánica como la anisotropía dieléctrica, el contenido de humedad y la densidad. Para ello se realiza una serie de ensayos con distintos lotes de madera donde se evalúa tanto el sistema de adquisición y procesado de los registros, así como el grado de alteración que se produce en las señales electromagnéticas registradas como consecuencia de la variación de estas propiedades físicas. Todo ello con el objetivo de establecer un patrón de

comportamiento electromagnético de la madera frente a la radiación electromagnética para una frecuencia de emisión determinada.

Objetivo 2

A continuación se comparan y contrastan la calidad y fiabilidad de los resultados obtenidos con georradar con respecto a la caracterización del contenido de humedad y la densidad con los obtenidos por otras técnicas no destructivas que en la actualidad se emplean en el diagnóstico de la madera estructural como son la técnica de ultrasonidos y el resistógrafo. El objetivo es establecer cuál de ellas nos aporta información más interesante y fiable con respecto a las variables analizadas (contenido de humedad y densidad).

Objetivo 3

La clasificación resistente de los distintos tipos de madera, empleada con fines estructurales, surge por la necesidad de controlar lo más posible los factores de variabilidad de la misma, tanto entre los distintos tipos de madera como dentro de un mismo tipo de madera. Los métodos que actualmente se emplean para clasificar y catalogar las maderas son los de estimación visual (UNE 56544:2007) o por el aspecto externo del material y las clasificaciones mecánicas basadas en la medición de propiedades altamente relacionadas con la resistencia. No obstante estos métodos presentan algunas limitaciones como la subestima de la calidad resistente, la subjetividad, la difícil aplicabilidad al estudio de la madera que forma parte de una estructura, etc. Por tanto, el tercer objetivo de esta tesis se orienta a la búsqueda de un proceso de clasificación de la madera estructural que mejore los ya existentes, mediante la utilización de una técnica no destructiva como es la del georradar para identificar singularidades que puedan mermar la calidad resistente de la madera. Se trata por tanto, de establecer una metodología de adquisición y procesado de registros que permita desarrollar un protocolo de clasificación con un mayor grado de fiabilidad

1.2.- SITUACIÓN ACTUAL DEL EMPLEO DE LA MADERA ESTRUCTURAL EN EDIFICACIÓN

La madera junto al barro y la piedra han acompañado desde sus comienzos al proceso constructivo humano. Su uso comienza con la aparición de las primeras herramientas incisivas, sílex o hachas, por ejemplo, y se perfecciona con la evolución de las técnicas de corte hasta llegar hasta nuestros días.

Con la aparición del acero y el hormigón armado, a mediados y fines del siglo XIX respectivamente, la utilización de la madera estructural sufre primero un retroceso y un parón después, que no se recuperará plenamente hasta la aplicación de las resinas sintéticas a las estructuras de la madera laminada hacia 1950.

El estudio de la madera como elemento estructural de la edificación y su tratamiento en la rehabilitación de edificios históricos se ha tratado en diversos libros desde principios de siglo hasta la actualidad. Ejemplos recientes de ello en nuestro país son los trabajos de Arriaga et al. (2002) y Vignote y Martínez (2006).

La situación actual en el sector de la edificación resulta crítica desde la entrada en vigor de la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE: Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación. Modificada por la Ley 24/2001, de 27 de diciembre) y el Código Técnico de la Edificación (CTE: Dirección General de Arquitectura y Política de Vivienda del Ministerio de Vivienda, 2006). A esta situación no resulta ajena la madera en la construcción, resultando un momento especialmente interesante en la medida en que, por primera vez, en España se dispone de un marco normativo que sitúa a la madera estructural en igualdad de condiciones frente a otros materiales. Por otro lado, la elevada demanda de madera estructural en el mercado está haciendo muy necesaria y urgente la

actualización del sector para asumir y dar respuesta a los retos planteados por el CTE.

Es a partir de las últimas dos décadas cuando surgen gran cantidad de monografías centradas en la tecnología, transformación, aplicación de la madera estructural. Ejemplos de ellos son también las numerosas monografías publicadas por AITIM en la última década en el campo de la madera estructural como VV. AA. (2003), Argüelles y Arriaga (2003), VV. AA. (2004a) y VV. AA. (2004b).

En este nuevo marco, la madera y sus productos derivados para uso estructural por primera vez son contemplados en igualdad de condiciones con otros materiales, ofreciendo en edificación las mismas garantías de calidad y seguridad estructural. Así, la integración de la madera como material estructural en una normativa de obligado cumplimiento viene a satisfacer una demanda del sector para equipararse en el mercado a otros productos.

Pero para ello, la primera necesidad consiste en implantar en los sistemas de producción y caracterización de madera y productos derivados para uso estructural unas medidas encaminadas a garantizar sus propiedades mecánicas. Los sistemas actualmente más reconocidos e implantados en Europa y en otros países de sobrada tradición en la construcción con madera, son los basados en la clasificación visual y en la asignación de clases resistentes para la madera aserrada. Para ello, desde hace años se vienen desarrollando las normas de clasificación visual a nivel nacional (en España, la UNE 56544:2007), cuyos resultados están siendo refrendados por los Comités Europeos de Normalización para reconocer la asignación de clases resistentes mediante su integración en la norma UNE-EN 1912:2005+A2:2008. El sistema de clases resistentes queda definido en la norma UNE-EN 338:2003. En concreto, el Laboratorio de Estructuras de Madera del CIFOR-INIA desarrolla diversos proyectos de

investigación que han conducido a la caracterización de las cuatro especies de coníferas españolas más utilizadas en estructuras.

En este campo se abre un abanico de líneas de investigación tan extenso como necesario. Para la caracterización de madera en aserradero existen normas y procedimientos cuya aplicación en estructuras existentes resulta muy limitada, por lo que se hace necesario un nuevo enfoque para tratar de estimar las propiedades mecánicas de la madera puesta en obra. Con estas aplicaciones como finalidad, la mayor parte de estas líneas de investigación se basan en el estudio de técnicas no destructivas para complementar la aplicación de la clasificación visual y mejorar la predicción de las propiedades mecánicas o detectar discontinuidades en el material.

La madera es un material heterogéneo, y por ello sus valores mecánicos tienen una gran variación, incluso entre material procedente de una misma región (Hermoso et al., 2002). En consecuencia, existen numerosas técnicas y equipos no destructivos que se están desarrollando y optimizando para garantizar la seguridad en el uso de la madera. Actualmente la norma visual es el método más popular para formar grupos de calidad homogénea. Sus mayores ventajas son la economía y validez para diferentes dimensiones. Sin embargo, las técnicas no destructivas implementadas en equipos tienen otras ventajas frente a las técnicas visuales: objetividad, mayor rendimiento clasificatorio y optimización del material. Aunque, también tienen el inconveniente de ser más caras y estar calibradas para unas dimensiones y especies determinadas.

En esta línea destacan la aplicación de técnicas basadas en medir la velocidad de propagación de ultrasonidos, la resistencia a la penetración de una varilla, la resistencia a la extracción de un tornillo o el análisis de los modos de vibración natural mediante vibraciones inducidas. El resistógrafo también resulta una técnica muy utilizada, aunque sus aplicaciones en la práctica se encuentran más relacionadas con el diagnóstico de daños que con la caracterización de las

propiedades mecánicas. La termografía permite detectar con un alto grado de sensibilidad los cambios de temperatura. La mayor parte de estas y otras técnicas no destructivas basadas en diferentes fundamentos, tratan de establecer relaciones que permitan mejorar la capacidad de predicción de las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Esta predicción resulta especialmente necesaria para aumentar la fiabilidad del cálculo estructural en los trabajos de intervención en edificios con estructura de madera.

Otras técnicas y algunas de las anteriores también pueden ser utilizadas para localizar discontinuidades ocultas en la madera o algunas singularidades de la propia madera (nudos, fendas, etc.), daños biológicos como pudriciones o ataques de insectos, cambios de humedad, alternancia de materiales, etc. (Beall, 2007). Al margen de las mencionadas, existen numerosas y variadas técnicas no destructivas basadas en muy diferentes fundamentos físicos o mecánicos (infrarrojos, visión artificial, rayos X, densitometrías, entre otras) de las que actualmente no hay constancia de su utilización o investigación en España.

La madera es un material abundante en el patrimonio monumental e inmobiliario de España. Sin embargo, hasta la fecha no se han desarrollado técnicas de inspección y diagnóstico precisas al nivel que se ha producido en otros materiales de construcción como el hormigón o la piedra. Teniendo en cuenta que en la inspección de estas estructuras se presentan dificultades añadidas como son el estudio de barras estructurales de grandes escuadrías, de especies y procesos industriales no habituales.

Es a partir de esta primera década del 2000 cuando en España se vienen desarrollando proyectos y estudios por parte tanto de grupos de investigación emergentes como del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria (INIA) con el objetivo de poner a punto metodologías de inspección, representación y análisis para la toma de decisiones de intervención sobre las estructuras de madera del patrimonio construido. Prueba de ello son las diversas

publicaciones existentes sobre la necesidad de desarrollar esta metodología como Basterra et al. (2004), Basterra et al. (2005), Ramón et al. (2005) y Ramón et al. (2008) o descripciones del estado actual de la utilización de la madera estructural en la construcción en España (Arriaga et al., 1999; Esteban et al., 2007).

1.3.- TÉCNICAS SEMI-DESTRUCTIVAS DE INSPECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LA MADERA ESTRUCTURAL

En este apartado se describen las técnicas semi-destructivas que actualmente tienen mayor repercusión o están en proceso de estudio para ser aplicadas como herramientas de inspección y diagnóstico de estructuras de madera. De entre todas ellas destacan la técnica del resistógrafo, el extractor de tornillos, el extractor de muestras, la dendrocronología y la prueba del carbono 14.

A.-Resistógrafo

El resistógrafo consiste en un taladro mecánico que realiza una perforación de 3 mm de diámetro y evalúa la resistencia que ofrece a la perforación. El aparato es portátil y tiene una broca con un diámetro de 1.5 mm en el fuste y 3 mm en la punta que avanza a una velocidad constante. La resistencia a la penetración se mide mediante el consumo de potencia.

Su origen se remonta a 1985 cuando fue utilizado en Alemania para detectar la degradación en postes de madera. Posteriormente evolucionó a un dispositivo diseñado por Rinn que se denominaba «Densitomat» y en 1993 se rebautizó como resistógrafo. La resistencia que ofrece a su avance se relaciona con la densidad de la madera y es capaz de detectar los anillos de crecimiento al encontrar diferencias de densidad entre la madera de verano y de primavera, teniendo en cuenta que la

distancia entre los anillos de crecimiento de la madera para una misma sección varía en función del ángulo con el que penetra la aguja (Mariño et al., 2000).

La interpretación de la salida gráfica de la penetración del resistógrafo permite detectar zonas dañadas con galerías o pudriciones por la pérdida brusca de resistencia. Sin embargo, el valor numérico medio de la gráfica completa en una sección no detecta diferencias significativas entre una zona dañada por hongos o insectos xilófagos y una zona sana (Ramón et al., 2005).

Más adelante en el capítulo 8 de la presente tesis se profundiza en el estudio de esta técnica, pues se emplea con objeto de comparar su eficacia con la del georradar.

B.- Extractor de tornillos

Se trata de una técnica poco extendida en nuestro país, aunque recientemente existen algunos trabajos realizados por Bobadilla et al. (2007). El instrumento registra el arranque de un tornillo de 4 mm de diámetro y 18 mm de longitud. La fuerza que se necesita para realizar el arranque está relacionada con la densidad y el módulo de elasticidad en piezas pequeñas y libres de defectos. Sin embargo, la escasa penetración del tornillo ofrece una información muy localizada de la pieza y muy difícil de extrapolar a madera estructural de gran escuadría.

C.- Extractor de muestras (core-drilling, tensión micro-especimen, fractómetro)

Existen diversas líneas de investigación en las que se ha desarrollado instrumentación específica para la extracción de muestras y deducción a partir de ellas de los parámetros de resistencia mecánica.

Esta técnica se emplea con el objetivo de examinar las propiedades mecánicas de una pieza *in situ*. Consiste en la extracción de muestras de pequeño diámetro (mm) del material y a los que se le aplican una serie de tensiones. En algunos trabajos de investigación se emplea esta instrumentación barriendo la longitud de la pieza tomando varias lecturas en secciones a intervalos regulares. No obstante, la correlación que se obtiene con la resistencia de la pieza no es significativa, lo que limita la utilidad de esta instrumentación.

Bethge et al. (1996) han desarrollado un equipo portátil que mide la tensión de rotura, el módulo de elasticidad en flexión radial y la energía de rotura, en una probeta cilíndrica de 5 mm de diámetro extraída en la dirección radial. Este equipo es empleado en la inspección de árboles y no se conocen referencias respecto a su utilización en madera de estructuras. El equipo está pensado para un ensayo rápido al pie del mismo árbol y con la madera en verde. Su aplicación en estructuras sería factible, pero en principio los resultados que se obtienen están referidos a madera libre de defectos y en pequeñas dimensiones, con lo que su utilidad práctica de momento no es muy alta.

Recientemente, Kasal et al. (2003) y Kasal (2003) han desarrollado instrumentos específicos con el objetivo de extraer muestras y de momento han sido sólo probados en laboratorio. La técnica permite medir directamente el módulo de elasticidad del material sin comprometer la integridad de la estructura bajo estudio.

D.-Datación de la madera

Para la datación de la madera pueden aplicarse dos técnicas diferentes en metodología y precisión de los resultados como son la dendrocronología y la técnica del carbono 14. Su interés práctico se orienta a la datación de bienes histórico-artísticos para la intervención y rehabilitación de edificios (Rodríguez y Richter, 1985).

La dendrodatación se basa en un fenómeno biológico específico de la madera y se fundamenta en el estudio de la secuencias de anillos de crecimiento del árbol. Precisa un cierto número de muestras con características muy particulares y la precisión del resultado es muy elevada de forma que con independencia de la antigüedad se llega a determinar la edad en años sin margen de error (Rodríguez , 1997).

Una limitación del método es que no puede ser aplicado a cualquier especie. Para poder registrar los anillos es preciso que sean patentes en la madera como ocurre con la madera de conifera o en las frondosas de anillos porosos como el roble, no siendo aplicable a las maderas de anillo difuso como el chopo.

La radiodatación (técnica del carbono 14) es un método físico-químico que se aplica a cualquier resto orgánico y las muestras necesarias para el análisis son inferiores a las precisadas en la dendrodatación. Su precisión es menor, aunque también pueden ser complementarias ambas técnicas (Rodríguez , 1997, 2000).

1.4.- TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE INSPECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LA MADERA ESTRUCTURAL

Las técnicas no destructivas que actualmente tienen mayor repercusión dentro del ámbito de estudio se describen brevemente a continuación. Se trata de la técnica de ultrasonidos, métodos de vibraciones inducidas, termografía, rayos Gamma-densitometría, ondas radiofrecuencia y ondas microondas.

A.-Ultrasonidos

El objetivo del estudio mediante ultrasonidos es la obtención del módulo de elasticidad dinámico deducido a partir de la velocidad de propagación de las ondas mecánicas y la densidad del material.

La velocidad de propagación será mayor cuanto menor sea la presencia de defectos en la madera. Puede ser debido, por ejemplo, a que las fendas, desviaciones de fibras generales o locales provocadas por nudos, provocan la interrupción en la continuidad de transmisión de la onda y por tanto retardan su llegada al receptor. La velocidad de transmisión de varias especies españolas se ha determinado en probetas libres de defectos obteniéndose altas correlaciones entre las propiedades mecánicas y la rigidez acústica (Laffarga, 1992).

La constatación de la relación entre la velocidad de la onda y el módulo de elasticidad dinámico ha sido ampliamente estudiada por diversos autores como Acuña et al. (2001), Hermoso et al. (2003) y Casado et al. (2005). Asimismo, existen en los últimos años trabajos, como Acuña (2004), Hermoso et al. (2007) y Conde et al. (2007), que evalúan la posibilidad de mejorar la predicción de la resistencia mecánica de la madera estructural por el método visual combinándola con el método de ultrasonidos.

Además, la tomografía ultrasónica permite la reconstrucción de las secciones de madera por medio del análisis de la distribución de valores de velocidad de propagación registrados desde distintos ángulos.

B.-Métodos de vibraciones inducidas

Este método está basado en los mismos principios que la técnica de ultrasonidos. Se relaciona la velocidad de propagación de una onda (en este caso provocada por un impacto) con el módulo de elasticidad dinámico y la densidad. Además suelen añadir un análisis de la amortiguación de la vibración mediante un osciloscopio.

Sus aplicaciones se orientan a la evaluación de las características mecánicas, clasificación, control de calidad de productos derivados de la madera y detección de la degradación en estructuras de madera (madera laminada, postes, etc.).

Si en una pieza de madera existen degradaciones interiores u oquedades de galerías, la velocidad de propagación será diferente y el tiempo de propagación de la onda reflejará esta perturbación respecto a la madera sana. Estos sistemas se emplean en la inspección de estructuras de hormigón y acero, y actualmente también se comercializan para la madera.

En EE.UU. se emplea de manera frecuente la técnica de vibraciones para la determinación de la capacidad resistente de los postes de tendidos de telecomunicaciones o el estudio de longitud de pilotes de puentes (Anthony, 1998a) y para la inspección de árboles en pie (Bethge et al., 1996).

Otros autores como Karsulovic y León (1994) analizaron la impedancia acústica en maderas con nudos. Otros estudios se han centrado en el análisis de las propiedades resistentes de la madera y su variabilidad usando métodos acústicos. Ejemplo de ello son los trabajos realizados por Divos y Tanaka (2000), Pellerin y Ross (2002), Cilas et al. (2002), Brancheriau y Bailleres (2003) y Brancheriau (2006).

En España, existen algunos estudios recientes que evalúan la capacidad de esta técnica con el fin de realizar una clasificación resistente como Arriaga et al. (2005), Íñiguez et al. (2007), Carballo et al. (2007), Casado et al. (2007) y Casado et al. (2008).

También se han desarrollado otros equipos basados en las vibraciones inducidas como el Arbotom que, como presentan Rinn (2003) y Mariño et al. (2007), aportan junto con perfiles resistográficos información interesante del estado de conservación de la pieza.

C.-Termografía

Se trata de una técnica incipiente y al mismo tiempo prometedora. Debido a que la conductividad del calor de la madera depende de su densidad, los cambios de la temperatura de superficie de la madera también dependen de su densidad, hecho importante dado que la madera biodeteriorada tiene menor densidad que la madera sana. James y Rice (2002) han realizado inspecciones de edificios en busca de termitas en la que las imágenes obtenidas revelan actividad de xilófagos.

La pérdida de calor que supone la variación de la humedad que pueda tener la madera afecta a su temperatura. Esta diferencia puede ser observada con mucha claridad en las termografías. Por ello, esta técnica permite la inspección rápida en obra de amplias zonas, facilitando la localización de focos de humedad potencialmente peligrosos para la durabilidad de la madera.

D.-Rayos Gamma-Densitometría

Esta técnica se emplea para medir la densidad de un material emitiendo una radiación a través de la pieza de la que se conoce el coeficiente de absorción y se mide la energía recibida al otro lado. Se ha empleado para la evaluación del estado de postes de madera de líneas de telecomunicaciones, como técnica complementaria a la inspección visual (Taras y Lordanescu, 1998).

E.- Ondas radiofrecuencia

Forrer y Funck (1998) diseñaron un instrumento basado en el realizado por Ichijo (1953): electrodos que se sitúan en contacto directo con la superficie del material dieléctrico a estudio. Forrer y Funck (1998) lo implementan y mejoran para la detección de tipos de madera, nudos, huecos, azulado, etc. Las correlaciones entre este tipo de defectos y la atenuación y desplazamiento de fase son moderadas al trabajar en el rango de frecuencias de 1.4 a 20 MHz, es decir, en el rango de radiofrecuencia.

F.- Ondas microondas

La técnica de microondas permite estudiar y medir propiedades muy interesantes de la madera, como el contenido de humedad, la densidad, etc. Los estudios más interesantes a este respecto se encuentran detallados en Bucur (2003). Cuando un rayo de microondas se propaga a través de la madera, se produce un cambio de polaridad, se atenúa y se produce un cambio de fase. Estos tres cambios que se producen en la onda, todos ellos medibles, dependerán de la dirección de la fibra, del contenido de humedad y de la densidad (Torgovnikov, 1993). Esto se produce de tal forma que las tres medidas de los parámetros de las ondas microondas pueden ser empleadas para indicar simultáneamente las tres propiedades anteriores de la madera. De hecho, Schajer y Orhan (2006) describen el desarrollo y demostración de un sistema de microondas para identificar simultáneamente la dirección de la fibra, el contenido de humedad y la densidad.

Además el estudio de las propiedades dieléctricas de la madera a frecuencias dentro del rango de las microondas es muy útil para el empleo de las mismas en el calentamiento, secado y pegado de la madera. El conocimiento de las propiedades dieléctricas de un material permite predecir su habilidad para absorber la energía cuando se expone a la radiación de las microondas. El valor

medio de la energía absorbida por un determinado volumen de material cuando se calienta dieléctricamente está relacionado con el valor de la constante dieléctrica (Oloyede y Groombridge, 2000).

Las propiedades dieléctricas de la madera se han estudiado en el rango de bajas frecuencias dentro de las microondas. Ejemplo de ello son los trabajos presentados por Kabir et al. (1997), Olmi et al. (2000), Kabir et al. (2000), Sahin (2002), Sahin y Nürgül (2004). Se han aplicado para detectar nudos, defectos, desviación de la fibra en espiral (Kabir et al., 1998), (Baradit et al., 2006) y secciones de médula (Kaestner y Baath, 2000). Estudios recientes como Johansson et al. (2003), y Lundgren et al. (2006) proponen incluso modelos empíricos de predicción del contenido de humedad y distribución de densidad por medio de la inspección con ondas microondas.

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

1.5.- RESUMEN CONTENIDO DE LA TESIS

Para finalizar esta introducción, se presenta una breve síntesis de los temas que se tratan en cada uno de los cuatro bloques en los que se ha dividido la tesis.

La **primera parte** de la tesis consiste en una introducción general al problema que se trata. Para ello en el **capítulo 1** se definen los objetivos de la tesis. Con objeto de contextualizar la investigación se realiza una breve descripción de la situación actual del empleo de la madera en edificación y de las diversas técnicas semi-destructivas y no destructivas que se están investigando o empleando en el estudio, inspección y diagnóstico de estructuras de edificación de madera.

En el **capítulo 2** se describen brevemente aquellos conceptos básicos necesarios para poder trabajar con georradar tales como las características de propagación de las ondas electromagnéticas en medios materiales, descripción de la instrumentación, equipo, métodos de adquisición de datos y descripción de los registros.

Dado que el medio sobre el que se aplica la técnica de georradar como herramienta de inspección es la madera estructural, se dedica el **capítulo 3** a describir las principales propiedades físicas de la madera y de su proceso de secado, haciendo especial hincapié en aquellas propiedades o características que posteriormente afecten a la propagación de las ondas electromagnéticas. Asimismo, se describe la estructura interna de la madera, así como sus principales propiedades: anisotropía, contenido de humedad, densidad, etc. También se detalla la normativa española actual en cuanto a su determinación y la clasificación resistente. Por último, dado que el georradar es una técnica basada en impulsos electromagnéticos se detallan las principales propiedades dieléctricas de la madera.

En el **capítulo 4**, y último de esta primera parte, en primer lugar se describe el equipo con el que se trabaja y se justifica la elección de la antena. Posteriormente se detallan los ensayos realizados para calibrar el funcionamiento y comportamiento de la antena tanto en el aire, como sobre el medio que se trabaja (madera). En concreto se estudia la posición del cero de la antena empleada, la distancia mínima de no interferencia, la atenuación del frente de ondas, la zona de incidencia de la radiación, las pérdidas por efecto de contorno y la resolución tanto horizontal como vertical. Se considera necesario incluir en este capítulo una serie de ensayos orientados a comprender mejor el comportamiento de la señal electromagnética al reflejarse y transmitirse a lo largo de los medios que atraviesa, es decir, el estudio del cambio de fase que sufre la señal, particularizado para el caso de la madera. En el último apartado de este capítulo se incluye la descripción de los distintos dispositivos de adquisición de registros empleados en los distintos ensayos realizados a lo largo de esta tesis.

En la **segunda parte** de la tesis se analizan las principales propiedades de la madera mediante el georradar. Las características analizadas son la anisotropía dieléctrica, la variación del contenido de humedad y la variación de densidad. En el **capítulo 5** se analiza en detalle la anisotropía dieléctrica de la madera a partir de dos lotes de madera: un primer lote de madera de *Pinus pinaster* Ait., ya que ésta es la madera que de forma porcentual mayormente se comercializa en España y un segundo lote de maderas de diferentes especies. El comportamiento dieléctrico de la madera frente a un campo eléctrico depende de muchos factores, siendo unos de los principales la frecuencia del campo y la dirección de sus fibras. Por ello en este capítulo se caracterizan las respuestas dieléctricas de los distintos lotes de madera dependiendo de la dirección del campo con respecto a las fibras por medio del georradar con una antena de 1.6 GHz. La caracterización viene definida por el patrón de comportamiento encontrado en la velocidad de propagación, constante dieléctrica, en la amplitud y el espectro de frecuencias de la señal en las diferentes direcciones de incidencia del campo frente a la fibra de la madera.

En el **capítulo 6** se evalúan las variaciones que se producen en las señales electromagnéticas como consecuencia de la variación en el contenido de humedad de la madera. La presencia de agua en la madera produce modificaciones en sus propiedades electromagnéticas y por tanto afecta a las características de la propagación de las ondas. De igual forma que en el capítulo anterior se trabaja con dos lotes de madera: un primer lote de madera de *Pinus pinaster* Ait. y un segundo lote de maderas de diferentes especies. Se analizan las variaciones que se producen en el tiempo de llegada, la velocidad de propagación, la constante dieléctrica, la amplitud y el espectro de frecuencias de las señales.

La capacidad del georradar para caracterizar maderas de diferentes especies se estudia en el **capítulo 7**. Para ello se trabaja con un lote de maderas de diferente densidad (con un amplio rango de variación de este parámetro). Se analiza en detalle la variación que se produce como consecuencia de la densidad en los distintos parámetros de las ondas electromagnéticas (velocidad de propagación, constante dieléctrica, amplitud y espectro de frecuencia).

En la **tercera parte** de la tesis se comparan los resultados obtenidos del análisis de las tres propiedades anteriormente mencionadas (anisotropía dieléctrica, contenido de humedad y densidad) por medio de georradar con los obtenidos por otras técnicas. En concreto en el **capítulo 8** se comparan con los resultados de la técnica semi-destructiva del resistógrafo y con los de la técnica no destructiva de ultrasonidos por ser ambas de las más aceptadas dentro de su categoría en el sector de la madera estructural.

En la **cuarta parte** se evalúan las propiedades mecánicas de la madera por medio de georradar. En primer lugar en el **capítulo 9**, se describe cual es el contexto normativo actual de la clasificación resistente de la madera estructural y las principales limitaciones de aplicación que presenta. A continuación se clasifica un lote de viguetas de *Pinus radiata* D. Don., según la norma de clasificación visual UNE

56544:2007 y por la técnica no destructiva de ultrasonidos. Para este mismo lote se propone una clasificación estructural basada en el análisis cualitativo de los registros de georradar. Finalmente se determina la fiabilidad de estos métodos contrastando los resultados obtenidos con cada uno de ellos con los resultados reales obtenidos a partir de los ensayos de rotura regulados por la norma UNE-EN 408:2004 y la norma de asignación de clases resistentes UNE-EN 338:2003.

Por último, en el **capítulo 10** se resumen los resultados, se presentan las conclusiones y se indican futuras líneas de trabajo y de investigación. Seguidamente, se incluyen las referencias bibliográficas ordenadas alfabéticamente.

En los **anexos** se muestra la información de los distintos tipos de madera empleadas a lo largo de la tesis codificadas según la norma UNE-EN 13556:2004. Por último se incluyen los valores dimensionales, contenido de humedad y clasificación resistente por los diferentes métodos aplicados del lote de viguetas de madera de *Pinus radiata* D. Don. empleado en el capítulo 9.

CAPÍTULO 2
EL GEORRADAR

La técnica de georradar se ha ido desarrollando y empleando desde los años cincuenta en investigaciones de alta resolución del subsuelo o de ciertos medios en geología, ingeniería, minería y glaciología. Se ha convertido, en poco tiempo, en una herramienta prospectiva multidisciplinar y de gran resolución para profundidades que van desde centímetros hasta decenas de metros (se alcanzan 50 m de profundidad). En la actualidad se aplica en muy diversas áreas: ingeniería civil, geología, recursos naturales, hidrología, estudios del medio ambiente, arqueología, patrimonio histórico y artístico.

El carácter no destructivo de esta técnica hace que en la actualidad se esté aplicando en el estudio de edificios históricos para detectar humedades en el subsuelo, determinar profundidades y espesores de zapatas de cimentación, encontrar estructuras o cavidades enterradas en el subsuelo, tales como criptas, enterramientos, etc., como se detalla en Gracia et al. (2000), Pérez (2001), Ranalli et al. (2004), García et al. (2004), García et al. (2007), Ramírez et al. (2008) y Pérez et al. (2008). Todo ello en edificios en los que dado su valor histórico, arquitectónico o cultural, se ha de realizar de forma no invasiva.

Asimismo, en los últimos años se está aplicando para 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 como Lualdi (2003), Maierhofer (2003), Porsani et al. (2006) y Benedetto y Pensa (2007).

En la actualidad existen pocos trabajos relacionados con la aplicación del georradar al estudio de la madera. Tan sólo hay algunos que lo aplican para detectar las raíces de los árboles siempre y cuando haya suficiente contraste dieléctrico entre las raíces y el suelo, como son Butnor et al. (2001) y Butnor (2003) e incluso algunos autores evalúan el contenido de humedad en la zona de las raíces por medio de georradar como al Hagrey y Müller (2000), Hruska et al. (1999) y al Hagrey (2007).

Recientemente se han realizado estudios sobre la potencialidad de la aplicación de la técnica del georradar a diversos aspectos de la inspección, clasificación y caracterización de la madera estructural realizado por miembros de la Universidad Politécnica de Valencia como Capuz et al. (2007), Rodríguez-Abad et al. (2007a), Rodríguez-Abad et. al. (2007b), Rodríguez-Abad et al. (2008a), Rodríguez-Abad et al. (2008b), Rodríguez-Abad et al. (2009a) y Rodríguez-Abad et al. (2009b) presentados en diferentes congresos nacionales e internacionales con resultados muy prometedores.

A continuación se describen brevemente los conceptos teóricos del fundamento de la técnica necesarios para la comprensión del estudio realizado en esta tesis. Todos estos conceptos teóricos se encuentran expuestos extensamente en otras tesis doctorales españolas como la de Lorenzo (1994), García (1997) y Pérez (2001).

2.1.- FUNDAMENTO DE LA PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

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. Estas relaciones se completan con las denominadas ecuaciones de continuidad, que especifican el comportamiento de estos campos en las zonas en las que existen distribuciones superficiales de carga, es decir, ahí donde se tienen discontinuidades en el medio. A partir de estas ecuaciones se puede determinar el comportamiento de una onda electromagnética durante su propagación por un medio determinado.

$$\nabla \vec{D} = \rho_f \quad [2.1]$$

$$\nabla \vec{B} = 0 \quad [2.2]$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{M} \quad [2.3]$$

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad [2.4]$$

donde \vec{D} es el vector de desplazamiento eléctrico (C/m^2), ρ_f es la densidad de carga libre (C/m^3), \vec{B} es la inducción magnética (Wb/m^2), \vec{E} es la intensidad del campo eléctrico (V/m), \vec{M} es la imanación (A/m), \vec{H} es la intensidad del campo magnético (A/m) y \vec{J} (A/m^2) es la densidad de corriente debida al movimiento de cargas en la materia.

Para medios homogéneos e isotropos, las ecuaciones anteriores se relacionan por medio de la permitividad dieléctrica (ϵ), la conductividad (σ) y la permeabilidad magnética (μ) del material:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad [2.5]$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad [2.6]$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad [2.7]$$

Partiendo de las ecuaciones de Maxwell y con la ecuación general de propagación de ondas se pueden obtener las relaciones que rigen la propagación de una onda electromagnética en función de las propiedades del medio por el que se propaga.

2.1.1.- PARÁMETROS ELECTROMAGNÉTICOS DE UN MEDIO

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

La **conductividad** de un medio proporciona una medida de la respuesta de sus cargas libres en presencia de un campo eléctrico externo, es decir, de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica:

$$\vec{J}_f = \sigma \vec{E} \quad [2.8]$$

La conductividad de un material (σ) se expresa en $(\Omega\text{m})^{-1}$ o Siemens/m y es la inversa de su resistividad (Ωm).

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

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

$$\sigma = \sigma' - i\sigma'' \quad [2.9]$$

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

La **permitividad dieléctrica** absoluta es una constante de proporcionalidad entre la intensidad del campo eléctrico externo aplicado (\vec{E}) y el vector desplazamiento eléctrico (\vec{D})

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad [2.10]$$

Asimismo, la permitividad absoluta (ϵ), cuyas unidades son F/m, se define como el producto entre una permitividad relativa del material (ϵ_r), que es una constante adimensional y la permitividad dieléctrica del vacío ($\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m).

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad [2.11]$$

La permitividad dieléctrica relativa del material es una constante que da una medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Para la mayoría de los materiales que se pueden encontrar al realizar una prospección electromagnética, los valores de ε_r se encuentran entre 1 (la del aire) y 81, siendo esta última la ε_r del agua a 20°C.

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

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad [2.12]$$

Este parámetro y la conductividad están relacionados entre sí. La parte real de la permitividad dieléctrica relativa del material y la imaginaria de la conductividad generan una corriente que varía en fase con el campo eléctrico aplicado. La parte imaginaria de ε_r y la real de la conductividad generan una corriente desfasada respecto al campo eléctrico. La componente imaginaria de la permitividad dieléctrica considera los retardos en la respuesta a la polarización del material sometido a un campo electromagnético (Sutinen, 1992), es decir, indica el factor de pérdidas dieléctricas. Por otro lado también contiene el factor que indica las pérdidas por conducción.

Es importante resaltar que tanto la parte real como la imaginaria de la permitividad dieléctrica relativa del medio varían en función de la frecuencia. Hay diferentes mecanismos que caracterizan esta dependencia (Robert, 1996). Para altas frecuencias (entre 10 MHz y 1 GHz), en la mayor parte de los materiales del subsuelo, los fenómenos de desplazamiento (o polarización)

dominan sobre los fenómenos de conductividad. De esta forma, los medios suelen caracterizarse a partir de la parte real de ε_r a esta frecuencia de estudio.

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

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} \quad [2.13]$$

La permeabilidad relativa del material depende a su vez de la susceptibilidad magnética del mismo (χ_m), que a su vez es la constante de proporcionalidad entre la imanación de un material y la intensidad de campo magnético externo. La permeabilidad magnética relativa se puede escribir de forma compleja como:

$$\mu = \mu' - i\mu'' \quad [2.14]$$

La parte real de esta expresión da idea de la energía magnética almacenada en el material y se le denomina permeabilidad magnética elástica. La parte imaginaria determina la cantidad de pérdidas magnéticas debidas a corrientes turbillonarias, histéresis, viscosidad magnética del material, etc., y se denomina permeabilidad magnética viscosa. En la mayor parte de los materiales que se encuentran en los estudios con georradar (excepto en aquellos que contengan materiales ferromagnéticos) se cumple que la permeabilidad magnética es próxima a la unidad, no dependiendo de la frecuencia del campo magnético.

2.1.2.- VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN, LONGITUD DE ONDA Y ATENUACIÓN

A partir de las cuatro ecuaciones formuladas por Maxwell y la ecuación de una onda plana que se propaga en un medio, se pueden calcular las relaciones que definen la propagación de las ondas electromagnéticas en un material. Considerando el caso de una onda plana que se propaga en la dirección \vec{r} suponiendo una variación del campo armónica respecto al tiempo, es decir, dependiente de $e^{i\omega t}$, se tiene:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{(i\omega t - \gamma \vec{r})} \quad [2.15]$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}_0 e^{(i\omega t - \gamma \vec{r})} \quad [2.16]$$

Estas expresiones tienen una parte que define la propagación de la onda con el tiempo, mientras que el otro término muestra la disminución de la amplitud de la onda con la distancia recorrida, es decir, considera la atenuación de la onda electromagnética durante su propagación por el medio. El término de la amplitud (que consta de una amplitud inicial en un punto dado y de un término de atenuación con la distancia a dicho punto) depende de un factor de decaimiento, denominado constante de propagación o número de onda complejo (γ).

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0 e^{(-\gamma \vec{r})} \quad [2.17]$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = \vec{H}_0 e^{(-\gamma \vec{r})} \quad [2.18]$$

La constante de propagación puede expresarse en función de los parámetros electromagnéticos característicos de cada medio introduciendo las relaciones

que se contemplan en las ecuaciones de Maxwell (Stewart et al., 1994), (García, 1997).

$$\gamma = iw\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r} = i\frac{w}{c}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r} = i\frac{2\pi}{\lambda_0}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r} \quad [2.19]$$

donde w es la pulsación de la onda emitida, c es la velocidad de una onda electromagnética en el vacío, λ_0 es la longitud de la misma onda también en el vacío. Asimismo, considerando las componentes real e imaginaria de la constante de propagación se tiene:

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad [2.20]$$

donde la componente real de la constante de propagación es el denominado factor de atenuación de la onda y la imaginaria es la constante de fase de la onda que determina la velocidad de fase de la misma. De esta forma, a partir de β se determina la velocidad de la onda en el medio material (v) en el cual se está propagando.

$$v = \frac{w}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{w\varepsilon}\right)^2} + 1 \right)}} \quad [2.21]$$

En medios no magnéticos la expresión se simplifica ya que $\mu_r=1$; de forma que la expresión que comúnmente se puede utilizar es:

$$v = \frac{c}{\text{Re}\sqrt{\varepsilon_r}} \quad [2.22]$$

Cuando los medios son dieléctricos o poco conductores el término asociado con la conductividad es pequeño. Si además se tiene en cuenta que las frecuencias habituales de trabajo están situadas entre 10 MHz y 1 GHz se puede considerar que $\varepsilon'' \ll \varepsilon'$ (ecuación 2.12). Esto es debido a que el término asociado con la relajación de la molécula de agua y, por lo tanto, con la parte imaginaria de la permitividad es muy pequeño. En estos casos la ecuación 2.22 puede simplificarse.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}} \quad [2.23]$$

La velocidad más elevada se obtiene para el aire, mientras que la menor la presenta el agua. El resto de materiales están situados entre estos dos valores.

La longitud de onda en un medio dado (λ_m), depende de la velocidad de fase y de la frecuencia de la onda emitida y en definitiva de la longitud de onda en el vacío (λ_0).

$$\lambda_m = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{w} v = \frac{2\pi}{w} \frac{c}{\text{Re} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} = \frac{\lambda_0}{\text{Re} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \quad [2.24]$$

En medios no magnéticos ($\mu_r = 1$), la expresión se simplifica, quedando:

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{\text{Re} \sqrt{\varepsilon_r}} \quad [2.25]$$

La atenuación de una onda electromagnética debido a las características del material por el que se propaga es un tema que ha sido planteado en diversas ocasiones tanto teóricamente por autores como Carcione (1996a), Turner y Siggins (1994) y Zonghou y Tripp (1997), como a partir de simulaciones

numéricas realizadas por Carcione (1996b) y Casper y Kung (1996) y Xu y McMechan (1997),

La componente real de la constante de propagación caracteriza el grado de disminución de la amplitud de la onda conforme aumenta la distancia al punto en el cual se ha generado. A este parámetro se le denomina factor de atenuación y sus unidades son m^{-1} tal y como exponen Cai y McMechan (1995) y García (1997)

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \text{Im} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad [2.26]$$

El grado de atenuación de una onda electromagnética se define como el cociente entre las amplitudes de las oscilaciones de la onda en dos puntos separados una distancia r . Al tomar la ecuación de propagación de ondas, esta relación queda como:

$$\frac{\vec{E}_0}{\vec{E}(\vec{r})} = e^{\alpha \vec{r}} \quad [2.27]$$

Si se toman logaritmos de [2.27], se puede medir el grado de atenuación en nepers (en el caso de considerar logaritmos neperianos). En el caso de considerar logaritmos decimales, se obtiene un parámetro del grado de atenuación (decibelios). Este parámetro permite obtener el grado de decaimiento de la amplitud de la onda conforme ésta se propaga por el medio material.

$$L = \ln \left(\frac{\vec{E}_0}{\vec{E}(\vec{r})} \right) = \alpha \vec{r} \quad [2.28]$$

$$L = 20 \log \left(\frac{\vec{E}_0}{\vec{E}(\vec{r})} \right) = 20(\log e) \alpha \vec{r} \quad [2.29]$$

2.1.3.-PARÁMETROS EFECTIVOS

Las corrientes en fase respecto al campo eléctrico producen una conductividad que se denomina efectiva y que es el valor mensurable de este parámetro como describen Turner y Siggins (1994) y Sutinen (1992). La conductividad efectiva es la suma de los efectos de la componente real de la conductividad compleja y del efecto de la componente imaginaria de la permitividad dieléctrica relativa del medio:

$$\sigma_{ef} = \sigma' + w \varepsilon'' \quad [2.30]$$

La permitividad efectiva está compuesta en parte por la componente real de la permitividad dieléctrica relativa del medio y en parte por el efecto de las cargas libres (parte imaginaria de la conductividad compleja). Esto da lugar a que se produzca una corriente en desfase respecto al campo eléctrico. Este efecto es importante a altas frecuencias (Carcione, 1996a) y debe tenerse en cuenta cuando se trabaja con frecuencias en la banda de las microondas (antenas de 1 GHz y frecuencias superiores).

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon' - \frac{\sigma''}{w} \quad [2.31]$$

Son estos parámetros efectivos (σ_{ef} , ε_{ef}) los que se pueden medir en experiencias de laboratorio. De esta forma son éstos los que se utilizan para calcular la velocidad de propagación de la onda electromagnética por el medio y la atenuación de la energía que se produce durante esta propagación. En los

siguientes capítulos para simplificar se emplea el término de constante dieléctrica (ϵ) cuando realmente lo que se está calculando es la parte real de la permitividad dieléctrica relativa del medio (ecuación 2.11 y 2.12).

2.1.4.-REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

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.

La impedancia de un campo electromagnético (η) es el cociente entre el campo eléctrico y el campo magnético. De esta forma se define la impedancia para el campo electromagnético incidente (η_i) que coincide con la del campo magnético reflejado y la del refractado (η_2). A partir de las expresiones de las impedancias se pueden calcular los coeficientes de transmisión ($T_{1 \rightarrow 2}$) y de reflexión ($R_{1 \rightarrow 2}$) de Fresnel de la energía, como el cociente entre el campo incidente (\vec{E}_i) y el campo refractado (\vec{E}_t), y el cociente entre el campo incidente y el campo reflejado (\vec{E}_r):

$$R_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} = \frac{\eta_2 \cos t - \eta_1 \cos i}{\eta_1 \cos i + \eta_2 \cos t} \quad T_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} = \frac{2\eta_2 \cos t}{\eta_1 \cos i + \eta_2 \cos t} \quad [2.32]$$

siendo i el ángulo de incidencia de la onda sobre la superficie plana, y t el de refracción.

La suma del coeficiente de reflexión (que representa el porcentaje de energía reflejada de la energía incidente) y del coeficiente de refracción (que representa el porcentaje de energía transmitida al segundo medio, de la energía incidente), es la unidad.

En los estudios que se realizan con georradar pueden simplificarse estas expresiones, ya que el sistema opera con reflexión de muy pequeño ángulo, pudiendo considerar que se trabaja con incidencia normal en el caso de que la superficie reflectora sea plana. En estas condiciones, los coeficientes de reflexión y de transmisión únicamente dependen de la relación entre impedancias. Si además se trabaja en medios no magnéticos las ecuaciones de 2.32 se simplifican.

$$R = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad T = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad [2.33]$$

En los estudios con georradar los valores de R elevados implican la posibilidad de observar en los registros con más facilidad la onda reflejada. No obstante, esto da lugar a que la penetración de la señal disminuya y las reflexiones producidas en contrastes posteriores sean de menor amplitud. Esto es debido a que el porcentaje de energía refractada es menor, lo que contribuye a que la amplitud de la onda en posteriores reflexiones también sea menor.

Cuando el cálculo del cociente de las ecuaciones de 2.32 se realiza a partir de las amplitudes registradas se obtienen los coeficientes de reflexión r y de transmisión t en amplitud:

$$r = \frac{A_r}{A_i} \quad t = \frac{A_t}{A_i} \quad [2.34]$$

siendo A_i la amplitud de la onda incidente en la discontinuidad y A_r la amplitud de la onda reflejada y A_t la amplitud de la onda refractada o transmitida. Los coeficientes de reflexión y transmisión de las ecuaciones 2.32 y 2.34 están relacionados entre sí de la siguiente manera (Lorenzo, 1994):

$$R = r^2 \quad T = t^2 \quad [2.35]$$

2.2.- CARACTERÍSTICAS DE LA PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN MEDIOS MATERIALES

Los parámetros que influyen en la velocidad de la onda son la permitividad dieléctrica relativa del medio, la conductividad, la permeabilidad magnética y la frecuencia de la emisión. Los tres primeros son característicos del medio, mientras que el cuarto depende del equipo empleado.

Además durante la propagación de una onda electromagnética por un medio se producen pérdidas de energía debido a diferentes 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 ondas, 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.

A.- Dispersión geométrica del frente de ondas

La emisión de las ondas de georradar se produce en forma de un haz de energía aproximadamente cónico, con sección elíptica. La mayor parte de la energía radiada queda comprendida dentro de la zona definida por el ángulo de radiación, que en muchas de las antenas utilizadas actualmente es de 45° . Esto quiere decir que la antena radia la mayor parte de la energía en un haz cónico cuyo ángulo mayor (en la dirección de desplazamiento de la antena) es de unos 90° . En este caso o en el caso de poder considerar el dipolo emisor como puntual, si se considera además que el medio por el que se propaga la energía es homogéneo y no absorbente, la reducción de energía es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia recorrida.

B.- Fenómenos de absorción

La absorción se produce cuando durante la propagación de la onda parte de la energía electromagnética se convierte en calor (Reynolds, 1997). Esto es consecuencia de la polarización por orientación de las moléculas de agua, fenómeno que aparece para frecuencias de la banda de microondas y de la banda de las radiofrecuencias (Ulriksen, 1982). Otros tipos de polarización se producen a otras frecuencias (infrarrojos y ultravioletas): la polarización iónica y la polarización electrónica. Estos tres fenómenos se caracterizan por una disminución del valor de la parte real de la permitividad dieléctrica relativa y un aumento de la parte imaginaria. Esto da lugar a un aumento del ángulo de

pérdidas dieléctricas como muestran Cabrera et al. (1993) y Sutinen (1992). No obstante, en la banda de frecuencias en la que opera el georradar únicamente se produce el fenómeno de polarización por orientación. Este fenómeno consiste en la orientación de la molécula de forma que su carga positiva se desplaza respecto a la negativa en la dirección del campo eléctrico aplicado.

La permitividad dieléctrica es el parámetro que describe la capacidad de que cargas opuestas dentro de un mismo material se separen una cierta distancia (capacidad de polarización del material). En general, para la mayoría de materiales la polarización por orientación es reducida porque sus moléculas no tienen suficiente libertad para poder orientarse en la dirección del campo eléctrico, lo que sí ocurre con el agua. De esta forma, la existencia de agua en los poros de un medio determinado aumenta la capacidad de polarización del medio. Esto indica que las pérdidas de energía por esta causa son menores en el caso de medios con un bajo contenido de humedad que en medios de humedad elevada. Se cita comúnmente el contenido de agua como una de las causas de mayor peso en la atenuación de las ondas. Este efecto es muy importante sobre todo para las frecuencias más altas.

La atenuación como resultado de la absorción de energía por el medio se produce como consecuencia de las características electromagnéticas del material por el que se propaga la onda y es la causa fundamental de las pérdidas de energía en el caso de medios materiales. El factor de atenuación (α) depende de la permitividad dieléctrica del medio (ϵ_r), de su conductividad (σ), de la permeabilidad magnética (μ) y de la pulsación de la onda emitida (ω). A partir de [2.26] y [2.27] y el valor de μ y ϵ se llega a la siguiente expresión.

$$\alpha = \omega \left[\left(\frac{\mu \epsilon}{2} \right) \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right]^{1/2} \quad [2.36]$$

siendo la pulsación de la onda $\omega = 2\pi f$, f la frecuencia (Hz).

El factor de pérdidas (P) se define como el cociente entre la conductividad y el producto de la pulsación por la permitividad dieléctrica relativa del medio. Esta relación define los medios entre los llamados de pequeñas pérdidas y los que se denominan medios de grandes pérdidas. Los materiales en los que $P \ll 1$ son los denominados materiales dieléctricos o casi dieléctricos.

$$P = \frac{\sigma}{\omega \epsilon} = \tan \delta \quad [2.37]$$

siendo δ el denominado ángulo de desfase.

C.- Dispersión de la energía ("scattering")

Este fenómeno se produce cuando la energía electromagnética incide en objetos cuyas dimensiones son del orden de su longitud de onda o inferiores. En estos casos se produce una distribución aleatoria de la energía incidente. El resultado es una disminución de la amplitud de la onda y la generación de un ruido aleatorio de fondo. Estos efectos son mayores cuando el tamaño de los objetos anómalos (o de las heterogeneidades del material en el que se propaga la energía) es del orden de la longitud de onda. Este efecto es más evidente cuando en el estudio se utilizan antenas de más alta frecuencia, ya que en estos casos la longitud es de orden centimétrico.

Otro factor que se incluye en este apartado es la denominada dispersión cromática (Cabrera et al., 1993). En los medios transparentes a una radiación la ϵ_r depende de la frecuencia de la onda, ya que la velocidad depende de este parámetro. La velocidad de grupo se obtiene calculando la velocidad de desplazamiento del máximo de la envolvente, pudiendo escribir la velocidad de grupo (v_g) mediante una expresión que depende de la velocidad de fase (v_f) y de un término que se denomina dispersión cromática.

$$v_g = v_f - \lambda \frac{\partial v_f}{\partial \lambda} \quad [2.38]$$

2.3.- INSTRUMENTACIÓN Y MÉTODOS DE ADQUISICIÓN DE REGISTROS

En este apartado se describen los componentes del equipo del georradar, su funcionamiento y los métodos de adquisición de datos, haciendo especial énfasis en el funcionamiento de las antenas.

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

2.3.1.- COMPONENTES DEL EQUIPO DE 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**. En la figura 2.1 se muestra un esquema de las diferentes componentes del georradar, del proceso de adquisición de datos y los registros obtenidos en los que se aprecia la reflexión

en la interfase aire-madera (onda directa) y la reflexión en la interfase madera-aire (onda reflejada).

A.- Unidad central

La unidad central o unidad de control de un georradar es donde se realiza la coordinación y control de las antenas, de los diversos accesorios que se pueden añadir al equipo básico y de la señal emitida. También coordina el almacenamiento de la señal en algún tipo de soporte (magnético, fotográfico, en papel) y, en algunos casos, permite realizar el tratamiento básico de las señales durante la adquisición de datos.

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.

B.-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.

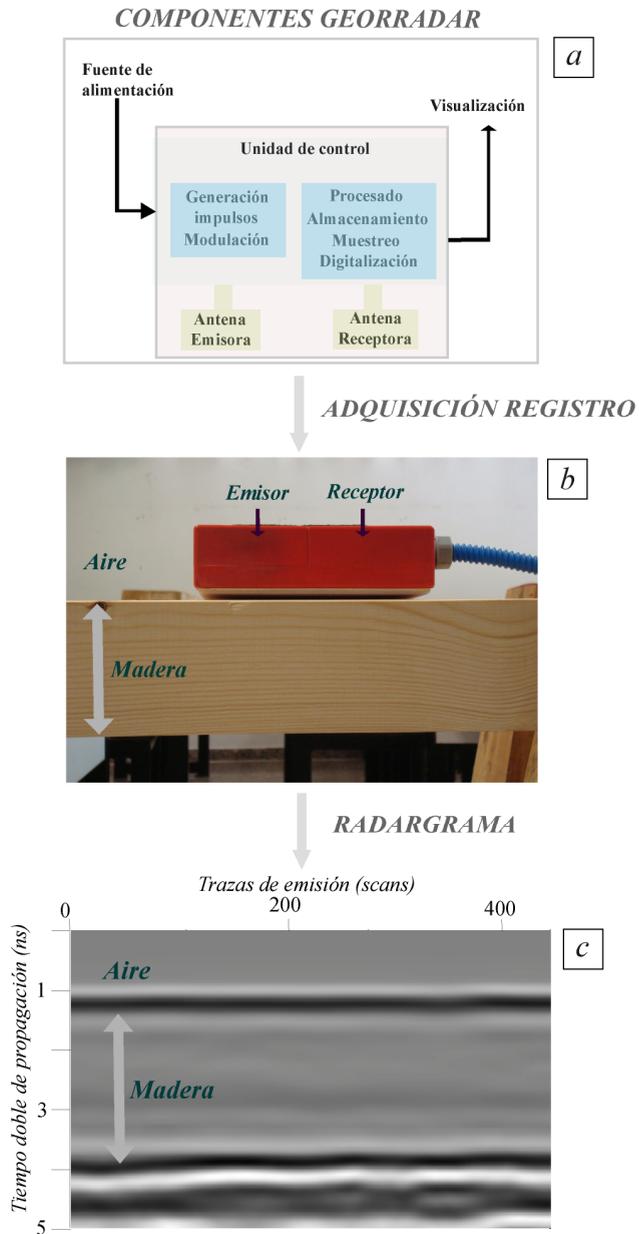


Figura 2.1.- (a) Esquema simplificado de las diferentes componentes de un equipo de georradar; (b) Antena de 1.6 GHz emitiendo sobre madera; (c) Radargrama obtenido en una adquisición puntual de registros.

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

El parámetro que caracteriza a las antenas teniendo en cuenta estas consideraciones es la direccionalidad (también llamada directividad). Se define como el cociente de la densidad de potencia que se tiene a una cierta distancia de la antena direccional emisora y la densidad de potencia que se tendría en ese mismo punto si la antena emisora fuese isotrópica y radiase la misma potencia que la primera.

Las antenas del georradar suelen ser antenas de media longitud de onda, es decir, antenas con una espira que funciona como un dipolo, emitiendo energía según un modelo de radiación ya conocido (Duke, 1990). Asimismo, el modelo de radiación de las antenas depende de las características electromagnéticas de los medios en contacto tal como describen Arcone (1996) y Conyers y Goodman (1997). De forma general, conforme aumenta la permitividad dieléctrica efectiva de un medio, la direccionalidad de la antena aumenta también. Esto conlleva una anchura del lóbulo de radiación menor, de forma que un mayor porcentaje de energía se propaga en la dirección deseada y una parte menor es la que se propaga por el exterior del medio a analizar. La dependencia entre la anchura del lóbulo principal y la permitividad dieléctrica relativa efectiva del medio viene dada por el ángulo (β) entre la vertical y el límite del haz principal

(semianchura del lóbulo) y la permitividad dieléctrica efectiva relativa del medio (ϵ_r) que se está estudiando y que se encuentra en contacto con el aire.

$$\beta = \arcsin \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad [2.39]$$

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

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad [2.40]$$

Cada tipo de antena se escoge debidamente de acuerdo con las necesidades de su utilización. En la tabla 2.1 se presenta la división general por bandas 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.

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.

Tabla 2.1.- Bandas de frecuencia y longitudes de onda correspondientes a cada banda para la propagación en el vacío.

<i>Frecuencia</i>	<i>Longitud de onda</i>	<i>Denominación</i>
<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

Una tercera clasificación de antenas de georradar se realiza dependiendo del número de dipolos implementados. Se distingue entre antenas monoestáticas (primer caso) y biestáticas (segundo caso).

Las 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.

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.

C.- 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.

Asimismo, para efectuar el estudio se pueden utilizar equipos complementarios que simplifican el trabajo y que permiten mayor precisión en la interpretación final de los datos. Estos equipos no se conectan a la unidad central, pero son útiles tanto durante los trabajos de campo como durante el procesado posterior de los registros. Se pueden agrupar en equipos para tratamiento de datos y visualización de datos, equipos para situar perfiles y otros equipos complementarios para transporte del georradar y de las antenas y para facilitar su manejo.

2.3.2.- 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.

Hay otros métodos de adquisición de registros heredados de la técnicas empleadas en sísmica como el Common Mid Point, la transiluminación, la tomografía, la reflexión y refracción de gran ángulo y los sondeos, que consisten en aprovechar la colocación de la antena en diferentes posiciones para obtener diferentes trayectorias de rayos, con el objeto de mejorar la identificación de los parámetros de propagación de las ondas en el medio de estudio.

2.4.- TRATAMIENTO DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE REGISTROS

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.

2.4.1.-PARÁMETROS DE UN REGISTRO. INFORMACIÓN EN LA CABECERA DE UNA TRAZA

Los parámetros que definen al radargrama se recogen en la cabecera del archivo de registro. 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.

En la figura 2.2 se presenta una cabecera de registro donde se aprecian los valores introducidos de los parámetros anteriormente nombrados y que son accesibles mediante el software de procesamiento de datos.

The screenshot shows the 'Edit File Header' dialog box. The 'FILE NAME' is 'FILE3', 'Created' is 'Nov, 28 2008, 13:44:52', and 'Modified' is '00:00:00'. The 'Channel(s)' is '1'. The 'samp/scan' is '512', 'bits/sample' is '16', 'scans/sec' is '80', 'scans/ m' is '263', 'm /mark' is '6', and 'DielConstant' is '0'. The 'Channel Information' section shows 'Channel' as '1', 'Antenna' as '5100 1500 MHZ', and 'Comp' as 'NONE'. The 'Range Gain (dB)' is '0.0 12.0 20.0', 'Position (nS)' is '-0.5', 'Range (nS)' is '5', 'Top (m)' is '0', and 'Depth (m)' is '0'. The 'Range Gain' section also includes 'Vert IIR LP N =2 F =3000 MHz', 'Vert IIR HP N =2 F =600 MHz', and 'Static Stacking N=4'. The bottom buttons are 'Save', 'Save As', 'Cancel', '3D Options', and 'Help'.

Figura 2.2.- Cabecera de un registro obtenido con el georradar SIR10-H (GSSI), en el que se detallan los principales parámetros del registro: modelo de la antena (5100), frecuencia central de emisión según GSSI (1500 MHz), rango del registro (Range $R=5$ ns), posición de inicio de la señal (Position $P=-0.5$ ns), puntos por traza (samp/scan 512), función de ganancia (Range gain (dB), función de 4 puntos (0, 12, 20, 20), etc.

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. Por ejemplo, en el caso del registro mostrado en la cabecera de la figura 2.2 sólo se registran aquellos eventos incluidos en un intervalo temporal de 5 ns (valor de R).

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 (Conyers y Goodman, 1997). 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 (Conyers y Goodman, 1997). 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.-Velocidad de transmisión y de registro

El número de pulsos por segundo que puede transmitir y registrar un georradar son dos parámetros que se pueden ajustar antes o durante la adquisición de datos, de acuerdo con las necesidades del estudio. Aunque los equipos de georradar habituales pueden transmitir más de 25.000 pulsos por segundo (Conyers y Goodman, 1997), la tecnología actual no permite estas velocidades de registro. El equipo de georradar no puede registrar cada una de las trazas individuales reflejadas a partir de cada pulso transmitido a causa de la alta velocidad de propagación. Para solventar este problema los equipos efectúan un muestreo de la señal obteniendo información de varios pulsos emitidos para reconstruir una única traza.

Una vez seleccionada la velocidad de transmisión de pulsos al medio se puede estimar la velocidad de registro teniendo en cuenta el muestreo deseado. Si se

pretende que cada traza recibida se reconstruya a partir de 512 puntos y la velocidad de transmisión es de 50 kHz, el número máximo de trazas registradas cada segundo resulta ser de 97 scans/s, valor obtenido efectuando el cociente entre la velocidad de transmisión y el número de puntos de muestreo.

A partir de esta velocidad de registro máxima se selecciona la velocidad de registro que se utilizará en el estudio. Para ello se ha de tener en cuenta la resolución horizontal que se pretende alcanzar (el número mínimo de trazas que ha de contener el evento producido por la reflexión de la energía en el elemento de menor tamaño) y la velocidad a la que se desplaza la antena sobre la superficie del medio. Los valores más elevados de la velocidad de registro se utilizan únicamente en el caso de que la velocidad de desplazamiento de la antena sea muy elevada o si se necesita una resolución horizontal extremadamente alta para identificar las reflexiones en elementos del medio.

E.-Superposición de trazas

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

Una superposición de trazas excesiva, sobre todo en una zona donde se producen eventos hiperbólicos (ocasionados en elementos finitos) puede disminuir sus amplitudes hasta un nivel en que no se puedan distinguir, obteniendo un radargrama característico de un medio continuo. Normalmente no es posible efectuar una superposición de más de 3 a 6 trazas para poder obtener una imagen del medio que pueda considerarse continua (Maijala, 1992).

F.-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.

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

G.-Filtros frecuenciales aplicados durante la adquisición de datos

En la cabecera de los registros también se indican los distintos filtros aplicados durante la toma de datos en campo. La posibilidad de aplicar un filtrado simultáneo con la adquisición de datos es una opción polémica. Una adquisición de datos con un filtro aplicado impide registrar parte de la señal que llega a la antena, pudiendo de esta forma, en el caso de no seleccionar correctamente el filtrado aplicado, perder datos que pudieran ser de interés. Sobre todo porque en muchas ocasiones no se considera o no se conoce exactamente la variación producida en el rango de frecuencias y en las frecuencias centrales a causa de los efectos de filtrado producidos por los distintos medios.

Sin embargo, en ocasiones, es necesario realizar un filtrado previo durante la adquisición de datos, sobre todo en los casos en los que se requiere una interpretación rápida, de forma casi simultánea a la adquisición de datos, no pudiendo esperar a una interpretación posterior. En este caso, es necesario conocer lo mejor posible el comportamiento de las antenas y los rangos de frecuencias emitidos y recibidos (Conyers y Goodman, 1997). Si estos parámetros se controlan, el filtrado puede mejorar notablemente la señal, facilitando la interpretación rápida de los datos.

Diversos investigadores consideran que las mejores interpretaciones pueden obtenerse si se realiza la adquisición y almacenamiento de datos de las dos formas diferentes: con y sin filtros. Posteriormente, durante la interpretación y el tratamiento, deben compararse los dos registros (Conyers y Goodman, 1997). Los dos tipos de filtros que se pueden aplicar usualmente durante la adquisición de datos son los denominados filtros verticales y filtros horizontales.

Los filtros verticales son los denominados filtros F-k o filtros temporales, ya que se aplican a cada una de las trazas del registro, en la coordenada temporal (eje vertical) de los registros. Los filtros horizontales se denominan también filtros espaciales, ya que se trata de un filtrado en la dirección horizontal y su objetivo es eliminar el ruido de fondo que se observa en el radargrama.

2.4.2.-REGISTROS DE AMPLITUDES

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

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

Cada una de las trazas que forman parte del radargrama es un registro de amplitudes debidas a las reflexiones producidas en el interior del medio. 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. 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.

En el ejemplo mostrado en la figura 2.3 se elige la tabla de color 6 con una función $X_{form} 1$, indica el tamaño del intervalo de amplitudes que tiene cada color. Con esta escala se le asigna color blanco a las mayores amplitudes positivas, de esta forma cuando aparecen en el radargrama significa que hay una fuerte reflexión o un alto contraste dieléctrico. Por lo contrario las zonas de color negro uniforme implican zonas de alta homogeneidad y bajo contraste dieléctrico. Efectivamente, en el ejemplo mostrado en la figura 2.3 se trata del

radargrama registrado al desplazar la antena de 1.6 GHz de frecuencia central por una vigueta apoyada sobre un trípode metálico. El mayor contraste dieléctrico se produce en la interfase entre la madera y el trípode metálico y ahí es donde se localizan las mayores amplitudes y el color blanco.

Aplicando diferentes escalas de color no lineales se consigue que se resalten y se diferencien claramente reflexiones de menor amplitud que en el caso de la escala lineal. El resultado de esta operación son unos registros en colores donde las amplitudes similares (incluidas dentro de cada intervalo) quedan representadas por un mismo color.

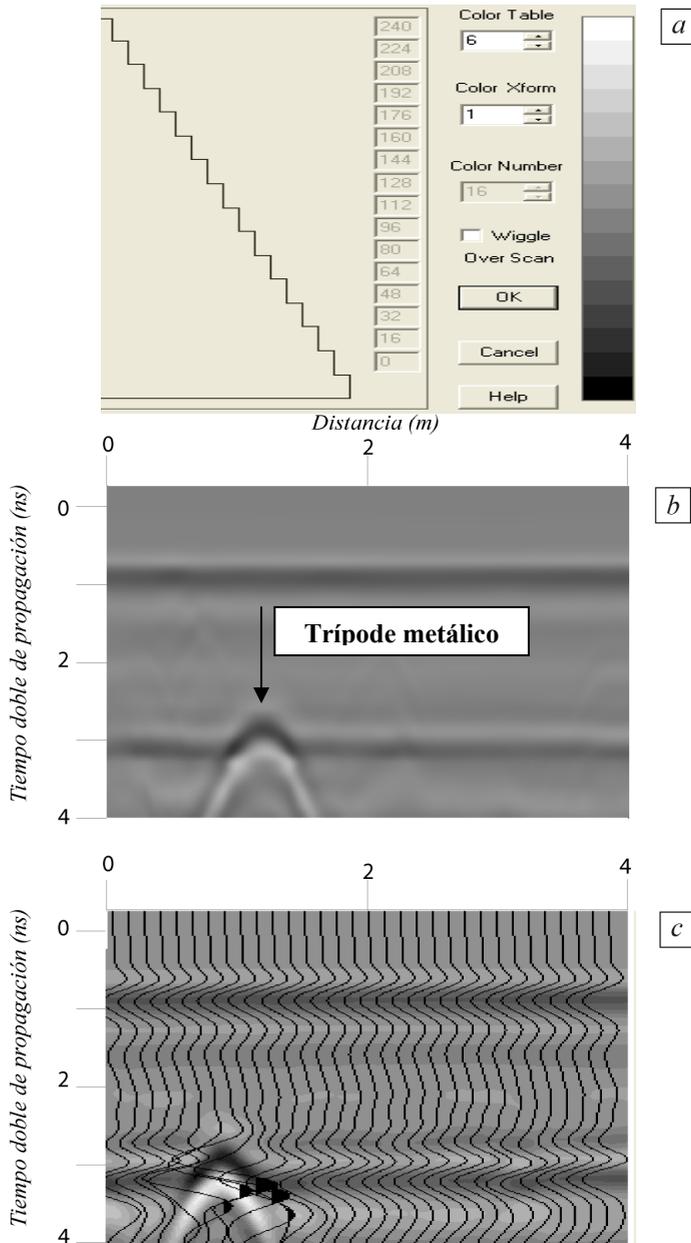


Figura 2.3.- (a) Ventana de diálogo del programa RADANT-NT para la selección de la escala de color para la visualización del radargrama; (b) Radargrama con escala de color 6 y Xform 1 de una vigueta sobre un trípode metálico; (c) Radargrama anterior al que se le superponen las trazas.

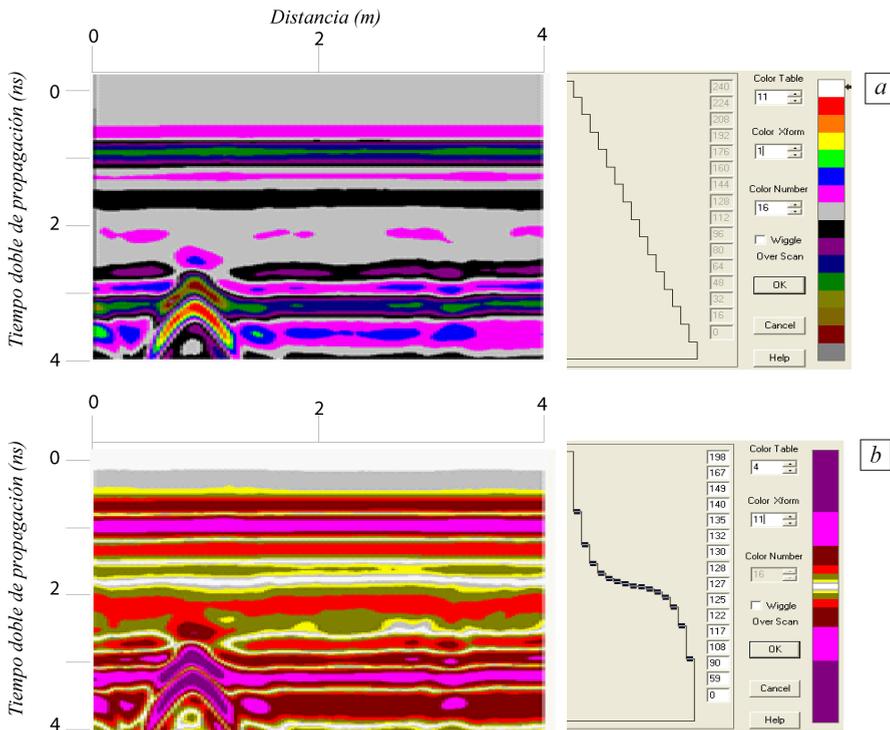


Figura 2.4.- Radargrama registrado con la antena de 1.6 GHz de frecuencia central al desplazar la antena por una viga apoyada sobre un trípode metálico representado con la tabla de color 11 y la función *Xform* 11 (a) y con la tabla de color 4 y la función *Xform* 11(b).

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 2.4 se presenta el mismo radargrama que en la figura 2.3, pero con dos escalas de color diferentes. Se aprecia como el mismo registro, depende de la escala aplicada se ve resaltado un sector u otro del radargrama. Por ejemplo, en la figura 2.4a al aplicar la tabla de color 4 con la función *Xform* 11 se complica la identificación de la onda directa, hasta el punto que es difícil reconocerla.

2.4.3.-OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS NECESARIOS PARA LA INTERPRETACIÓN DE RADARGRAMAS

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

$$h = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \Delta t \quad [2.41]$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \quad [2.42]$$

donde h es la distancia al reflector o espesor del medio que se desea obtener (profundidad), v la velocidad a la que se propaga la onda, c la velocidad de propagación en el vacío (30 cm/ns) y ε_{ef} permitividad dieléctrica efectiva del medio (véase apartado 2.1.3) y Δt 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.

Como ejemplo en la figura 2.5a se muestra un radargrama obtenido de forma puntual al colocar la antena sobre una vigueta de madera y representado en dos escalas de color diferentes. A partir del análisis de las trazas se obtienen los tiempos de llegada de las ondas y junto con el espesor del medio, que es conocido en este caso, se calcula la velocidad de propagación de las ondas y con ello la permitividad dieléctrica efectiva.

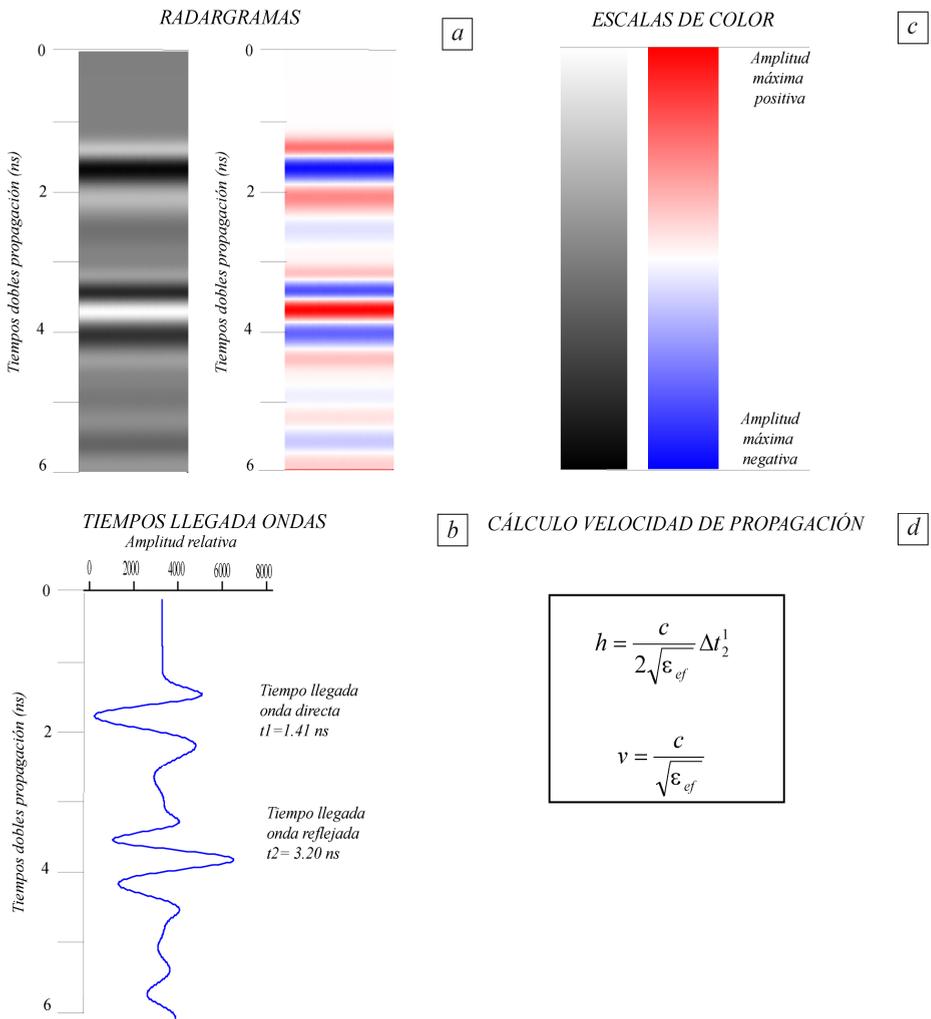


Figura 2.5.- (a) Radargrama de adquisición estática sobre vigueta de madera visualizado con dos tablas de color diferentes; (b) Tablas de color de los radargramas ; (c) Trazo característica del radargrama en el que se indican los tiempos dobles de propagación; (d) Cálculo de la velocidad de propagación y de la permitividad dieléctrica efectiva.

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

CAPÍTULO 3

PRINCIPALES PROPIEDADES DE LA MADERA ESTRUCTURAL

Se inicia el capítulo describiendo la estructura interna de la madera y sus principales propiedades físicas, haciendo especial hincapié en aquellos conceptos que de forma directa afectan en las mediciones con georradar como los procedimientos de determinación del contenido de humedad, densidad, propiedades dieléctricas y resistentes. En la última parte del capítulo se revisan las normas vigentes españolas y europeas sobre la clasificación resistente de la madera.

3.1.- ESTRUCTURA INTERNA DE LA MADERA

Se llama madera al conjunto de tejidos leñosos que forman el tronco, las raíces y las ramas de un árbol, excluida la corteza. En el estudio de la madera para explicar todas las características de su comportamiento físico-mecánico es necesario distinguir tres niveles de observación: **macroscópico**, **microscópico** y **ultramicroscópico**.

La **estructura macroscópica** es la que se puede observar a simple vista o utilizando una lupa de 10 aumentos. De forma macroscópica en una sección de un árbol se puede distinguir la corteza, el cambium, la albura, el duramen y la médula (figura 3.1).

La corteza es una capa de espesor irregular, en la que se encuentran dos zonas claramente diferenciadas. La parte externa, llamada epidermis y está formada por células muertas. La interna, llamada liber, está formada por células vivas, cuya misión es la de proteger y aislar al árbol durante su crecimiento. El cambium, también llamado capa generatriz, se encarga de generar células nuevas, que hacia el interior irán a engrosar la albura y hacia el exterior la corteza.

La albura es la capa exterior de la madera, que contiene gran cantidad de agua, es porosa, en general de poco espesor y poca consistencia. El duramen también conocido como madera perfecta, aparece contiguo a la albura y hacia el interior. Tiene unas características de durabilidad y resistencia máximas, siendo su color normalmente más oscuro que el de la albura. En estas dos última capas se pueden distinguir los anillos de crecimiento en la mayor parte de las especies. Los anillos de crecimiento se pueden apreciar gracias a las diferencias de coloración que presentan según el periodo vegetativo o la época en los que se origina la capa de cambium de la cual nacen. Por último, está la médula que es la parte central del tronco, también llamada corazón.

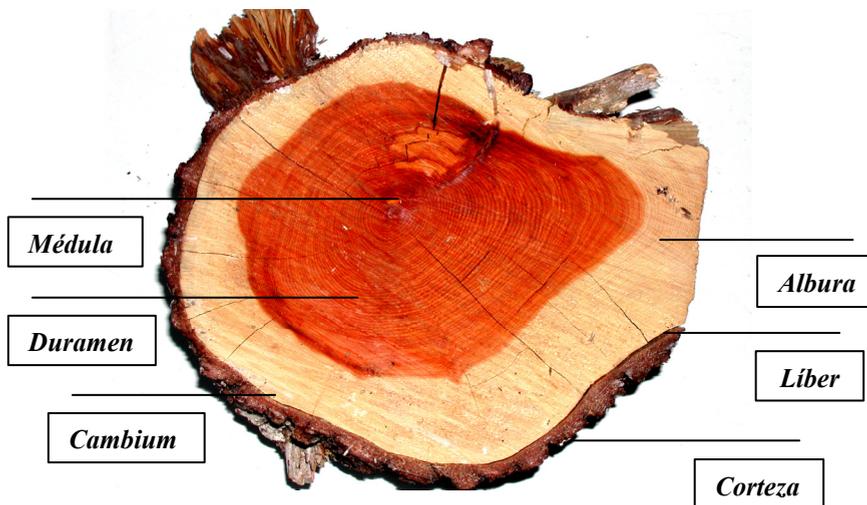


Figura 3.1.- Sección de un árbol en la que se aprecia su estructura macroscópica: la corteza, el cambium, el líber, la albura, el duramen y la médula.

Los radios medulares están constituidos por células dispuestas en dirección radial, es decir, perpendicular al eje del tronco y aportan rigidez a su estructura. Tienen importancia en las propiedades de la madera, ya que son en parte

responsables de las propiedades de contracción de la madera, influyen en la resistencia a la hienda y en la resistencia a la rajadura en las frondosas.

La **estructura microscópica** es la visible con unos 2.000 aumentos. Las coníferas muestran una estructura relativamente sencilla en la que del 90 al 95% son células denominadas traqueidas. Éstas tienen forma alargada con una longitud de 2 a 5 mm y un diámetro de 10 a 50 μm con los extremos cerrados en forma afilada o plana. Estas fibras crecen en sucesivas capas anulares y tienen su eje longitudinal paralelo al eje del tronco del árbol.

La anatomía de las frondosas es más compleja que la de las coníferas. El tejido básico de las frondosas con funciones estructurales está constituido por fibras libriformes, es decir, de paredes más gruesas y traqueidas. Dentro de este tejido existen conductos denominados vasos, con diámetros interiores de cierta entidad y con longitudes variables. La disposición de estos conductos puede ser de forma concentrada (marcando anillos), semi-difusa o difusa. Las fibras de las frondosas tienen paredes de mayor espesor y menor luz interior que las traqueidas de las coníferas

Para apreciar la **estructura ultramacroscópica** se requiere aumentos superiores a 3.000. Los principales elementos químicos que componen la madera son la celulosa, la lignina y las hemicelulosas, presentándose cada uno de ellos en una proporción diferente dependiendo de la especie. La celulosa se encuentra aproximadamente en una proporción entre el 40-50%, la lignina entre el 24-28% y las hemicelulosa, colorantes, terpenos, taninos, ácidos resínicos y materias nitrogenadas, entre el 20-25%.

La sustancia básica que forma la pared de la célula es la celulosa que se agrupa en unidades mayores denominadas fibrillas elementales. Estas, a su vez, se agrupan (en número de 100 a 2000 cadenas de celulosa) constituyendo las microfibrillas.

Entre las células existe una capa denominada laminilla intermedia (o pared intercelular) que las une entre sí. Esta capa tiene un alto contenido de lignina y carece prácticamente de celulosa.

La celulosa es un polímero tridimensional que presenta extremada resistencia y es análogo al almidón, es decir, se descompone en contacto con el agua, pero es inalterable si está seca. Es más densa que el agua, de color blanco, insípida e inodora. La lignina es un polímero tridimensional amorfo y no dispone de grupos polares, lo que da un carácter hidrófobo a la madera y es la sustancia que da a la madera su dureza, rigidez y resistencia a compresión, ya que actúa como cementante entre las células. Por último las hemicelulosas, al igual que la celulosa, es un polímero tridimensional, cuya misión es dar a las fibras unión, pero sin incidir ni en su dureza, ni en sus propiedades mecánicas. Son sustancias fácilmente atacables por los hongos.

3.2.-PRINCIPALES PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA

Las principales propiedades físicas que caracterizan a la madera estructural y su comportamiento físico-mecánico son la anisotropía, la densidad, la higroscopicidad y la humedad de equilibrio higroscópico (*HEH*).

La madera es un material anisótropo ya que presenta desigual comportamiento, tanto mecánico como dieléctrico, dependiendo del plano o dirección que se considere respecto a las fibras. Por eso es necesario definir el plano o dirección en el que se trabaja o se ha cortado una viga (figura 3.2). Se define el eje longitudinal (*L*) como el paralelo a la fibra; el eje radial (*R*) es la dirección normal al crecimiento de los anillos (perpendicular a la dirección de la fibra). Por último la dirección tangencial (*T*) es perpendicular a la dirección a la fibra pero tangente a los anillos de crecimiento.

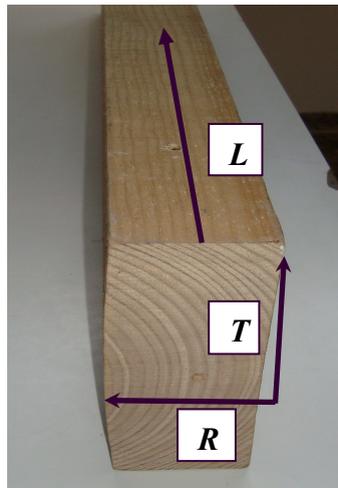


Figura 3.2.-Principales direcciones de estudio respecto a la fibra en la madera estructural: eje longitudinal (*L*), el eje radial (*R*) y el eje tangencial (*T*).

Una de las propiedades más ventajosas de la madera es su baja densidad. La densidad de la madera es muy variable con las especies, desde 300 hasta 1100 kg/m³, aunque las especies empleadas habitualmente en estructuras presentan densidades entre 450 y 600 kg/m³.

Su relación con la humedad es otra de las particularidades de la madera. La higroscopicidad es la capacidad que poseen ciertos materiales de absorber humedad de la atmósfera que los rodea y retenerla en forma de agua líquida. La madera es un material que cumple con estas características ya que puede contener agua de sorción, de adsorción, de condensación o capilar y líquida. Además, dependiendo del contenido de humedad sus propiedades mecánicas varían y, lo que es más grave, también lo hacen sus dimensiones.

Un árbol recién cortado posee un alto contenido de humedad, dado que el agua es imprescindible para la vida del árbol, pudiendo contener entre 60-200 % de contenido de humedad (cuanto más joven más húmedos). Al cortarlo y dejarlo al aire, el aire absorbe agua de la superficie de la madera dejando la primera capa de la madera casi sin agua. El mismo proceso sucede desde la superficie de la madera hacia la primera capa interior de la madera y así sucesivamente hasta llegar a igualar la fuerza desecante del aire con la fuerza de absorción de humedad de la madera. Este proceso es muy lento y puede durar años.

Por tanto, la Humedad de Equilibrio Higroscópico (*HEH*) es el contenido de humedad de la madera en el que se equilibran las fuerzas de absorción de humedad de la madera con la fuerza desecante del aire. La *HEH* es prácticamente constante para todas las especies de modo que con el ábaco de Kollman (1959) en función de la temperatura (C°) y la humedad relativa del aire (%) se obtienen las curvas de *HEH* de la madera.

La madera de un árbol recién apeado, a lo largo del proceso de secado, tiene la pared celular completamente saturada y cierta cantidad de agua libre. Primero

elimina el agua libre, esta pérdida se hace sin apenas variación de sus características. La máxima humedad que puede tener una madera sin que exista agua libre recibe el nombre de Punto de Saturación de la Fibras (*PSF*), que oscila dependiendo de la especie alrededor del 30% del contenido de humedad. Una vez bajada la humedad de este punto no podrá recuperar agua libre a no ser que sea por inmersión.

3.3.- DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

La densidad (ρ) es la relación entre la masa (M) y el volumen (V) de una madera a una humedad determinada (h):

$$\rho_h = \frac{M_h}{V_h} \quad [3.1]$$

La densidad está directamente relacionada con el contenido de humedad. Dependiendo de su contenido, se denomina normal en caso de que las medidas de masa y volumen se realicen cuando las muestras están en torno el punto *HEH* ($HEH \cong 12\%$). Se denomina anhidra si las medidas se realizan al 0% de contenido de humedad, o bien verde si éstas se realizan cuando la madera está recién apeada.

La variación de densidad entre árboles de una misma especie es del orden del 10 al 20% respecto a su valor medio. Incluso dentro del mismo árbol la densidad varía según la posición del mismo. En algunas especies como los pinos, la densidad disminuye con la altura del árbol, mientras que en otras como los chopos ocurre todo lo contrario. La densidad también varía dentro de la misma sección de un tronco aumentando generalmente con la distancia a la médula.

En España, para la determinación de la densidad se aplica la norma UNE 56531:1977 que regula cómo realizar el ensayo.

Estudios recientes emplean las ondas microondas o las de radiofrecuencia para el análisis de la densidad y su variabilidad con el contenido de humedad. En concreto, Steele y Cooper (2000) han desarrollado un método para detectar diferencias de densidad en vigas analizadas por radiofrecuencia, aunque hasta la fecha sólo se han obtenido buenos resultados para la detección de nudos y huecos.

3.4.- DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

El estudio tecnológico de las relaciones entre el agua y la madera es seguramente el más importante de todos los que dependen de este material dado que afecta a la mayoría de procesos de transformación de la misma. Además, la variación de la cantidad de agua en una misma pieza hace variar considerablemente la mayoría de sus propiedades físicas y mecánicas.

Los principales métodos empleados para la determinación del contenido de humedad (*CH*) de la madera estructural son el de **dsecación hasta estado anhidro**, mediante **higrómetro de resistencia** y mediante **las ondas microondas**.

La norma UNE-EN 13183-1:2002 establece el procedimiento operativo para determinar el contenido de humedad por el **método de dsecación hasta el estado anhidro**. Según esta norma las muestras deben ser prismas cuadrangulares de sección recta de 2 mm de lado y altura paralela a la dirección longitudinal de las fibras. En primer lugar, la masa de las muestras se miden con una balanza de precisión de 0.01g y a continuación se secan con una estufa de circulación de aire cuya temperatura se pueda mantener a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Las muestras permanecen en la estufa donde se seca hasta alcanzar masa constante. Cuando dos mediciones de la masa difieren en menos de 1/200 (0.005g) de la primera se considera que ha llegado al valor de la masa anhidra y entonces finalmente el contenido de humedad se calcula como:

$$CH(\%) = \frac{M_h - M_o}{M_o} \times 100 \quad [3.2]$$

donde M_o es la masa anhidra, M_h es la masa a determinado contenido de humedad h y CH es el contenido de humedad.

Como algunos autores refieren (Jiménez, 1999) y (Forest Products Laboratory, 1999), se recomienda que en el caso de extraer de las vigas la probeta, ésta se obtenga al menos a 50 cm del final de la pieza y en tablas a 15 cm de las testas, para que el *CH* que se analiza sea lo más representativo posible de toda la viga.

Existe una relación casi lineal entre el logaritmo de la resistencia eléctrica y el contenido de humedad de la madera, cuando ésta se encuentra en el intervalo entre el *PSF* y el estado anhidro. Este es el principio en el que se basan los instrumentos empleados con esta técnica, los higrómetros de resistencia.

Para medir el contenido de humedad mediante el **higrómetro de resistencia** se aplica la norma UNE-EN 13183-2:2002. Según ésta, las agujas, por las que se hace pasar la corriente eléctrica, se deben clavar hasta 1/5 del espesor de la madera para que refleje el *CH* medio de toda la muestra y en un plano perpendicular a las fibras longitudinales de la madera.

En piezas de longitudes inferiores a 1 m se realizan tres determinaciones, en tres puntos equidistantes situados en una diagonal de una cara y en otras tres igualmente distribuidas en la cara opuesta. Si la pieza es mayor de 1 m se realizan dos mediciones por cada metro, equidistantes a lo largo de la diagonal de la cara, e igualmente en la cara opuesta. Finalmente, la media de todos los valores se considera como el *CH* de la pieza.

Es importante resaltar que esta técnica será válida sólo para maderas sometidas previamente a algún proceso de secado al aire o en cámaras, ya que el método no es fiable para medir humedades por encima del *PSF*. Los medidores están normalmente calibrados para medidas comprendidas entre los 7 y 25% de *CH*.

La técnica de las **ondas microondas** es una técnica bastante reciente y poco divulgada en España que se basa en el estudio de la atenuación de la señal electromagnética y el desplazamiento de la fase para deducir el *CH*. Ejemplos de

estudios desarrollados en estas líneas de investigación son los realizados por King et al. (1985), Martin et al. (1987), Kabir et al. (1997) y Kabir et al. (2000).

Por el momento su aplicación presenta un problema. El tamaño de las piezas está limitado a las dimensiones de la cavidad de testeado o el tamaño de la guía de ondas del equipo, ya que el tamaño de las muestras como máximo puede alcanzar los centímetros.

3.5.- PROCESO DE SECADO DE LA MADERA

La humedad a la que debe secarse una madera es aquella que sea similar a la *HEH* del ambiente donde se vaya a instalar. Esta *HEH* varía en función de la zona geográfica y con la época del año. Además hay que tener en cuenta que la elección de la humedad final de la madera depende del empleo a que está destinada.

Para un producto de madera que se emplee en Valencia capital, la *HEH* oscila entre el 13% en verano y el 14% en invierno. La madera deberá secarse hasta el 13.5% oscilando su humedad un 0.5% arriba y abajo, para que las deformaciones sean muy pequeñas (Álvarez y Seoane, 1983). Además, el contenido de humedad es un parámetro crítico para la mayoría de las patologías físico-químicas de la madera, siendo un factor de riesgo para la estructura de la que forma parte cuando su valor es superior al 20 %.

Los parámetros propios de la madera que influyen para que se seque correctamente y no aparezcan posteriormente tensiones que produzcan defectos o alteraciones que modifiquen su valor resistente son: la especie forestal, el espesor, el *CH* inicial y final. Asimismo, dentro de cada especie forestal el proceso de secado varía dependiendo de muchos factores como el tipo de

madera, la densidad, el coeficiente de contracción volumétrica o la resistencia de la madera.

En cuanto a los parámetros atribuibles al proceso de secado, los que influyen directamente son la velocidad, la dirección, la temperatura y la presión de secado y la homogenización y acondicionamiento de la madera.

Es muy importante tener en cuenta el gradiente de humedad de la madera. La zona superficial de la mayoría de las especies alcanza la *HEH* antes de que el verdadero proceso de secado interno comience. Esto da lugar a que se desarrolle el gradiente de humedad, que consiste en la diferencia de *CH* que se produce entre la parte interna y la externa de la viga.

Generalmente las especies ligeras se secan antes que las más densas, porque la estructura de las ligeras contiene más huecos por unidad de volumen y la humedad se mueve a través de las oquedades más rápido que a través de las paredes celulares de la madera.

En la actualidad son objeto de estudio los dispositivos necesarios para evaluar el gradiente de humedad en la madera. Ejemplos de estos estudios son los trabajos presentados por Tiitta et al. (1999), Sobue (2000) y Jazayeri y Ahmet (2000) que desarrollan instrumentos de paso de corriente eléctrica para la estimación del gradiente de humedad, cuya fiabilidad no está todavía contrastada.

Los métodos más comunes para secar la madera son el secado al aire y en horno. No obstante, en los últimos años se empiezan a emplear la técnica de las ondas microondas y radiofrecuencia, tanto para el control de proceso de secado al horno, como para secarlas propiamente.

Las principales ventajas que ofrece el método de secado al horno son: la rapidez del secado, que se llega a la humedad final que se desee y que la temperatura elevada esteriliza la madera, es decir, mata los posibles insectos que pueda tener. Por el contrario, como principales inconvenientes se encuentra el aumento del riesgo de aparición de fendas y curvaturas por velocidad de secado y supone un gran gasto de energía y una inversión elevada.

La técnica de secado por ondas de radiofrecuencia ya se aplicó con éxito en los setenta, pero su uso en la industria no se extendió debido a la baja eficiencia de la técnica para el secado de lotes. Sin embargo, a partir de los noventa se han realizado de nuevo experimentaciones en secado de maderas de baja densidad por esta técnica tanto en piezas de tamaño comercial, prueba de ello son los trabajos presentados por Avramidis y Zwick (1992), Avramidis et al. (1996), Avramidis y Zwick (1996) como en hornos en fase experimental presentados por Avramidis et al. (1994), Avramidis y Liu (1994) y Liu et al. (1994), obteniéndose resultados muy prometedores.

La aplicación de la técnica de las microondas en la industria de la madera se ha desarrollado en las pasadas décadas, tanto en el campo del tratamiento de la madera como en el del diagnóstico. Las ondas microondas se han aplicado para el calentamiento, secado y pegado de la madera. El uso de esta tecnología para el secado de la madera presenta importantes ventajas. Con un correcto control, la madera se puede calentar de forma rápida, uniforme, selectiva y económica.

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

3.6. – PROPIEDADES DIELECTRICAS

El estudio de las propiedades dieléctricas es importante por varios motivos. En primer lugar, la propagación de una onda electromagnética en un medio depende estrechamente de la permitividad dieléctrica relativa del mismo. En segundo lugar, porque su relación con la densidad y el contenido de humedad de la madera convierte al georradar en una técnica potencialmente aplicable para determinar estos dos valores.

Las propiedades eléctricas más importantes de un medio como la madera son la conductividad, la constante dieléctrica y el factor de pérdida (véase apartado 2.1.1). Ahora bien, estas propiedades varían dependiendo de una serie de factores, siendo los principales: la frecuencia del campo, la temperatura, el contenido de humedad, la densidad y la desviación de fibra de la madera (Torgovnikov, 1993).

3.6.1.- CONDUCTIVIDAD

La madera seca es un excelente aislante. La conductividad eléctrica de la madera varía de forma suave con el voltaje aplicado y aproximadamente se duplica con cada 10° C de aumento de temperatura. Ahora bien, varía mucho dependiendo del contenido de humedad, especialmente en contenidos inferiores al *PSF* hasta el estado anhidro. La resistividad se encuentra entre 10^{14} y 10^{16} Ωm para madera secada al horno y alcanza de 10^3 a 10^4 Ωm para la madera en su *PSF* (Forest Products Laboratory, 1999).

Otros autores como Vignote y Martínez (2006) proponen unos valores aproximados similares (tabla 3.1), matizando que varía mucho dependiendo de la especie, dirección de la fibra y temperatura.

Tabla 3.1.- Valores de humedad y resistividad aproximados de la madera (Vignote y Martínez, 2006).

Humedad (%)	0	9	13	18	23	26	30	50
Resistividad (Ωm)	10^6	10^4	1000	100	10	1	0.1	0.01

Conforme aumenta el contenido de humedad desde el *PSF* hasta llegar a la saturación completa de la estructura de la madera, el aumento de la conductividad es más pequeño y errático, generalmente sin llegar a la centésima.

En el caso de que la madera contenga exceso de sales solubles u otras sustancias electrolíticas, o esté en contacto prolongado con el agua del mar, la conductividad puede aumentar significativamente. El aumento es pequeño cuando el contenido de humedad es menor de 8%, pero aumenta rápidamente conforme el contenido de humedad supera el 10-12%.

3.6.2.- CONSTANTE DIELECTRICA

La permitividad dieléctrica efectiva o también llamada constante dieléctrica (véase apartado 2.1.3) de la madera secada en el horno hasta su estado anhidro varía entre 2 y 5 a temperatura ambiente y disminuye lentamente conforme aumenta la frecuencia del campo eléctrico aplicado. Hay una intensa interacción negativa entre el *CH* y la frecuencia: a 20 Hz la constante dieléctrica puede variar desde 4 para madera seca a cerca de 1.000.000 para madera húmeda; a 1 kHz, desde 4 en seco a 5.000 en húmedo y a 1 MHz, de 3 cuando está seca a 100 cuando está húmeda.

Con el aumento del contenido de humedad la cantidad de agua en la matriz de la madera aumenta. Como la constante dieléctrica del agua es mucho mayor que la de la madera, se espera una tendencia de aumento de la constante. Conforme

aumenta el CH desde la condición anhidra, los componentes polares de las paredes celulares alcanzan mayor libertad de rotación cuando presentan contenidos de humedad más altos, contribuyendo a presentar un comportamiento dieléctrico más pronunciado.

Torgovnikov (1993) muestra por medio de regresiones que la relación entre la constante dieléctrica y el contenido de humedad es tal que la tasa de incremento de la constante dieléctrica es mayor para contenidos de humedad superiores al PSF . No obstante, las funciones obtenidas también presentan cierta pendiente por debajo del PSF .

La relación entre la constante dieléctrica y el contenido de humedad es un tema de permanente interés. Esta relación se ha interpretado como lineal, logarítmica o exponencial para bajos valores del contenido de humedad y a frecuencias dentro de las microondas por diversos autores desde los años sesenta hasta la actualidad: James y Hamill (1965), Tinga (1969), James (1977), Peyskens et al. (1984), Kabir et al. (1997) y Kabir et al. (1998). Recientemente Sahin y Nürgül (2004) encuentran que para varias frecuencias de estudio las ecuaciones de segundo orden presentan el mejor ajuste para las curvas que relacionan estas dos variables.

La constante dieléctrica es mayor cuando el campo eléctrico es paralelo a la fibra que perpendicular (Forest Products Laboratory, 1999). Jiménez (1999) afirma que la constante dieléctrica es mayor para la polarización paralela a la fibra que perpendicular a ella, siendo la razón de 1.3 a 1.6. Sahin y Nürgül (2004) encuentran que la relación es entre 1.2 y 1.3 veces mayor para tres especies diferentes.

En un estudio reciente Daian et al. (2005) comprueba por la técnica de microondas como la diferencia entre la constante dieléctrica radial y tangencial es de un pequeño tanto por ciento siendo ligeramente mayor la radial. Aunque en

cualquier caso esta diferencia es mínima en comparación con la longitudinal (Sahin y Nürgül, 2004).

La diferencia en las propiedades dieléctricas entre las distintas direcciones de incidencia del haz se atribuye a la diferencia en la disposición de las paredes celulares y a la anisotropía de las sustancias de éstas paredes. Según Norimoto y Yamada (1972) las propiedades dieléctricas de la madera están fuertemente influidas por la celulosa en la dirección longitudinal, pero en la dirección transversal las propiedades dieléctricas están influidas por la lignina. La lignina tiene valores dieléctricos mucho menores que la celulosa. Ya en estudios anteriores se consideró que los grupos hidroxilos de la celulosa tienen mayor grado de libertad para rotar en la dirección longitudinal (Lin, 1967). Lo explicado anteriormente se añade al hecho de que la probabilidad de salto de dipolo a un lado adyacente cuando se aplica un campo es considerablemente mayor cuando se aplica de forma longitudinal que cuando se hace en otra dirección (Norimoto y Yamada, 1971).

Sahin y Nürgül (2004) complementan lo antes expuesto confirmando la tendencia definida y para ello se basan en que en estado anhidro, las macromoléculas de celulosa en la madera están muy ligadas e impiden a los dipolos de las moléculas desplazarse bajo el influjo de un campo. El proceso de humidificación da lugar a la penetración de moléculas de agua en la celulosa y debilita la adherencia transversal, dando lugar a un aumento de la movilidad de los dipolos.

Por último, hay que tener en cuenta que la relación entre la constante dieléctrica y el contenido de humedad varía dependiendo de la densidad. Cuando se aplica un campo a un medio dieléctrico, las moléculas tienden a alinearse con el campo, y el movimiento dependerá de la cohesión interna del material. De acuerdo con esto, en las maderas más ligeras hay pocos grupos polares que acompañen la polarización, lo que significa que las propiedades dieléctricas de las maderas

menos densas son más bajas que las de las más densas. Por lo tanto la diferencia de propiedades dieléctricas en diferentes especies están fuertemente relacionadas con la densidad y la capacidad de absorción del medio (Sahin y Nürgül, 2004).

Torgovnikov (1993) muestra cómo la constante dieléctrica está fuertemente influida por la densidad de la madera. Según sus estudios la constante dieléctrica por sí misma no proporciona una buena estimación del contenido de humedad de la madera en general por su relación con la densidad. Sólo será válido el estudio del contenido de humedad de la madera a partir de la constante dieléctrica si se trabaja con maderas de una única densidad o si la densidad de la madera es conocida.

3.6.3.-FACTOR DE PÉRDIDA

Cuando un medio no conductor es situado en un campo eléctrico, absorbe y almacena energía potencial. La cantidad de energía almacenada por unidad de volumen depende de la constante dieléctrica y de la magnitud del campo aplicado. Un dieléctrico ideal libera toda esa energía al circuito eléctrico externo cuando el campo es eliminado, pero los dieléctricos reales disipan algo de energía en forma de calor.

El factor de pérdida es una medida de esa porción de energía almacenada convertida en calor, que en el caso de la madera varía desde cerca de 0.01 para maderas secas de baja densidad hasta 0.95 para maderas densas a altos niveles de contenido de humedad. Forest Products Laboratory (1999) y Jiménez (1999) establecen que el factor de pérdida es más grande a lo largo de la fibra que en sentido perpendicular. El factor de pérdida de la madera es elevado en comparación con el de otros materiales como los aislantes plásticos.

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

3.7.- PROPIEDADES MECÁNICAS Y NORMAS DE CLASIFICACIÓN RESISTENTE DE LA MADERA

La madera sometida a cargas presenta un comportamiento visco-elástico. Por una parte es elástico, ya que la deformación que se produce por una carga cesa cuando cesa la carga. Pero por otra parte, se comporta como un material plástico cuando se incrementa la deformación por acción del tiempo de aplicación de la carga.

La madera presenta un comportamiento mecánico diferente frente a otros materiales resistentes en dos aspectos concretos. La deformación ante una cierta carga aumenta con el tiempo. Si se carga una madera con 10 kg durante unos instantes, la deformación que presenta es del orden de 2.5 veces menor que si la carga se mantiene durante varios minutos. Además, el valor de la deformación en el estado elástico es muy elevado respecto a cualquier otro material.

Es un material que presenta una acusada variabilidad en sus propiedades mecánicas. Coeficientes de variación del 40% no son infrecuentes, al menos en las coníferas españolas (Fernández-Golfín et al., 2001). Esta elevada variabilidad tiene su fundamento en factores de tipo genético, de tipo selvícola e incluso, de tipo tecnológico (Diez y Fernández-Golfín, 1998).

La resistencia mecánica de una pieza de madera varía sensiblemente según el CH y por ello, la resistencia a un esfuerzo dado no puede definirse con exactitud sino respecto a un CH determinado. Aunque la relación con el CH varía con el esfuerzo y además no es exactamente lineal, se puede aproximar que cuando la madera aumenta un 1% su contenido de humedad, la resistencia merma entre el 1.5% - 2% hasta contenidos de humedad del 30%. Para contenidos de humedad superiores la resistencia no varía. Por ejemplo, si la resistencia con un $CH=12\%$ es 1, con un $CH=20\%$ será 0.7 y con un $CH=30\%$ será 0.6 (Vignote y Martínez, 2006).

Otro factor importante es que la resistencia mecánica varía de forma considerable con la especie, es decir, la densidad va a influir directamente en el comportamiento mecánico de las maderas de las distintas especies e incluso dentro de una misma especie.

Los defectos o singularidades de dimensiones importantes que aparecen en las piezas de madera influyen directamente en las características mecánicas. La inclinación de la fibra afecta de forma significativa a la resistencia a flexión y tracción, con menor importancia en la compresión axial y apenas a la compresión perpendicular a la fibra y al esfuerzo cortante. Los nudos poseen un efecto similar a la inclinación de la fibra, afectando de forma importante a la flexión y tracción y no alterando de forma apreciable la resistencia al esfuerzo cortante y a la compresión perpendicular a la fibra. Sin embargo, las fendas son las singularidades que sí afectan de forma determinante la resistencia al esfuerzo cortante. Por último, hay que tener presente que las gemas y pudriciones afectan a todos los valores de resistencia.

El sistema de clases resistentes definido en la norma UNE-EN 338:2003 reagrupa a la vez las calidades y las especies que tengan niveles de resistencia similares haciéndolas de esta forma intercambiables. Esto permite al calculista prescribir una clase resistente determinada y utilizar los valores característicos de dicha clase para el diseño y el cálculo.

Esta norma indica para cada clase los valores característicos de las propiedades de resistencia y rigidez y los valores de densidad, así como los criterios de clasificación de las poblaciones de madera. La norma define un determinado número de clases de resistencia designadas por un número que indica el valor de la resistencia a la flexión en N/mm^2 , por ejemplo *C14*, *C16*, *C18*. En la tabla 3.2 se muestra un extracto de la tabla publicada en la norma donde se presentan los valores característicos de la resistencia, rigidez y densidad que corresponden a diversas clases de resistencia para coníferas.

Una población de madera puede asignarse a una clase resistente si los valores característicos de resistencia a la flexión ($f_{m,k}$) y densidad (ρ_{mk}) son iguales o mayores que los valores establecidos en la tabla 3.2 para dicha clase resistente, y si el valor característico medio de su módulo de elasticidad en flexión ($E_{m,l}$) es igual o mayor que el valor indicado en la norma para dicha clase resistente.

Tabla 3.2.- Clases resistentes y valores característicos correspondientes según la norma UNE-EN 338:2003 para las coníferas y el chopo.

Parámetros evaluados		C14	C16	C18	C20	C22
Propiedades de resistencia (N/mm²)						
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22
Tracción paralela a la fibra	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13
Tracción perpendicular a la fibra	$f_{c,90,k}$	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5
Compresión paralela a la fibra	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20
Compresión perpendicular a la fibra	$f_{c,90,k}$	2.0	2.2	2.2	2.3	2.4
Cortante	$f_{v,k}$	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4
Propiedades de rigidez (kN/mm²)						
Módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra	$E_{m,l}$	7.0	8.0	9.0	9.5	10
Módulo de elasticidad paralelo a la fibra	$E_{0,05}$	4.7	5.4	6.0	6.4	6.7
Módulo de elasticidad perpendicular a la fibra	$E_{90,medio}$	0.23	0.27	0.30	0.32	0.33
Módulo medio cortante	G_{medio}	0.44	0.50	0.56	0.59	0.63
Densidad (kg/m³)						
Densidad	ρ_{mk}	290	310	320	330	340
Densidad media	ρ_m	350	370	380	390	410

En la norma EN 408:2003 se establecen los métodos para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas en laboratorio de las maderas en sus dimensiones reales de uso para la posterior asignación de clases resistentes. En la UNE-EN 384:2004 se determinan los valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad.

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

CAPÍTULO 4

CALIBRACIÓN DEL EQUIPO Y MÉTODOS DE ADQUISICIÓN DE REGISTROS

A lo largo de este capítulo se describe una serie de ensayos realizados para calibrar el comportamiento de la antena de 1.6 GHz de frecuencia central (GSSI). En primer lugar, se analiza el comportamiento de la antena cuando se emite al aire, ya que existen parámetros que es necesario conocer previo al empleo del equipo y que dependen de la antena empleada. Estos son la posición del cero de la antena, la distancia mínima de no interferencia entre la antena y la superficie del medio, la atenuación del frente de ondas, la huella de la antena, las pérdidas por efecto de contorno y resolución vertical y horizontal.

A continuación se calibra el equipo, para el caso en el que la radiación se propaga a través de muestras de madera. De forma previa a la realización de cualquier ensayo es interesante conocer cuáles van a ser las características de propagación a través de la madera y sobre todo los cambios de fase que se producen al reflejarse las ondas en las distintas interfases (madera-aire, aire-madera, madera-reflector metálico). Una vez se conocen éstos resulta más sencillo identificar los tiempos de llegada de las ondas y cómo se manifiestan en los ensayos realizados a lo largo de la tesis. El resultado de estos ensayos corrobora que la elección de la antena, en concreto su frecuencia central de emisión, es la adecuada para la consecución de los objetivos planteados en esta tesis.

En el último apartado del capítulo se establecen cuáles van a ser las distintas tipologías de los dispositivos de registros realizados a lo largo de toda la tesis y la nomenclatura por la que se identifican, ya que dependiendo de los objetivos planteados en cada uno de los ensayos se elige el dispositivo más adecuado.

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

4.1.- DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE GEORRADAR EMPLEADO

El equipo empleado pertenece a la Universidad Politécnica de Valencia y está fabricado por GSSI (Geophysical Survey Systems Inc.). El equipo consta de una unidad central, de la antena de 1.6 GHz de frecuencia central y del software adecuado para el tratamiento de las señales registradas.

La unidad central empleada es el modelo SIR-10H y dispone de una CPU, un monitor a color VGA donde se pueden visualizar los datos y un teclado para interacción con la CPU (figura 4.1).

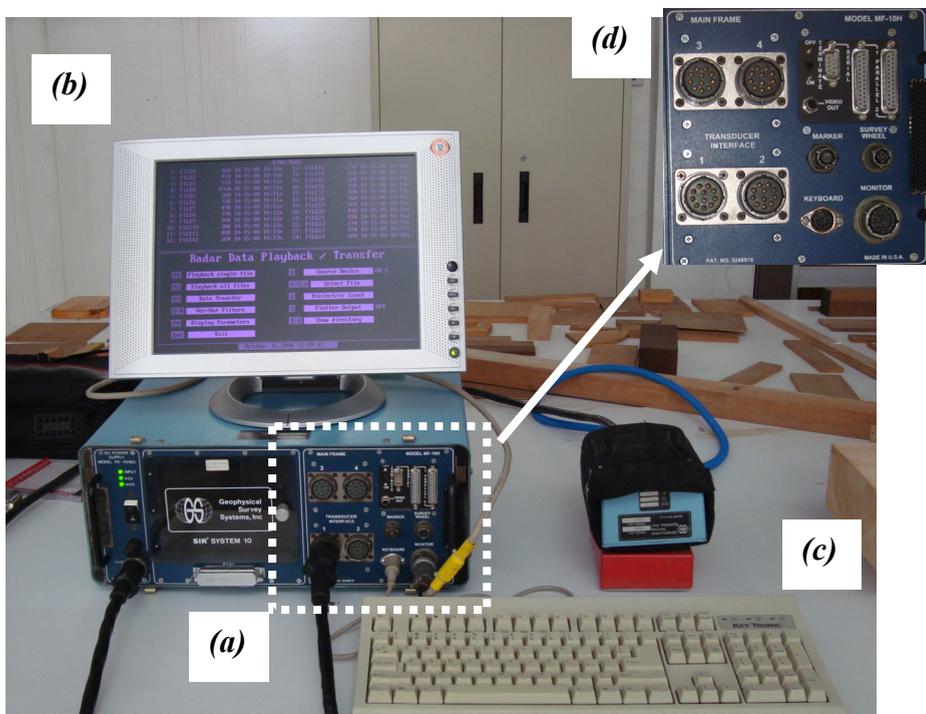


Figura 4.1.- Componentes del equipo de georradar modelo SIR-10H de GSSI: (a) unidad de control; (b) dispositivo de visualización; (c) antena de 1.6 GHz de frecuencia central; (d) detalle de la unidad central.

Las antenas que pueden encontrarse en el mercado trabajan con un centro de frecuencias entre 10 y 2600 MHz. El espectro de frecuencias presenta un valor máximo para la frecuencia central de la señal. Esta frecuencia central caracteriza la antena, pero la emisión no es monocromática. Tal y como se ilustra con la figura 4.2, el espectro de frecuencias de la señal emitido con la antena de 1.6 GHz de frecuencia central de GSSI muestra un rango de frecuencias comprendido entre la mitad (límite inferior) y dos veces (límite superior) la frecuencia central (Conyers y Goodman, 1997). A este rango se le llama ancho de banda (B) y es diferente para cada antena.

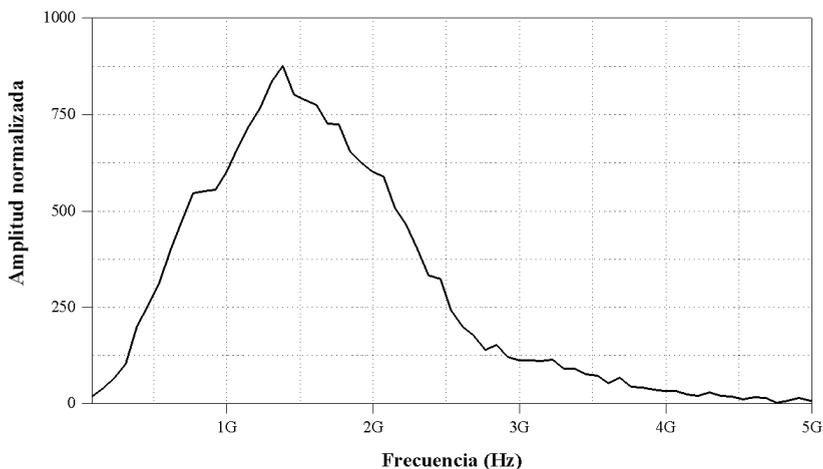


Figura 4.2.- Espectro de frecuencia de la emisión al aire de la antena modelo 5100 (GSSI) de frecuencia central 1.6 GHz.

La antena con la que se trabaja es el modelo 5100 de la empresa Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI). Es una antena direccional monoestática, cuya frecuencia central de emisión se centra en los 1.6 GHz (véase apartado 2.3.1). Se trata de una de las antenas de mayor resolución que se encuentran actualmente en el mercado. La frecuencia de emisión condiciona tanto la profundidad de penetración como la resolución, entendida como la distancia mínima que ha de haber entre dos reflectores para que se identifiquen con reflexiones

independientes. Como se muestra en los ensayos que más adelante se exponen, la antena elegida, por una parte llega a profundidades de penetración ligeramente superiores a las dimensiones de las viguetas y además nos aporta la resolución suficiente como para identificar las distintas reflexiones por separado, siendo estos motivos los que principalmente justifican su elección.

Los usos principales que se le han dado hasta ahora están relacionados con la inspección de estructuras de hormigón para localizar barras de hierro, cables, conducciones, etc. Asimismo, también se emplea en los tableros de puentes para detectar espesores de hormigón y del resto de materiales. Todo ello es gracias a que la antena está diseñada para llegar a zonas de difícil acceso o reducidas, ya que sus características son: 1.8 kg de masa, 3.8 x 10 x 16.5 cm de tamaño y dependiendo de las condiciones del material a estudio se puede llegar a una profundidad de penetración de 0.5 m. El emisor está situado a 3 cm de la marca central de la antena en el lado del cable y el transmisor a 3 cm de la marca central en la dirección opuesta (figura 4.3)

Es importante conocer el pulso si se trabaja en campo cercano. Es escasa la información que proporciona el fabricante sobre el tipo de antena emisora y receptora y la estructura interna de la antena. Recientemente (Warren y Giannopoulos, 2008) han modelado numéricamente el interior de la misma. Según éstos la principal característica física de la antena es que los elementos de emisión y recepción son de tipo *bowtie* y que están aislados por un revestimiento de material absorbente. La forma exacta y contenido de frecuencia de los pulsos empleados por GSSI para excitar la antena son desconocidos. Sin embargo, las modelizaciones más recientes como las de Roberts y Daniels (1997), Gurel y Oguz (2000) y Uduwawala et al. (2004) emplean un pulso de forma Gaussiana.

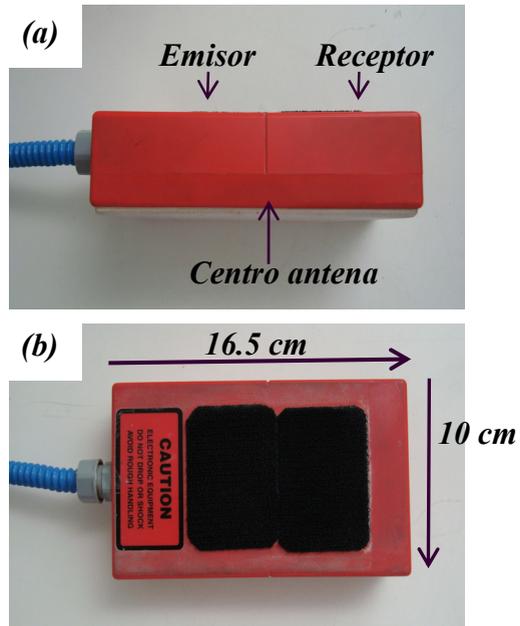


Figura 4.3.- (a) Localización del emisor y receptor en la antena de 1.6 GHz de frecuencia central de GSSI y (b) sus dimensiones.

4.2.- CALIBRACIÓN DE LA ANTENA EMPLEADA

A continuación se detallan una serie de ensayos realizados para el estudio del comportamiento de la antena de frecuencia central de emisión 1.6 GHz (GSSI). Cuando se realizan las mediciones con el georradar y se quiere tener precisión en los registros en el dominio temporal se tiene que controlar una serie de factores antes de realizar la medición, tales como los expuestos a continuación: análisis del cero de la antena, cálculo de la distancia mínima de no interferencia entre la antena y la superficie del medio, estudio de la atenuación del frente de ondas, estudio de la huella de la antena, estudio de las pérdidas por efecto de contorno y la resolución vertical y horizontal teórica.

4.2.1.- ANÁLISIS DEL CERO DE LA ANTENA

El cero de la antena es el punto en el radargrama a partir del cual hay que empezar a contar el tiempo de propagación, que no tiene por qué coincidir con el inicio del registro. La posición de este punto cuando la antena se coloca cerca o sobre el medio que se estudia no es necesariamente siempre la misma.

Para poder tener un posicionamiento vertical preciso se debe ajustar correctamente el cero de la escala de tiempo y de esta forma poder estimar correctamente la velocidad de propagación en el medio.

Son varios los autores que analizan la posición del cero en campo cercano como Yelf (2004), Periera et al. (2005) y Rial et al. (2006). Según Yelf (2004) hay distintas posiciones que se pueden adoptar como cero de escala de tiempos. En la figura 4.4 se distinguen claramente algunas de ellas: (a) primera ruptura de tendencia, (b) punto de amplitud cero y (c) primer máximo positivo.

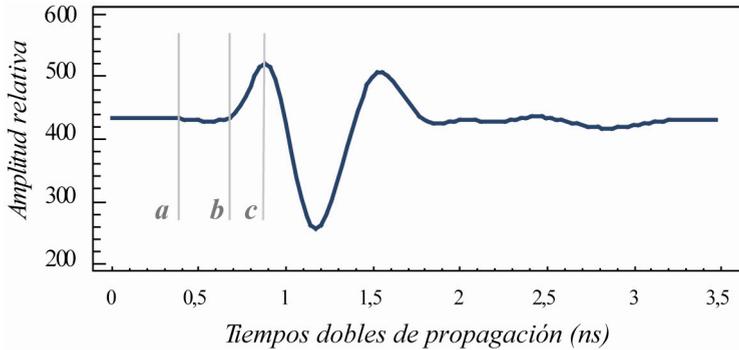


Figura 4.4.- Esquema de una traza donde se indican los tiempos medidos como cero de la antena: (a) primera ruptura de tendencia; (b) punto de amplitud cero y (c) primer máximo positivo.

Se realiza el siguiente ensayo para comprobar si con la antena con la que se trabaja es adecuado tomar como cero la posición (a) definida por Yelf (2004). Para ello, en este experimento se sitúa la antena a distancias conocidas sobre una superficie metálica de forma que se pueda distinguir perfectamente la señal directa y la reflexión en la placa metálica. La placa metálica permanece fija y se van realizando mediciones puntuales a diferentes distancias de separación entre la antena y la placa. Las dimensiones del reflector metálico son tales que la huella de la antena queda dentro de la superficie metálica, incluso a la mayor distancia estudiada.

Conocidas las distancias de separación, se calculan los incrementos de tiempo teóricos ($\Delta t_{(teórico)}$) entre la llegada de la onda directa al propagarse por el aire y la reflexión en la placa con la fórmula:

$$\Delta t_{(teórico)} = \frac{2x}{c} \quad [4.1]$$

donde x es la distancia de separación entre la antena y el reflector y c es la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el aire (30 cm/ns).

En este caso se toma como lectura del cero de la antena en los radargramas la posición (a) enunciada por Yelf (2004) y el tiempo de llegada de la reflexión siguiendo el mismo criterio. De la diferencia de estos tiempos de llegada se obtiene el incremento de tiempo medido ($\Delta t_{(medido)}$). En la tabla 4.1 se presentan los incrementos de tiempo teóricos $\Delta t_{(teórico)}$ (ecuación 4.1) y medidos en los radargramas para cada una de las distancias medidas, así como su diferencia.

Tabla 4.1.- Diferencias de tiempos teóricos $\Delta t_{(teórico)}$ y medidos $\Delta t_{(medido)}$ al propagarse la onda por el aire emitida con la antena de 1.6 GHz.

x	$\Delta t_{(teórico)}$	$\Delta t_{(medido)}$	$\Delta t_{(medido)} - \Delta t_{(teórico)}$
20	1.333	1.371	0.038
30	2.000	2.031	0.031
40	2.667	2.717	0.050
50	3.333	3.402	0.069
60	4.000	4.063	0.063
70	4.667	4.701	0.034
80	5.333	5.383	0.049
90	6.000	6.068	0.068
100	6.667	6.703	0.036

x en cm; $\Delta t_{(teórico)}$, y $\Delta t_{(medido)}$ en ns.

Como se aprecia en la tabla 4.1 se obtienen unas diferencias mínimas entre el incremento de tiempo teórico y medido. La mayor diferencia es de 0.069 ns, por lo que se puede asumir que la posición del cero en la antena al emitir al aire se encuentra en el inicio de la primera señal, es decir, en la posición (a) de la figura 4.4.

Ahora bien, la posición del cero dependerá de cada antena, de la distancia entre emisor y receptor, de la distancia entre la antena y el medio estudiado y de las propiedades eléctricas del medio bajo la antena (Yelf, 2004).

La lectura del cero de la antena al situarla sobre la madera se realiza siguiendo el criterio establecido para la medición al aire. No obstante, aplicar este mismo

criterio en la lectura de tiempos de las reflexiones es más complejo. En la mayoría de los casos esta posición (*a*) de lectura en la onda reflejada no se identifica, bien por estar demasiado atenuada la onda o bien por haberse solapado con la directa.

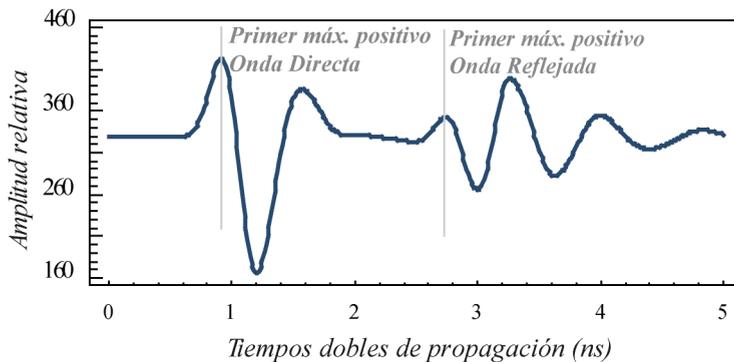


Figura 4.5.- Criterio establecido de la lectura de tiempos de llegada de la onda directa (*D*) y de la onda reflejada (*R*). En ambos casos se toma la lectura en el primer máximo positivo de la fase.

Por este motivo, para poder comparar tiempos de llegadas de ambas ondas es necesario establecer un criterio único que los haga comparables. De esta forma se establece el criterio general de tomar las lecturas en el primer máximo positivo de cada señal, es decir, en la posición (*c*), ya que su mayor amplitud hace más sencilla la identificación (figura 4.5). No obstante, en cada uno de los ensayos que se presentan en esta tesis se hace especial hincapié en cómo se han realizado las lecturas, dado el carácter experimental de la misma.

4.2.2.- CÁLCULO DE LA DISTANCIA MÍNIMA DE NO INTERFERENCIA

Se trata de averiguar la distancia mínima a partir de la cual no se produce un acoplamiento de la señal directa por el aire y de la primera reflexión en el medio para poder identificarlas por separado con la antena de 1.6 GHz (GSSI).

Para ello se realiza el siguiente ensayo. En primer lugar se emite al aire y se obtiene el registro mostrado en la figura 4.6. Se observa que la duración del pulso (T_0) que se propaga por el aire es de 2.23 ns. De este modo la separación entre la antena y un medio reflector debe ser superior a 33.5 cm (véase ecuación 4.1) para que no se solape la señal directa y la reflexión en la superficie del reflector.

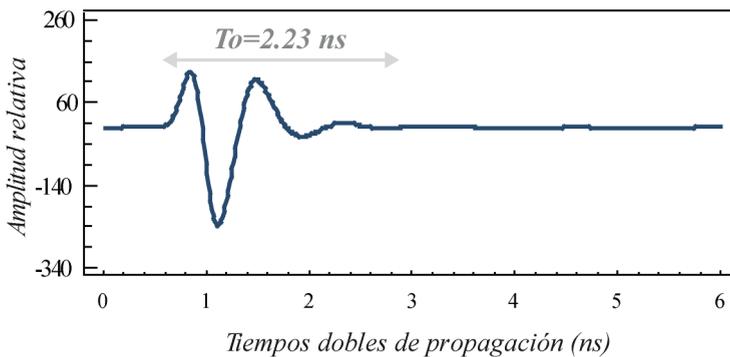


Figura 4.6.- Pulso de la antena de 1.6 GHz (GSSI) con una duración de $T_0=2.23$ ns al realizar una emisión al aire.

A continuación se corrobora este resultado colocando la antena frente a una placa metálica. Para ello se efectúan mediciones a diferentes distancias de separación (x) entre la placa y la antena (desde los 10 cm hasta 1 m, cada 10 cm). Como era de esperar y se observa en la figura 4.7, a partir de las mediciones situadas entre los 30 y 40 cm es cuando el tiempo de separación entre la llegada de la onda reflejada es superior a la duración de la onda directa (T_0), y por tanto no se

solapan. Para distancias entre la antena y el reflector menores de 30 cm el acoplamiento entre las señales es evidente.

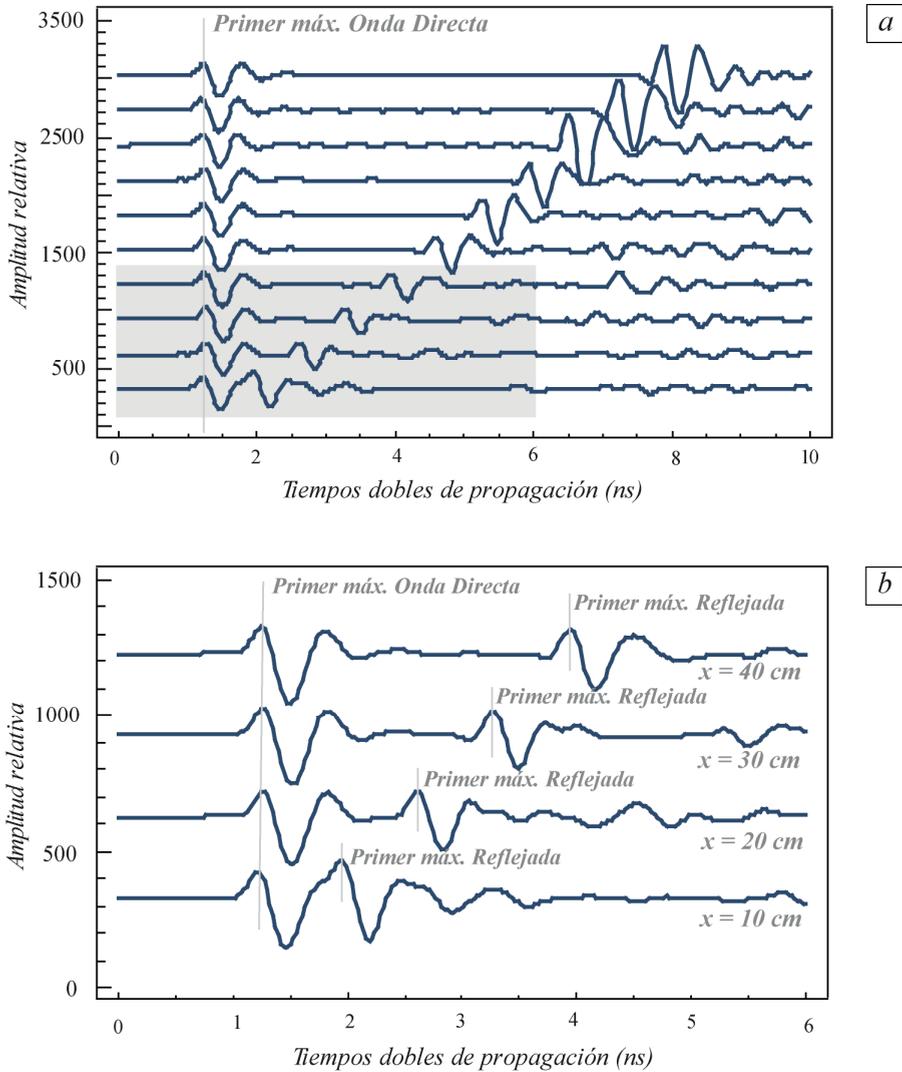


Figura 4.7.- Trazas de los radargramas colocando la antena a diferentes distancias de separación entre la antena y la placa metálica: (a) distancias de separación desde 10 cm hasta 1 m; (b) distancias de separación desde 10 cm hasta 40 cm.

4.2.3.- ESTUDIO DE LA ATENUACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS

La atenuación de las ondas electromagnéticas es uno de los factores de la propagación de las ondas más importantes, ya que condiciona la penetración de la señal en el medio y, por lo tanto, la profundidad de investigación que se puede alcanzar. Los fenómenos que condicionan la atenuación se exponen en el apartado 2.2.

Ahora bien, cuando una onda se propaga por el vacío su amplitud se atenúa sólo por expansión geométrica del frente de ondas, ya que no se producen fenómenos de absorción. De esta forma, la amplitud de una onda esférica que se propaga es inversamente proporcional a la distancia recorrida. Se establece que las características del aire, en lo que a atenuación se refiere, se aproximan al vacío, considerándose que la absorción que se produce por la propagación de la señal por el aire es despreciable comparada con otros medios.

El objetivo del siguiente ensayo es obtener la ecuación empírica de la atenuación que se produce en el pulso emitido por la antena (1.6 GHz) al propagarse por el aire. El dispositivo que se emplea es el mismo que el del apartado anterior. Una vez colocado el reflector metálico que se va alejando progresivamente se registra la señal. En este caso no se aplica ninguna función de ganancia para que las amplitudes de las ondas reflejadas no se distorsionen.

En cada una de las trazas, correspondientes a diferentes distancias de separación (x) se mide la amplitud de la onda directa (A_d) y la amplitud de la onda reflejada en la placa (A_r). En la figura 4.8a se observa que, como era de esperar, conforme aumentan las distancias de separación va disminuyendo la amplitud de las ondas reflejadas. Al comparar esta figura con la figura 4.7a se pone de manifiesto el efecto que tiene la aplicación de una función de ganancia.

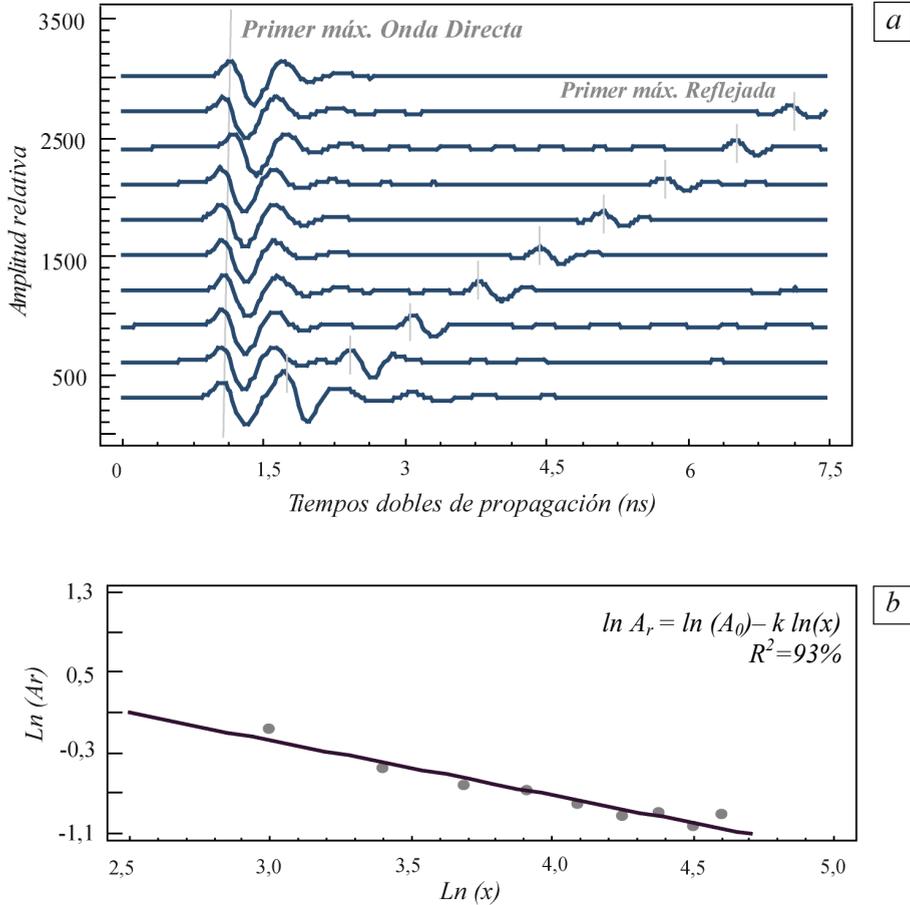


Figura 4.8.- (a) Trazas de los radargramas colocando la antena a diferentes distancias de la placa metálica $x=[0.10-1 \text{ m}]$; (b) Función de ajuste de la atenuación de las ondas al propagarse por el aire.

Una vez tomadas las lecturas de las amplitudes sobre cada radargrama se calcula la A_x (amplitud normalizada) a partir de la amplitud de la directa y de la reflejada. Esta amplitud normalizada depende del coeficiente de atenuación por expansión geométrica del frente de ondas (k) y de la distancia recorrida en su trayectoria (x).

$$A_x = \frac{A_r}{A_d} = A_0 \cdot x^{-k} \quad [4.2]$$

Con el objetivo de obtener los coeficientes de la ecuación 4.2, se ajusta la siguiente recta:

$$\ln A_r = \ln A_0 - k \ln x \quad [4.3]$$

El valor del coeficiente A_0 , que es una constante que depende de la amplitud inicial y el coeficiente de expansión geométrica de la ecuación 4.2 se obtiene con un nivel de confianza de $R^2=93\%$ (figura 4.8).

$$A_x = A_0 \cdot d^{-k} = 4.23 \cdot x^{-0.54} \quad [4.4]$$

De esta forma se comprueba cómo la expansión geométrica puede considerarse una función inversamente proporcional a la raíz de la distancia de propagación.

4.2.4.- ZONA DE INCIDENCIA DE RADIACIÓN

Las antenas empleadas en el equipo de georradar son antenas direccionales, es decir, que en su diagrama de radiación se aprecia una zona en la cual la radiación es máxima y que recibe el nombre de lóbulo principal. Este lóbulo principal se puede aproximar a un cono de radiación por el que se transmite el 90% de la energía. La superficie de intersección entre el cono principal de la radiación y el reflector recibe el nombre de huella de la antena, zona iluminada o zona de incidencia de radiación (figura 4.9).

Existen diversas aproximaciones para calcular el radio de la huella de la antena. Las más ampliamente aceptadas son la de la primera zona de Fresnel y la

propuesta por Conyers y Goodman (1997). Estas fórmulas se obtienen considerando que la huella de la antenna se puede aproximar a una circunferencia.

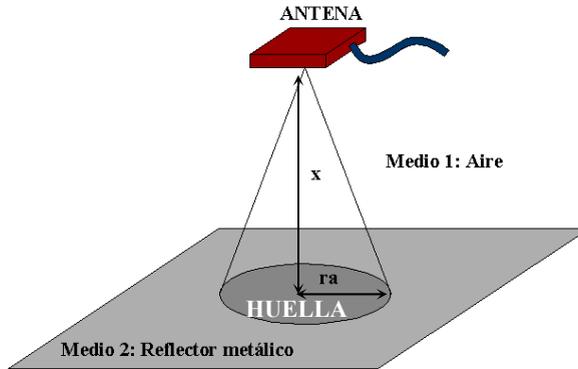


Figura 4.9.- Esquema del área iluminada por la antena, cuyo radio es ra , a una distancia x del medio reflector de constante dieléctrica ϵ_2 .

A partir del estudio de las zonas de Fresnel se considera que la huella de la antena corresponderá a la primera zona de Fresnel, cuyo radio es $ra=d_1/2$:

$$d_1/2 = \left(\frac{\lambda^2}{4} + x \cdot \lambda\right)^{1/2} \quad [4.5]$$

donde x es la distancia de separación (cm) entre la antena y la superficie reflectora y λ_0 la longitud de onda en el vacío:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_c} = 20 \text{ cm} \quad [4.6]$$

donde c es velocidad de propagación en el vacío (cm/ns) y f_c frecuencia central de emisión de la antena (GHz).

De modo que, según estos cálculos, al separar la antena de 1.6 GHz una distancia de 1 m, los medios han de tener como máximo 46 cm de radio o 0.66 m² de superficie (tabla 4.2), para que el 90% de la radiación emitida por la antena atraviese el medio estudiado.

Según Conyers y Goodman (1997) la huella de la antena se define como el área iluminada por la antena, cuyo radio ra será:

$$ra = \frac{\lambda}{4} + \frac{x}{\sqrt{\epsilon_{ef} + 1}} \quad [4.7]$$

donde ϵ_{ef} es la permitividad efectiva promedio del medio que atraviesa, que para el caso que a continuación se desarrolla es el aire ($\epsilon \approx 1$). Esta última aproximación, con la que se simplifica el problema, ha sido utilizada por diversos autores como García (1997).

Tabla 4.2.- Superficie que cubre la huella a diferentes distancias, según la 1ª zona de Fresnel y según Conyers y Goodman (1997).

x (cm)	$d_1/2$ (cm)	S_F (cm ²)	ra (cm)	S_a (cm ²)
10	17	942	12	458
20	22	1570	19	1151
30	26	2198	26	2158
40	30	2826	33	3479
50	33	3454	40	5114
60	36	4082	47	7063
70	39	4710	54	9326
80	41	5338	62	11903
90	44	5966	69	14794
100	46	6594	76	17999

En la tabla 4.2 se presentan los valores del radio de la huella de la antena en el caso teórico por los dos métodos al situar un reflector a diferentes distancias y la superficie que cubre la huella de la antena a la distancia de separación x según la 1ª zona de Fresnel (S_F) y la superficie según Conyers y Goodman (S_a). En ella se

aprecia una divergencia importante entre el valor de la superficie obtenido con un método y con otro, ya que para una misma distancia de separación de 1 m, en un supuesto la huella tiene un radio de 46 cm, mientras que en el otro tiene un radio de 76 cm. La huella de mayor tamaño es siempre la calculada con la expresión de Conyers y Goodman (1997).

4.2.5.- ESTUDIO DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTO DE CONTORNO

Es necesario saber el efecto que causa sobre la amplitud de la señal el hecho de que la superficie del reflector sea menor que la huella de la antena. Este punto es de especial interés ya que, al trabajar con viguetas de madera, debido a sus dimensiones es común encontrarnos con esta situación.

Cuando la antena emite sobre un reflector de menor tamaño que la huella se reciben las reflexiones procedentes de este medio ($M1$), pero también las del medio que lo rodea ($M2$). Esto da lugar a que la onda recibida tenga una amplitud diferente a la que le correspondería si solamente hubiera reflexión en $M1$, como consecuencia de que el $M2$ circundante tiene un coeficiente de reflexión r diferente al primero (véase apartado 2.1.4).

En el ensayo que se describe a continuación se evalúa cómo influye esta pérdida de sección y para ello se trabaja con tres placas metálicas de diferentes dimensiones (tabla 4.3). En primer lugar se calcula el porcentaje de la huella de la antena, halladas con [4.5] y [4.7] a diferentes distancias de separación entre la antena y el reflector, que quedaba fuera de 3 placas metálicas.

Como se ve en la tabla 4.4 en ambos casos la huella de la antena está completamente dentro de la superficie de la Placa 1, independientemente de la distancia de separación. Sin embargo, para las Placas 2 y 3 conforme aumenta la

distancia de separación, aumenta significativamente el porcentaje de la huella que se queda fuera de la misma. En el caso de la Placa 2, a partir de una distancia de separación de 30 cm, calculando la huella con los dos procedimientos, hay un porcentaje significativo de la huella que no está completado por la placa metálica. En el caso de la Placa 3, sólo con separar 10 cm la antena ya se tiene parte de la huella que no está cubierta por la placa, llegando en el caso extremo de la distancia de separación de 1 m a ocupar la placa menos del 5% de la huella.

Tabla 4.3.- Dimensiones de las placas metálicas 1, 2 y 3 para el estudio de las pérdidas por efecto de contorno.

<i>Placas</i>	<i>Dimensiones</i>	<i>Área</i>
<i>Placa 1</i>	100 x 100 cm	10000 cm ²
<i>Placa 2</i>	36 x 45 cm	1620 cm ²
<i>Placa 3</i>	17 x 18 cm	306 cm ²

Con el objeto de comprobar de forma empírica cómo varía la amplitud de las reflexiones en función del tamaño del reflector, es decir, del porcentaje de la huella que queda fuera del mismo, se toman las lecturas de las amplitudes del primer máximo positivo de la reflexión sobre las tres placas metálicas y se analiza su comportamiento (figura 4.10). Las amplitudes registradas se normalizan con la amplitud del primer máximo positivo de la onda directa al emitir al aire.

En primer lugar, queda patente que para las tres placas la tendencia de disminución de la amplitud con respecto a la distancia es muy similar, siguiendo el mismo patrón de atenuación que se obtiene en el apartado 4.2.3.

La diferencia de magnitud entre las amplitudes de las reflexiones de cada placa es debida fundamentalmente a que cuanto más pequeña es la placa menor es el porcentaje de la huella que se refleja dentro de la placa metálica y mayor la que se refleja fuera y por tanto menor la amplitud final resultante. Por este motivo, la Placa 1 presenta las mayores amplitudes y la Placa 3 las menores.

Tabla 4.4.- Porcentaje de la huella de la antena que queda fuera de cada una de las placas metálicas empleadas en el estudio de las pérdidas por efecto de contorno calculadas según la 1ª zona de Fresnel y según Conyers y Goodman (1997).

<i>Distancia</i>	<i>1ª Zona de Fresnel</i>			<i>Conyers y Goodman (1997)</i>		
	<i>Af₁</i>	<i>Af₂</i>	<i>Af₃</i>	<i>Af₁</i>	<i>Af₂</i>	<i>Af₃</i>
<i>10</i>	0	0	66	0	0	32
<i>20</i>	0	0	80	0	0	73
<i>30</i>	0	24	86	0	24	86
<i>40</i>	0	43	89	0	53	91
<i>50</i>	0	53	91	0	68	94
<i>60</i>	0	60	92	0	77	96
<i>70</i>	0	66	94	0	82	97
<i>80</i>	0	69	94	0	87	97
<i>90</i>	0	73	95	0	89	98
<i>100</i>	0	76	95	0	91	98

Af₁, Af₂, Af₃: Áreas de la huella fuera de la Placa 1, 2 y 3 respectivamente

A partir de 20 cm de separación y hasta 70 cm las amplitudes medidas para las placas 1 y 2 son muy similares. Para distancias superiores, los valores de amplitud divergen apreciándose un descenso para la Placa 2. Por lo tanto, el hecho de que la disminución de amplitud sea parecida para las placas 1 y 2 sugiere que las fórmulas teóricas sobredimensionan el tamaño de la huella. Por ejemplo, para una distancia de 40 cm, la huella de la antena está completamente dentro de la Placa 1. Sin embargo, para la Placa 2 a esa misma distancia la placa sólo ocupa el 57% de la huella según la 1ª zona de Fresnel y el 47% según Conyers y Goodman (1997).

A partir de los resultados se observa que la disminución en la amplitud es ostensible solamente cuando el área de la huella que queda fuera del reflector es mayor del 66%, calculada con la primera zona de Fresnel.

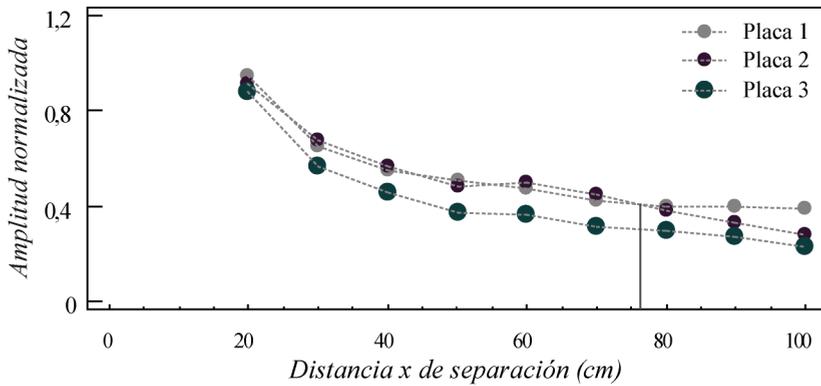


Figura 4.10.- Amplitudes registradas en las tres placas metálicas de diferente tamaño a diferentes distancias de separación ($x=[0.20-1\text{ m}]$).

4.2.6.- CAPACIDAD DE RESOLUCIÓN DE LA ANTENA DE 1.6 GHz

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

A.-Resolución vertical

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.

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

$$B \cong f_c = \frac{1}{T} = 1.6GHz \quad [4.8]$$

siendo T la duración del 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 (Annan, 2003).

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

$$R_v = e_{medio} \geq \frac{v \cdot T}{2} = \frac{\lambda_m}{2} \quad [4.9]$$

donde v es la velocidad de propagación de las ondas en el medio y λ_m la longitud de onda de la señal en el medio estudiado (Spagnolini, 1997).

A partir de la ecuación 4.9 puede verse que para mejorar la R_v existen dos opciones. O bien se disminuye la velocidad de propagación del medio, o bien se disminuye la duración del impulso generado por el georradar. La disminución de la duración del pulso (T) implica un aumento en el ancho de banda en el espectro de frecuencias (B). De esta forma es como se mejora la resolución vertical (R_v), es decir, diseñando antenas que generen señales de menor duración que darán como resultado una longitud de onda menor, pero en contraposición presentarán una penetración menor de la onda en el medio.

En el caso de trabajar con la antena de 1.6 GHz la duración del pulso es $T=0.625$ ns. En la tabla 4.5 se muestran los valores de resolución vertical o espesores mínimos de esta antena para una serie de medios calculados a partir de una recopilación de constantes dieléctricas recogidas de diferentes fuentes como Conyers y Goodman (1997), García (1997) y Lorenzo (1996).

Tabla 4.5.- Constantes dieléctricas, velocidades de propagación y resolución vertical máxima y mínima para diferentes medios con la antena de 1.6 GHz (GSSI).

<i>Material</i>	$\epsilon_{(Mínima)}$	$\epsilon_{(Máxima)}$	v^* (Mínima)	v^* (Máxima)	R_v^{**} (Mínima)	R_v^{**} (Máxima)
<i>Agua dulce</i>	80	81	03.4	03.3	1.0	1.0
<i>Agua salada</i>	81	88	03.3	03.2	1.0	1.0
<i>Aire</i>	1	1	30.0	30.0	9.0	9.0
<i>Arcilla seca</i>	2	4	21.2	15.0	6.4	4.5
<i>Arcilla húmeda</i>	8	40	10.6	04.7	3.2	1.4
<i>Arenisca húmeda</i>	8	8	10.6	10.6	3.2	3.2
<i>Arenisca seca</i>	6	6	12.2	12.2	3.7	3.7
<i>Hormigón</i>	6	13	12.2	07.7	3.7	7.8
<i>Madera</i>	2	8	21.2	10.6	6.4	3.2

* v en (cm/ns), ** R_v en cm

Con el objetivo de comprobar que la definición teórica de la R_v se ajusta con los datos experimentales se realiza el siguiente ensayo con probetas de hormigón. Se fabrican unas probetas de hormigón de calidad H-30 y con una relación agua-cemento (A/C) de la amasada de 0.55. De esta calidad se han fabricado 3 probetas prismáticas de longitud 60 cm y diferentes secciones: 20 x20 cm, 20 x 13.5 cm y 20 x 7.5 cm. Durante el periodo de endurecimiento las probetas fueron sometidas a un curado en una cámara húmeda hasta 24 horas antes del día 28. A partir de este momento las muestras se dejan secar al aire hasta los 90 días que es el día en el que se registran los datos con el georradar.

En cada una de las probetas prismáticas se desplaza la antena sobre sus 4 caras. De los registros obtenidos se calcula la v y la ϵ (tabla 4.6). Todas ellas presentan valores similares, a pesar de tener dimensiones diferentes, por estar por encima de la R_v .

De esta forma se confirma que para identificar separadamente las distintas reflexiones es necesario trabajar con muestras o viguetas de madera cuyos espesores sean superiores a la R_v . Dadas las escuadrias estándar de las maderas se trabaja con la antena de 1.6 GHz de frecuencia central, ya que los espesores

son mayores que la R_v y, por tanto, se confirma la adecuación de la misma para el estudio de la madera estructural.

Tabla 4.6.- Velocidades de propagación y constante dieléctrica del hormigón a los 90 días de fabricación en probetas de diferentes tamaños.

<i>Probeta</i>	<i>Lado</i>	<i>v (cm/ns)</i>	<i>ϵ</i>
1	1	8.4	12.7
	2	8.6	12.3
	3	8.3	13.1
	4	8.5	12.4
2	1	8.5	12.6
	2	8.5	12.6
	3	8.3	13.0
	4	8.5	12.6
3	1	8.3	13.1
	2	8.0	14.2
	3	8.3	13.1
	4	8.0	14.2

B.-Resolución horizontal

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

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

Existen diversas formas de cuantificar la resolución horizontal atendiendo a diferentes criterios: la primera zona de Fresnel, el criterio de Conyers y Goodman (1997), el de Reynolds (1997) y el de Lorenzo (1994).

La primera zona de Fresnel define el área mínima detectable, de tal forma que los rasgos menores del medio no se detectan. En definitiva cuanto mayor sea el radio de la primera zona de Fresnel peor será la R_H y su radio se obtiene a partir de la ecuación:

$$R_H = d_1 / 2 \quad [4.10]$$

Según Conyers y Goodman (1997), para poder diferenciar dos elementos como eventos separados horizontalmente en un registro, deben estar separados como mínimo la distancia que proporciona el eje principal de la huella, calculándose el radio de la huella (ra) según la ecuación 4.7.

$$R_H = ra \quad [4.11]$$

Reynolds (1997) define la resolución horizontal como inversamente proporcional a $\alpha^{1/2}$, siendo α el factor de atenuación (véase apartado 2.1.2). De esta forma se entiende que la resolución horizontal es mayor en un medio altamente atenuante que en uno que no lo sea.

$$R_H = \frac{1}{\alpha^{1/2}} \quad [4.12]$$

Lorenzo (1994) considera que un elemento de dimensiones finitas queda perfectamente determinado con un número de trazas t si el número de ellas es lo suficientemente grande. Propone que el número de trazas (nt) mínimo necesario vendrá definido por la siguiente ecuación:

$$R_H = nt = \frac{2 \cdot x \cdot t_s}{v_a} \quad [4.13]$$

donde x es la separación entre la antena y el objeto, v_a la velocidad de desplazamiento de la antena, y t_s el número de trazas por segundo, teniendo en cuenta que esta fórmula se define considerando la semi-anchura del lóbulo principal con un ángulo de 45° .

4.3.- ANÁLISIS DEL CAMBIO DE POLARIDAD DE LAS ONDAS AL REFLEJARSE EN DIFERENTES INTERFASES

Para confirmar que las reflexiones observadas en los radargramas son exactamente las producidas en las interfases y que no se trata de singularidades particulares se precisa algún criterio que ayude a contrastar los resultados. Un posible criterio es el análisis del cambio de fase que experimenta una onda cuando se transmite de un material con una determinada constante dieléctrica a otro cuya constante es diferente (mayor). Autores como Arcone (1996) han utilizado estos razonamientos en sus investigaciones.

La justificación teórica se obtiene a partir de las ecuaciones de Fresnel y a partir de ellas pueden estudiarse los cambios de fase que sufren las ondas al reflejarse y al refractarse.

En primer lugar, se ha de discernir entre luz transmitida y luz reflejada. En el caso de la luz transmitida, a partir de las ecuaciones de Fresnel, y teniendo en cuenta que los ángulos de incidencia y de transmisión son siempre inferiores a $\pi/2$, se deduce que las amplitudes de la onda transmitida tienen siempre el mismo signo que la amplitud de la onda incidente. Por tanto no hay cambio de fase en la refracción, ya que un cambio de signo en la amplitud equivale a un cambio de π en la fase.

Para la reflejada, en el caso particular de incidencia normal, que es el caso de este estudio, se tiene que discernir entre dos situaciones en función del índice de refracción, cuando $n_1 < n_2$ y cuando $n_1 > n_2$, siendo n_1 y n_2 el índice de refracción del medio 1 y 2 respectivamente. Se obtiene el coeficiente de reflexión a partir de las ecuaciones 2.33 y 2.34 y teniendo en cuenta que $n \sim \sqrt{\epsilon}$ se tiene:

$$r = \frac{A_r}{A_i} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} = \frac{v_2 - v_1}{v_1 + v_2} \quad [4.14]$$

donde v_1 y v_2 son las velocidades de propagación en el medio 1 y 2 respectivamente.

En el caso de que $n_1 < n_2$ se observa que el numerador siempre es negativo y el denominador siempre positivo, lo que implica que necesariamente se tiene que producir un cambio de fase. Sin embargo, si $n_1 > n_2$ no se produce cambio de fase sea cual sea la orientación del vector incidente.

Así pues, se puede decir que, cuando una onda electromagnética incide en un reflector, la parte que se refracta no sufre nunca cambio de fase, y la parte que se refleja sufre cambio de fase únicamente si el índice de refracción (o la constante dieléctrica) del segundo medio es de mayor magnitud que el del primer medio.

Para poder saber si una onda sufre un cambio de fase es necesario compararla con otra tomada como referencia. Dado que la onda incidente no cambia de fase cuando se transmite es posible tomar como onda de referencia la onda directa.

Al estudiar las velocidades de propagación de las ondas en la madera se necesita tener claro si se producen cambios de fase en las reflexiones y transmisiones, para poder identificar sus tiempos de llegada. En muchos casos no se cumple ni la distancia mínima de no interferencia de señales, ni incluso la resolución vertical y de esta forma, las señales se solapan y es difícil realizar la identificación de cada reflexión por separado. Por este motivo, se realiza un análisis de los cambios de fase en este medio, para que en los posteriores estudios desarrollados a la largo de la tesis se disponga de unos valores de referencia de cómo se producen las reflexiones.

Otro problema añadido que se presenta es que la onda se encuentra muy atenuada al reflejarse sobre la base de la muestra de madera. Por este motivo, a las muestras ensayadas, en algunos casos, se les coloca un reflector metálico en la base de la misma con objeto de amplificar la reflexión. Por lo tanto, en este estudio detallado de los cambios de fase también se estudia el comportamiento de la reflexión que se produce en la interfase madera-reflector metálico.

Tabla 4.7.- Cambios de fase en las reflexiones en las interfases de diferentes medios: aire-reflector metálico, aire-madera, madera-aire y madera-reflector metálico.

<i>Medio 1</i>	<i>Medio 2</i>	<i>Coefficiente reflexión</i>	<i>Cambio Fase</i>
Aire	Reflector metálico	$r < 1$	+
Aire	Madera	$r < 1$	+
Madera	Aire	$r > 1$	-
Madera	Reflector metálico	$r < 1$	+

En primer lugar, se estudia de forma teórica los posibles cambios de fase teniendo como primer medio madera y segundo aire, o bien, como primer medio madera y como segundo un reflector metálico. Posteriormente, se contrasta cómo se producen los cambios de fase en los radargramas obtenidos de las mediciones reales.

Se obtiene el coeficiente de reflexión r (ecuación 4.14), y con los valores de las constantes dieléctricas de los diferentes materiales utilizados (tabla 4.5), asumiendo que la $\epsilon_{(metal)} = \infty$ por ser un conductor. En la tabla 4.7 se anota, si hay cambio de fase teórico en la señal reflejada en la interfase con un signo “+” y si no lo hay con “-”.

Por último, se comprueba cómo se producen estos cambios de fase teóricos en radargramas reales. Para ello, se realizan mediciones estáticas sobre la vigueta colocando la antena sobre el canto y sobre la cara (figura 4.11).

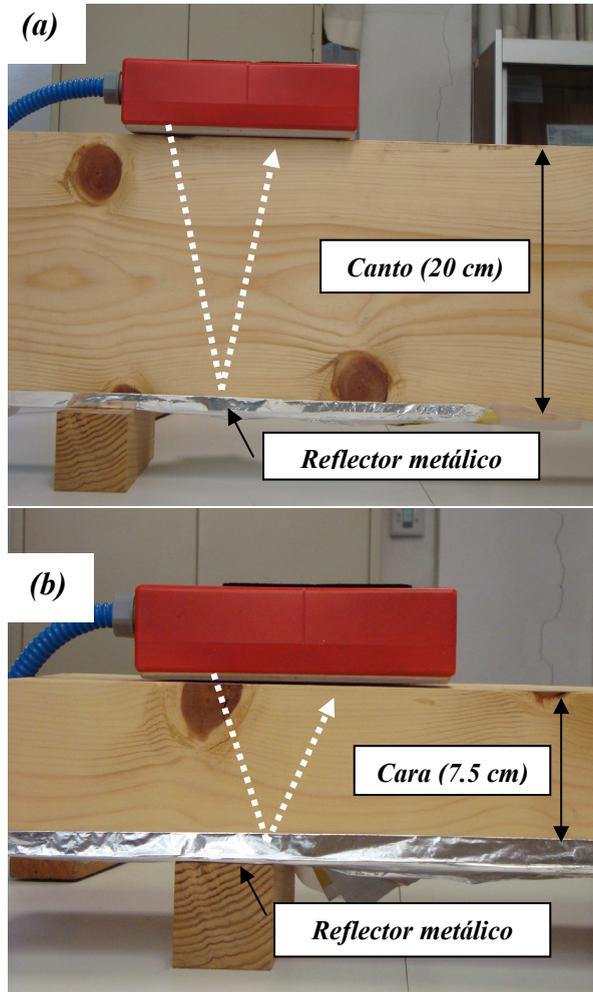


Figura 4.11.- Posiciones de la antena en la adquisición de registros: (a) adquisición en la que las ondas recorren la cara y (b) el canto.

En los radargramas adquiridos apoyando la antena en canto, por tratarse de muestras de madera con espesores superiores a la R_v , la reflexión que se produce en la base de la vigueta se identifica claramente. Como se aprecia en la figura 4.12 si se coloca un reflector metálico en la base de la muestra, se produce un cambio de fase, marcado en la figura con una línea punteada gris. Mientras que

en la reflexión en la base de la muestra de madera sin reflector metálico, no se produce este cambio de fase.

En las mediciones realizadas al atravesar el canto, es decir, colocando la antena en cara, es más difícil identificar el cambio de fase. Esto se debe a que el espesor de $7.5 \text{ cm} < R_v$ y, por tanto, la onda directa y de la onda reflejada en la base de la muestra se solapan.

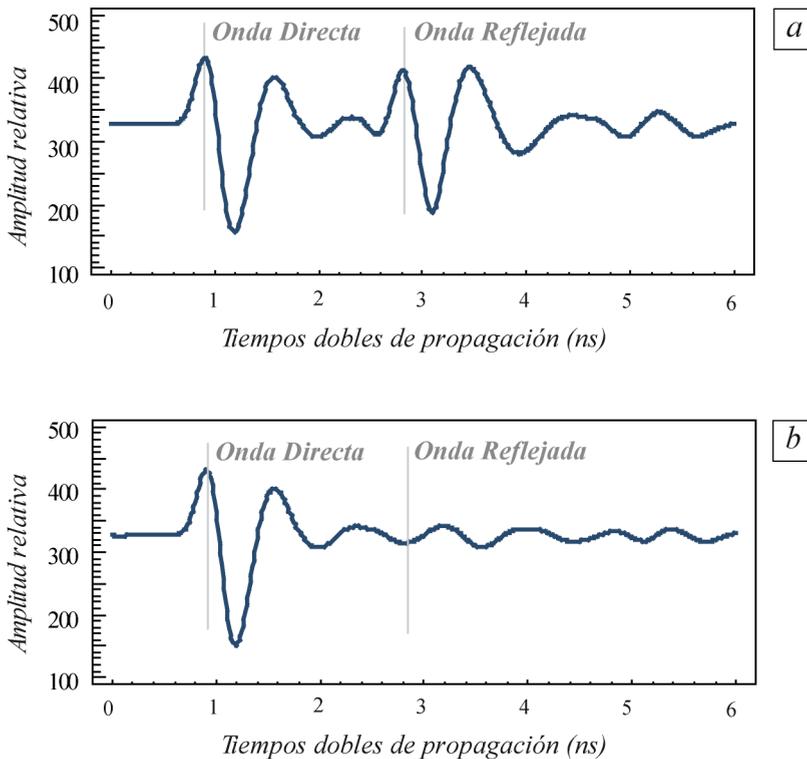


Figura 4.12.- Cambio de fase de la onda reflejada en la base de una muestra de *Pinus nigra Arnvar. Salzmannii* al apoyar la antena sobre el canto con un reflector metálico bajo la muestra (a) y sin el reflector (b).

Aun así, se comparan los registros realizados con y sin reflector metálico bajo la muestra y se consigue diferenciar cuando se produce el cambio de polaridad (figura 4.13). Al contrastar estos dos registros es cuando se puede apreciar el

cambio de fase. Esto sugiere que, en determinados registros cuando el espesor de la muestra es menor que la R_v , es recomendable tomarlos con y sin reflector metálico para facilitar la identificación de las fases.

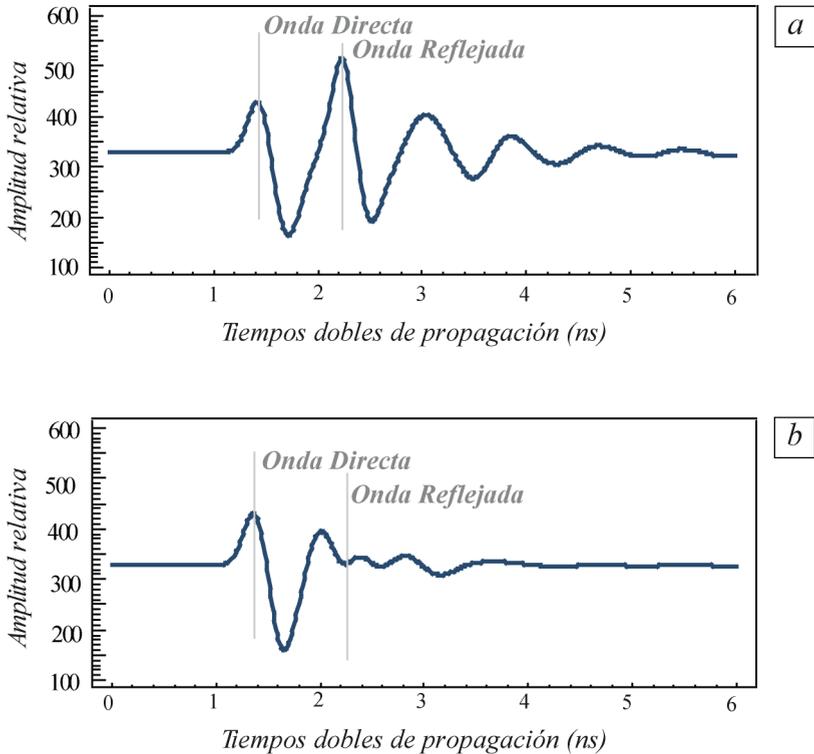


Figura 4.13.- Cambio de fase de la onda reflejada en la base de una muestra de *Pinus nigra Arn, var. Salzmannii* al apoyar la antena sobre la cara con un reflector metálico bajo la muestra (a) y sin el reflector (b).

4.4. –DESCRIPCIÓN DE LA TIPOLOGÍA DE ADQUISICIÓN DE REGISTROS

En el estudio de la aplicación del georradar a un medio como la madera debido al bajo contraste de impedancia que existe entre la madera y el aire, las reflexiones que se producen en la base de la muestra (interfase madera-aire), presentan unas amplitudes muy bajas y sin cambio de polaridad. Esto da lugar a que en la mayoría de los casos resulte muy complicado la identificación de las reflexiones. Esta situación mejora cualitativamente cuando bajo la muestra de madera se sitúa un reflector metálico. En este caso las amplitudes de la reflexión aumentan significativamente y además se produce un cambio de fase que ayuda a reconocer la señal. Evidentemente todo ello condiciona la forma en la que deben adquirirse los registros. En la figura 4.14 se describen los distintos tipos de mediciones que se realizan a lo largo de la tesis dependiendo del tipo de adquisición y si se coloca el reflector metálico o no.

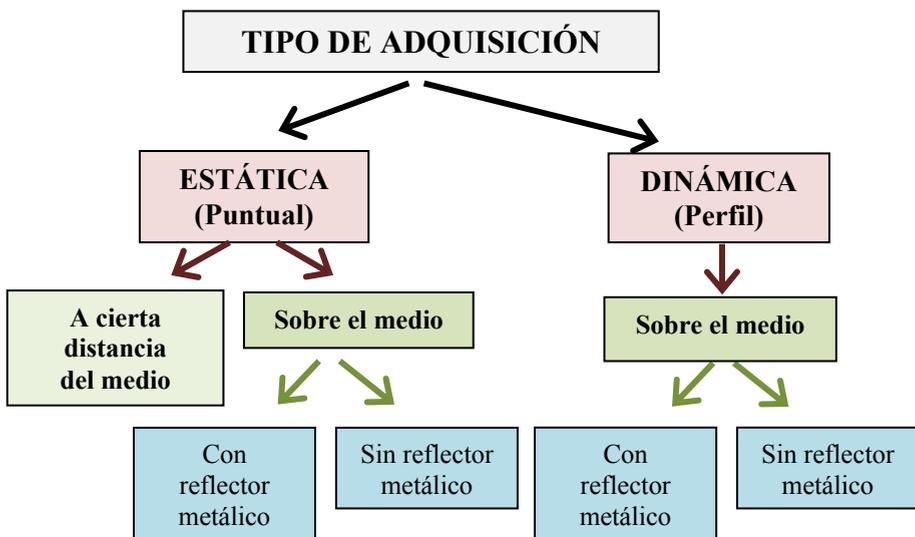


Figura 4.14.- Diagrama de tipos de adquisiciones de registros estáticas o dinámicas con una antena direccional monoestática con o sin reflector metálico bajo la muestra.

En las mediciones estáticas a cierta distancia de la muestra es indiferente si hay o no bajo la muestra un reflector metálico ya, que en este caso no se estudia la reflexión en esa interfase por encontrarse demasiado atenuada. Asimismo, tampoco se realiza la adquisición en dinámico a cierta distancia del medio, puesto que sólo aporta información de la parte más superficial de la madera y no de la reflexión en la base de la muestra o la propagación por el interior de la misma. En tal caso, el resultado de esta medición es muy similar a la adquisición en estático a cierta distancia del medio. Por otra parte, en algunos casos las adquisiciones dinámicas se hacen colocando el reflector metálico sólo en parte de la muestra o bien en los extremos de la misma. De esta forma en un mismo registro se dispone de dos tipos de mediciones y con ello se diferencia mejor cuando se produce el cambio de fase y se mejora la identificación de la señal.

Por último, se debe tener en cuenta que, tal y como se comenta en el capítulo 3.2, la madera es un material anisótropo. Por ello, en la mayoría de los casos estudiados en la tesis es necesario aplicar diferentes métodos de adquisición de registros en las diferentes superficies que componen las muestras estudiadas: cara, canto y longitud (figura 4.15). Dependiendo de los objetivos de cada estudio se toman los registros en unas superficies u otras.

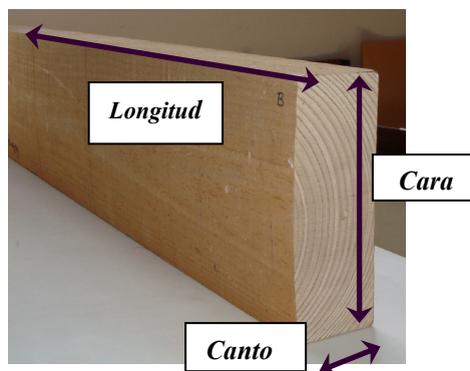


Figura 4.15.- Esquema de la secciones de una vigueta: Longitud (*L*), cara (*Cr*) y canto (*Ct*).

En concreto, para definir el dispositivo de adquisición de registros se establece el siguiente criterio, a partir de la posición de la antena y la sección que atraviesa. De esta forma si se dice que se trabaja con el dispositivo *Cara_ParalelaF*, se hace referencia a que la antena se coloca sobre la cara y se estudia cómo se comportan las ondas al atravesar el canto, orientando la antena paralela a la dirección de las fibras de la muestra. En la tabla 4.8 y figura 4.16 se resumen todos los posibles casos que se presentan a lo largo de toda la tesis.

Tabla 4.8.- Posiciones de la antena y nomenclatura del dispositivo de registro.

<i>Caso</i>	<i>Posición de la antena</i>	<i>Sección analizada</i>	<i>Dispositivo</i>
<i>a</i>	Canto	Se estudia cara	<i>Canto</i>
<i>b</i>	Testa	Se estudia longitud	<i>Testa</i>
<i>c</i>	Cara: Orientada paralela a dirección fibras	Se estudia canto	<i>Cara_ParalelaF</i>
<i>d</i>	Cara: Orientada perpendicular a dirección fibras	Se estudia canto	<i>Cara_PerpendicularF</i>

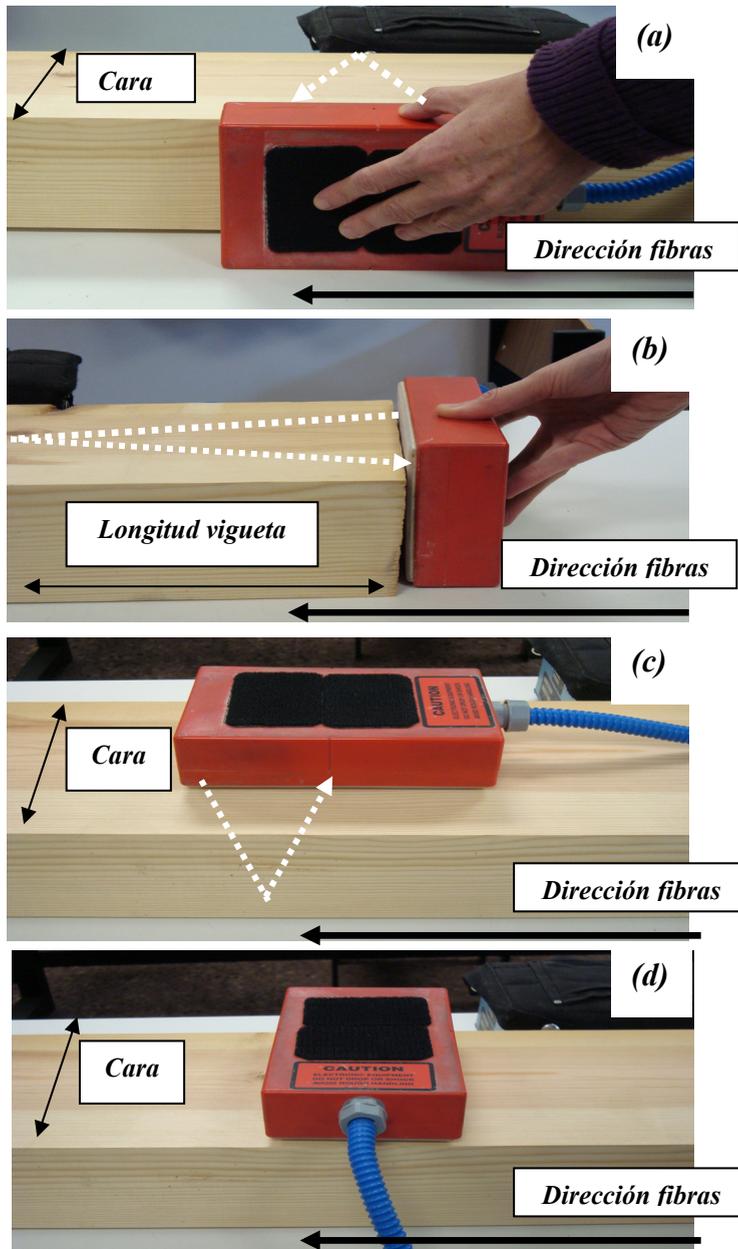


Figura 4.16.- Posiciones de la antena y nomenclatura del dispositivo de estudio: (a) Antena sobre canto; (b) sobre testa; (c) sobre la cara orientada paralela a la dirección de las fibras; (d) sobre la cara orientada perpendicular a la dirección de las fibras.

PARTE 2

**ANÁLISIS DE LAS PRINCIPALES
PROPIEDADES FÍSICAS DE
LA MADERA MEDIANTE GEORRADAR**

Por caracterización de la madera se entiende la determinación de un gran número de propiedades del material, que van desde el conocimiento de las particularidades de la pared celular a las características macroscópicas del tronco, pasando por una serie de propiedades físicas, químicas, mecánicas y tecnológicas.

Cuando un rayo de microondas se propaga a través de la madera, se produce un cambio de polaridad, se atenúa y se produce un cambio de fase. Estos cambios que se producen en la onda, todos ellos medibles por medio de georradar, dependerán de la dirección de la fibra, del contenido de humedad y de la densidad (Torgovnikov, 1993). Por tanto en este bloque de la tesis se analizan estas tres propiedades físicas de la madera: la anisotropía dieléctrica, el contenido de humedad y la densidad, a partir de las variaciones producidas en los parámetros de las ondas electromagnéticas emitidas con el equipo de georradar. Los parámetros de onda que se analizan son la velocidad de propagación, la amplitud de la onda directa y la reflejada y por último los espectros de frecuencia de las señales electromagnéticas.

*La primera propiedad estudiada es la **anisotropía dieléctrica**. La madera no es un material homogéneo, sino un material muy diferente según el plano o la dirección que se considere. Como resultado de esa desigual configuración presenta un desigual comportamiento tanto mecánico como dieléctrico que es necesario evaluar.*

*La segunda propiedad analizada es el efecto que produce en las ondas electromagnéticas la variación del **contenido de humedad**. El estudio de las relaciones entre el agua y la madera es una pieza clave en la comprensión de su comportamiento, dado que afecta a la mayoría de sus procesos de transformación, así como al comportamiento de ésta a lo largo de su vida útil.*

*Por último, se realizan una serie de ensayos para caracterizar la **densidad** de la madera por medio de las ondas electromagnéticas. La densidad es una de las propiedades que caracteriza a la madera y está estrechamente relacionada con la mayoría de las restantes propiedades físicas, mecánicas y tecnológicas. Conocer la densidad o la variación de la misma, es por tanto, tener un conocimiento aproximado de otras múltiples características y de su aptitud para el uso.*

CAPÍTULO 5
ANISOTROPIA DIELECTRICA

El comportamiento dieléctrico de la madera frente a un campo eléctrico depende de muchos factores, siendo los principales: la frecuencia del campo, la temperatura, el contenido de humedad, la densidad y la desviación de fibra de la madera (Torgovnikov, 1993).

El objetivo de este estudio es analizar la variación en las señales electromagnéticas emitidas y registradas con georradar con una antena de frecuencia central 1.6 GHz como consecuencia de la diferente disposición de las fibras. Todas las viguetas se encuentran a una temperatura, un contenido de humedad y una densidad constante a lo largo de todo el estudio.

Cuando se incide sobre un medio con radiación electromagnética se pueden dar dos situaciones. La primera tiene lugar cuando el vector del campo eléctrico es paralelo al plano de incidencia, llamado en este caso polarización paralela (figura 5.1a). La segunda se produce cuando el vector del campo eléctrico es perpendicular al plano de incidencia y se conoce como polarización perpendicular (figura 5.1b). El propio diseño de la antena determina como se produce la polarización del campo. En este caso se trabaja con una antena que radia un campo electromagnético máximo en la dirección perpendicular al dipolo, y nulo a lo largo de su eje (Duke, 1990), es decir, el campo eléctrico es perpendicular al plano de incidencia (figura 5.1b). Algunos autores como van der Kruk y Slob (2004), Jordan et al. (2004) y Barsottelli et al. (2006) con objeto de caracterizar dieléctricamente el comportamiento de algunos materiales, analizan las variaciones que se producen en las amplitudes de las ondas al propagarse el campo en diferentes direcciones del material.

En el caso de la madera, su comportamiento dieléctrico varía dependiendo de la dirección de análisis con respecto a las fibras que la componen. Por tanto, en este estudio se analiza, partiendo de un campo polarizado perpendicularmente, cual es la variación que se produce en las ondas electromagnéticas al incidir diferencialmente con respecto a la disposición de las fibras. Variando la posición

del dipolo, es decir, variando la posición de la antena el campo eléctrico oscila perpendicular a las fibras (figura 5.1c) o en paralelo a las fibras (figura 5.1d).

Para ello se evalúan dos lotes diferentes de madera. El primero de ellos consiste en probetas de madera de *Pinus pinaster* Ait. que se analizan con objeto de estudiar el comportamiento anisótropo en una misma especie. El segundo lote consiste en 20 probetas de madera de diferentes especies caracterizadas por su diferente densidad. Con este segundo lote, se comprueba si los patrones de comportamiento encontrados para el *Pinus pinaster* Ait. se repiten en el resto de especies. En todas ellas se analiza el comportamiento dieléctrico en 4 posiciones de la antena respecto a la fibra.

Los parámetros de onda que se analizan son la velocidad de propagación, la amplitud de la onda directa y la reflejada y por último los espectros de frecuencia de las señales electromagnéticas.

El espectro de frecuencia de una onda electromagnética es una medida de la distribución de amplitudes de cada frecuencia que componen la onda. Los espectros calculados a lo largo de toda la tesis se obtienen empleando la Fast Fourier Transform (FFT). Por medio de este operador matemático se transforma una función del dominio temporal (tiempos dobles de propagación) al dominio frecuencial. El objetivo del análisis espectral es determinar cuáles son las frecuencias dominantes en la señal. Además, en el caso concreto de esta tesis se calculan para estudiar de qué forma se ven alterados como consecuencia de la variación de las distintas propiedades físicas de la madera.

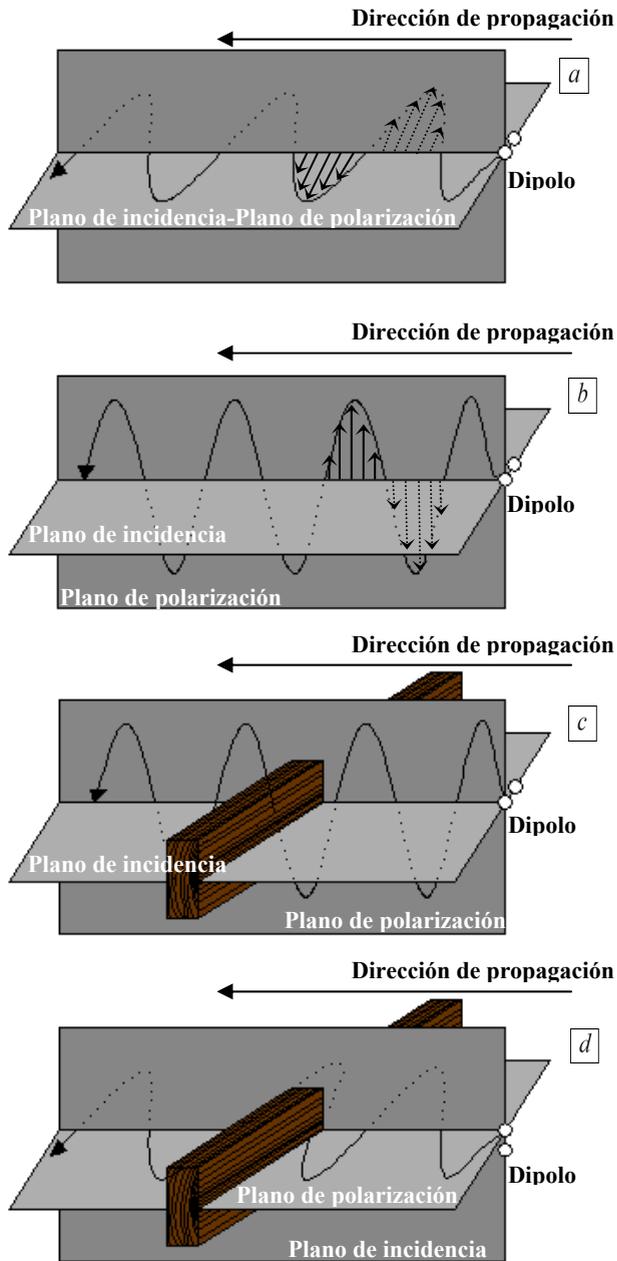


Figura 5.1.- Polarización del campo eléctrico paralela (a) y perpendicular (b). Polarización perpendicular del campo eléctrico que oscila perpendicular a las fibras (c) y paralela a las mismas (d).

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

5.1.- COMPORTAMIENTO DIELECTRICO ANISÓTROPO DE LA MADERA

La madera es un material dieléctricamente anisótropo ya que su comportamiento depende del plano o dirección que se considera.

Hasta 1971 hay muy pocos estudios que versan sobre la anisotropía dieléctrica de la madera. Entre estos estudios se encuentran los de Kröner y Pungs (1952) que afirman que la anisotropía dieléctrica de la madera es consecuencia principalmente de su estructura macroscópica (composición de madera y aire).

Son Norimoto y Yamada, los primeros que sugieren que el problema de la anisotropía dieléctrica de la madera está relacionado con la frecuencia. Los estudios realizados por Norimoto y Yamada (1971) comprueban que la anisotropía dieléctrica de la madera a bajas frecuencias (entre 30 Hz-10 MHz), depende no sólo de la estructura macroscópica, sino también de la estructura molecular. Establecen que la probabilidad de salto de dipolo a un lado adyacente es considerablemente mayor cuando se aplica un campo en la dirección paralela con respecto a las fibras que cuando se hace en otra dirección. Posteriormente Norimoto y Yamada (1972) comprueban que las propiedades dieléctricas de la madera están fuertemente influidas por la celulosa en la dirección paralela. Sin embargo, en la dirección perpendicular las propiedades dieléctricas están influidas por la lignina y ésta presenta valores dieléctricos mucho menores que la celulosa.

Sahin y Nürgül (2004) complementan lo expuesto anteriormente confirmando la tendencia definida y para ello se basan en que en estado anhidro, las macromoléculas de celulosa en la madera están ligadas por fuerzas de segunda valencia que previenen a los dipolos de las moléculas del desplazamiento bajo el influjo del campo magnético. El proceso de humidificación da lugar a la

penetración de moléculas de agua en la celulosa y debilita la adherencia transversal, dando lugar a un aumento de la movilidad de los dipolos.

Tal y como se detalla en el capítulo 3.6 la constante dieléctrica es mayor cuando el campo se aplica paralelo a la fibra que perpendicular (Forest Products Laboratory, 1999).

Bucur (2003) presenta una relación de estudios que corroboran que la constante dieléctrica es mayor cuando el campo se aplica paralelo a la fibra. Ejemplo de ello son los resultados para el Pino Oregón que presentan James y Hamill (1965) donde la relación entre la constante dieléctrica en dirección paralela y perpendicular es 1.3. Chazelas (1991) obtiene para esta relación un coeficiente de 1.2 para el caso del Abeto. Jiménez (1999) afirma que la constante dieléctrica es mayor para la polarización paralela a la fibra que perpendicular a ella, siendo la razón de 1.3 a 1.6. Más recientemente Sahin y Nürgül (2004) encuentran que la relación es entre 1.2 y 1.3 veces mayor para tres especies diferentes.

Autores como James y Hamill (1965), Chazelas (1991) o Torgovnikov (1993) comprobaron experimentalmente para diferentes frecuencias de emisión y distintas especies tanto de coníferas como de frondosas que apenas existe diferencia entre las constantes dieléctricas en las diferentes direcciones perpendiculares del campo respecto a la fibra: radial y tangencial. Estudios más recientes realizados por la técnica de microondas comprueban que la diferencia entre la constante dieléctrica radial y tangencial es de un pequeño tanto por ciento (Daian et al., 2005), siendo ligeramente mayor la radial; aunque en cualquier caso esta diferencia es mínima en comparación con la paralela (Sahin y Nürgül, 2004).

5.2.- DESCRIPCIÓN DE LAS PROBETAS

En el primer ensayo se emplean 22 muestras de *Pinus pinaster* Ait., cuyas dimensiones son 20 x 7.5 x 20 cm, la densidad media es $\rho=0.49 \text{ g/cm}^3$, cuando se encontraban a su humedad de equilibrio higroscópico ($CH=10-12\%$). En la figura 5.2 se presenta la sección en testa de cada una de las 22 probetas. Como se ve más adelante es importante tener en cuenta que no todas ellas presentan la misma sección de corte.

En el segundo ensayo se emplea otro lote de maderas. En este caso se trata de maderas de diferentes especies con escuadrías distintas (la longitud de la cara varía de 14 a 44 cm) y cuyas densidades se encuentran en un rango entre ($\rho=0.90 -0.12 \text{ g/cm}^3$); todas ellas en el momento de la toma de registros se encuentran en su HEH ($CH\approx 10-12\%$). En la tabla 5.1 se listan las dimensiones de la longitud (L), cara (Cr), canto (Ct), la densidad (ρ) y el contenido de humedad (CH) en el momento del registro con georradar.

En la figura 5.3 se muestran las secciones en testa de cada una de las probetas ordenadas en función de su densidad. La figura 5.3a es la sección en testa de la muestra de mayor densidad y la 5.3r la de menor densidad. De igual forma que en el caso del *Pinus pinaster* Ait., es interesante resaltar que cada una de ellas presenta no sólo unas dimensiones de escuadría diferentes, sino también una sección de corte diferente.

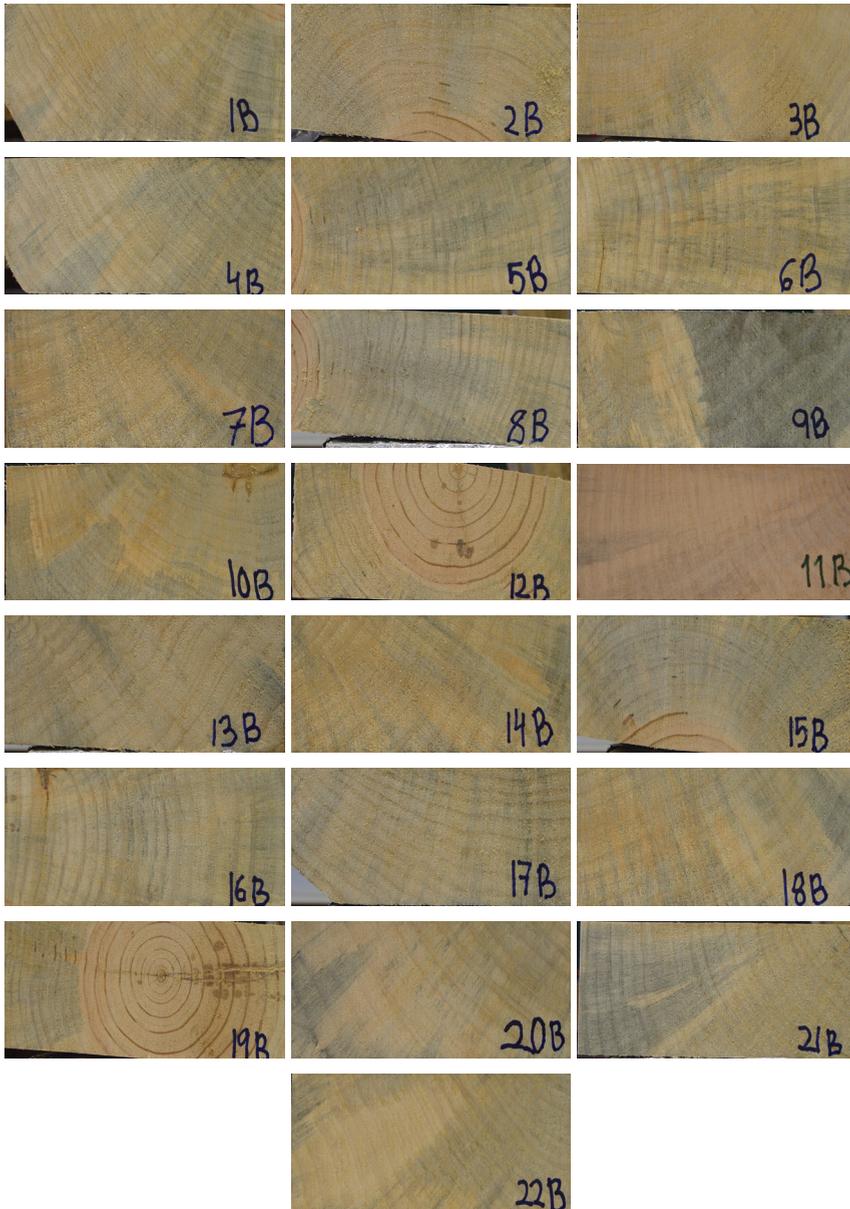


Figura 5.2.- Secciones en testa de 22 probetas de 20 x 7.5 x 20 cm *Pinus pinaster* Ait.

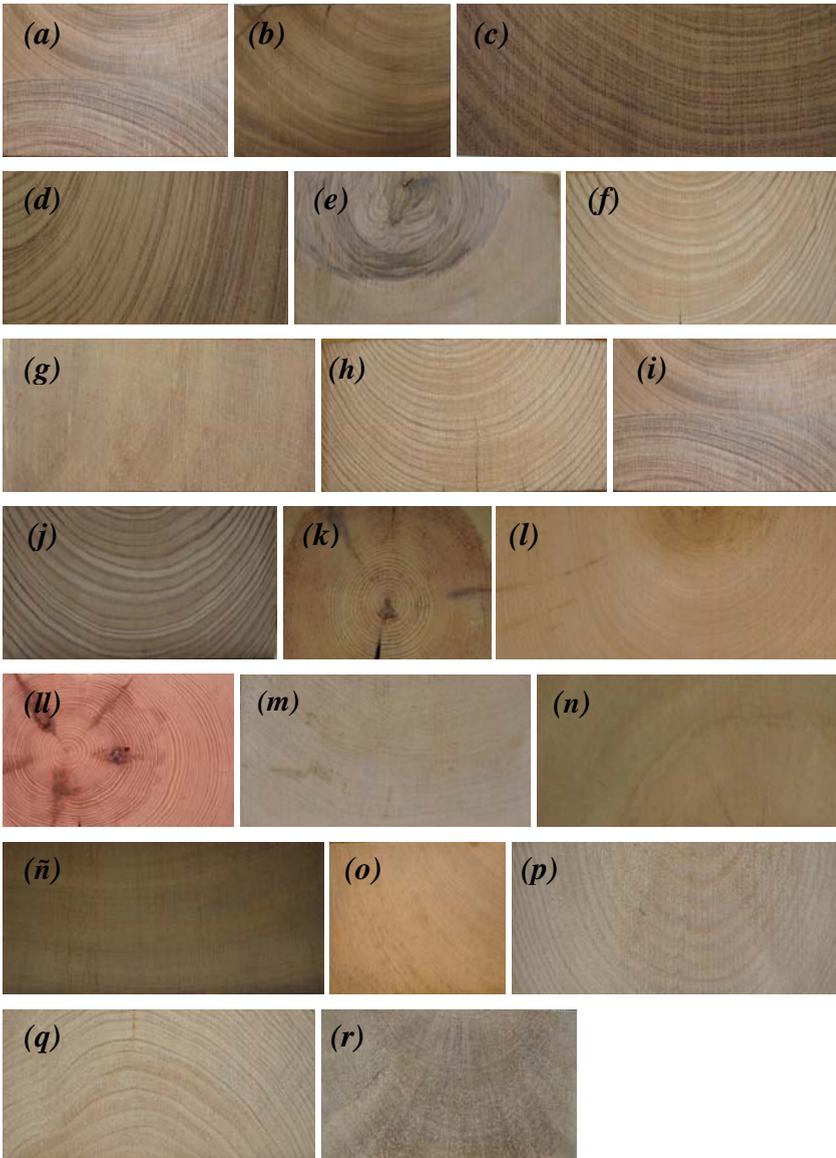


Figura 5.3.- Secciones en testa de las distintas especies de diferente densidad.

La densidad y el contenido de humedad de las piezas de ambos lotes se determinan siguiendo las normas UNE 56531:1977 y UNE-EN 13183-1:2002 respectivamente (véase apartados 3.3 y 3.4). En el Anexo A se incluyen el nombre normalizado en español, la especie a la que corresponden y el grupo

según la norma UNE-EN 13556:2004 de los 20 tipos de maderas empleadas en esta tesis.

Tabla 5.1.- Dimensiones, densidades y contenidos de humedad del lote de maderas de diferentes especies.

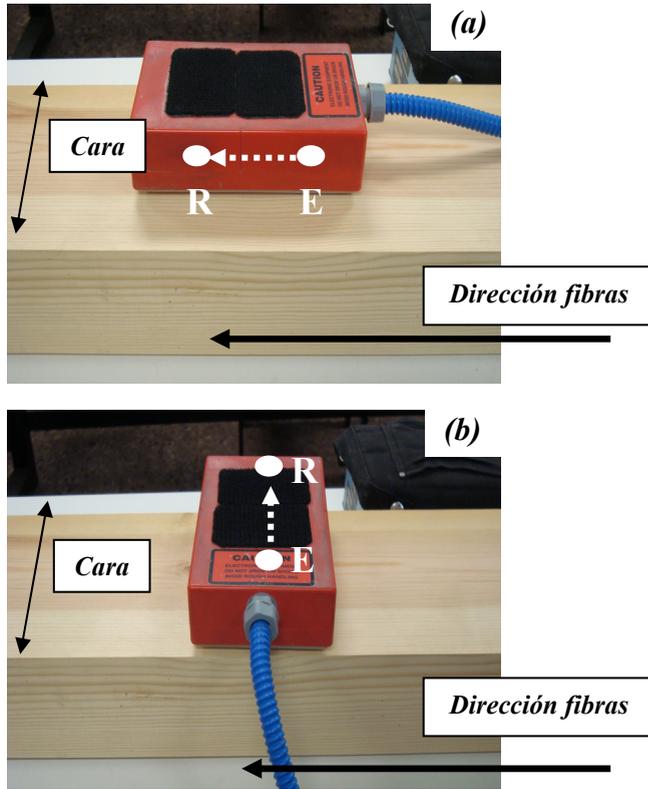
<i>Muestra</i>	<i>L (cm)</i>	<i>Cr (cm)</i>	<i>Ct (cm)</i>	ρ (g/cm ³)	<i>CH (%)</i>
<i>1</i>	14.0	14.2	7.6	0.90	9.0
<i>2</i>	19.0	19.5	11.6	0.80	10.6
<i>3</i>	23.5	23.9	7.3	0.80	10.7
<i>4</i>	24.3	25.4	7.5	0.75	11.4
<i>5</i>	19.4	19.4	9.5	0.70	11.7
<i>6</i>	19.0	19.5	7.4	0.68	10.3
<i>7</i>	20.3	20.1	6.1	0.67	11.1
<i>8</i>	19.1	19.6	7.3	0.66	10.5
<i>9</i>	13.9	14.1	7.3	0.65	10.5
<i>10</i>	19.1	19.6	7.1	0.64	12.8
<i>11</i>	19.0	19.5	14.3	0.59	9.3
<i>12</i>	31.9	32.2	8.0	0.58	10.4
<i>13</i>	18.3	20.0	13.6	0.57	9.4
<i>14</i>	18.0	18.1	8.0	0.56	10.1
<i>15</i>	30.9	30.4	8.0	0.56	13.2
<i>16</i>	21.2	21.5	7.7	0.55	12.3
<i>17</i>	14.0	14.5	10.0	0.55	10.7
<i>18</i>	22.0	22.1	7.5	0.52	12.2
<i>19</i>	19.2	19.2	6.8	0.50	9.5
<i>20</i>	20.9	20.9	10.0	0.12	10.5

5.3.- ANISOTROPIA DIELECTRICA PARALELA VERSUS PERPENDICULAR

En este apartado se analiza cuál es la variación en el comportamiento dieléctrico de la madera dependiendo si el campo eléctrico es perpendicular a las fibras de la madera (T), o bien es paralelo a la dirección de las fibras (L).

Las mediciones se realizan de forma estática con dos dispositivos de registro: *Cara_ParalelaF* y *Cara_PerpendicularF* (figura 5.4). De esta forma con el dispositivo *Cara_ParalelaF* la antena y por tanto el plano de incidencia es paralelo a las fibras, pero el campo eléctrico oscila de forma perpendicular a las mismas (figura 5.1c). En el caso del dispositivo *Cara_PerpendicularF* el plano de incidencia es perpendicular a la dirección de las fibras pero el campo eléctrico oscila de forma paralela a las mismas (figura 5.1d).

La señal registrada, tanto en el lote de *Pinus pinaster* Ait. como en el de maderas de diferentes densidades, se puede dividir en dos partes (figura 5.5a). En primer lugar, llega la onda directa, que corresponde a la energía radiada desde el emisor al receptor por la interfase aire-madera y se propaga a la velocidad del segundo medio (madera). En segundo lugar, se recibe la onda reflejada en la base de la muestra, que corresponde a la interfase madera-reflector metálico. Se coloca un reflector metálico en la base de todas las muestras con el objeto de amplificar la señal y poder realizar las mediciones de tiempo de llegada y amplitud con mayor precisión.



<i>Caso</i>	<i>Posición antena con respecto fibras</i>	<i>Dirección del campo respecto fibras</i>	<i>Nombre dispositivo</i>
<i>a</i>	Paralela	<i>Perpendicular</i>	<i>Cara_ParalelaF</i>
<i>b</i>	Perpendicular	<i>Paralelo</i>	<i>Cara_PerpendicularF</i>

Figura 5.4.- Posiciones de la antena apoyada sobre la cara en direcciones ortogonales de propagación del campo respecto a las fibras.

5.3.1.-ESTUDIO DEL CASO DEL *PINUS PINASTER* AIT.

Con la antena de frecuencia central de 1.6 GHz situada sobre la cara el espesor de la muestra es 7.5 cm y por tanto la onda directa y la reflexión se solapan. No obstante, esto no impide analizar el comportamiento de la madera dependiendo de la dirección de oscilación del campo frente a las fibras. Como se muestra en la figura 5.5b, con el dispositivo de registro *Cara_PerpendicularF* se produce un retraso en el tiempo de llegada de la onda reflejada frente al tiempo de llegada de la misma registrada con el dispositivo *Cara_ParalelaF*. Esto da lugar a una disminución de la velocidad de propagación y finalmente un aumento de la constante dieléctrica al comparar los registros del dispositivo *Cara_PerpendicularF* frente a *Cara_ParalelaF*.

De los registros obtenidos los parámetros evaluados para estudiar la diferencia de comportamiento son: las velocidades de propagación (v), las amplitudes de la onda directa (A_D) y reflejada (A_R) y el espectro de frecuencia de la señal electromagnética.

Las velocidades de propagación (v) y las correspondientes constantes dieléctricas (ϵ) se calculan a partir de las ecuaciones 2.41 y 2.42 (véase apartado 2.4.3) y se muestran en la figura 5.6.

La velocidad es siempre mayor en el caso de que el campo se propague polarizado de forma perpendicular a la fibra de la madera y de esta forma ϵ siempre es menor en este caso. Igualmente se comprueba que ϵ es siempre mayor en el caso de que el campo se propague polarizado paralelo a las fibras. Como valor promedio de todas las muestras se obtiene que la relación entre la constante dieléctrica paralela y perpendicular es $\epsilon_{(L)}/\epsilon_{(T)}=1.2$ con una desviación típica estándar $\sigma=0.05$. Este resultado está en completo acuerdo con los resultados expuestos por otros autores al trabajar con frecuencias mayores tal y como se detalla en el apartado 5.1 del presente capítulo.

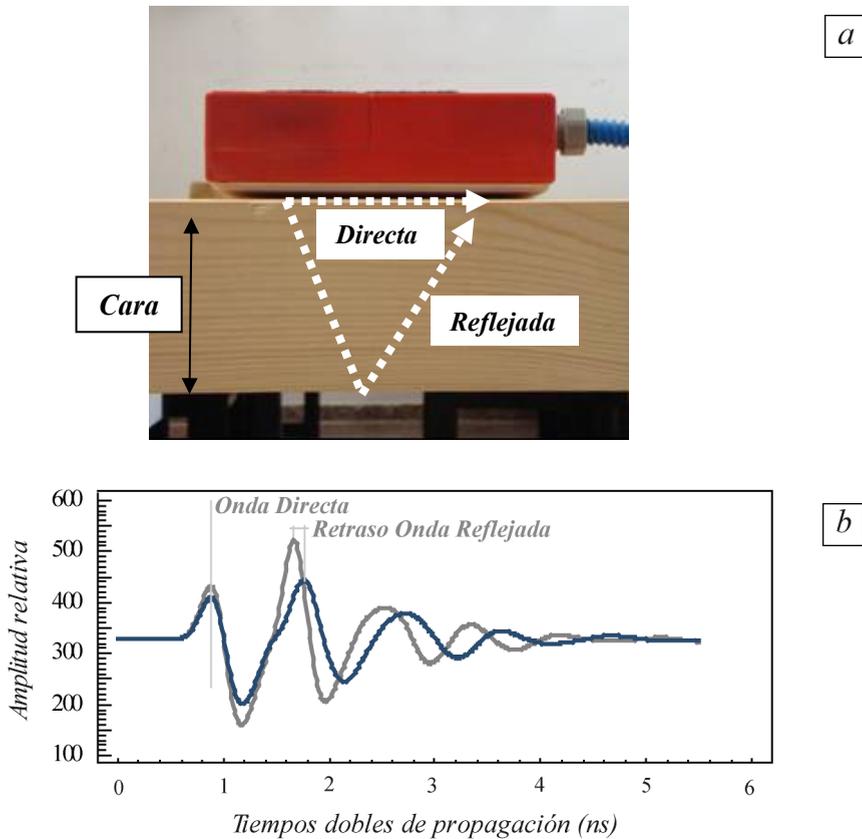


Figura 5.5.- (a) Trayectoria de onda directa (D) y onda reflejada (R); (b) Comparación de las trazas típicas con el dispositivo de registro $Cara_PerpendicularF$ (línea azul) y $Cara_ParalelaF$ (línea gris).

En este punto se analizan las A_D y A_R y todas ellas se normalizan con la amplitud del primer máximo positivo de la onda directa al emitir al aire. En todos los casos se trabaja tomando la lectura de amplitudes en el primer máximo positivo de la onda, tanto en la directa como en la reflejada.

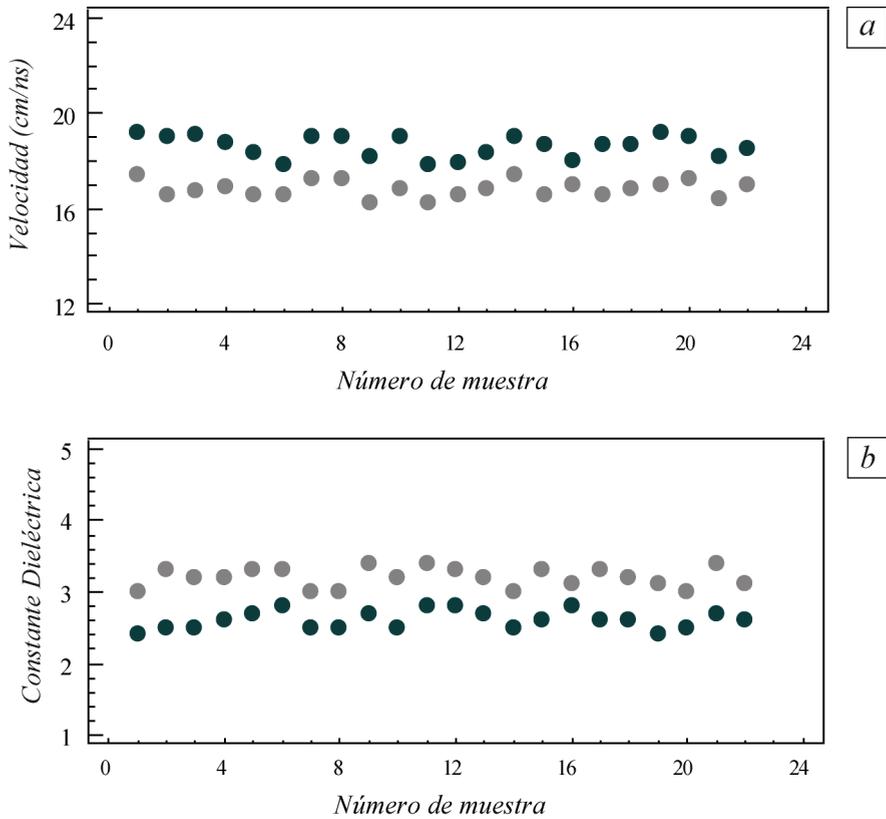


Figura 5.6.-Velocidades de propagación de las ondas (a) y constantes dieléctricas (b) de las 22 muestras de *Pinus pinaster* Ait. En ambos casos se representa con un punto gris cuando el campo es paralelo a las fibras (*Cara_PerpendicularF*) y verde cuando es perpendicular (dispositivo *Cara_ParalelaF*).

En la figura 5.7 se presentan las amplitudes normalizadas de la onda directa (A_D) y la reflejada (A_R) cuando el campo es paralelo (L) y perpendicular (T) a las fibras. La variabilidad de las amplitudes normalizadas para un tipo de onda y dirección de propagación del campo frente a las fibras es muy pequeña, ya que la desviación típica máxima encontrada es $\sigma=0.05$; sólo en el caso de la R cuando el campo es perpendicular se obtiene una desviación típica de 0.10. En cualquier caso estos valores de variabilidad son muy pequeños en comparación con la variabilidad intrínseca de la madera.

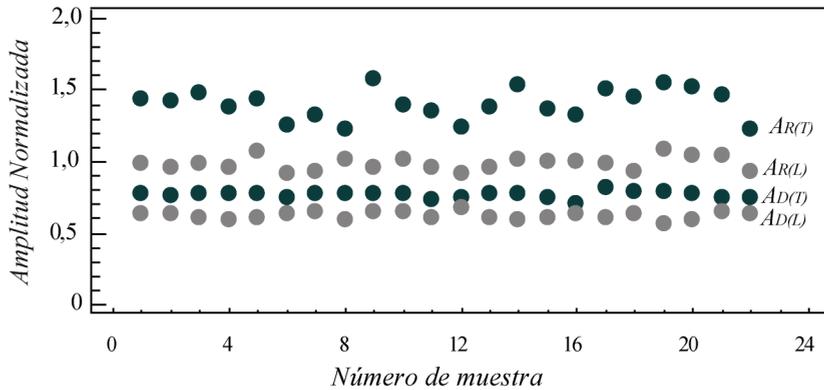


Figura 5.7.- Amplitudes normalizadas de las ondas directas (A_D) y reflejadas (A_R) en direcciones paralelas (L) y perpendiculares (T) de las muestras de *Pinus pinaster* Ait.

En la figura 5.7 se aprecia claramente como, tanto la D como la R , presentan mayores amplitudes normalizadas cuando el campo es perpendicular. Esto es debido a que al incidir el campo en esta dirección el medio se polariza menos que cuando el campo eléctrico es paralelo. Si el medio se polariza menos presenta menores valores de ε y por tanto se espera que la onda se vea menos afectada por el campo y se atenúe menos en su trayectoria. Todo ello se refleja en la obtención de amplitudes normalizadas mayores cuando el campo eléctrico es perpendicular.

Finalmente se establece que la relación $A_{D(L)}/A_{D(T)}=0.81$ con una desviación estándar de 0.05 y para la onda reflejada $A_{R(L)}/A_{R(T)}=0.70$ con el mismo valor de desviación típica. Dados los bajos valores de desviación típica se considera que estos coeficientes son representativos de las relaciones entre las amplitudes normalizadas para el *Pinus pinaster* Ait.

En este caso al calcular los espectros de frecuencia de las señales recibidas se comprueba que todas las muestras siguen, de forma general, el mismo comportamiento espectral. Esto es, al comparar estos espectros con la emisión al aire, lo primero que resalta es el desplazamiento que se produce hacia bajas

frecuencias tanto cuando el campo es paralelo como perpendicular a las fibras (figura 5.8).

Ahora bien, son dos los fenómenos que se producen en todas las muestras. Por una parte, se produce un desplazamiento generalizado a bajas de la frecuencia central. Pero, para el caso del campo perpendicular el desplazamiento es menor que cuando es paralelo, encontrándose para el primer caso la frecuencia central entre 1.3-1.2 GHz. Cuando el campo es paralelo el centro de frecuencias se sitúa en torno a 1.0 GHz y lleva asociada una ligera disminución del ancho de banda.

Por otra parte, se reduce la amplitud de la frecuencia central. Cuando el campo es perpendicular la frecuencia central alcanza valores de amplitud en el intervalo entre 4300-4700. Sin embargo, cuando es paralelo la frecuencia central está claramente fijada en valores menores de amplitud en torno a 3700.

Todas estas diferencias encontradas se interpretan como consecuencia de la diferencia en la polarización del medio. Cuando el campo es paralelo, el medio presenta mayores propiedades dieléctricas, dando lugar a que se produzca una mayor absorción de altas frecuencias, el desplazamiento a bajas, la reducción del ancho de banda y la disminución de la amplitud de la frecuencia central.

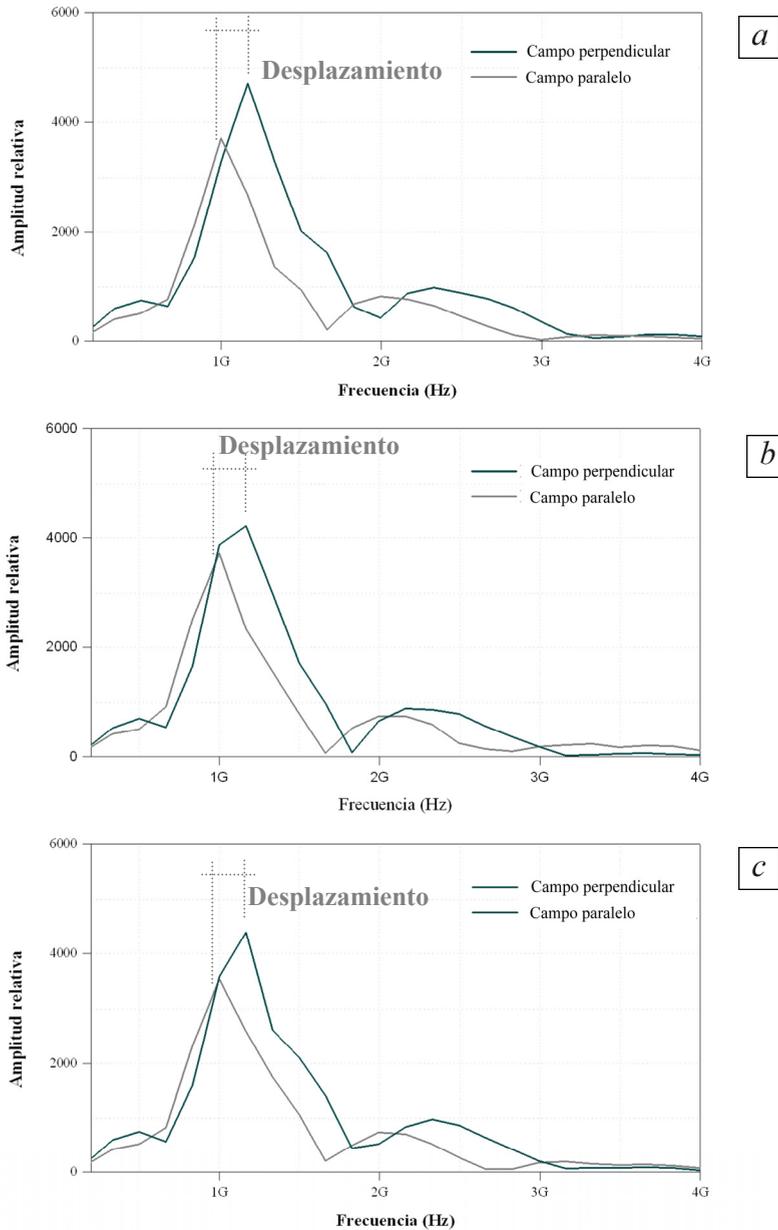


Figura 5.8.- Espectro de frecuencia cuando el campo eléctrico es paralelo y perpendicular a las fibras de las muestras 3, 6 ,11 de *Pinus pinaster* Ait.

5.3.2.-ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO SOBRE LAS DISTINTAS ESPECIES

Con el fin de comprobar si los patrones de comportamiento dieléctrico cuando el campo eléctrico es paralelo o perpendicular a las fibras de la madera los ensayos se repiten en maderas de diferentes especies, secciones y densidades. Con objeto de hacer comparables los resultados que se obtienen se sigue exactamente el mismo protocolo de estudio aplicado al *Pinus pinaster* Ait., es decir, se emplea el dispositivo de registro *Cara_ParalelaF* y *Cara PerpendicularF* (figura 5.4).

Con estos dispositivos de registro y dados los espesores de las muestras al trabajar con la antena de 1.6 GHz, en algunos casos la onda directa y la reflejada se solapan. No obstante, a pesar de esto se sigue apreciando que cuando el campo eléctrico es paralelo a las fibras se produce un retraso en el tiempo de llegada de la señal. Esto da lugar a una disminución de la velocidad de propagación y finalmente un aumento de ε con respecto a cuando el campo es perpendicular.

En la figura 5.9 se muestran las trazas características de dos de las maderas estudiadas (muestra 2 y 14) cuando el campo eléctrico es paralelo y perpendicular a las fibras. En el caso de la muestra 14 al atravesar un espesor de muestra de 8 cm (tabla 5.1), las señales directa y reflejada se solapan. No obstante, a pesar de esto, se aprecia en el primer máximo positivo de la reflejada el aumento del tiempo de llegada cuando el campo es paralelo. En otros casos como es el de la muestra 2, como la reflexión se produce a 11.6 cm las reflexiones se identifican por separado, así como el retraso del tiempo de llegada.

En la figura 5.10 se presentan las velocidades de propagación (v) resultantes para las 20 probetas y su constante dieléctrica (ε) correspondiente. La velocidad es siempre mayor cuando el campo es perpendicular a las fibras y de esta forma ε siempre es menor, independientemente de la densidad de la madera estudiada.

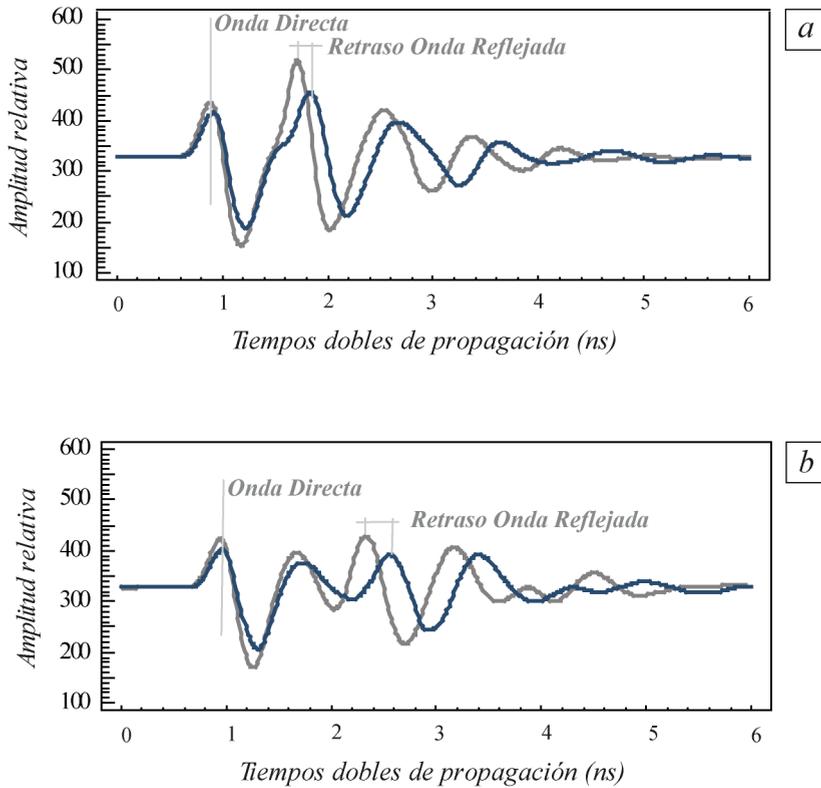


Figura 5.9.- Comparación de las trazas típicas con el dispositivo de registro *Cara_PerpendicularF* (línea azul) y *Cara_ParalelaF* (línea gris) de la muestra 14 (a) y de la 2(b).

Las v y ε cuando el campo es paralelo o perpendicular se detallan en la tabla 5.2. La relación entre la constante dieléctrica cuando el campo es paralelo y cuando es perpendicular ($\varepsilon_{(L)}/\varepsilon_{(T)}$) en este caso presenta un rango de oscilación entre 1.0 y 1.4. Estos valores obtenidos están en completo acuerdo con los resultados de otros autores tal y como se detalla en el apartado 5.1 del presente capítulo.

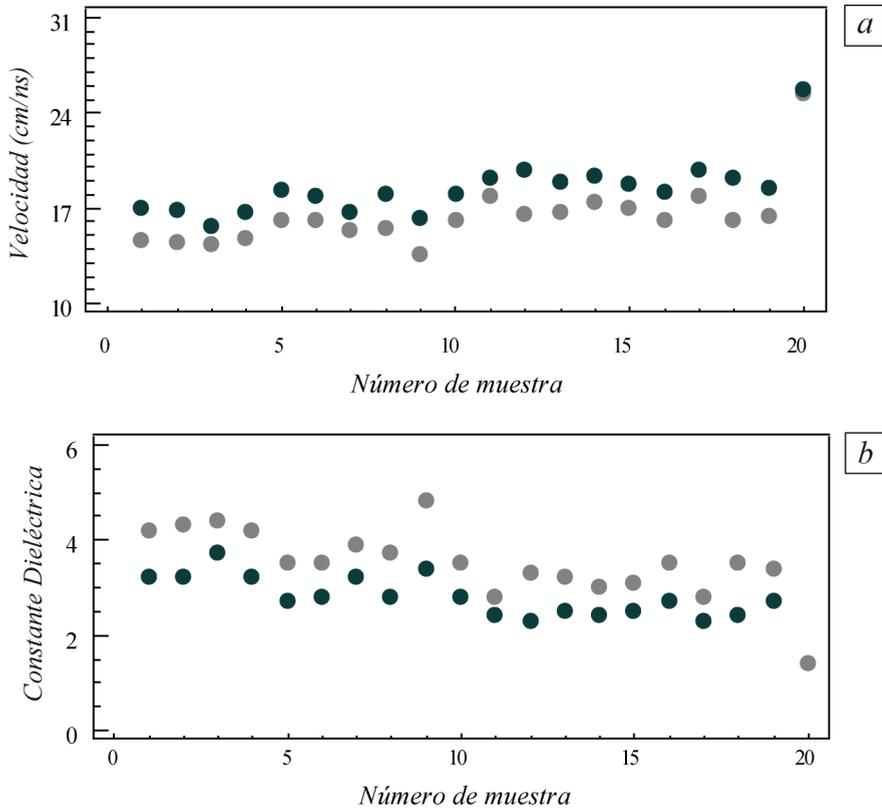


Figura 5.10.- (a) Velocidades de propagación de las ondas y (b) constante dieléctrica con el dispositivo *Cara_PerpendicularF* (punto gris) y *Cara_ParalelaF* (punto verde).

Seguidamente se analizan las A_D y A_R y todas ellas se normalizan a partir de la amplitud del primer máximo positivo de la onda directa al emitir al aire y se trabaja tomando la lectura de amplitudes en el primer máximo positivo de la onda. En la figura 5.11 se presentan las amplitudes normalizadas A_D y A_R alcanzadas cuando el campo eléctrico es paralelo (L) y perpendicular (T). En todos los casos la amplitud cuando el campo es perpendicular es mayor que cuando es paralelo, independientemente de la densidad de la madera analizada.

Tabla 5.2.- Velocidades y constantes de las 20 especies distintas obtenidas con los dispositivos de registro *Cara_PerpendicularF (L)* y *Cara_ParalelaF (T)*

<i>Muestra</i>	$v_{(T)}$	$v_{(L)}$	$\varepsilon_{(T)}$	$\varepsilon_{(L)}$	$\varepsilon_{(L)}/\varepsilon_{(T)}$
<i>1</i>	16.9	14.6	3.2	4.2	1.3
<i>2</i>	16.8	14.5	3.2	4.3	1.3
<i>3</i>	15.7	14.3	3.7	4.4	1.2
<i>4</i>	16.7	14.7	3.2	4.2	1.3
<i>5</i>	18.3	16.0	2.7	3.5	1.3
<i>6</i>	17.8	16.1	2.8	3.5	1.2
<i>7</i>	16.7	15.3	3.2	3.9	1.2
<i>8</i>	18.0	15.5	2.8	3.7	1.3
<i>9</i>	16.2	13.6	3.4	4.8	1.4
<i>10</i>	18.0	16.0	2.8	3.5	1.3
<i>11</i>	19.2	17.9	2.4	2.8	1.2
<i>12</i>	19.8	16.5	2.3	3.3	1.4
<i>13</i>	18.9	16.7	2.5	3.2	1.3
<i>14</i>	19.3	17.4	2.4	3.0	1.2
<i>15</i>	18.8	17.0	2.5	3.1	1.2
<i>16</i>	18.1	16.0	2.7	3.5	1.3
<i>17</i>	19.8	17.9	2.3	2.8	1.2
<i>18</i>	19.2	16.1	2.4	3.5	1.4
<i>19</i>	18.4	16.4	2.7	3.4	1.3
<i>20</i>	25.6	25.3	1.4	1.4	1.0

**velocidades de propagación en cm/ns.*

La variabilidad de A_D cuando el campo es paralelo o perpendicular es muy pequeña, ya que apenas alcanza una desviación típica $\sigma=0.05$, es decir, permanece muy estable independientemente de la densidad de la madera. En cuanto a A_R , la variabilidad de una especie a otra es mucho mayor que en el caso de la onda directa, alcanzándose desviaciones típicas máximas del orden de $\sigma=0.30$. Es de suponer, que al tratarse de la onda reflejada en la base de la muestra recorre el interior de la misma y por tanto se ve más afectada por las variaciones macro y microestructurales de cada una de las diferentes especies y densidades.

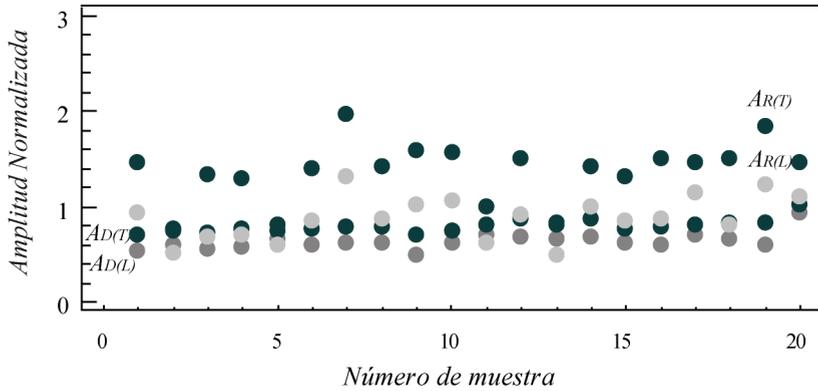


Figura 5.11.- Amplitudes normalizadas de las ondas directas (A_D) y reflejadas (A_R) cuando el campo es paralelo (L) y perpendicular (T) frente a las fibras de 20 especies diferentes.

En la tabla 5.3. se muestra la relación entre A_D cuando el campo es paralelo (L) y cuando es perpendicular (T) frente a las fibras y de igual forma la relación para las A_R . Para la onda directa los coeficientes obtenidos de esta relación de amplitudes normalizadas se encuentran dentro del intervalo [0.71-0.91] y para la onda reflejada en el intervalo [0.51-0.79].

En relación al análisis espectral realizado el principal resultado es que todas las especies presentan la misma tendencia. Como ejemplo se muestra en la figura 5.12 los espectros de frecuencia cuando el campo es paralelo o perpendicular frente a la fibra de la muestra 1, 8 y 15. En líneas generales se puede establecer que todas las muestras siguen el mismo comportamiento espectral, independientemente de la densidad.

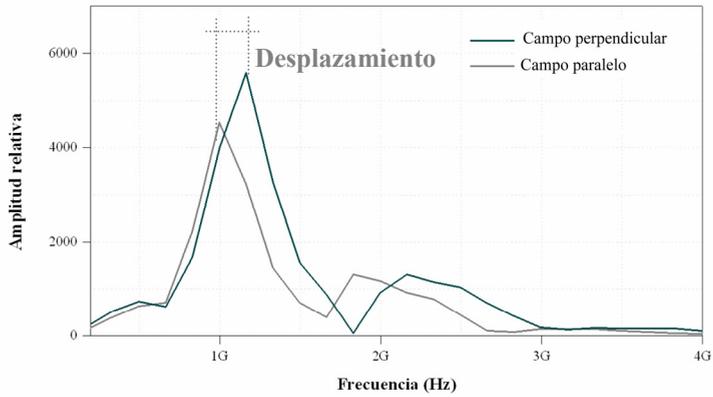
Tabla 5.3.- Relación de amplitudes normalizadas cuando el campo es paralelo o perpendicular de las ondas directas y reflejadas de 20 especies distintas.

<i>Muestra</i>	$A_{D(L)}/A_{D(T)}$	$A_{R(L)}/A_{R(T)}$
<i>1</i>	0.77	0.63
<i>2</i>	0.79	0.67
<i>3</i>	0.76	0.51
<i>4</i>	0.76	0.54
<i>5</i>	0.86	0.72
<i>6</i>	0.76	0.61
<i>7</i>	0.79	0.66
<i>8</i>	0.77	0.61
<i>9</i>	0.71	0.64
<i>10</i>	0.81	0.68
<i>11</i>	0.87	0.60
<i>12</i>	0.77	0.61
<i>13</i>	0.82	0.59
<i>14</i>	0.77	0.69
<i>15</i>	0.80	0.65
<i>16</i>	0.74	0.58
<i>17</i>	0.87	0.79
<i>18</i>	0.79	0.53
<i>19</i>	0.73	0.67
<i>20</i>	0.91	0.75

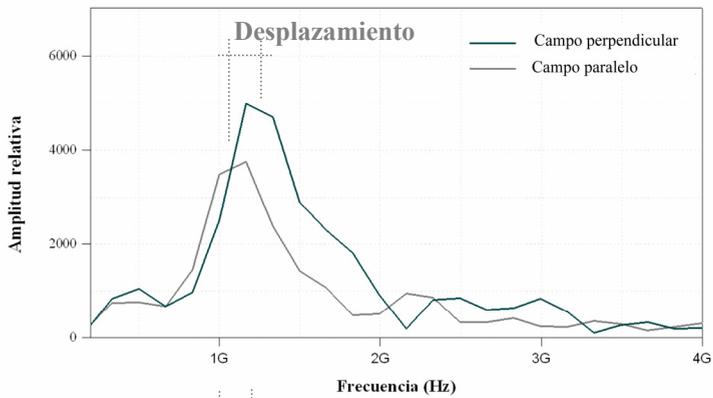
Por una parte, se produce un desplazamiento a bajas de la frecuencia central. Cuando el campo es perpendicular el desplazamiento es menor que cuando es paralelo, encontrándose la frecuencia central entre 1.3-1.2 GHz para el primer caso, mientras que para el segundo el centro de frecuencias pivota siempre en torno a 1.0 GHz, de igual forma que sucede con el *Pinus pinaster* Ait.

Por otra parte, se observa que se reduce la amplitud de la frecuencia central, independientemente de la densidad de la muestra. El espectro cuando el campo es paralelo siempre presenta menor amplitud de la frecuencia central. Ahora bien, cada una de las especies presenta una variación distinta de la amplitud de la frecuencia central que no está relacionada directamente con la densidad. No

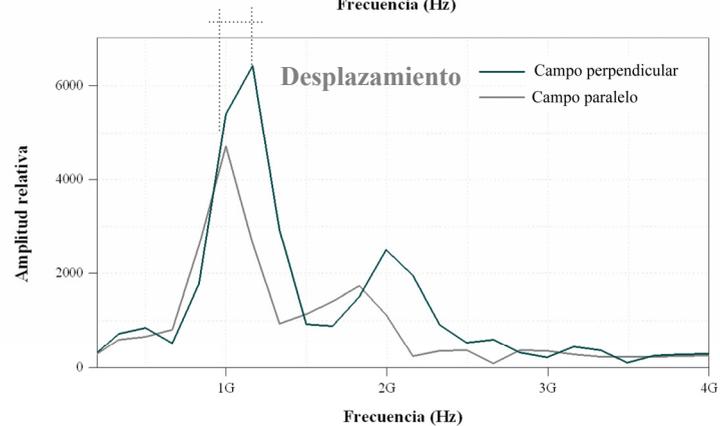
obstante, se comprueba que conforme disminuye la densidad la diferencia de amplitud entre ellas se agudiza. Por ejemplo, en la muestra 1 cuando el campo es paralelo se produce una disminución de la frecuencia central de 1100 unidades frente a cuando es perpendicular; para la muestra 6 de 1300 unidades y para la muestra 15 de 1700 unidades (figura 5.12).



a



b



c

Figura 5.12.- Espectro de frecuencia de las señales cuando el campo eléctrico es paralelo y perpendicular a las fibras de la muestra 1(a), de la 6 (b) y de la 15 (c) del lote de maderas de diferentes densidades.

5.3.3.- SÍNTESIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este estudio son muy interesantes pues confirman la capacidad del georradar para registrar la anisotropía dieléctrica de la madera para ondas con una frecuencia de emisión de 1.6 GHz independientemente de la especie que se estudie. Se comprueba que la madera tiene una respuesta dieléctrica diferente para las distintas direcciones de radiación respecto a la fibra. Por esta razón, a la hora de trabajar con georradar es necesario conocer en qué medida las variaciones de la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas, de las amplitudes y de los espectros son atribuibles a la anisotropía dieléctrica de la madera o alteraciones como pudriciones, humedad o la presencia de nudos.

Las principales conclusiones deducidas a partir de la comparación realizada entre los resultados cuando el campo eléctrico es paralelo o perpendicular a las fibras se detallan a continuación.

La v es siempre mayor cuando el campo es perpendicular a la fibra y de esta forma ε siempre es menor en este caso, independientemente de la especie y densidad de la madera estudiada. Se obtiene la relación entre las constantes $\varepsilon_{(L)}/\varepsilon_{(T)}$ y su rango de variación de esta relación para las distintas especies estudiadas es de 1.0 a 1.4. Estos resultados están en completo acuerdo con los obtenidos por otros autores a frecuencias de emisión próximas. No obstante, no se puede establecer una correlación directa entre la disminución de la densidad y la relación ($\varepsilon_{(L)}/\varepsilon_{(T)}$).

En cuanto a las amplitudes se aprecia claramente como al colocar un reflector bajo las muestras y trabajar con espesores tan reducidos (menores que la resolución vertical), da lugar a un aumento significativo de A_R . Tanto en la onda directa como en la reflejada la amplitud es mayor cuando el campo eléctrico es perpendicular, independientemente de la onda estudiada, de la especie y densidad

de la madera analizada. Esto es debido a que en ese caso el medio se polariza menos, es decir, presenta menores ε y por tanto se espera que la madera se vea menos afectada por el campo y éste atenúe menos dando lugar a amplitudes mayores.

La variabilidad de las A_D cuando el campo es paralelo o perpendicular es muy pequeña, ya que apenas alcanza una desviación típica $\sigma=0.05$, a pesar de estar trabajando con probetas de especies, densidades y secciones diferentes. La amplitud normalizada de estas ondas permanece muy estable independientemente de la densidad de la madera.

En cuanto a la onda reflejada, la variabilidad de A_R de una especie a otra es mucho mayor que en el caso de la onda directa. Al tratarse de la onda reflejada en la base de la muestra, ésta recorre el interior de la misma y por tanto se ve más afectada por las variaciones macro y microestructurales de cada una de las especies.

Finalmente es difícil establecer un patrón de comportamiento para la relación $A_{(L)}/A_{(T)}$ que pueda asociarse únicamente con la variación de densidad, tanto de la onda reflejada como de la directa.

Al comparar todos los espectros de frecuencia con el de la emisión al aire se observa un desplazamiento a bajas de la frecuencia central, pero mantiene la forma del máximo central. Este desplazamiento es menor cuando el campo es perpendicular y además lleva asociado una disminución del ancho de banda. Asimismo, cuando el campo es perpendicular la frecuencia central alcanza valores de amplitud mayores.

Todas estas diferencias encontradas cuando el campo es paralelo o perpendicular a las fibras se interpretan como consecuencia de la diferencia en la polarización que sufre el medio dependiendo de la dirección de propagación del campo. Cuando el campo es paralelo el medio se polariza más y por tanto se produce una

mayor absorción de altas frecuencias y de ahí que reproduzca en el espectro un desplazamiento a bajas, la reducción del ancho de banda y la disminución de la amplitud de la frecuencia central. Ahora bien, cada una de las especies presenta una variación distinta de la amplitud de la frecuencia central que, en principio, no está relacionada directamente con la densidad. No obstante, se comprueba conforme disminuye la densidad la diferencia de amplitud entre ellas se agudiza.

Por último, es importante resaltar la gran aportación que suponen el empleo del georradar (antena de 1.6 GHz) para el análisis de la anisotropía dieléctrica. Por una parte, los valores obtenidos de la relación entre la constante dieléctrica en las distintas direcciones del campo eléctrico frente a la fibra están en perfecto acuerdo con los estudios realizados por otros autores por técnicas de microondas. Pero no sólo eso, sino que por otra parte y lo que es más relevante, supone una gran aportación ya que este fenómeno es perfectamente identificable por medio del análisis de los parámetros de onda: tiempos de llegada y amplitudes y espectros de las señales emitidas por medio del equipo de georradar a la frecuencia de estudio.

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

5.4.- ANISOTROPIA DIELECTRICA PERPENDICULAR DIFERENTES DIRECCIONES

Con el fin de comparar el comportamiento dieléctrico, en las diferentes direcciones perpendiculares del campo frente a las fibras, en concreto en la dirección radial y tangencial se realiza un segundo estudio. Para ello se toman los registros con el dispositivo *Canto* y *Testa* (figura 5.13). La traza característica obtenida en todos los registros está compuesta como en los casos anteriores por la onda directa y la reflejada (figura 5.5a). Para una mejor identificación de la onda reflejada se coloca bajo las muestras un reflector metálico.

Cuando se realizan las mediciones con los dispositivos *Canto* y *Testa* las direcciones de propagación del campo son perpendiculares entre sí. Esto permite evaluar las características de la propagación del campo en las direcciones radial y tangencial dependiendo de la parte del árbol de la que se obtiene cada muestra (figura 5.2 y figura 5.3). De este modo y para cada caso de forma individual, se analiza la respuesta electromagnética del material cuando el campo es perpendicular a las fibras pero incide de forma diferenciada (radial o tangencialmente).

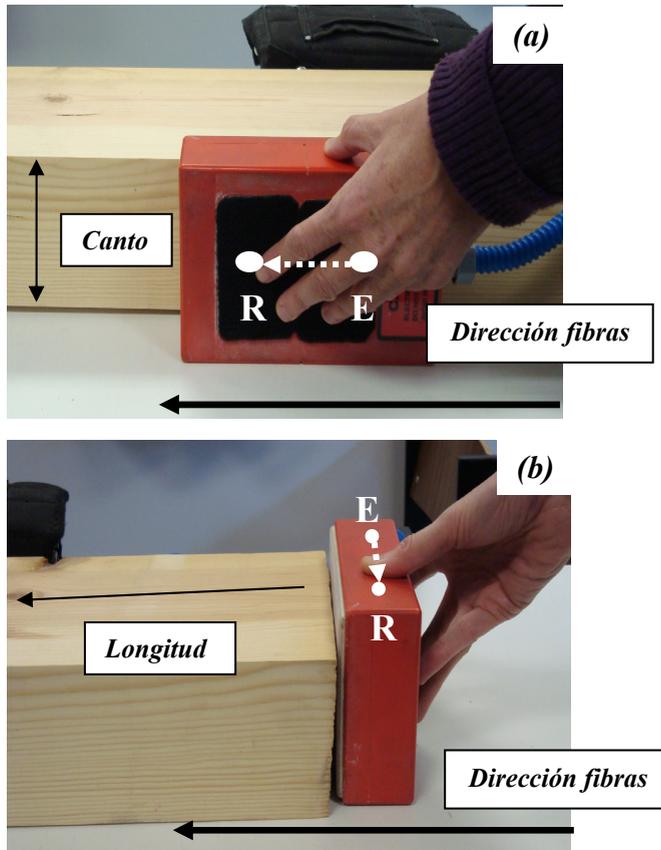


Figura 5.13.- Dispositivos de registro *Canto* (a) y *Testa* (b).

5.4.1.- CONTROVERSIAS CON LA RESOLUCIÓN VERTICAL

Para evitar los posibles problemas derivados de la falta de resolución vertical se trabaja con probetas que tienen una longitud aproximadamente igual a la dimensión a la cara. Esto es, por ejemplo una muestra de *Pinus pinaster* Ait. tiene unas dimensiones de 7.5 cm de canto, 20 cm de cara y 20 cm de longitud.

Como se expuso anteriormente al estudiar la reflexión cuando el campo es paralelo o perpendicular a la fibra se emplean los dispositivos

Cara_PerpendicularF y *Cara_ParalelaF*. En estos casos la onda directa y la reflejada se solapan. Sin embargo, con el dispositivo de registro *Testa* y *Canto* al atravesar un espesor de 20 cm no se solapan. Esto da lugar a que las reflexiones obtenidas con los dispositivos *Cara* y *Canto* no sean comparables con las anteriores.

Cuando se estudian las diferentes direcciones perpendiculares del campo frente a la fibra no interesa introducir otra variable y por tanto un posible error al no estar comparando las mismas fases de las ondas reflejadas. Como ejemplo en la figura 5.14 se representan las trazas típicas cuando el campo es perpendicular en muestras de *Pinus Pinaster* Ait. de diferente longitud: (a) 7.5 cm; (b) 11 cm; (c) 20 cm adquiridas con el dispositivo de registro *Testa*. En el caso (a) la onda directa y la reflejada se solapan; sin embargo, en el caso (b) se pueden distinguir las reflexiones por separado y por último en el caso (c) se encuentran perfectamente identificables de forma independiente. Por todo ello, las probetas se cortan de tal forma que las longitudes recorridas por las ondas reflejadas con los dispositivos de registros *Canto* y *Testa* sean aproximadamente las mismas y con ello comparar siempre las mismas fases de onda cuando el campo es perpendicular en diferentes direcciones frente a las fibras.

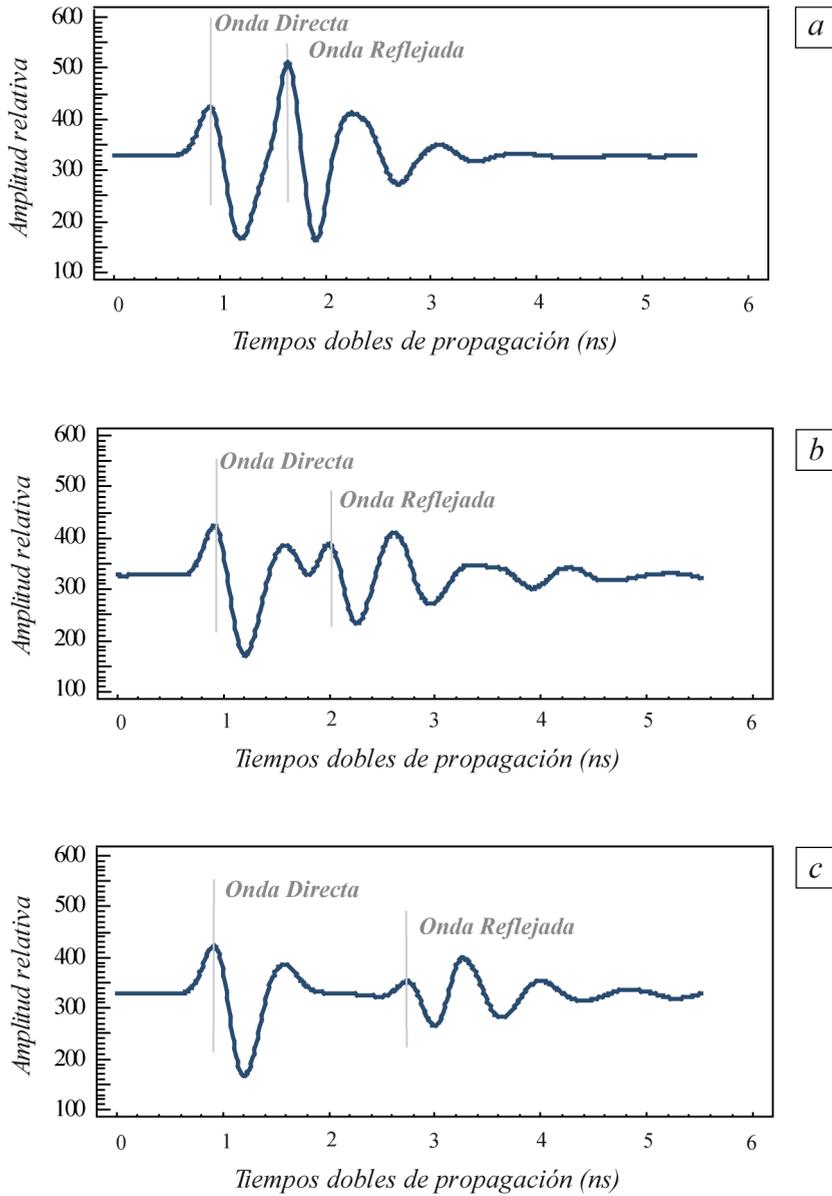


Figura 5.14.- Comparación de trazas con el dispositivo *Testa* en muestras de diferente longitud del *Pinus pinaster* Ait.: (a) 7.5 cm; (b) 11 cm; (c) 20 cm.

5.4.2.-ESTUDIO DEL CASO DEL *PINUS PINASTER* AIT.

Las v de las ondas obtenidas para todas las muestras presentan valores muy próximos, independientemente de la dirección perpendicular del campo que se estudia. Como ejemplo se muestra en la figura 5.15 las trazas correspondientes al dispositivo *Canto* de la muestra 16 (a) y al dispositivo *Testa* de la muestra 19 (b). La reflexión se produce al mismo tiempo, independientemente de si el campo es tangencial, como es el caso de la muestra 16, o radial, como es el caso de la muestra 19 (figura 5.2).

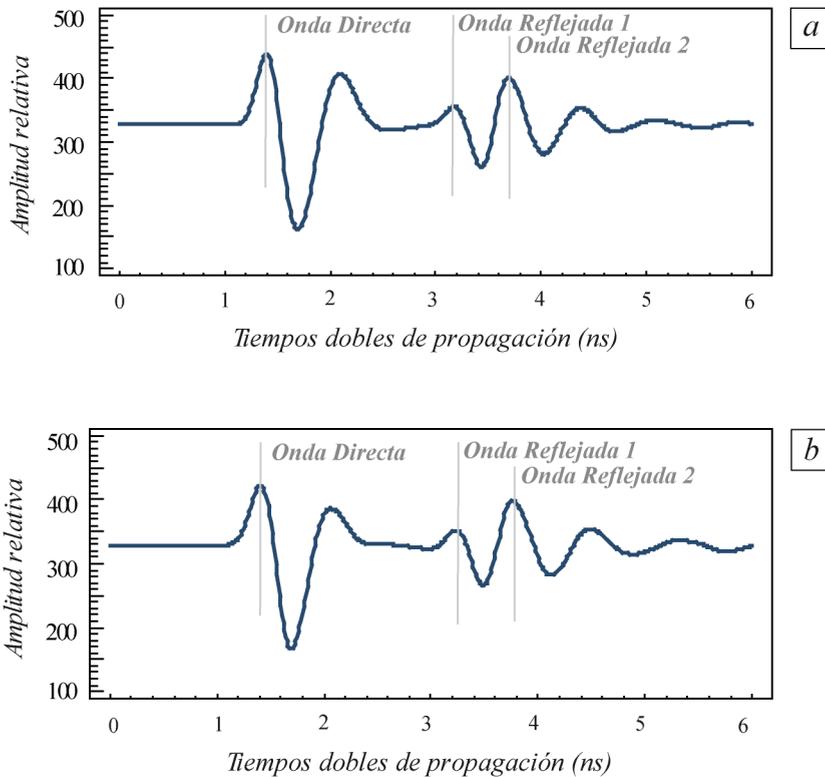


Figura 5.15.- Trazas características del *Pinus pinaster* Ait. registradas con el dispositivo *Canto* en la muestra 16 (a) y con el dispositivo *Testa* en la muestra 19 (b).

Las v y ε son prácticamente las mismas en ambos casos, tanto si el campo es radial como tangencial o una composición de ambas direcciones. Se obtiene como valor promedio de v con el dispositivo *Testa* $v=21.5$ cm/ns y $\varepsilon=2.0$, obtenida con una desviación típica $\sigma=0.07$. Con el dispositivo *Canto* la velocidad de propagación promedio obtenida es $v=21.8$ cm/ns y $\varepsilon=1.9$ obtenida con la misma desviación típica que en el caso anterior.

A la vista de estos resultados y teniendo en cuenta que con los dos dispositivos de registro se tienen diferentes planos de propagación del campo electromagnético respecto a las fibras se deduce que a la frecuencia de radiación con la que se trabaja (antena de frecuencia central de 1.6 GHz) no existe diferencia apreciable en la velocidad de propagación de la onda en las diferentes direcciones perpendiculares para el *Pinus pinaster* Ait.

A continuación se analizan las amplitudes y como se aprecia en la figura 5.15 en el caso de la onda reflejada se puede tomar lectura en el primer máximo positivo ($R1$), pero también en el segundo ($R2$) y dado que alcanza amplitudes mayores es más sencilla su identificación. Con el objeto de comprobar si este segundo máximo positivo aporta información interesante o por lo menos comparable a la del primer máximo también se efectúan las lecturas de amplitudes de este segundo máximo positivo. Posteriormente, todas ellas se normalizan dividiéndolas por la amplitud del primer máximo positivo de la onda directa al emitir al aire.

En la figura 5.16 se presentan los distintos valores normalizados de A_D , de las amplitudes del primer máximo positivo de la reflejada (A_{R1}) y del segundo máximo positivo de la reflejada (A_{R2}) con los dispositivos de registro *Canto* (C) y *Testa* (T) para cada muestra. Las A_D son siempre mayores que la de los dos máximos positivos de la reflejada. Esta diferencia de magnitudes es debido a que en este caso la onda reflejada recorre una trayectoria más larga que con los

dispositivos de registro *Cara_ParalelaF* y *Cara_PerpendicularF* y como consecuencia la onda reflejada siempre aparece significativamente más atenuada.

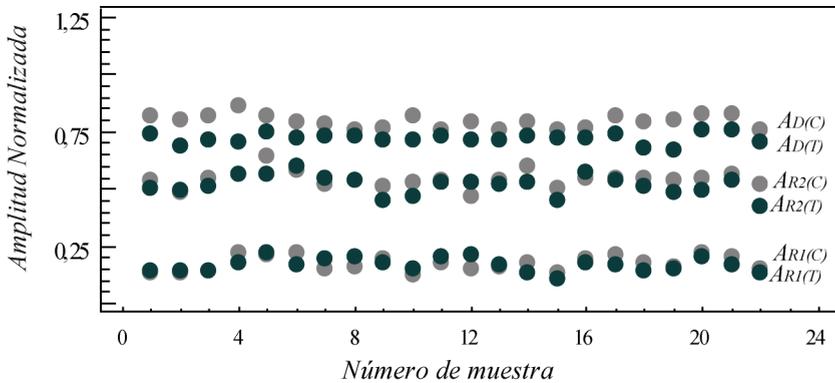


Figura 5.16.- Amplitudes normalizadas del las ondas directas (A_D) y reflejadas (A_R) con el dispositivo de registro *Canto* (C) y *Testa* (T) de las muestras de *Pinus pinaster* Ait.

La variación de amplitudes normalizadas para un tipo de onda y de dirección de propagación del campo es muy pequeña, ya que la desviación típica máxima encontrada es $\sigma=0.04$ (tabla 5.4) para todas las ondas y máximos estudiados.

En la onda reflejada, tanto para el primer máximo como para el segundo, no se aprecia diferencia de amplitud normalizada dependiendo del dispositivo de registro, obteniéndose valores promedio para ambos casos equivalentes.

Sin embargo, en la onda directa sí se aprecia un ligero descenso de la amplitud normalizada con el dispositivo en *Testa*. Esta pequeña variación no se puede atribuir a la anisotropía, ya que se mantiene prácticamente constante para todas las muestras, independientemente del tipo de sección (radiales, tangenciales, etc.). La relación entre A_D con el dispositivo *Canto* y *Testa* es $A_{D(C)}/A_{D(T)}=1.10$ con una desviación estándar de $\sigma=0.05$. Dados los bajos valores de desviación típica se puede considerar que estos coeficientes son representativos de la

relación entre amplitudes de la onda directa, independientemente de la sección de corte de la vigueta.

Tabla 5.4.- Amplitudes normalizadas promedio y desviación típica de las muestras de *Pinus pinaster* Ait. con el dispositivo de registro *Canto* y *Testa*.

	$A_{D(C)}$	$A_{D(T)}$	$A_{R1(C)}$	$A_{R1(T)}$	$A_{R2(C)}$	$A_{R2(T)}$
Promedio	0.80	0.72	0.17	0.17	0.54	0.51
σ	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04

En la figura 5.17 se muestran, como ejemplo, los espectros de las muestras 16 y 19. Se seleccionan estas dos muestras como representativas del comportamiento general, porque como se ha visto anteriormente, con el dispositivo *Canto* el campo eléctrico es tangencial a las fibras en el caso de la muestra 16 y radial en el caso de la muestra 19. Se aprecia que existen dos picos máximos significativos situados a 1.2 GHz y a 1.7 GHz y entre ellos un mínimo situado en torno a 1.5 GHz.

Los espectros de los dispositivos *Canto* y *Testa* presentan comportamientos similares, excepto en la amplitud del primer pico. No obstante, las diferencias son tan pequeñas que es difícil atribuir las a la distinta disposición de las fibras respecto a la propagación del campo.

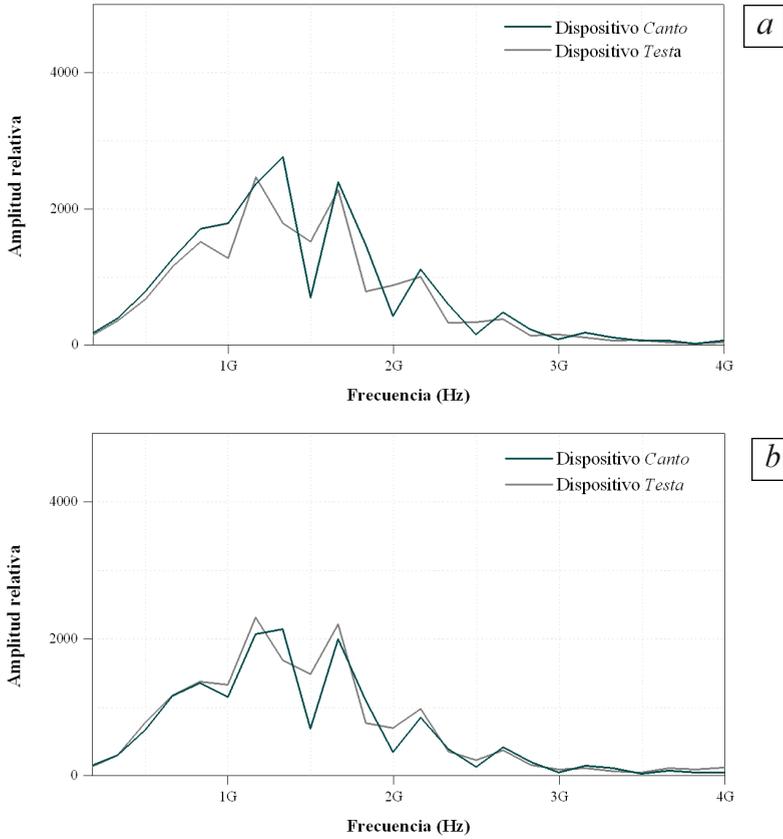


Figura 5.17.- Espectros de frecuencia de las señales con dispositivo *Canto* y con el dispositivo *Testa* de la muestra 16 (a) y de la muestra 19 (b) del lote de maderas de diferentes densidades.

5.4.3.-ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO SOBRE DISTINTAS ESPECIES

A continuación se analizan las señales al tomar los registros con el dispositivo *Canto* y *Testa* del lote de maderas de diferentes especies y densidades. Las v para todas las muestras presentan valores muy próximos, independientemente de la dirección perpendicular del campo frente a las fibras. Como ejemplo se muestra en la figura 5.18 las trazas correspondientes al dispositivo *Canto* (a) y *Testa* (b) de la muestra 3. Como se aprecia claramente en esta figura la reflexión en la base de la muestra se produce al mismo tiempo, independientemente de la dirección de propagación del campo.

Los valores de velocidad de propagación y constante dieléctrica con ambos dispositivos de registro son prácticamente los mismos, tanto si el campo es radial como tangencial o una composición de ambas direcciones. Finalmente se obtiene como velocidades cuando el campo es perpendicular el valor promedio de v en las diferentes direcciones (tabla 5.5).

A la vista de estos resultados se deduce que a la frecuencia de radiación con la que se trabaja (antena de frecuencia central de 1.6 GHz) no existe diferencia apreciable en la velocidad de propagación de la onda en las diferentes direcciones perpendiculares independientemente de la especie y densidad de la madera que se estudie.

En cuanto a las amplitudes, de igual forma que sucede en el *Pinus Pinaster* Ait., en el caso de la onda reflejada se puede tomar lectura en el primer máximo positivo ($R1$), pero también en el segundo ($R2$) que dado que alcanza amplitudes mayores es más sencillo su identificación (figura 5.18). Todas las amplitudes se normalizan dividiéndolas por la amplitud del primer máximo positivo de la onda directa emitida al aire.

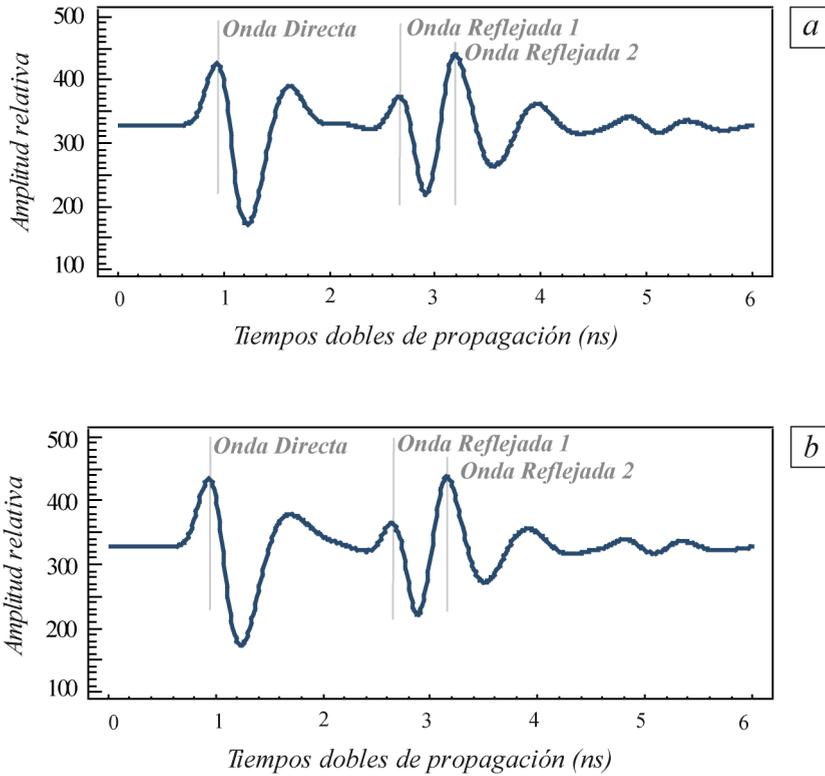


Figura 5.18.- Trazas características con el dispositivo de registro *Canto* (a) y *Testa* (b) en la muestra 3 del lote de maderas de diferentes especies.

En la figura 5.19 se presentan los distintos valores normalizados de A_D , el primer máximo positivo de la reflejada (A_{R1}) y el segundo máximo positivo de la reflejada (A_{R2}) con los dispositivos *Canto* y *Testa*. La diferencia de magnitudes de amplitud normalizada entre la onda directa y el primer máximo positivo y el segundo es como consecuencia de la atenuación que sufre la onda al recorrer la cara.

La variación de las amplitudes normalizadas para la onda directa con los dos dispositivos de registro es muy pequeña; aun así, a pesar de encontrar un comportamiento parecido al del *Pinus pinaster* Ait., se comprueba que no

siempre se cumple que $A_{D(C)} > A_{D(T)}$ como ocurre con el *Pinus pinaster* Ait. En la tabla 5.6 se presentan los valores para la relación $A_{D(C)}/A_{D(T)}$ para cada especie.

Tabla 5.5.- Velocidades de propagación y constante dieléctrica promedio de las 20 especies con el dispositivo de registro *Canto* y *Testa*.

<i>Muestra</i>	$v_{Promedio}$ (cm/ns)	ϵ (promedio)
1	18.6	2.6
2	17.7	2.9
3	15.7	3.7
4	15.9	3.6
5	19.2	2.4
6	20.2	2.2
7	21.8	1.9
8	20.8	2.1
9	18.1	2.7
10	19.8	2.3
11	20.0	2.3
12	22.2	1.8
13	20.4	2.2
14	21.1	2.0
15	17.8	2.8
16	21.0	2.0
17	20.5	2.1
18	22.2	1.8
19	21.9	1.9
20	28.0	1.2

En cuanto a la onda reflejada, que muestra de forma más precisa qué ocurre puesto que se propaga por el interior de la madera, se comprueba que tanto para el primer máximo como para el segundo positivo no hay diferencia de amplitud normalizada obteniéndose valores promedio equivalentes para los dos casos (figura 5.19).

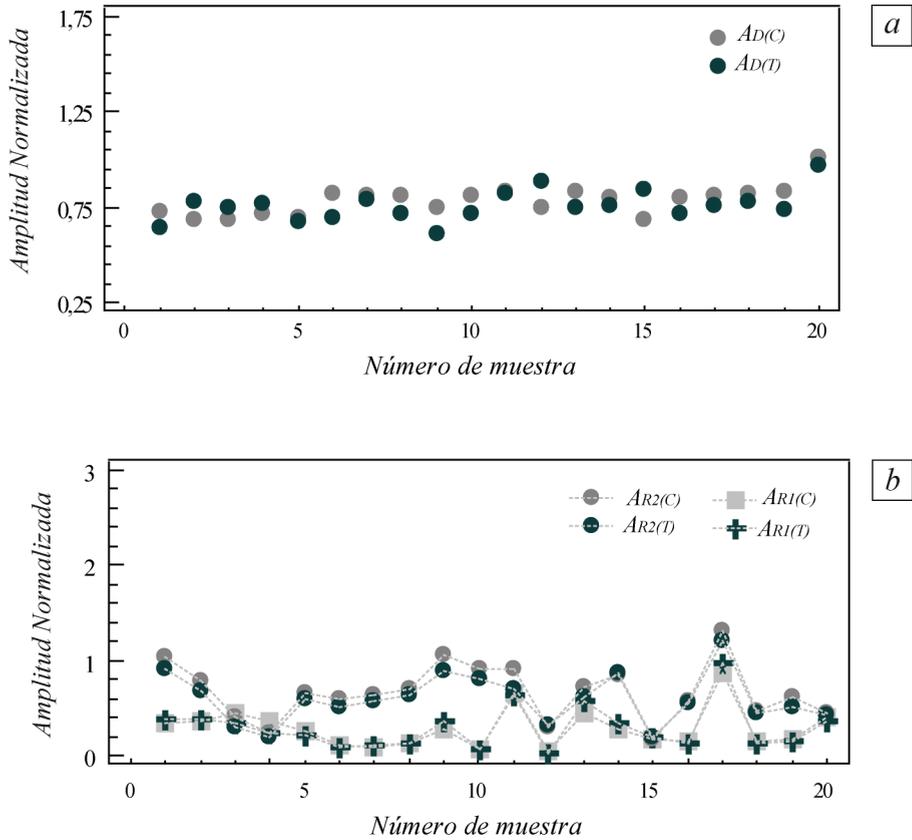


Figura 5.19.- (a) Amplitudes normalizadas de las ondas directas (A_D) y (b) reflejadas medidas en el primer máximo positivo (A_{R1}) y en el segundo máximo positivo (A_{R2}) con los dispositivos de registro *Canto* (C) y *Testa* (T) de 20 especies diferentes.

El orden de magnitud del segundo máximo es mucho mayor que el del primer máximo en la amplitud de la onda reflejada normalizada. Así como en el caso del *Pinus pinaster* Ait. siempre el primer máximo de la onda reflejada presenta valores de amplitud normalizadas menores, esto no se cumple de igual forma para todas las especies. En este sentido no se puede establecer un patrón de comportamiento de un máximo frente al otro, e incluso no se aprecia que esta variación pueda estar relacionada con la densidad de la especie.

Tabla 5.6.- Amplitudes de la onda directa, del primer y segundo máximo positivo de la onda reflejada normalizadas con el dispositivo de registro *Canto* (C) y *Testa* (T).

Muestra	$A_{D(C)}$	$A_{D(T)}$	$A_{D(C)}/A_{D(T)}$	$A_{R1(C)}$	$A_{R1(T)}$	$A_{R2(C)}$	$A_{R2(T)}$
1	0.73	0.64	1.2	0.33	0.39	1.04	0.90
2	0.68	0.78	0.9	0.37	0.39	0.78	0.67
3	0.68	0.75	0.9	0.44	0.34	0.40	0.29
4	0.71	0.77	0.9	0.36	0.23	0.24	0.19
5	0.69	0.67	1.0	0.26	0.22	0.65	0.60
6	0.82	0.69	1.2	0.11	0.09	0.60	0.50
7	0.81	0.79	1.0	0.09	0.10	0.64	0.58
8	0.81	0.71	1.1	0.12	0.12	0.70	0.64
9	0.75	0.61	1.2	0.28	0.37	1.06	0.88
10	0.81	0.71	1.1	0.07	0.06	0.90	0.80
11	0.83	0.82	1.0	0.66	0.64	0.91	0.69
12	0.75	0.88	0.9	0.04	0.03	0.30	0.31
13	0.83	0.75	1.1	0.45	0.57	0.72	0.61
14	0.80	0.76	1.1	0.27	0.34	0.84	0.87
15	0.68	0.84	0.8	0.17	0.19	0.18	0.19
16	0.80	0.72	1.1	0.16	0.13	0.58	0.56
17	0.81	0.76	1.1	0.86	0.97	1.32	1.21
18	0.82	0.78	1.1	0.15	0.12	0.47	0.44
19	0.83	0.74	1.1	0.17	0.14	0.62	0.50
20	1.01	0.97	1.0	0.41	0.36	0.44	0.42

Finalmente se calculan los espectros de frecuencia de las señales y se comprueba que todas tienen el mismo comportamiento espectral. En la figura 5.20 se muestran como ejemplo los espectros de las 11 y 19. Se seleccionan estas dos muestras como representativas del comportamiento general. Con el dispositivo *Canto* el campo eléctrico es tangencial a las fibras en el caso de la muestra 19 y radial en el caso de la muestra 11.

De igual forma que sucede en el *Pinus pinaster* Ait., en este caso se aprecia como existen dos picos máximos significativos situados a 1.2 GHz y a 1.7 GHz y entre ellos un mínimo situado siempre en torno a 1.5 GHz. Ahora bien, así como en el *Pinus pinaster* Ait. el primer pico situado en torno a 1.2 GHz siempre

alcanza mayores amplitudes, se comprueba que dependiendo de la especie la mayor amplitud la presenta o el primer o el segundo pico. Se comprueba que para las diferentes direcciones perpendiculares del campo con ambos dispositivos de registro los resultados son muy similares. No obstante, independientemente de la especie se produce un ligero aumento de amplitud de los picos máximos con el dispositivo *Canto* y si el campo es tangencial, como es el caso de la muestra 19. Para el resto de casos posibles no existe un único patrón de comportamiento, encontrándose la mayoría de los máximos positivos con valores de amplitud muy próximas.

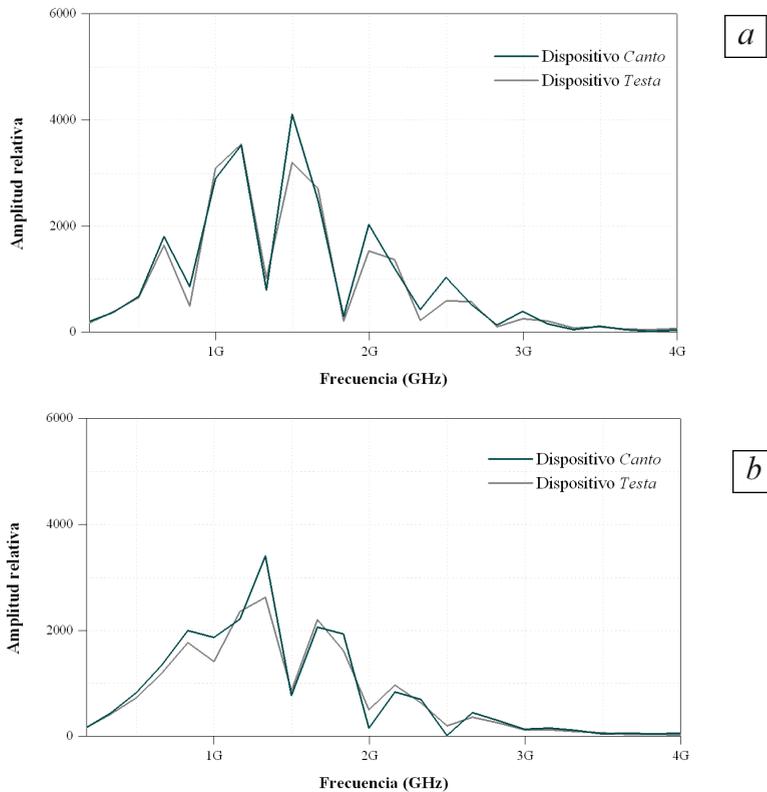


Figura 5.20.- Espectros de frecuencia con el dispositivo *Canto* y *Testa* de la muestra 11(a) y de la 19 (b).

5.4.4.- SÍNTESIS DE RESULTADOS

De la comparación realizada en las distintas direcciones del campo perpendiculares a las fibras se deducen las siguientes conclusiones. Las v para todas las muestras presentan valores muy próximos, independientemente de la dirección perpendicular del campo respecto a las fibras.

A la vista de estos resultados y teniendo en cuenta que con los dispositivos de registro *Canto* y *Testa* se tienen diferentes planos de propagación del campo electromagnético con respecto a las fibras se deduce a que la frecuencia de radiación con la que se trabaja no existe diferencia apreciable en la velocidad de propagación de la onda independientemente de la especie y densidad de la madera.

La variación de las A_D con el dispositivo *Canto* frente al dispositivo *Testa* es muy pequeña y se mantiene muy estable independientemente de la densidad de la muestra. En el caso del *Pinus pinaster* Ait. las A_D son siempre mayores que la de los dos primeros máximos positivos de la reflejada (A_{R1} y A_{R2}). La diferencia de magnitudes de amplitud normalizada entre la onda directa y la reflejada es debida a que en este caso la onda reflejada recorre una trayectoria más larga y por tanto como consecuencia de la distancia recorrida la onda reflejada siempre aparecerá significativamente más atenuada.

No obstante, al comparar la onda directa y la reflejada con el resto de especies, se comprueba que no siempre se cumple que A_D es mayor con el dispositivo *Canto* que *Testa* como ocurre con el *Pinus pinaster* Ait.

En cuanto a la onda reflejada, que muestra de forma más precisa lo que ocurre en la trayectoria de propagación por producirse ésta por el interior de la madera, se comprueba, tanto en el primer máximo como el segundo, que no hay diferencia de amplitud normalizada con los dos dispositivos de registro.

El orden de magnitud del segundo máximo de la onda reflejada, de forma general, es mucho mayor que el del primer máximo. Pero, así como en el caso del *Pinus pinaster* Ait. esto sucede en todas las muestras (A_{RI} siempre son menores), esto no se cumple de igual forma para todas las especies. En este sentido no se puede establecer un patrón de comportamiento de un máximo frente al otro, e incluso no se aprecia que esta variación pueda estar relacionada con la densidad de la especie.

En cuanto a los espectros, en el caso de los registros de los dispositivos *Canto* y/o *Testa* en el espectro aparecen dos picos máximos significativos independientemente de la densidad de la madera estudiada. Ahora bien, así como en el *Pinus pinaster* Ait. el primer pico siempre alcanza mayores amplitudes, esto no sucede para todas las especies.

Al igual que en el resto de parámetros estudiados, apenas existen diferencias entre los espectros registrados con los dispositivos *Canto* y *Testa*. La única singularidad destacable es la ligera variación de amplitud de los dos picos máximos. También se observa un patrón que siempre se repite en el caso de que el campo sea tangencial con el dispositivo de registro *Canto* y es que las amplitudes de los picos positivos presentan amplitudes ligeramente mayores.

Es importante resaltar la gran aportación que suponen el empleo del georradar (antena de 1.6 GHz) para el análisis de la anisotropía en las diferentes direcciones perpendiculares. Igual que ocurre en el estudio de la anisotropía dieléctrica perpendicular versus paralela, los resultados obtenidos están en perfecto acuerdo con los estudios realizados por otros autores por técnicas de microondas. Además, este fenómeno es perfectamente identificable por medio del análisis de los parámetros de onda: tiempos de llegada y amplitudes y espectros de las señales emitidas por medio del equipo de georradar.

Una vez realizado el estudio y análisis pormenorizado del comportamiento de la propagación de las ondas en cada una de las posibles direcciones con respecto a las fibras para cada una de las especies se concluye que en caso de querer obtener información sobre la velocidad de propagación en el medio, la amplitud y el espectro de las ondas electromagnéticas la técnica del georradar proporciona información muy relevante y satisfactoria.

Ahora bien, todos estos parámetros de onda deberán estar siempre referenciados a la dirección de propagación del campo con respecto a la fibra y se deberá tener en cuenta el espesor analizado con respecto a la resolución vertical. Solamente en el caso de que los espesores de las muestras sean mayores que la resolución no se observa ninguna variación en el comportamiento dieléctrico cuando el campo es radial o tangencial a las fibras.

Por último, es necesario recalcar la gran importancia del resultado obtenido por georradar, ya que al no registrarse diferencia significativa en los parámetros de onda en las distintas direcciones perpendiculares del campo frente a la fibra, se simplifica la toma la adquisición de registros. Esto quiere decir, que si se inspecciona una viga que forma parte de una estructura no tendremos diferencia significativa al realizar su análisis en cualquiera de las direcciones perpendiculares del campo. De esta forma no se está obligado a realizar la inspección de todas las vigas siempre en la misma dirección de estudio, lo que facilita la adquisición de registros, ya que como bien es sabido al analizar las vigas que forman parte de una estructura no siempre las caras son accesibles.

CAPÍTULO 6

ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

El estudio tecnológico de las relaciones entre el agua y la madera es seguramente el más importante de todos los que dependen de este material, dado que afecta a la mayoría de procesos de transformación y utilización de la misma (Vignote y Martínez, 2006). Además, la variación del contenido de humedad (CH) en una misma pieza hace que se modifiquen considerablemente la mayoría de sus propiedades físicas y mecánicas.

La determinación del contenido de humedad se realiza por desecación de probetas hasta el estado anhidro (UNE-EN 13183-1:2002), siendo éste el método comúnmente aceptado. No obstante, es un método lento y que necesita seccionar la vigueta para tomar una muestra. La forma más habitual de realizar la medición, especialmente cuando la madera es parte de una estructura (Arriaga et al., 2002), es mediante el uso de un xilohigrómetro (véase capítulo 3.4) basado en la resistencia eléctrica (UNE-EN 13183-2:2002). El método eléctrico presenta una serie de ventajas como son su rapidez, que no necesita tomar una porción de la vigueta y se puede emplear en una estructura en servicio. No obstante, se ha de tener mucho cuidado en la interpretación de las mediciones, ya que este método está generalmente limitado a valores de contenido de humedad menores del 30%. Además presenta el inconveniente de que los electrodos se han de introducir en la pieza a lo largo de los primeros centímetros. Debido al gradiente de humedad existente en la madera, es posible que la lectura no sea suficientemente representativa de la media, por estar tomando lectura solamente de los valores más superficiales.

Por tanto, se pone de manifiesto la necesidad de desarrollar nuevos procedimientos que permitan evaluar el contenido de humedad sin invadir la muestra y de una forma más rápida, sencilla y fiable para el rango completo de contenido de humedad desde su apeo hasta que alcanza la humedad de equilibrio higroscópico.

Actualmente, la tecnología del georradar tiene muchas aplicaciones en diversos campos y es un método de prospección no destructivo muy prometedor para el estudio rápido de estructuras. De hecho, el georradar ya se ha aplicado y con buenos resultados en el estudio de la variación del contenido de humedad de suelos (Maierhofer et al., 1998a), (Lunt et al., 2005) y (Laurens et al., 2005), de otros materiales como el hormigón (Schmalz et al., 2002), (Huisman et al., 2003) y (Zagoskin et al., 2006) y áreas de investigación diversas en el campo de la construcción como el estudio de muros de obra de fábrica (Maierhofer et al., 1998b).

El objetivo de este trabajo es estudiar como afecta la variación del contenido de humedad en la propagación de las ondas electromagnéticas a través de la madera. Para ello se realizan experimentos de laboratorio en muestras de dos lotes de madera diferentes. Por una parte se estudia la variación del comportamiento electromagnético en un lote de madera de *Pinus pinaster* Ait., cuyos resultados se detallan en el apartado 6.1. Posteriormente se estudia la variación del comportamiento en un lote de maderas de diferentes especies y los resultados obtenidos en este caso se detallan en el apartado 6.2.

Algunos autores como Laurens et al. (2002), Laurens et al. (2005), Sabartaï et al. (2006a-2006b), Klysz y Balayssac (2007) y Viriyametantont et al. (2008) han desarrollado un protocolo para el estudio de la variación del contenido de humedad en muestras de hormigón. En este caso se aplica este protocolo al estudio de la variación del contenido de humedad de la madera.

La presencia de agua en la madera produce modificaciones en sus propiedades electromagnéticas y por tanto afecta a las características de la propagación de las ondas. En concreto, se estudia la capacidad del georradar para registrar las variaciones que se producen en el tiempo de llegada de la onda directa, en la velocidad, en la amplitud y en el espectro cuando se propagan en unas viguetas de madera de uso estructural cuyo contenido de humedad va disminuyendo.

6.1.- EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LAS PROPIEDADES ELECTROMAGNÉTICAS DEL *PINUS PINASTER* AIT.

En este estudio se trabaja con un lote 22 viguetas de *Pinus pinaster* Ait. que inicialmente presentan un *CH* aproximado del 100 % de su masa anhidra. Posteriormente se someten a un proceso de secado, que se interrumpe en distintos momentos para realizar mediciones con georradar y mediciones de la masa de las viguetas. De este modo se obtienen registros de georradar para distintos contenidos de humedad en un rango comprendido entre el 100% y el 10% aproximadamente.

6.1.1.-DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Las viguetas tienen unas dimensiones de 20 x 7.5 x 150 cm cuya densidad media, cuando se encuentran en la humedad de equilibrio higroscópico (10-12%), es $\rho=0.49 \text{ g/cm}^3$, calculada ésta según la norma (UNE 56531:1977). Las secciones en testa de las viguetas se muestran en la figura 5.2, ya que las muestras con las que se trabaja en el estudio de la anisotropía dieléctrica se obtienen de estas mismas viguetas.

En cada sesión se mide la masa y seguidamente se realizan las mediciones con el georradar. Los dispositivos de registro empleados son, por una parte los dinámicos colocando la antena en *Cara_ParalelaF* y *Canto* (véase apartado 4.4). En el caso del dispositivo *Testa* el registro es estático. En total se realizan 13 sesiones de registro con georradar.

Las primeras mediciones de masa se realizan muy seguidas en el tiempo, ya que la pérdida de agua libre se produce rápidamente. Poco a poco las mediciones de

masa se espacian en el tiempo, pues la pérdida de agua se ralentiza. En la última fase, para poder acelerar el secado se introducen en un horno.

Las densidades promedio de cada sesión están representadas en la figura 6.1, donde se aprecia que conforme se van secando la densidad disminuye. En una primera fase lo hace de forma mucho más acelerada y posteriormente su evolución es más lineal con tendencia a estabilizarse.

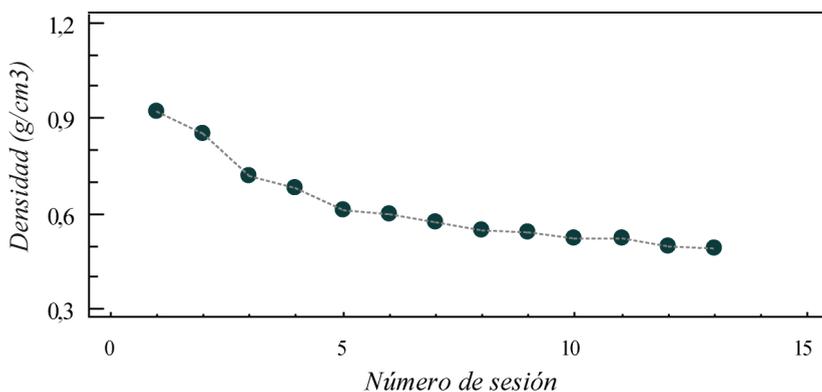


Figura 6.1.- Densidad promedio de las 22 viguetas de *Pinus pinaster* Ait. a lo largo del proceso de secado.

El procedimiento operativo aplicado para la determinación del contenido de humedad por desecación hasta el estado anhidro fue el regulado por la norma UNE-EN 13183-1:2002 descrita en el apartado 3.4 de esta memoria.

En la figura 6.2 se presenta la variación del *CH* durante el proceso de secado para cada una de las sesiones de medición y cada una de las viguetas. La primera sesión corresponde al momento en el que las viguetas están recién cortadas y su contenido de humedad es máximo (Sesión S1) y la última sesión en el que las viguetas alcanzan la humedad de equilibrio higroscópico (Sesión S13).

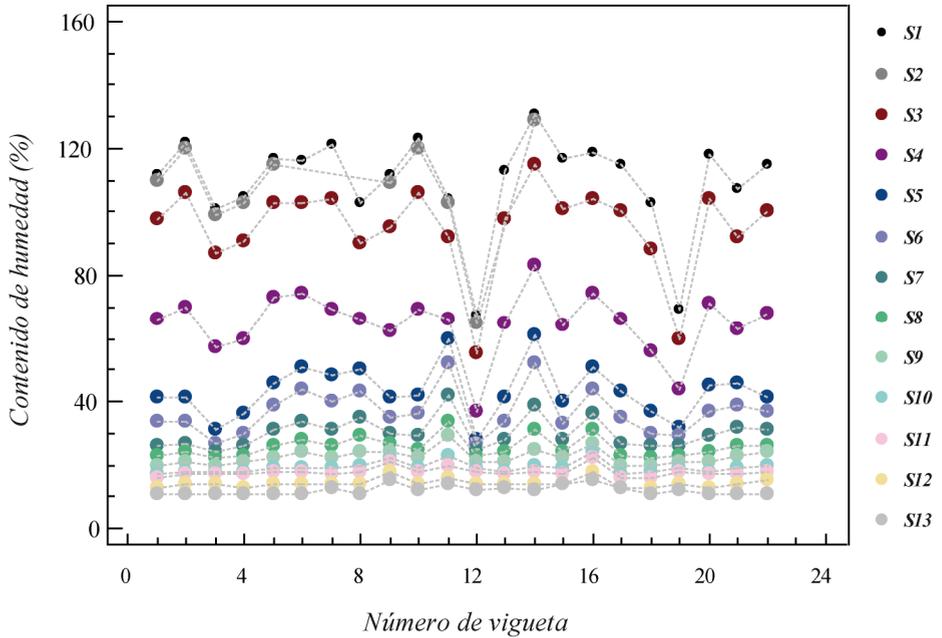


Figura 6.2.- Contenido de humedad de cada vigueta de *Pinus pinaster* Ait. en cada una de las 13 sesiones de registro con georradar.

En un principio en cada sesión las viguetas presentan un CH muy diferente entre sí (desde 115% hasta 55%). Sin embargo, durante el proceso de secado estas diferencias entre las distintas viguetas se reducen, alcanzando finalmente todas ellas un $CH \approx 12\%$. En la tabla 6.1 se comprueba esta variabilidad a lo largo de las sesiones a partir de los valores promedio ($CH_{promedio}$), máximo (CH_{max}) y mínimo (CH_{min}) del contenido de humedad para cada sesión (S1-S13)

Los ensayos de georradar se llevan a cabo en la misma sesión en la que se mide la masa de las viguetas para poner de relieve los efectos del secado en los registros de georradar. En la figura 6.3 se muestra los distintos tipos de dispositivo de registro empleados dinámicos: *Cara_ParalelaF*, *Canto* y estáticos: *Testa* (véase apartado 4.4).

Tabla 6.1.- Contenido de humedad (%) promedio, máximo y mínimo de las 22 viguetas de *Pinus pinaster* Ait. en cada sesión.

<i>CH</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>	<i>S6</i>	<i>S7</i>
<i>Promedio</i>	107	95	65	47	36	37	30
<i>Máximo</i>	129	115	83	68	52	52	42
<i>Mínimo</i>	65	55	37	33	27	27	24
<i>CH</i>	<i>S8</i>	<i>S9</i>	<i>S10</i>	<i>S11</i>	<i>S12</i>	<i>S13</i>	
<i>Promedio</i>	26	22	19	18	14	12	
<i>Máximo</i>	34	29	24	22	18	15	
<i>Mínimo</i>	22	20	17	16	13	11	

La señal registrada puede separarse en dos partes: onda directa (*D*) y onda reflejada (*R*). En la figura 6.4 se muestra la forma de las señales típicas registradas con el dispositivo de registro *Canto* (*a*) y *Cara_ParalelaF* (*b*).

Con el objeto de efectuar la lectura de tiempos de llegada y amplitudes de las ondas, se establece el criterio que a continuación se describe. En cuanto a la *D*, se toma la lectura de ambos parámetros (amplitudes y tiempos de llegada) en el primer máximo positivo para todos los dispositivos.

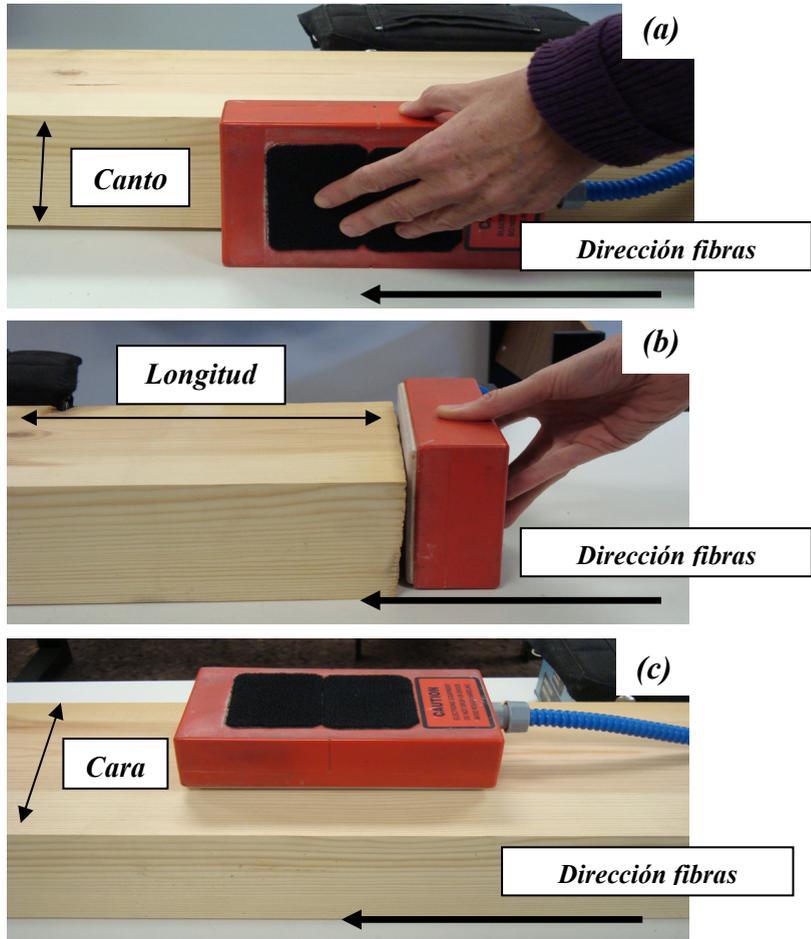


Figura 6.3.- Dispositivos de registro: (a) *Canto*, (b) *Testa* y (c) *Cara_ParalelaF*.

En lo que respecta a la R , la lectura de tiempos de llegada y sus amplitudes se efectúa en el primer máximo positivo tanto para el dispositivo *Cara_ParalelaF* como *Canto*. Ahora bien, con el dispositivo *Canto*, tomando lectura en el primer máximo positivo (RI) sólo se puede trabajar en el intervalo de CH comprendido entre [34-11%], ya que para valores superiores se produce una gran atenuación de la señal que no permite identificar esta parte de la señal. Por lo tanto, en la lectura de amplitudes, en este caso también se efectúan en el segundo máximo

positivo ($R2$) lo que permite, al tener este pico siempre mayor amplitud que el primero, identificar esta fase hasta CH del 44%.

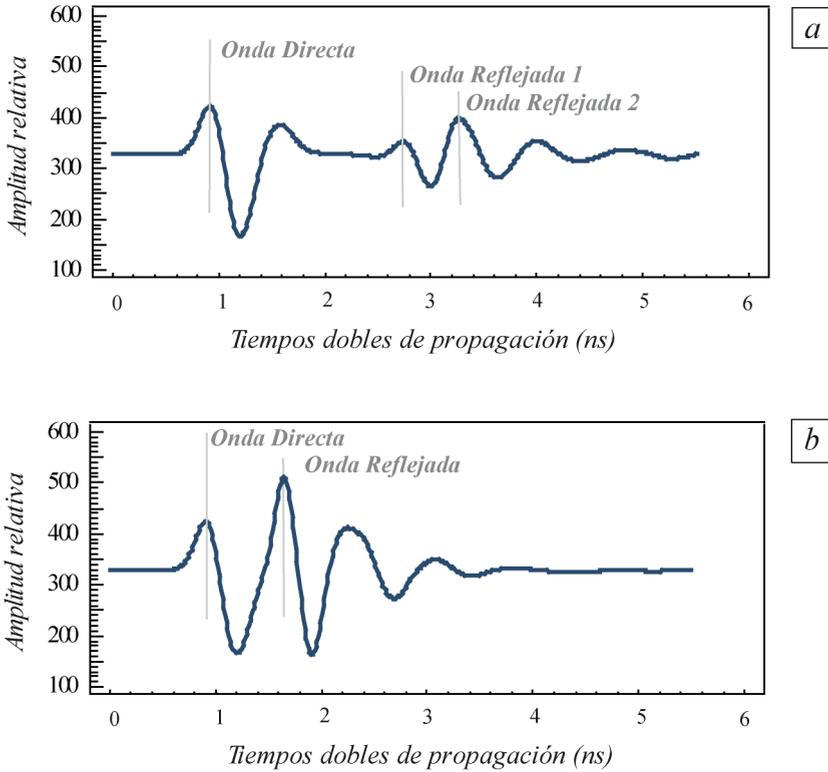


Figura 6.4.- (a) Señal típica registrada con el dispositivo *Canto* y (b) con el *Cara_ParalelaF* en viguetas de *Pinus pinaster* Ait.

6.1.2.- ANÁLISIS CUALITATIVO DE LOS REGISTROS

Como resultado relevante de este estudio se obtiene que, efectivamente, las mayores v se presentan siempre cuando las viguetas están más secas. Esta velocidad aumenta conforme disminuye la humedad, hasta alcanzar los valores máximos de velocidad en la sesión S13.

Como ejemplo se muestran en la figura 6.5 tres radargramas de la vigueta 5, tomados con el dispositivo de registro dinámica *Cara_ParalelaF*, cada uno de ellos registrado en momentos distintos y por lo tanto con *CH* diferentes. Para poder identificar mejor la reflexión bajo la mitad de la vigueta se coloca un reflector metálico, ya que como se comprueba en el apartado 4.3 al colocar un reflector metálico se produce un cambio de polaridad en la reflexión, que facilita la identificación de las fases. Este fenómeno es fácilmente observable en los tres radargramas mostrados en la figura 6.5, donde la reflexión que se produce en la interfase madera-aire está más atenuada (parte izquierda de cada radargrama) y sin cambio de polaridad. Sin embargo, en la parte de la vigueta donde se coloca el reflector (lado derecho del radargrama) se produce el cambio de polaridad y las amplitudes alcanzan valores mayores.

Cuando la madera presenta un $CH=115\%$, es decir, en la sesión S1, la diferencia entre el tiempo de llegada de la *D* y de la *R* es de 2.81 ns. Sin embargo, en la figura (b) al haber descendido el $CH=31\%$, la diferencia de tiempos de llegada entre ambas ondas disminuye considerablemente (1.31 ns). Por último, en la figura (c) se muestra una medición posterior en esta vigueta donde se comprueba que se obtiene el menor tiempo de propagación (0.84 ns), que corresponde al registro de la sesión S12 y para un $CH=14\%$. Al disminuir los tiempos de propagación se produce un aumento de la velocidad y por tanto, las propiedades dieléctricas son menores.

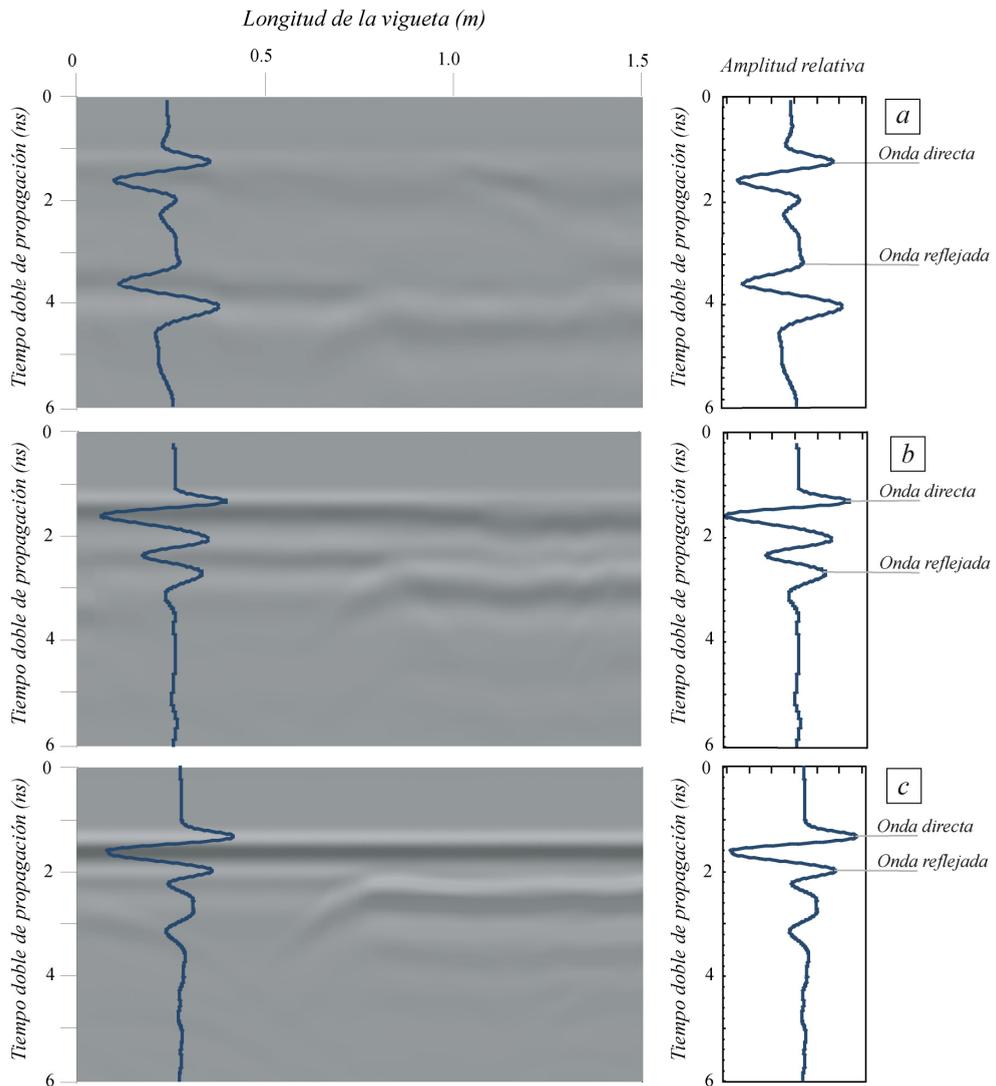


Figura 6.5. -Variación de los tiempos de propagación con el dispositivo de registro *Cara_ParalelaF* como consecuencia de la variación del *CH*: (a) Radargrama obtenido tras la sesión S1 (*CH*=115%); (b) sesión S7 (*CH*=31%) y (c) sesión S12 (*CH*=14%).

Otra forma apreciar el efecto de la variación del *CH* en la señal electromagnética consiste en analizar las trazas características. La figura 6.6 recoge dos trazas

registradas con 20 días de diferencia en el proceso de secado. Se aprecia que la variación del CH conduce a una clara modificación de las señales.

Por un lado, en el análisis de las amplitudes se puede observar que una disminución del CH da lugar a un incremento en la amplitud de las dos ondas (D y R). La amplitud de las ondas electromagnéticas depende de la atenuación que se produce durante la propagación. Una disminución en el CH conduce a una disminución en la conductividad eléctrica y por tanto, a una disminución de la atenuación. Además, la constante dieléctrica del medio influye en la radiación de la antena, de modo que cuando la madera se seca el valor de ϵ disminuye. Esto produce un ensanchamiento en el patrón de radiación (véase apartado 2.3.1) y explica el incremento de la amplitud de la onda directa.

Por otro lado, la disminución de ϵ genera un incremento en la velocidad de propagación. Este hecho se observa en la figura 6.6 donde se aprecia el desplazamiento de la R de la traza correspondiente a la vigueta más seca, lo que da lugar a una disminución del tiempo de propagación.

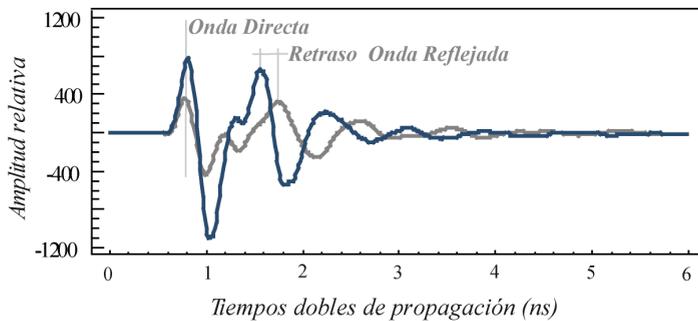


Figura 6.6. - Trazas correspondientes a dos momentos de medición con el dispositivo de registro *Cara_ParalelaF* con 20 días de diferencia (línea gris $CH = 70\%$ y línea azul $CH = 25\%$).

6.1.3.- ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS REGISTROS

A continuación se estudia de forma cuantitativa como afecta la variación del CH en los parámetros de onda. En primer lugar se estudia la variación en los tiempos de llegada de la onda directa, a continuación, la variación en las velocidades de propagación y amplitudes de las ondas (tanto la directa como la reflejada) y por último, se analiza la variación espectral asociada a este fenómeno.

6.1.3.1.-TIEMPOS DE LLEGADA

Se asume que el tiempo cero corresponde al momento en el que la onda directa (D) se registra y es comúnmente empleado como origen de tiempos en los registros de georradar. Ahora bien, esto omite el hecho de que cuando una antena se coloca sobre una superficie o cerca de ella, la onda directa se ve alterada en su forma y se desplaza en el tiempo unas décimas de nanosegundo, debido a la carga dieléctrica del material sobre el que se encuentra (Roberts y Daniels, 1997). Incluso algunos autores como Viriyametanont et al. (2008) demuestran que en el estudio de la variación del contenido de humedad del hormigón, el tiempo de llegada de la onda directa esta afectado por el CH de las muestras.

Como se detalla en el apartado 4.2.1 según Yelf (2004) la posición del cero depende de cada antena, de la distancia entre emisor y receptor y las propiedades dieléctricas del medio bajo la antena. Por ese motivo el análisis que a continuación se expone se realiza con el objeto de comprobar si esa alteración del tiempo de llegada de la onda directa (adelanto o retraso), en el caso de la madera, también está directamente afectado por la variación del CH . Las lecturas de los tiempos de llegada de la onda directa se realizan en el primer máximo positivo para facilitar su identificación.

Como ejemplo se muestra en la figura 6.7 los promedios de tiempo de llegada de la onda directa por sesión con el dispositivo de registro *Testa*, ya que es representativo del comportamiento del resto de dispositivos de registro. En todas ellas se comprueba que se produce un aumento del tiempo de llegada, es decir, conforme se secan las viguetas, el tiempo de llegada de esta onda se retrasa.

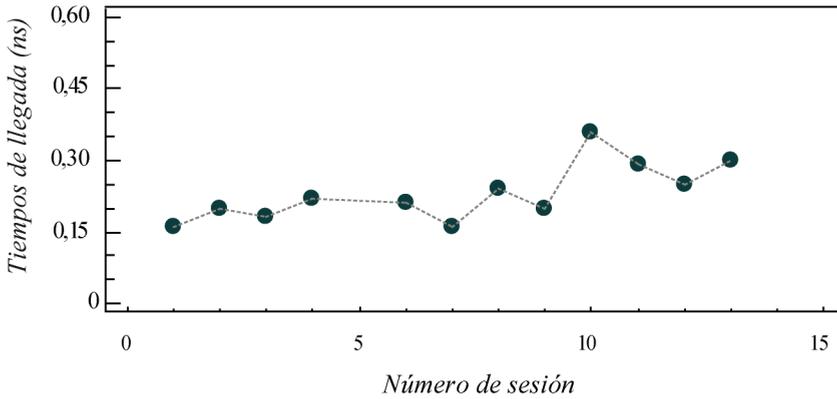


Figura 6.7.- Tiempos de llegada promedio de la sesión de la onda directa con el dispositivo de registro *Testa* en las viguetas de *Pinus pinaster* Ait.

Para comprobar si existe alguna relación entre este retraso con el *CH* se ajustan los valores promedio de tiempo de llegada de la onda directa con el $CH_{promedio}$ de la sesión (tabla 6.2). Los mejores ajustes entre el $CH_{promedio}$ y el tiempo de llegada de la onda directa es el ajuste exponencial. A lo largo de toda la tesis la bondad del ajuste se expresa a partir del cuadrado del coeficiente del momento de correlación del producto Pearson (R^2). En este caso todos los ajustes realizados presentan un coeficiente de correlación bastante bajo y poco representativo (figura 6.8).

Asimismo, al analizar el ajuste de cada uno de los tiempos de llegada con el *CH* para cada vigueta y sesión se obtienen unos ajustes exponenciales con unos coeficientes de correlación todavía más bajos.

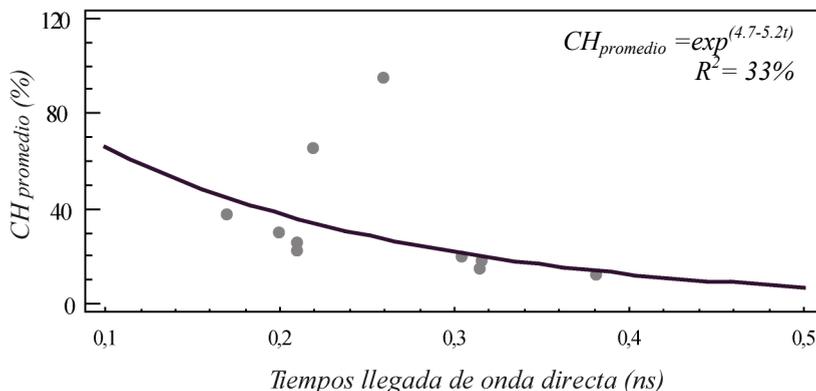


Figura 6.8.- Ajuste de tiempos de llegada promedio de la sesión de la onda directa con el $CH_{promedio}$ de la sesión con el dispositivo de registro *Cara_ParalelaF* en las viguetas de *Pinus pinaster* Ait.

En la tabla 6.2 se resumen todos los ajustes realizados. Los bajos parámetros de correlación obtenidos inducen a pensar que, a pesar de la tendencia de aumento de tiempo de llegada de la onda directa, esta tendencia no está directa y únicamente relacionada con la variación del CH como sucede en el estudio del hormigón.

Tabla 6.2.- Parámetros de los ajustes del CH con los tiempos de llegada de la onda directa. Función exponencial de ajuste: $CH(\%) = \exp^{(a-bt)}$.

<i>Dispositivo de registro</i>	<i>Distribución</i>	R^2 (%)	<i>a</i>	<i>b</i>
<i>Testa</i>	Media por sesión	50	5.3	-7.6
	Todas	34	4.7	-5.8
<i>Cara_ParalelaF</i>	Media por sesión	33	4.7	-5.2
	Todas	25	4.3	-4.05
<i>Canto</i>	Media por sesión	53	4.6	-5.8
	Todas	23	4.3	-4.2

6.1.3.2.- VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN

La constante dieléctrica (ϵ) de un medio es uno de los parámetros físicos que determina el valor de la velocidad de propagación (v) de una onda electromagnética en ese medio (véase capítulo 2). Dado que el CH del medio influye de forma decisiva en ϵ , cabe pensar que la medida de la velocidad de propagación de la onda puede proporcionar información sobre el contenido de humedad.

En este apartado se estudia la variación de las velocidades de propagación como consecuencia de la variación del CH desde distintos aspectos:

A.-Métodos de medición

Los registros se efectúan con dispositivos de registro distintos con el objeto de comparar cual de ellos es más efectivo en cada una de las posiciones de la antena respecto a las fibras de la madera.

B.-Obtención de velocidades de propagación

Se analiza la variación de la v como consecuencia de la variación del CH .

C.-Relación de velocidades de propagación con el contenido de humedad

Se buscan los mejores ajustes entre las v y el CH de las viguetas.

A.-Métodos de medición

Se realizan adquisiciones estáticas y dinámicas. Las adquisiciones estáticas se realizan, en primer lugar, colocando un reflector metálico bajo la vigueta y posteriormente sin el reflector. En cuanto a las dinámicas, se coloca el reflector

metálico sólo bajo la mitad de la vigueta, con el objeto de poder identificar mejor la reflexión al producirse el cambio de polaridad en la reflexión en la interfase madera-reflector metálico (véase capítulo 4.3). Todas las viguetas son estudiadas con los tres dispositivos de registro.

Tras efectuar la lectura del tiempo de llegada de las ondas directas y de las reflejadas en cada vigueta, para cada método de adquisición de registros y en cada una de las diferentes sesiones, es decir, a lo largo de todo el proceso de secado, se deduce lo siguiente:

- Con CH altos y medios se produce una gran atenuación de la señal y un retraso importante de su tiempo de llegada. Esto da lugar a que se identifiquen mejor las ondas reflejadas con el dispositivo *Cara_ParalelaF* que con *Canto*, ya que en el primer caso la onda recorre menor distancia y por lo tanto se atenúa y dispersa menos. Asimismo, dado los altos CH la onda se propaga más lento y por tanto la onda directa y la reflejada se encuentran menos solapadas.
- Por el contrario conforme se seca la vigueta, cuando se llega a valores de CH bajos y por tanto menores diferencias de tiempos de llegada con el dispositivo *Cara_ParalelaF*, la onda directa y la reflejada se solapan. En ese caso es más sencillo identificar los tiempos de llegada de la reflejada con el dispositivo *Canto*, porque al ser menor el CH la onda reflejada está menos atenuada y además el tiempo de llegada es menor.
- De forma general se puede establecer que es más sencillo efectuar la lectura de tiempos en los registros estáticos, sobre todo si bajo la vigueta se coloca un reflector metálico, que en los dinámicos.
- Sin embargo, cuando los CH son altos o medios es necesario contrastar la llegada de la onda reflejada con los tres métodos. Para

$CH > 50\%$, es interesante medir con los 3 dispositivos pues el radargrama es muy confuso, incluso en la transición entre las zonas con y sin reflector metálico. Además con el dispositivo *Canto* para $CH > 50\%$ no se pueden tomar valores de amplitud, ya que se encuentra tan atenuada que sus valores son en torno a cero.

- Para $CH < 50\%$ se identifica con la misma rapidez y claridad con ambos dispositivos, dinámicos o estáticos colocando o no reflector metálico.

De forma generalizada se puede establecer que conforme desciende el CH mejora la identificación de las señales, independientemente del dispositivo de registro.

B.- Obtención de velocidades de propagación

En este punto se analiza la variación en la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas como consecuencia de la variación del CH . Las v y las correspondientes ε se calculan a partir de las ecuaciones 2.41 y 2.42 (véase apartado 2.4.3).

El efecto de la variación del CH de la madera sobre las mediciones de georradar, en particular sobre las v , se muestra en la figura 6.9. Cada curva representa la velocidad de propagación para una sesión de medición de cada una de las viguetas. En la gráfica se representan las velocidades resultantes de la adquisición de registros con el dispositivo *Cara_ParalelaF*. Se toman estos valores, ya que con el dispositivo *Canto* sólo se pueden obtener datos para valores del CH entre [34-11%], debido a la gran atenuación de la onda reflejada para contenidos de humedad superiores.

La disminución del CH durante el proceso de secado da lugar a una disminución de la polarización y de la conducción, lo que genera un incremento en la

velocidad de propagación. Este fenómeno se observa en la figura 6.9, ya que para todas las viguetas la velocidad máxima se alcanza cuando están más secas. El rango del CH varía desde 129%, cuando las viguetas están recién cortadas, hasta el 12% cuando alcanzan la HEH , dando lugar a una variación de la velocidad desde 4.7 hasta 18.9 cm/ns, como valores promedio de la sesión.

Como se describe en el capítulo 5, debido a la anisotropía dieléctrica de la madera, dependiendo del dispositivo de registro con respecto a las fibras, se obtienen mayores o menores velocidades de propagación. El análisis que a continuación se realiza se centra en el análisis de la variación de v empleando el dispositivo de registro *Cara_ParalelaF*, es decir, estudiando la variación que se produce cuando el campo se propaga perpendicularmente a las fibras. Los resultados obtenidos con este dispositivo son proporcionales a los que se obtienen con los dispositivos ortogonales a éste (véase apartado 5.3). Se elige profundizar en los registros tomados con el dispositivo *Cara_ParalelaF* por dos motivos. En primer lugar, este dispositivo permite recorrer la longitud completa de la vigueta y en segundo lugar, éste es el más sencillo de emplear a la hora de inspeccionar las viguetas que forman parte de una estructura.

Asimismo, la velocidad de propagación a lo largo de una misma sesión es más variable en las primeras, es decir, cuando las viguetas presentan un mayor CH (desde la sesión S1 hasta la sesión S6), que los observados a medida que se secan. Por ejemplo, en la sesión S6 el CH entre las distintas viguetas la v varía en un intervalo de 4.5 cm/ns. Mientras que en la última sesión (sesión S13) el rango de CH entre las distintas viguetas apenas varía 1% y por lo tanto el intervalo de variación de las velocidades es de 1.4 cm/ns. Por último, hay que señalar que un elevado CH dificulta la identificación de los tiempos de llegada debido a la fuerte atenuación y dispersión que se produce en la señal y es por ello que en las primeras sesiones algunas lecturas no se pudieron efectuar, incluso en los registros del dispositivo *Cara_ParalelaF*. Este patrón de comportamiento encontrado de la variación de v como consecuencia de la variación del CH de un

medio está en perfecto acuerdo con la teoría de propagación de las ondas electromagnéticas.

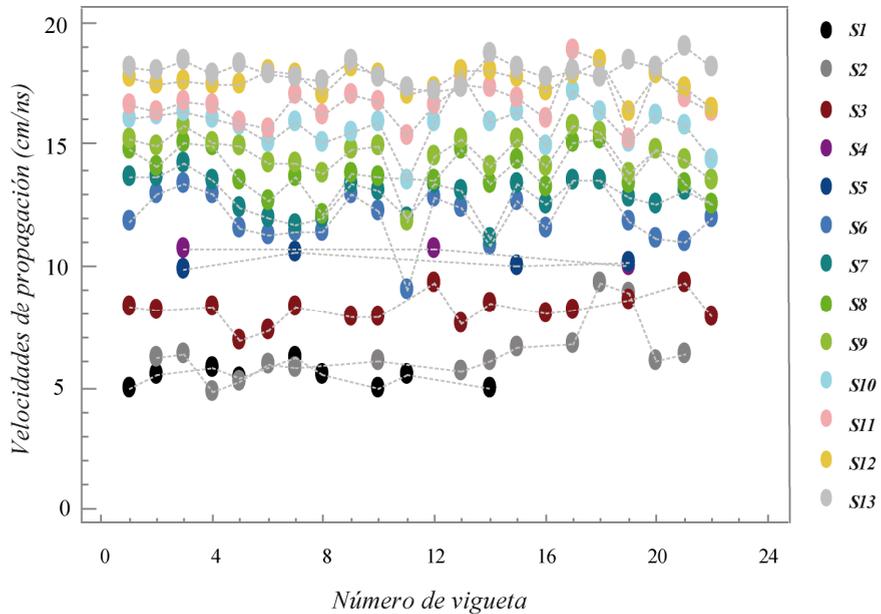


Figura 6.9.- Efecto del proceso de secado en las velocidades de propagación con el dispositivo de registro *Cara_ParalelaF*.

Cuando la cantidad de agua en la matriz de la madera se incrementa es de esperar un aumento de ϵ por dos razones, una porque la ϵ del agua es mucho mayor que la de la madera, y otra porque conforme aumenta el CH desde la condición anhidra los componentes polares de las paredes celulares alcanzan mayor libertad de rotación.

C.- Relación de velocidades de propagación con el contenido de humedad

La figura 6.10 muestra en (a) la velocidad de propagación de cada vigueta para cada sesión versus el CH y en (b) su correspondiente constante dieléctrica (ϵ) versus el CH . En ella se puede comprobar como ϵ aumenta conforme lo hace el

contenido de humedad, siguiendo la tendencia descrita por Torgovnikov (1993). En su trabajo Torgovnikov muestra que la tasa de incremento de ε es mayor para CH por encima del Punto de Saturación de la Fibra (PSF). No obstante, las rectas de regresión parecen tener también una pendiente significativa por debajo del PSF .

La relación entre la ε y el CH de un medio es un tema controvertido. Estas variables se han relacionado por medio de funciones lineales, logarítmicas o exponenciales para valores bajos del CH y para frecuencias dentro del rango de las microondas (véase apartado 3.6.2). Recientemente Sahin y Nürgül (2004) han obtenido que las ecuaciones de segundo orden son las que proporcionan el mejor grado de ajuste para distintas frecuencias. Sin embargo, en el presente estudio las mejores correlaciones se obtienen para funciones polinómicas de tercer grado. Como se observa en la figura 6.10, el valor del parámetro $R^2= 96\%$, en ambos casos, obtenido para las curvas de regresión revela el buen grado de ajuste de las variables estudiadas con el CH .

Existen algunas funciones de calibración comúnmente aceptadas en el estudio del CH del suelo como son las de Roth et al. (1992) y Topp et al. (1980); e incluso trabajos recientes que comparan unas con otras (Stoffregen et al., 2002). Es interesante destacar que tanto el comportamiento dieléctrico de la madera como el del suelo frente a la variación de su CH proporcionan mejores correlaciones cuando se ajustan las variables con ecuaciones de tercer orden.

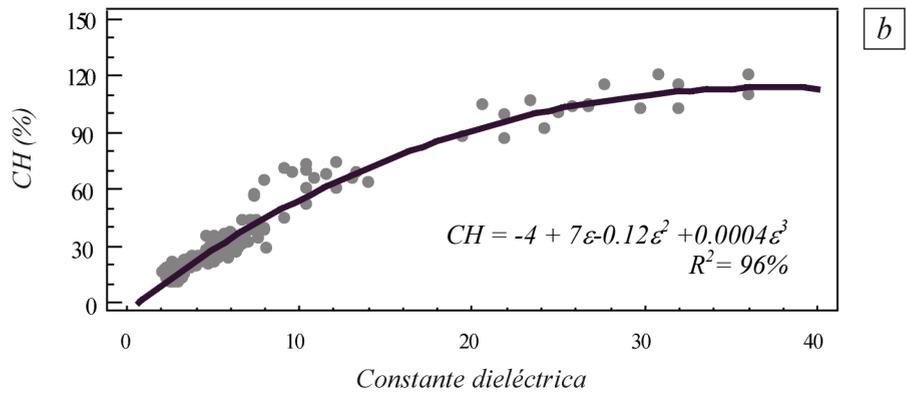
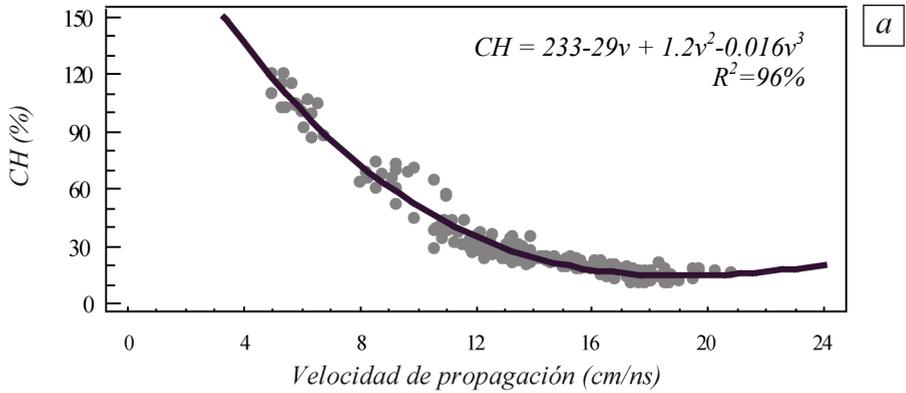


Figura 6.10.- Efecto de la variación del *CH* en la velocidad de propagación (a) y en la constante dieléctrica (b) en las viguetas de *Pinus pinaster* Ait.

6.1.3.3.- ANÁLISIS DE AMPLITUDES

Como fase previa al análisis de las variaciones de amplitudes como consecuencia de la variación del *CH* es necesario establecer el criterio de la lectura de las mismas. Tal y como se detalla en el apartado 4.2.1, son varias las posiciones que se pueden adoptar para la lectura de tiempos y por tanto de las amplitudes. El criterio establecido en este estudio es el de tomar la lectura de tiempos de llegada

y amplitudes siempre en el primer máximo positivo de la señal, tanto de la señal al atravesar el medio como de la onda directa al emitir al aire, empleada esta última para normalizar los valores de amplitud.

A continuación se realiza el siguiente ensayo para comprobar que no se pierde información aplicando este criterio. En primer lugar, se toma la lectura de amplitudes de la R desde el primer máximo positivo al segundo máximo negativo, comúnmente definido por el término en inglés *peak to peak* y se normaliza con la onda directa (nA). El resultado del mejor ajuste entre el CH y la amplitud normalizada *peak to peak* es una ecuación polinómica de segundo grado con un alto nivel de fiabilidad $R^2=92\%$ (figura 6.11a).

A continuación, se obtienen las amplitudes normalizadas (nA) tomando lectura de los primeros máximos positivos. El mejor ajuste es del mismo orden y presenta valores de fiabilidad similares al anterior (figura 6.11b). Esta comprobación valida el criterio establecido y de aquí en adelante se trabaja con las amplitudes normalizadas del primer máximo positivo. Además el tomar lectura de la amplitud en el primer máximo positivo amplía el rango de CH , ya que si las viguetas presentan un alto CH el primer máximo positivo sí se puede identificar. Mientras que la lectura de amplitudes *peak to peak* es muy difícil de realizar para CH altos.

Aceptada la validez del criterio establecido para la toma de lectura de las amplitudes se estudia la correlación de la variación de las amplitudes normalizadas de la onda directa (A_D) y de la onda reflejada (A_{R2}) con la variación del CH . El comportamiento de la D es especialmente interesante, ya que los ensayos muestran que las amplitudes de éstas se encuentran fuertemente influidas por su CH . Además, la sensibilidad de la onda directa al CH es un factor importante en la caracterización de la madera, teniendo en cuenta que esta señal es siempre la más fácil de registrar.

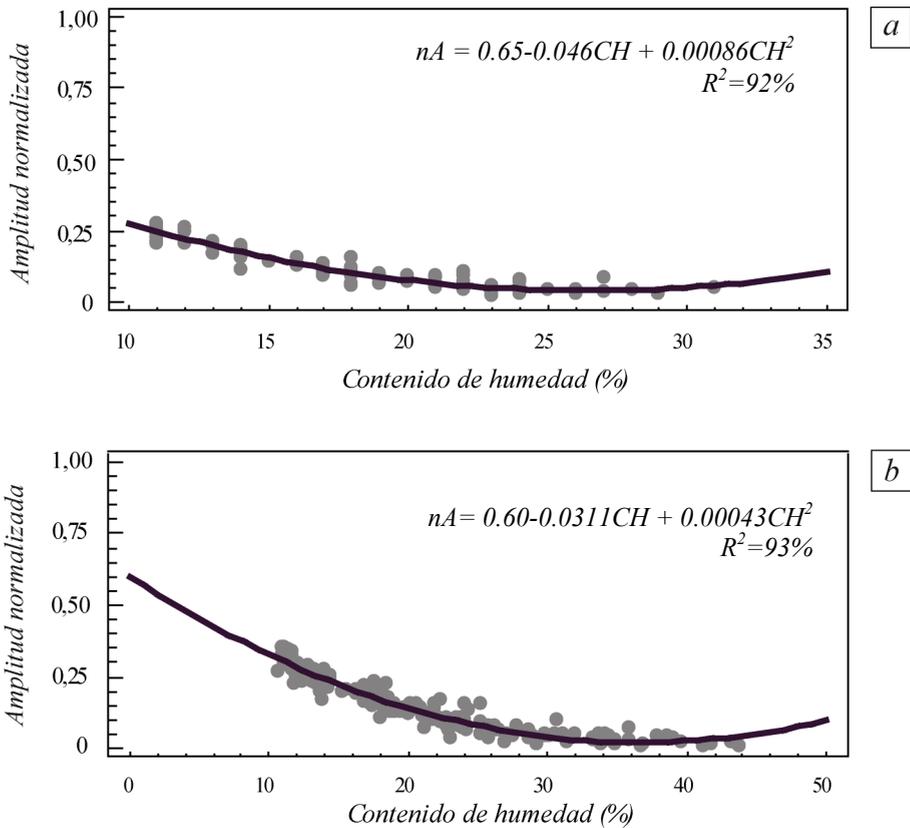


Figura 6.11.- (a) Ajuste de amplitudes normalizadas *peak to peak* de la onda reflejada con el dispositivo *Canto* con el *CH*; (b) Ajuste de amplitudes normalizadas del primer máximo positivo de la onda reflejada con el dispositivo *Canto* con el *CH*.

En la figura 6.12 se observa que la variación de A_D con la variación del CH es muy similar en los tres casos estudiados, es decir, con el dispositivo *Testa*, *Canto* y *Cara_ParalelaF*. La A_D aumenta cuanto más seca se encuentra la pieza analizada. Asimismo, se aprecia que para $CH > PSF$ la dispersión de los datos es significativamente mayor que cuando está por debajo.

Como ya se ha comentado, la onda directa se propaga por la superficie de la vigueta y por tanto, para el tipo de antena empelada, la distancia que recorre el rayo es siempre 6 cm, distancia entre el emisor y el receptor (véase apartado 4.1).

Las ondas se atenúan, como consecuencia de la distancia recorrida en su trayectoria, dando lugar a una disminución de su amplitud. Ahora bien, en este caso la distancia es constante y muy pequeña para que este fenómeno se observe. De modo que el aumento notable de la amplitud está asociado a la mayor amplitud del haz como consecuencia de la disminución del CH , demostrando la sensibilidad de la onda directa frente a la variación del CH .

En los ajustes calculados entre A_D y el CH , los mejores valores de correlación se obtienen para el caso del dispositivo *Testa* ($R^2= 93\%$). Mientras que con el dispositivo *Canto* o *Cara_ParalelaF* estos valores de correlación disminuyen ligeramente ($R^2= 74\%$ y $R^2= 87\%$). Esta diferencia en el grado de los ajustes se podría atribuir al hecho de que el valor del CH con el que se comparan las A_D es un valor promedio para toda la vigueta. En la sección transversal de las viguetas existe un gradiente de humedad ya que la parte interna se encuentra más húmeda que la externa, sobre todo para contenidos de humedad altos. Además hay que tener en cuenta que la onda directa viaja por los primeros centímetros de la madera. De este modo, con el dispositivo *Canto* la sección por la que viaja la onda directa presenta menor valor del gradiente de humedad que con el dispositivo *Cara_ParalelaF*. Esto puede explicar por qué las amplitudes normalizadas en el primer caso son superiores a las esperadas. Sin embargo, tanto en el caso del dispositivo *Testa* como *Cara_ParalelaF* la onda directa atraviesa una parte que se encuentra más cercana al centro de la sección y por tanto, con un contenido de humedad más próximo a la media. En lo que respecta a la onda directa hay que destacar dos resultados muy interesantes. Uno es que la función de ajuste obtenida para los tres casos estudiados es prácticamente la misma y el otro que la correlación entre las variables estudiadas es muy alta.

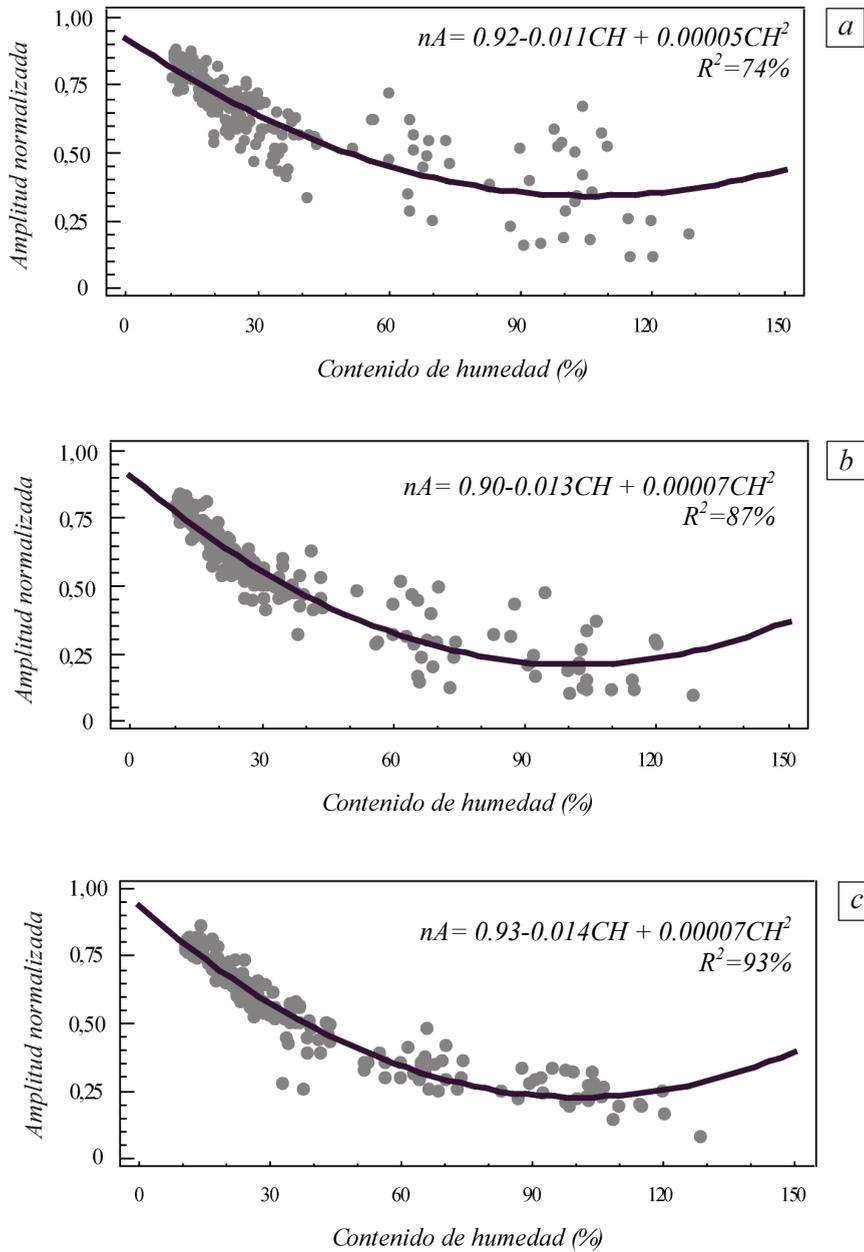


Figura 6.12.- Amplitud normalizada de la onda directa versus *CH* con el dispositivo *Canto* (a), *Cara_ParalelaF* (b) y *Testa* (c) en las viguetas de *Pinus pinaster* Ait.

En la figura 6.13 se muestra el mejor ajuste entre la A_{R2} con el dispositivo *Canto* (leída en el segundo máximo positivo) y con *Cara_ParalelaF* (leída en el primer máximo positivo) frente a las variaciones del CH . El comportamiento de la amplitud normalizada del primer y segundo máximo de la onda reflejada en el dispositivo *Canto* es similar. La única diferencia al trabajar con el segundo máximo es que permite aumentar el rango de CH con el que trabajar. En los dos casos la amplitud normalizada aumenta, de forma general, a medida que las viguetas están más secas.

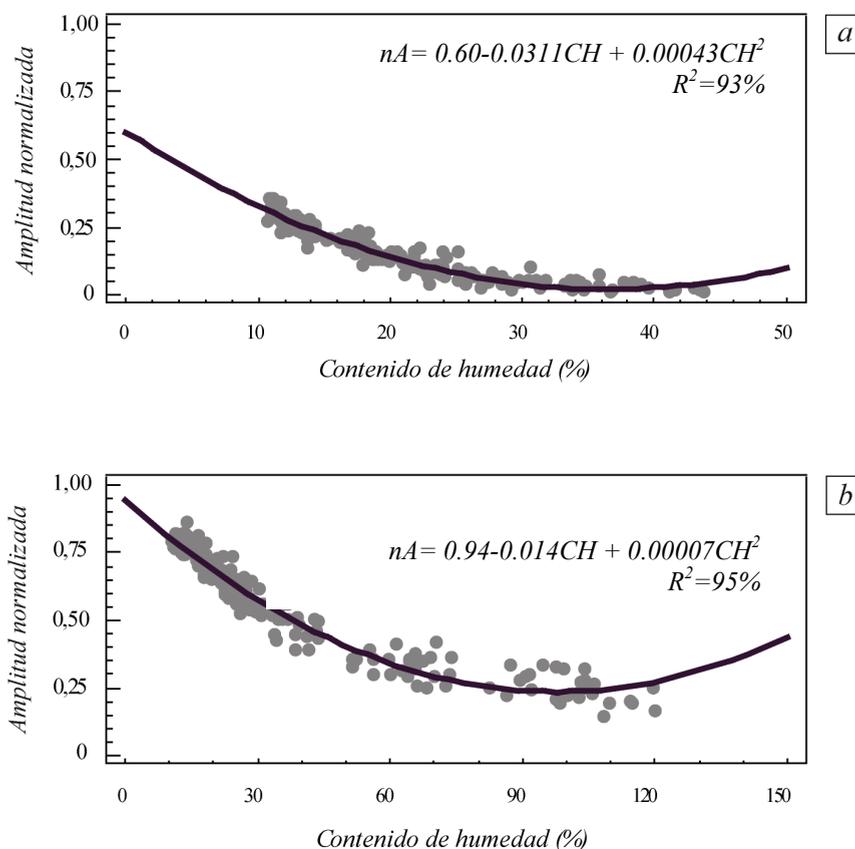


Figura 6.13.- Amplitudes normalizadas de la onda reflejada versus CH con el dispositivo *Canto* (a) y *Cara_ParalelaF* (b) en las viguetas de *Pinus pinaster* Ait.

El grado de ajuste de las variables para las curvas de regresión obtenidas es elevado, tanto las registradas con el dispositivo *Canto* ($R^2=93\%$) como para *Cara_ParalelaF* ($R^2=95\%$). Dadas las longitudes de las viguetas (125 cm) y la frecuencia de la antena empleada no se registran las ondas reflejadas con el dispositivo *Testa*.

Las amplitudes normalizadas de las señales que se registran con dispositivo *Canto* son ligeramente menores que las de *Cara_ParalelaF*. Esto es debido a que en el primer caso, al ser mayor el recorrido del rayo, se produce una atenuación mayor. Esta mayor atenuación hace que para $CH>45\%$ no sea posible efectuar la lectura de la onda reflejada con dispositivo *Canto*.

No obstante, la información que proporciona la curva de regresión obtenida para este caso es más fiable puesto que el espesor de este lado (20 cm) es tal que las llegadas de la onda directa y la reflejada no se solapan. Por tanto esta última está perfectamente identificada tras recorrer el espesor completo de la vigueta y su gradiente de humedad completo.

Por último, al comparar el comportamiento de A_D y A_{R2} se observa que, a pesar de la diferencia de magnitud, el patrón es muy similar. Ambas amplitudes son relativamente bajas para los elevados contenidos de humedad de las primeras sesiones y durante el proceso de secado la tasa de incremento de la amplitud normalizada aumenta. Cualquiera de las dos variables analizadas presentan una alta correlación con el CH , obteniéndose indicadores de fiabilidad muy elevados.

El comportamiento de la variación de amplitud normalizada de las ondas frente a la variación del CH se resume en la tabla 6.3. En esta tabla se incluyen las ecuaciones de ajuste y los parámetros de las mejores correlaciones obtenidas, junto con el dispositivo empleado para su registro.

Tabla 6.3.- Resumen de ajustes entre amplitudes normalizadas en cada sección versus el contenido de humedad registradas con distintos dispositivos.

<i>Apoyo antena</i>	<i>Amplitud normalizada</i>	<i>Ecuación</i>	<i>R²</i>
<i>Testa</i>	Onda directa	$A = 0.93 - 0.014CH + 0.00007CH^2$	$R^2 = 93\%$
<i>Canto</i>	Onda directa	$A = 0.92 - 0.011CH + 0.00005CH^2$	$R^2 = 74\%$
<i>Canto</i>	Onda reflejada	$A = 0.60 - 0.031CH + 0.00043CH^2$	$R^2 = 93\%$
<i>Cara_ParalelaF</i>	Onda directa	$A = 0.90 - 0.013CH + 0.00007CH^2$	$R^2 = 87\%$
<i>Cara_ParalelaF</i>	Onda reflejada	$A = 0.94 - 0.014CH + 0.00007CH^2$	$R^2 = 95\%$

6.1.3.4.- ANÁLISIS ESPECTRAL

Tal y como han comprobado algunos autores como Turner (1994) y Roberts (2000) al colocar la antena sobre determinado medio se produce un ligero desplazamiento hacia bajas frecuencias. Además algunos autores como Klysz et al. (2004) están experimentando con la posibilidad de evaluar la variación del *CH* en el hormigón por medio del análisis espectral.

En el espectro de frecuencia de una emisión al aire se aprecia un ligero desplazamiento de la frecuencia central frente al espectro al emitir sobre una madera. Por lo tanto la frecuencia central y el ancho de banda de la onda incidente y de la onda reflejada son diferentes debido al filtrado producido al atravesar el medio. Con el objetivo de emplear los parámetros del espectro como variable indicadora del *CH* se calculan los espectros de cada registro con el dispositivo *Cara_ParalelaF* y *Canto* de cada una de las viguetas en todas las sesiones de medición.

Del análisis de estos espectros de frecuencia se observan los siguientes patrones de comportamiento. Los espectros de las señales con el dispositivo *Cara_ParalelaF* tienen un patrón similar entre ellos y de igual forma si se

comparan los espectros obtenidos con el dispositivo *Canto*. Con ambos dispositivos se observa el efecto que produce en la señal el descenso del *CH*.

En los espectros de las señales con el dispositivo *Cara_ParalelaF* para los *CH* más altos aparecen dos picos máximos de frecuencia: uno sobre 800 MHz y otro en 1.3 GHz (figura 6.14a). A medida que el *CH* disminuye, el primero va aumentando de amplitud y se ensancha hacia frecuencias mayores. Conforme las viguetas se secan el segundo pico va disminuyendo desplazándose hacia las altas frecuencias y su amplitud va disminuyendo hasta quedarse en una amplitud en torno a 1000. Finalmente cuando alcanza la *HEH* el máximo queda centrado en torno a 1.2 GHz con la mayor amplitud (en torno a 3000).

Con el dispositivo *Canto* los espectros presentan dos picos diferenciados del resto con un mínimo central entre ambos para todos los *CH* (figura 6.14b). El primero de ellos está situado a bajas frecuencias (aproximadamente en torno a 1 GHz) y presenta una amplitud ligeramente mayor que el situado en altas. A medida que disminuye el *CH*, el pico situado a bajas frecuencias va aumentando su amplitud y desplazándose hacia altas. Sin embargo, el segundo pico también aumenta su intensidad pero lo hace con mayor velocidad, además de ir desplazándose hacia altas. En el proceso de secado llega un momento que los dos picos se aproximan, pero a diferencia con lo que ocurre con el dispositivo *Cara_ParalelaF*, ambos picos no llegan a fusionarse y queda siempre un pequeño valle. Finalmente, una vez se ha alcanzado la *HEH* el primer pico alcanza un ancho mucho mayor que el segundo quedándose centrado en torno a 1.2 GHz y con amplitud 2200.

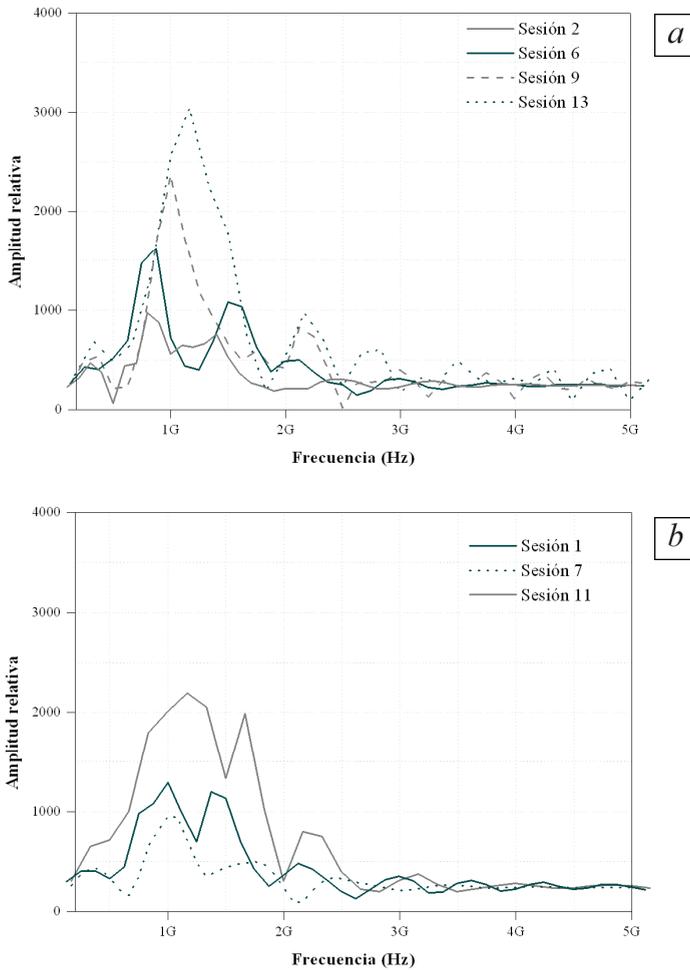


Figura 6.14.- (a) Espectro de frecuencia de la traza característica de la vigueta 2 de *Pinus pinaster* Ait. con el dispositivo de registro *Cara_ParalelaF* en diferentes sesiones de registro; (b) Espectro de frecuencia de la traza característica de la vigueta 1 de *Pinus Pinaster* Ait. con el dispositivo *Canto* en diferentes sesiones de registro.

6.2.- EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LAS PROPIEDADES ELECTROMAGNÉTICAS DE MADERAS DE DISTINTA DENSIDAD

El presente estudio analiza la eficacia de la técnica de georradar para la evaluación de la variación del CH de viguetas de madera de diferente densidad, así como si siguen los mismos patrones de comportamiento independientemente de la especie de la que se trate. Con este propósito se han analizado 7 viguetas de madera de especies diferentes y diferentes densidades, sometiénolas a procesos de secado y humidificación.

6.2.1.-DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Se emplean 7 viguetas de diferentes especies, extraídas del mismo lote de viguetas del que se obtienen las muestras para realizar el estudio de anisotropía, cuyas principales características se adjuntan en la tabla 6.4. A partir de éstas se obtienen sus densidades iniciales siguiendo la norma UNE 56531:1977 (figura 6.15a). Las secciones en testa de cada una de estas viguetas se pueden ver en la figura 5.3.

Estas viguetas se encuentran inicialmente a su HEH y posteriormente se someten a diferentes procesos de secado y humidificación. Para el cálculo del contenido de la humedad inicial (CH_{INI}) se aplica la norma UNE-EN 13183-1:2002 descrito en el apartado 3.4. Seguidamente, se reduce el CH de las viguetas introduciéndolas en un horno a 60° C y humedad constante durante un mes, obteniéndose el que se denomina CH_{SECA} . A continuación se introducen las viguetas durante 10 días en una piscina con agua. Al sacarlas se calcula su

contenido de humedad (CH_{SEMI}). Finalmente, se introducen de nuevo las piezas en la piscina. Esta vez durante 15 días, con el objeto de llegar a valores de contenido de humedad mayores (CH_{HUM}).

Tabla 6.4.- Dimensiones, densidades y CH iniciales de las viguetas de madera de diferentes especies.

<i>Vigueta</i>	<i>L (cm)</i>	<i>Cr (cm)</i>	<i>Cn (cm)</i>	ρ (g/cm ³)	<i>CH (%)</i>
<i>1</i>	116	14.2	7.6	0.90	9.0
<i>2</i>	150	19.5	11.6	0.80	10.6
<i>6</i>	87	19.5	7.4	0.68	10.3
<i>8</i>	137	19.6	7.3	0.66	10.5
<i>11</i>	138	19.5	14.3	0.59	9.3
<i>13</i>	138	22.1	7.5	0.52	9.4
<i>19</i>	138	19.2	6.8	0.50	9.5

Los valores de contenido de humedad finales para cada estado de humedad (CH_{INI} , CH_{SECA} , CH_{SEMI} , CH_{HUM}) y vigueta se muestran en la figura 6.15b. En ella se observa como no todas las especies presentan la misma variación en su CH para el mismo tiempo de secado o humidificación.

En general, las especies más ligeras secan más rápido que las especies más densas, ya que la estructura de las más ligeras contienen más huecos por unidad de volumen y el CH se mueve más rápido a través del aire que a través de las paredes celulares de la madera (Forest Products Laboratory, 1999). No obstante, como se detalla en el apartado 3.5 el proceso de secado de las viguetas depende de una serie de factores que hace que se produzcan distintas velocidades de secado a lo largo del proceso. Como se aprecia en la figura 6.15, no siempre las especies más ligeras secan más rápido, ya que la vigueta 11 rompe esta tendencia. Como es previsible, hay una mayor variación de densidad con respecto al CH en aquellos casos en los que la humedad varía más.

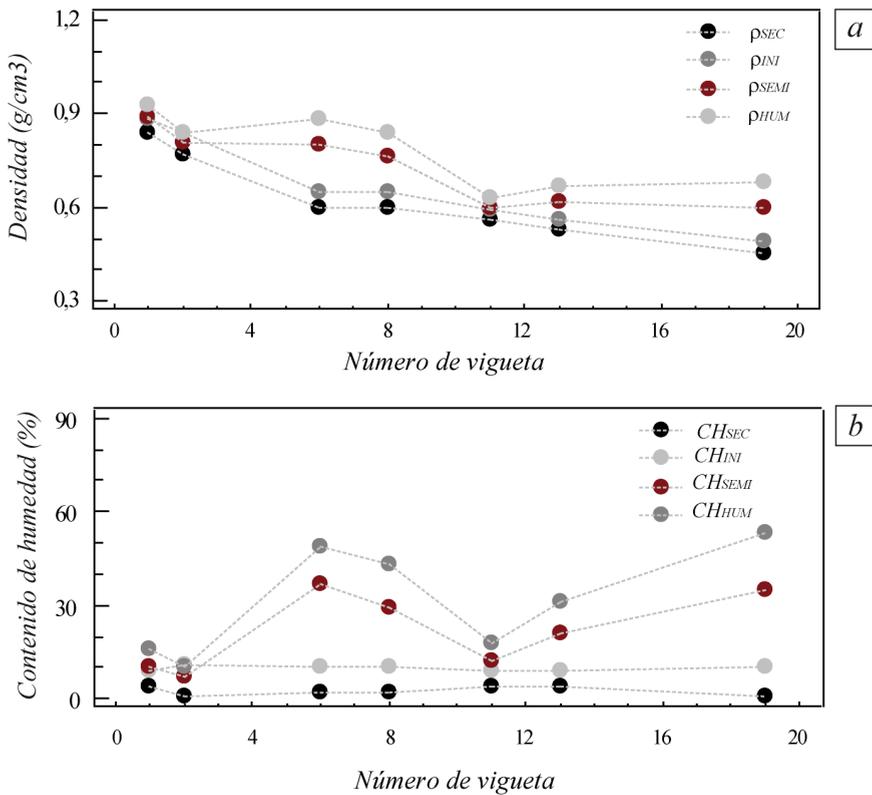


Figura 6.15.- (a) Variación de la densidad para diferentes CH y especies de madera; (b) variación del CH para maderas de diferente densidad.

Las mediciones con el georradar se realizan con los dispositivos de registro dinámicos *Cara_ParalelaF* y *Canto* en cada uno de los estados de CH.

Debido a que los diferentes grados de CH dan lugar a variación en las propiedades electromagnéticas, la longitud de las ventanas de registro de datos se adecua a cada caso. En este estudio se apoyan las viguetas por sus extremos en unos cubos metálicos con el objeto de amplificar la señal reflejada en los extremos de la vigueta y ayudarnos del cambio de polaridad en la reflexión para identificar más fácilmente los tiempos de llegada de las ondas reflejadas.

De igual forma que en el estudio de la variación del CH del *Pinus pinaster* Ait., se adopta el criterio de tomar todas las lecturas de tiempo y amplitud en el primer máximo positivo de cada una de las señales, tanto en los registros del dispositivo *Cara_ParalelaF* como el de *Canto*.

6.2.2.- ANÁLISIS CUALITATIVO DE LOS REGISTROS

Al analizar los radargramas obtenidos se observa que las mayores v se presentan siempre cuando las viguetas están más secas. Esta velocidad aumenta conforme disminuye la humedad de la vigueta, hasta alcanzar los valores máximos de velocidad en la sesión denominada CH_{SECA} , para todas las viguetas estudiadas.

Como ejemplo de este comportamiento se muestran en la figura 6.16 dos radargramas de la muestra 8 con el dispositivo de registro *Canto*. Cada uno de ellos se registra en momentos distintos y por lo tanto con contenidos de humedad diferentes. En primer lugar, se aprecia claramente el cambio de polaridad que se produce al apoyar las viguetas por sus extremos en dos cubos metálicos. Asimismo, en estas figura se comprueba el aumento significativo del tiempo de llegada de la onda reflejada al pasar de un contenido de humedad del $CH=2\%$ al $CH=37\%$.

Al analizar las amplitudes, se puede observar que una disminución del CH da lugar a un incremento en la amplitud de las dos ondas (directa y reflejada). Esto se observa claramente en la figura 6.16, donde las mayores amplitudes son las más próximas al color negro. La amplitud de las ondas electromagnéticas depende de la atenuación que se produce durante la propagación. Una disminución en el CH conduce a una disminución de la atenuación. Esto da lugar a que, a pesar de estar empleando la misma escala de color, claramente se produce una disminución de la intensidad de color negro (mayor atenuación) cuanto más húmeda se encuentra la vigueta.

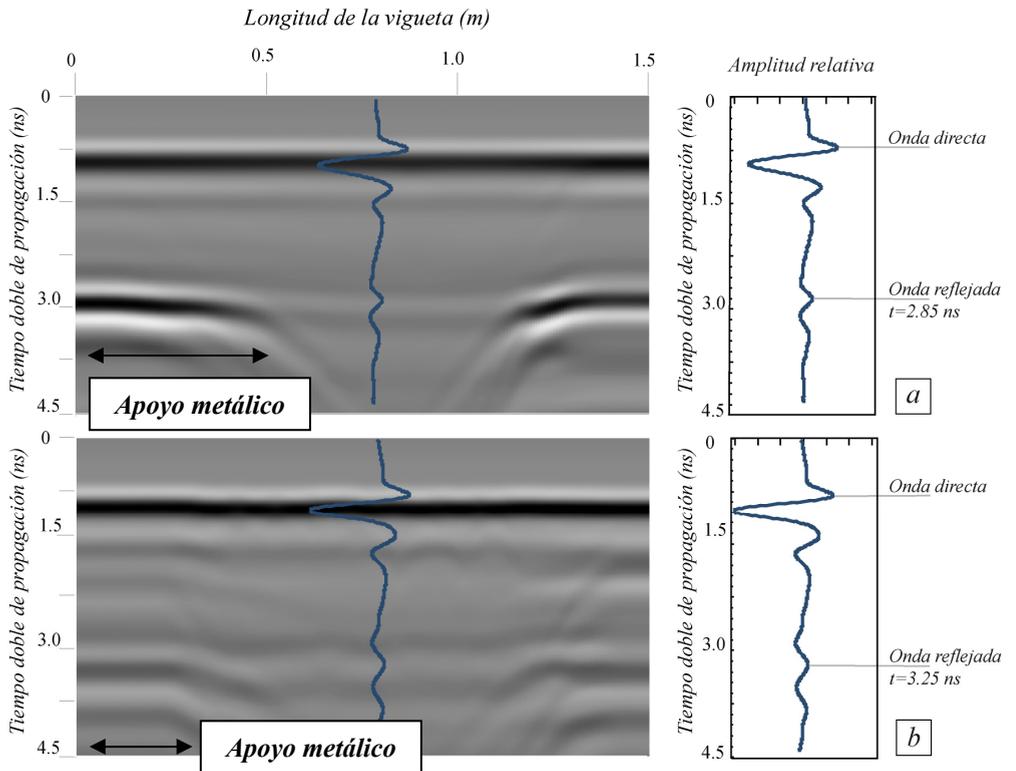


Figura 6.16.- Variación de los tiempos de propagación de la onda reflejada con el dispositivo de registro *Canto* de la viga 2 como consecuencia de la variación del *CH*: (a) Radargrama obtenido tras el secado ($CH_{SECA}=1\%$) y (b) tras la primera humidificación ($CH_{SEMI}=37\%$).

6.2.3.- ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS REGISTROS

Con objeto de cuantificar las variaciones que se producen en los parámetros de la onda como consecuencia de la variación del *CH* se analiza la velocidad de propagación, la amplitud y su correspondiente comportamiento espectral. En este caso no se analizan los tiempos de llegada de la onda directa, ya que como se ve en el estudio de la variación del *CH* del *Pinus pinaster* Ait., no se pudo constatar que exista un patrón de comportamiento debido específicamente a la variación del *CH*.

6.2.3.1.- VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN

A partir del procesado e interpretación de los radargramas se obtienen los tiempos dobles de propagación de las ondas directas y reflejadas y conocido el espesor de las viguetas se obtiene la velocidad de propagación en cada vigueta (ecuaciones 2.41 y 2.42).

Como resultado importante se obtiene que efectivamente las mayores v se presentan en el caso de las viguetas a CH_{SECA} para todas las especies estudiadas (figura 6.17). Esta velocidad disminuye conforme aumenta el CH de la vigueta (CH_{INH} , CH_{SEMB} , CH_{HUM}). Este efecto se cumple para todas las viguetas independientemente de la especie y densidad de las mismas.

En el caso de la vigueta 1, al analizar la velocidad en los distintos estados de contenido de humedad (CH_{INH} , CH_{SECA} y CH_{HUM}) se comprueba que son similares. Esto es debido a que el CH de esta madera, a pesar de haber seguido el mismo protocolo de secado y humidificación, que el resto, apenas varía su CH durante el proceso de secado. Asimismo, al comparar la variación del CH (figura 6.15) con la variación de la velocidad de propagación se comprueba que a un mayor incremento del CH los descensos de la v son mayores (viguetas 2, 6, 13 y 19).

La variación de la velocidad de propagación como consecuencia de la variación del CH se cumple independientemente de cómo estén dispuestas las fibras al cortar la vigueta, ya que al analizar las secciones de corte en testa de las viguetas (figura 5.3) cada una de ellas tienen una sección diferente.

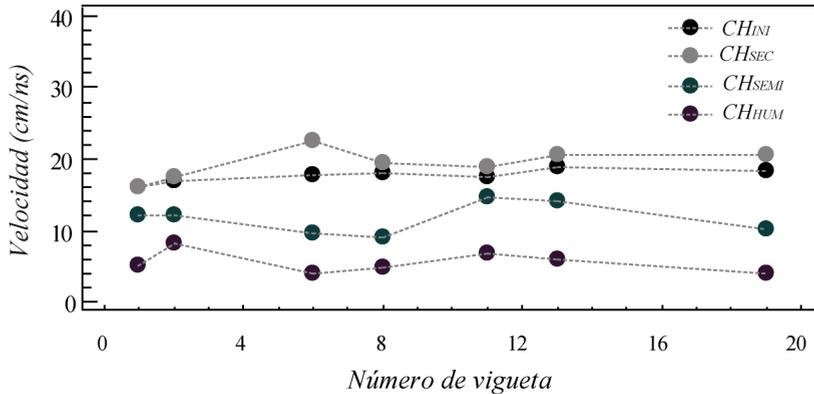


Figura 6.17.- Efecto de la variación del CH en la velocidad de propagación de viguetas de diferentes densidades con el dispositivo de registro *Cara_ParalelaF*.

6.2.3.2.- ANÁLISIS DE AMPLITUDES

Tal y como se desprende en el estudio de amplitudes realizado para el *Pinus pinaster* Ait., los valores más fiables los presenta la onda reflejada. Por lo tanto, el estudio que a continuación se detalla se centra en el análisis de las amplitudes de la onda reflejada. Para ello previamente se normalizan los valores con la amplitud del primer máximo positivo de la onda directa al emitir al aire. Resultados similares se obtienen con los dispositivos *Canto* y *Cara_ParalelaF*.

En la figura 6.18 se muestra la variación de las amplitudes normalizadas de la onda reflejada (A_{R2}) adquiridas con el dispositivo de registro *Cara_ParalelaF* a lo largo de los procesos de secado y humidificación. En la gráfica se comprueba que un incremento en el CH produce un descenso significativo de A_{R2} . No obstante, en el caso de la vigueta 6 y 19 el proceso de secado no significa un aumento de amplitud de la señal. Esto sugiere que los valores de A_{R2} , dependiendo de la especie, son menos sensibles a la variación del CH que las v . De esta forma, habría que estudiar en cada caso, es decir, en cada especie,

detalladamente la evolución de estos valores en función del CH tal y como se realiza en el caso del *Pinus pinaster* Ait. en el apartado anterior.

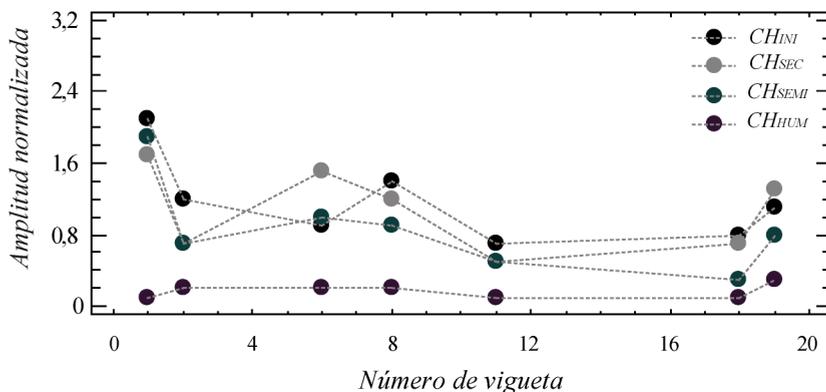


Figura 6.18.- Amplitudes normalizadas de la onda reflejada en viguetas de diferente densidad en los distintos estados de CH de maderas de diferentes especies con el dispositivo de registro *Cara_ParalelaF*.

6.2.3.3.- ANÁLISIS ESPECTRAL

Se calculan los espectros de frecuencia de las señales registradas para cada especie y CH . Del análisis de los mismos se observan los siguientes patrones de comportamiento. Los espectros de las señales con el dispositivo de registro *Cara_ParalelaF* tienen un patrón similar entre ellos y de igual forma sucede al comparar los espectros de las señales del dispositivo de registro *Canto*. En todos los casos se observa el efecto que produce en la señal al variar el CH .

En la figura 6.19 se muestran los espectros de las señales del dispositivo *Cara_ParalelaF* de las viguetas 13 y 11 respectivamente. El efecto del secado se manifiesta de forma clara dando lugar a un aumento de la amplitud del espectro. Ahora bien, se comprueba que el comportamiento frente a este descenso del CH no se manifiesta de igual forma para cada especie. Por ejemplo en el caso de la vigueta 13 la variación de CH del estado inicial al estado seca que se produce es

del 5% y esto da lugar a un aumento de la amplitud del pico central de 900. Mientras que en el caso de la vigueta 11 para la misma variación del *CH* el aumento que se produce en la frecuencia central es tan solo de 100.

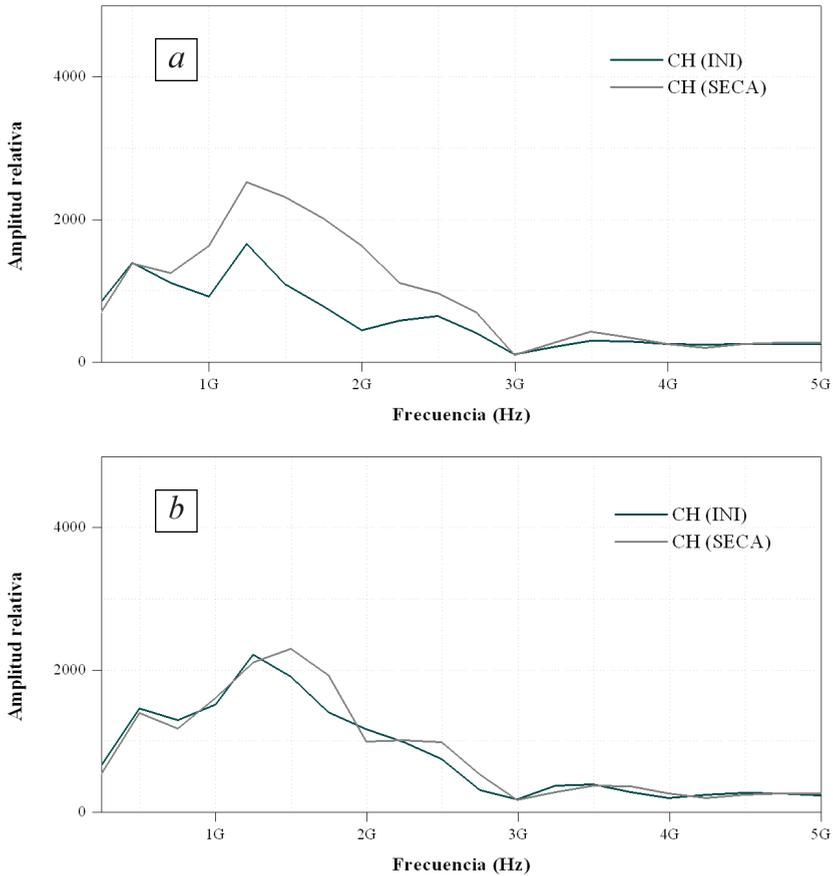


Figura 6.19.- Espectro de frecuencia de la traza característica de la vigueta 13 (a) y de la 11 (b) al apoyar con el dispositivo de registro *Cara_ParalelaF* para diferentes *CH* del lote de maderas de distintas especies con diferentes contenidos de humedad.

En cuanto a la frecuencia central no se produce un desplazamiento a altas de igual proporción en cada especie de madera. Para la madera 13 la frecuencia central se mantiene aproximadamente sobre 1.25 GHz, mientras que para la vigueta 11 la frecuencia central se desplaza de 1.25 GHz hacia 1.5 GHz.

Por último, se observa que estas variaciones de amplitud de la frecuencia central y desplazamiento de la misma no están relacionadas con la densidad de la especie ya que, aunque los patrones de comportamiento generales son los mismos, las magnitudes varían de unas especies a otras sin estar relacionadas con la densidad. Todo ello sugiere que cada especie tiene un comportamiento propio que en su caso se debería analizar por separado.

6.3.- SÍNTESIS DE RESULTADOS

Los resultados que se obtienen confirman la habilidad de la técnica de georradar para caracterizar el *CH* de la madera, revelándose por tanto, como una herramienta muy válida para el control o seguimiento de la variación del mismo. En concreto en este estudio se demuestra que la velocidad de propagación de las ondas, sus amplitudes y los correspondientes espectros de frecuencia de las señales están fuertemente influidos por la variación del *CH*.

De los parámetros de onda estudiados el tiempo de llegada de la onda directa, en oposición a lo que se esperaba, no presenta valores de correlación altos con la variación del *CH*, a diferencia de lo que sucede con otros materiales empleados en la construcción más homogéneos como el hormigón.

Para la obtención de la velocidad de propagación se trabaja con distintos dispositivos de adquisición de registros frente a la direcciones de las fibras con el objeto de comprobar cuál de ellos proporciona mayor y mejor información sobre el *CH*. Se comprueba que para contenidos de humedad altos y medios se identifican mejor las ondas reflejadas al apoyar la antena con el dispositivo *Cara_ParalelaF* que con el dispositivo *Canto*. Sin embargo, conforme se seca la vigueta es más sencillo identificar la onda reflejada con el dispositivo de registro *Canto*.

Asimismo, de forma general se puede establecer que es más sencillo efectuar la lectura de tiempos en los registros estáticos, sobre todo si bajo la vigueta se coloca un reflector metálico. Ahora bien, cuando los *CH* son altos o medios es necesario contrastar la llegada de la onda reflejada con el registro estático sin reflector metálico, por medio del contraste de polaridad y una visión completa de la vigueta. No obstante, para $CH < 50\%$ se identifica con la misma rapidez con el dispositivo de registro *Cara_ParalelaF* o *Canto*, tanto realizando una adquisición dinámica como estática colocando o no reflector metálico.

De las variables analizadas y para todo el rango de humedades estudiado, la mejor correlación con la variación del contenido de humedad se obtiene para la velocidad de propagación de la onda o el valor ε , magnitud derivada de la velocidad.

Se comprueba experimentalmente que cuanto más húmedas están las viguetas de madera, las ondas electromagnéticas que las atraviesan se propagan más lentamente y por tanto, el tiempo necesario para recorrer el mismo espesor de vigueta aumenta. En perfecto acuerdo con la teoría, se corrobora que cuando el CH desciende el valor de ε disminuye y, por tanto, la velocidad aumenta.

Es interesante resaltar que este comportamiento con respecto a la variación de la velocidad de propagación como consecuencia de la variación del CH se cumple independientemente de la densidad de la madera que se estudia y de cómo están dispuestas las fibras al cortar la vigueta y por lo tanto de cómo incida el campo electromagnético sobre ellas.

En cuanto a las amplitudes se observa que la disminución en el CH da lugar a un aumento de la amplitud, tanto de la onda directa como de la reflejada.

En el estudio pormenorizado realizado para el *Pinus pinaster* Ait. son muy interesantes los resultados obtenidos con respecto a las amplitudes, puesto que en el caso de que la vigueta objeto de estudio sea de espesor desconocido es necesario recurrir a este tipo de análisis. Estas amplitudes normalizadas, a pesar de la diferencia de magnitud, presentan comportamientos muy similares cuando el CH va disminuyendo, siendo excelente el grado de acuerdo entre las variables estudiadas para cualquiera de las direcciones prospectadas.

Para todo el rango de humedades estudiado de las viguetas de *Pinus pinaster* Ait., la gran atenuación de las ondas reflejadas para contenidos altos de humedad hace que sea más sencillo identificar la señal con el dispositivo de adquisición de registros *Cara_ParalelaF*. Ahora bien, cuando se trabaja con $CH < 50\%$ el mejor

ajuste lo proporcionan las amplitudes normalizadas del segundo máximo positivo de la onda reflejada con el dispositivo de registro en *Canto*.

Por último, cuando sea difícil detectar la reflexión en el lado opuesto bien, porque el espesor de la viga sea grande o el CH muy elevado, el estudio de la variación del CH se puede efectuar mediante el análisis de A_D . De nuevo para la onda directa se obtiene un gran acuerdo entre el CH y su amplitud, superior al 90% con el dispositivo de registro *Testa*. No obstante, en la aplicación real de la técnica a una estructura de madera es perfectamente posible que los extremos de las vigas no sean accesibles, cuando se trabaja *in situ*. Para estos casos se comprueba que los mejores resultados se obtienen cuando el dispositivo de adquisición de registros es el *Cara_ParalelaF*.

Estudios muy recientes como son Klysz y Balayssac (2007), Matteo et al. (2008) y Steelman y Endres (2008), destacan y experimentan el potencial que tiene el análisis de la variación del contenido de humedad por medio del análisis de la variación de A_D para el estudio en hormigón. En el caso de la madera estructural, a partir del estudio aquí realizado, queda demostrado como el análisis de la variación de A_D aporta información muy interesante sobre la variación del contenido de humedad. Es de especial interés esta comprobación, ya que se trata de la onda más sencilla de registrar e identificar y además no es necesario conocer el espesor de la viga estudiada. Asimismo, es interesante resaltar que el grado de acuerdo entre las variables estudiadas para cualquiera de las direcciones prospectadas es excelente, ya que se obtienen funciones de ajuste prácticamente iguales independientemente del dispositivo de registro empleado.

De forma general se puede decir que el aumento observado de la amplitud conforme se reduce el CH en las vigas de *Pinus pinaster* Ait., también se produce en el resto de maderas de diferente densidad estudiadas. No obstante, en algunas especies la amplitud de la onda reflejada no sigue el mismo patrón que en el caso del *Pinus pinaster* Ait. Esto sugiere que los valores de amplitud de la

onda reflejada, dependiendo de la especie son menos sensibles a la variación del CH que v .

Estos resultados están en perfecto acuerdo con los estudios realizados por (Torgovnikov, 1993) en los que muestra como la constante dieléctrica está fuertemente influida por la densidad de la madera. De esta forma sólo será válido el estudio de la variación del CH si se trabaja con maderas de la misma densidad. Por lo tanto, tal y como se comprueba, es necesario estudiar en cada caso, es decir, en cada especie, detalladamente la evolución de las amplitudes en función del CH tal y como se realiza en el caso del *Pinus pinaster* Ait.

Los espectros de las señales cuando se emplea el dispositivo de registro *Cara_ParalelaF* tienen un patrón similar entre ellos y de igual forma si se comparan los espectros con el dispositivo de registro *Canto*. En todos los casos se observa claramente el efecto que produce en la señal el descenso del CH . Por una parte, con el dispositivo *Cara_ParalelaF* los espectros para contenidos de humedades más altos aparecen dos picos máximos de frecuencia con amplitudes muy bajas. Conforme se van secando estos dos picos aumentan significativamente su amplitud y se van fusionando hasta presentar un único pico central cuando se encuentra a la *HEH*. Por otra parte, con el dispositivo de registro *Canto*, de igual forma que con el dispositivo anterior, conforme se van secando las viguetas los dos picos van aumentando de amplitud. Ahora bien, ni incluso cuando llegan a la *HEH* estos dos picos llegan a fusionarse y presentan un pequeño valle entre ellos.

Esta tendencia al aumento de amplitud de los picos a lo largo del proceso de secado, está perfectamente justificada por el hecho de que a mayores grupos polares, como consecuencia de la presencia de agua, las propiedades dieléctricas aumentan. Esto da lugar a que se produzca una mayor absorción de la energía dando lugar a espectros de amplitudes menores. Ahora bien, aunque en todas las especies se produce un ascenso de la amplitud del espectro conforme la vigueta

se seca, la proporción en la que lo hace no es igual para todas las especies, e incluso el desplazamiento hacia altas tampoco se produce con la misma tasa en todas las especies.

En definitiva, los resultados obtenidos muestran que el georradar puede ser utilizado como técnica no invasiva para evaluar el contenido de humedad en viguetas de madera de uso estructural de *Pinus pinaster* Ait. con un alto grado de confianza. Por otra parte el estudio realizado con las demás especies apuntan a que se pueden obtener resultados igualmente interesantes si se evalúa su comportamiento en su rango completo de variación de contenido de humedad.

Todo ello corrobora la hipótesis de que por medio de la técnica del georradar se puede obtener un parámetro indicador del grado de humedad de la madera o variabilidad para una misma vigueta a lo largo del tiempo. De esta misma forma, esta técnica se podría aplicar para definir zonas húmedas en el interior de una pieza (bolsas de humedad, pudriciones ocultas, etc.).

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

CAPÍTULO 7

CARACTERIZACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE LA MADERA DE DIFERENTE DENSIDAD

La densidad es una de las propiedades que caracteriza a la madera y está estrechamente relacionada con la mayoría de las restantes propiedades físicas, mecánicas y tecnológicas.

De hecho es uno de los tres parámetros que se tienen en cuenta a la hora de asignar clases resistentes a las piezas de madera según la norma UNE-EN 338: 2003.

El problema surge cuando se quiere obtener la densidad de una madera que forma parte de una estructura, ya que la mayoría de técnicas empleadas con este fin implican la extracción de una muestra que se analiza por métodos gravimétricos o bien densitometría de Rayos X.

De esta forma, se hace necesario obtener un método no destructivo para la determinación de la densidad que permita de forma sistemática inspeccionar un gran número de piezas *in situ* con una mayor eficiencia y rapidez. Son varios los autores que han estudiado el efecto de la densidad en las propiedades dieléctricas de la madera como Vermaas (1973). Todos ellos muestran como la densidad tiene un efecto medible en las propiedades dieléctricas en todas las direcciones de registro con respecto a la fibra. Para todas ellas se obtiene que conforme aumenta la densidad las propiedades dieléctricas aumentan. Incluso algunos autores como Kharadly (1985) y Martin et al. (1987) obtienen correlaciones por encima del 80% entre la amplitud de las ondas electromagnéticas en el rango de las microondas y la densidad.

En este capítulo se detallan los ensayos realizados con objeto de obtener una variable indicadora, que proporcione información de la densidad de la madera por medio de georradar. En este sentido, se analiza la correlación de la densidad con los siguientes parámetros de las ondas: velocidad de propagación, amplitud y por último espectros de frecuencia de la señal electromagnética.

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

7.1.-DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Para el presente estudio se emplea un lote de 20 viguetas de madera de diferentes especies. Las dimensiones y densidades, obtenidas según la norma UNE 56531:1977, de cada una de ellas se detallan en la tabla 7.1. En el Anexo A se incluyen el nombre normalizado en español, la especie a la que corresponden y el grupo según la norma UNE-EN 13556:2004 de los 20 tipos de maderas. Las secciones en testa de cada una de ellas se pueden ver en la figura 5.3, pues las muestras empleadas en el estudio de anisotropía también se obtienen de estas viguetas. Estas muestras empleadas para el estudio de la anisotropía dieléctrica también se han empleado en diferentes ensayos en el presente capítulo, como más adelante se detalla. La única diferencia entre las muestras y las viguetas es su longitud (tabla 7.1).

Para la obtención del *CH* se cortan unas pequeñas muestras de cada una de las viguetas y se sigue el protocolo establecido por la norma UNE-EN 13183-1:2002 (véase apartado 3.4).

Sobre estas viguetas los registros se toman siguiendo dos procedimientos con objeto de comprobar cuál de ellos proporciona mejores resultados. En primer lugar, se toman registros estáticos colocando la antena sobre la vigueta en 4 posiciones distintas, ya que como se comprobó en el capítulo 5 la anisotropía dieléctrica afecta de forma significativa en los parámetros de onda. En este caso se toman los registros con los dispositivos: *Canto*, *Testa*, *Cara_ParalelaF* y *Cara_PerpendicularF* (véase apartado 4.4). En todas las adquisiciones estáticas se coloca bajo las viguetas un reflector metálico para poder amplificar la señal y mejorar la identificación de los parámetros de las ondas.

El segundo procedimiento consiste en colocar la antena a 35 cm de la vigueta de tal forma que se recibe la onda directa que se propaga por el aire entre el emisor y el receptor y posteriormente se recibe la reflexión que se produce en la

interfase aire-madera. Tal y como se ve en el apartado 4.2.2 para que estas dos señales no se solapen la antena se ha separado de la vigueta 35 cm.

Tabla 7.1.- Dimensiones, densidades y contenido de humedad del lote de viguetas de diferente densidad.

	<i>Vigueta</i> <i>L (cm)</i>	<i>Muestra</i> <i>L (cm)</i>	<i>Cr (cm)</i>	<i>Ct (cm)</i>	ρ (g/cm ³)	CH (%)
<i>1</i>	116.5	14.0	14.2	7.6	0.90	9.0
<i>2</i>	155.5	19.0	19.5	11.6	0.80	10.6
<i>3</i>	100.7	23.5	23.9	7.3	0.80	10.7
<i>4</i>	200.0	24.3	25.4	7.5	0.75	11.4
<i>5</i>	91.0	19.4	19.4	9.5	0.70	11.7
<i>6</i>	137.5	19.0	19.5	7.4	0.68	10.3
<i>7</i>	105.0	20.3	20.1	6.1	0.67	11.1
<i>8</i>	87.0	19.1	19.6	7.3	0.66	10.5
<i>9</i>	112.0	13.9	14.1	7.3	0.65	10.5
<i>10</i>	136.8	19.1	19.6	7.1	0.64	12.8
<i>11</i>	138.0	19.0	19.5	14.3	0.59	9.3
<i>12</i>	102.0	31.9	32.2	8.0	0.58	10.4
<i>13</i>	138.0	18.3	20.0	13.6	0.57	9.4
<i>14</i>	96.5	18.0	18.1	8.0	0.56	10.1
<i>15</i>	96.0	30.9	30.4	8.0	0.56	13.2
<i>16</i>	102.0	21.2	21.5	7.7	0.55	12.3
<i>17</i>	97.0	14.0	14.5	10.0	0.55	10.7
<i>18</i>	199.0	22.0	22.1	7.5	0.52	12.2
<i>19</i>	138.5	19.2	19.2	6.8	0.50	9.5
<i>20</i>	93.5	20.9	20.9	10.0	0.12	10.5

En la lectura de tiempos de llegada y amplitudes de las ondas se aplica para todos los dispositivos de registro y todas las ondas el siguiente criterio. Tanto en las ondas directas (*D*) como en las reflejadas (*R*), se toma la lectura de ambos parámetros en el primer máximo positivo.

7.2.- ANÁLISIS CUALITATIVOS DE LOS REGISTROS

De forma previa a la evaluación cuantitativa de los registros estáticos con los 4 dispositivos de registro sobre las muestras, se realiza un ensayo preliminar sobre las viguetas. En este caso se emplea el dispositivo dinámico *Cara_ParalelaF*, ya que es éste el que se emplearía en el caso de estudiar una vigueta que forma parte de una estructura. Como ejemplo se muestra en la figura 7.1a un perfil realizado sobre la vigueta 4 ($\rho = 0.75 \text{ g/cm}^3$) y en la 7.1b sobre la vigueta 18 ($\rho = 0.52 \text{ g/cm}^3$) con el dispositivo de registro *Cara_ParalelaF*. Estas dos viguetas están sujetas en sus extremos por dos cubos metálicos, cuyas reflexiones de mayor amplitud y su cambio de polaridad con respecto a la reflexión en la interfase madera-aire, se observan con claridad en los radargramas.

Es interesante comprobar como en este caso, a pesar de tratarse de viguetas de iguales secciones de canto y diferente densidad, de forma cualitativa, es difícil establecer una diferencia en el comportamiento de la señal. Ahora bien si analizamos cuantitativamente se aprecian pequeñas diferencias en los tiempos de llegada y amplitudes de las ondas reflejadas.

Las maderas más ligeras presentan menos grupos polares dando lugar a que sus propiedades dieléctricas sean menores. Esto se refleja en una variación de la velocidad de propagación como consecuencia de la variación de densidad. En la figura 7.1 se comprueba que para la vigueta 18 el tiempo de llegada de la reflexión disminuye ligeramente con respecto al de la vigueta 4. De esta forma la velocidad de propagación a través de la vigueta 4 será ligeramente menor que en la vigueta 18.

En cuanto a las amplitudes se espera que cuanto más densa sea la madera, más atenuada se encontrará la radiación al propagarse por su interior, entendiendo la densidad como indicador de la cohesión interna del material. En definitiva, cuanto más densa sea la vigueta menores deberán ser las amplitudes de las

ondas. No obstante de forma cualitativa resulta difícil apreciar este efecto y por tanto se hace necesario comparar numéricamente las amplitudes para poder definir un patrón de comportamiento.

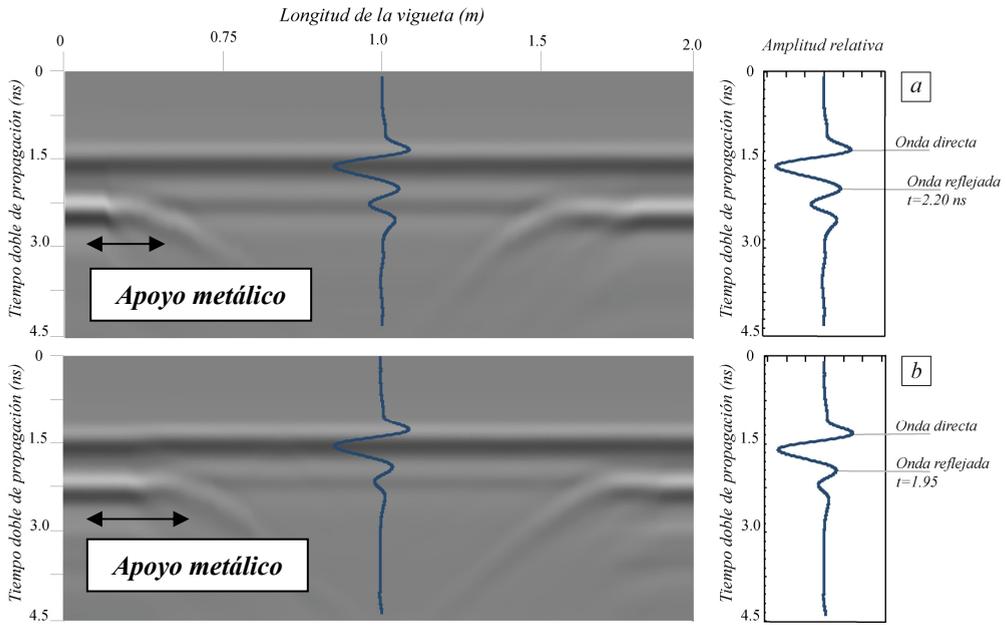


Figura 7.1. -Variación de los tiempos de propagación con el dispositivo de registro *Cara_PerpendicularF* en viguetas de diferente densidad: (a) Radargrama en la vigueta 4 ($\rho=0.75 \text{ g/cm}^3$) y (b) en la vigueta 18 ($\rho=0.52 \text{ g/cm}^3$).

7.3.- ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS REGISTROS

Con el fin de cuantificar el efecto que produce la diferencia en densidad en los parámetros de las ondas registradas se analizan: las velocidades de propagación, las amplitudes y el comportamiento espectral de las señales.

7.3.1.- VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN

A partir del procesado e interpretación de los registros del primer ensayo se obtienen los tiempos dobles de propagación y las correspondientes velocidades de propagación y constante dieléctricas (ecuaciones 2.41 y 2.42) con los 4 dispositivos de adquisición de registros: *Cara_PerpendicularF*, *Cara_ParalelaF*, *Canto* y *Testa* (tabla 5.2 y tabla 5.5).

En todos los casos se comprueba que a mayor densidad las v son menores. Esta relación se confirma al realizar el ajuste entre densidad y las velocidades de propagación. En cuanto a la relación entre la densidad y ε se aprecia que los ajustes presentan correlaciones menores que con la velocidad, incluso en el mejor de los casos. Los coeficientes de correlación de estos ajustes se muestran en la tabla 7.2, siendo los mejores obtenidos los de los dispositivos *Cara_PerpendicularF* y *Cara_ParalelaF*. En la figura 7.2 se muestra el ajuste calculado entre la v y la ε y la densidad que presentan mejores correlaciones.

Tabla 7.2.- Ajustes de la densidad con las velocidades de propagación y con correspondientes constantes dieléctricas para los 4 dispositivos de adquisición de registros.

<i>Parámetro</i>	<i>Dispositivo de adquisición</i>	<i>Coficiente(R^2)</i>
<i>Velocidad</i>	<i>Cara_PerpendicularF</i>	86
	<i>Cara_ParalelaF</i>	88
	<i>Canto</i>	69
	<i>Testa</i>	73
<i>Constante dieléctrica</i>	<i>Cara_PerpendicularF</i>	75
	<i>Cara_ParalelaF</i>	73
	<i>Canto</i>	51
	<i>Testa</i>	53

A la vista de estos resultados se corrobora que efectivamente las propiedades dieléctricas de la madera están fuertemente influidas por la densidad, de tal forma que a mayor densidad el comportamiento dieléctrico es mayor, independientemente de la dirección de registro respecto a las fibras. Ahora bien, todas las direcciones de estudio no presentan la misma fiabilidad en el ajuste. Esto es debido al comportamiento anisótropo del parámetro analizado con respecto a la dirección de estudio respecto a las fibras.

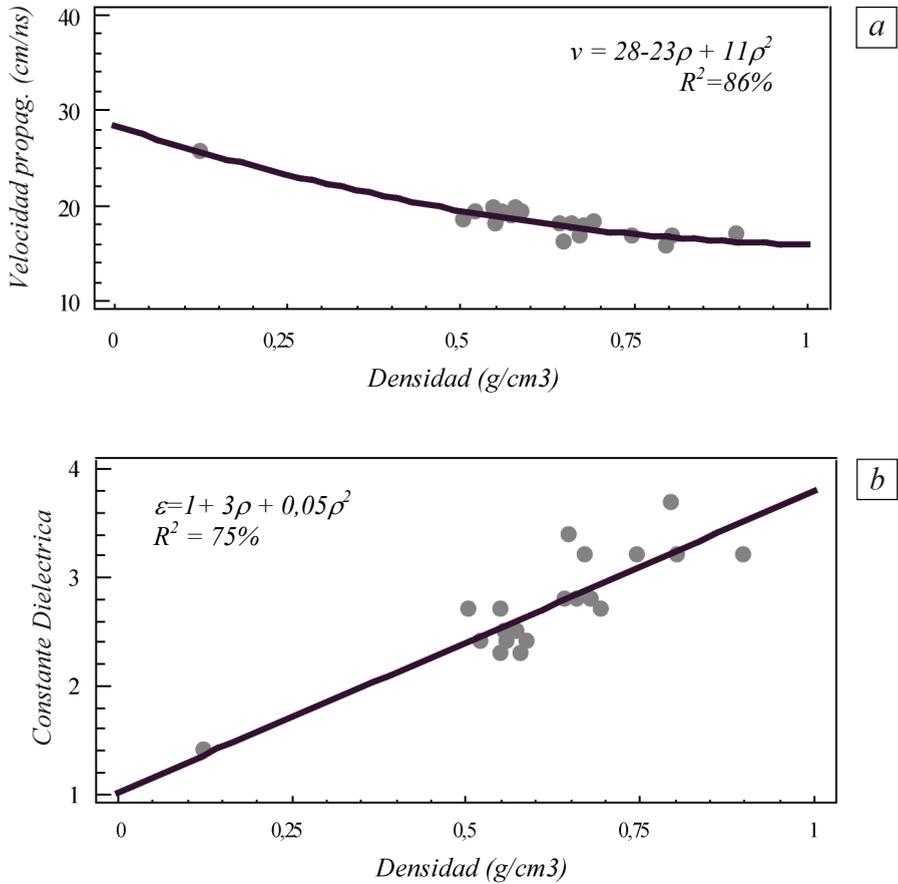


Figura 7.2.- Efecto de la diferencia de densidad en la velocidad de propagación (a) y en la constante dieléctrica (b) con el dispositivo *Cara_PerpendicularF*.

7.3.2.- ANÁLISIS DE AMPLITUDES

Todas las amplitudes leídas de las ondas directas y reflejadas de los distintos dispositivos de adquisición de registro se normalizan con el primer máximo positivo de la onda directa al emitir al aire.

Del análisis de las ondas normalizadas directas (A_D) y reflejadas (A_R) se desprende que su comportamiento en relación con la densidad es diferente. En

las figuras 5.11 y 5.19 se muestran las A_D y A_R de los 4 dispositivos de registro empleados. A continuación, en la tabla 7.3 se detallan los coeficientes de correlación obtenidos para los mejores ajustes (polinomio de segundo grado) entre la densidad y las amplitudes obtenidas con los 4 dispositivos. Estos resultados son muy interesantes pues se obtienen correlaciones del mismo orden que las presentadas por otros autores como son Kharadly (1985) y Martin et al. (1987).

Por una parte, las mejores correlaciones las presentan las A_D y en el caso del dispositivo de adquisición *Cara_PerpendicularF*. En este caso se comprueba que cuanto mayor es la densidad menor es la amplitud normalizada. Por otra parte, las A_R no siguen un patrón de comportamiento dependiente de la densidad, ya que se obtienen parámetros R^2 especialmente bajos ($R^2 < 12\%$).

Tabla 7.3.- Ajustes de la densidad con las amplitudes normalizadas de las ondas directas para los 4 dispositivos de adquisición de registros.

<i>Onda</i>	<i>Dispositivo de adquisición</i>	<i>Coficiente (R^2)</i>
<i>Directa</i>	<i>Cara_PerpendicularF</i>	80
	<i>Cara_ParalelaF</i>	75
	<i>Canto</i>	66
	<i>Testa</i>	46

Los ajustes entre la densidad y las amplitudes de los distintos dispositivos de adquisición de registro no presentan los mismos valores de correlación. Esto es debido al comportamiento anisótropo de este parámetro respecto a la dirección de estudio respecto a las fibras. Por ello, se decide profundizar en el análisis de aquel que presenta mejores correlaciones: Onda directa registrada con el dispositivo *Cara_PerpendicularF*.

Esto da la oportunidad de estudiar como se solapan las distintas ondas y analizar que efecto produce en la densidad. En la figura 7.4 se muestra una traza

característica de este tipo de dispositivo. En ella se distinguen una serie de máximos (positivos y negativos) al solaparse las distintas ondas.

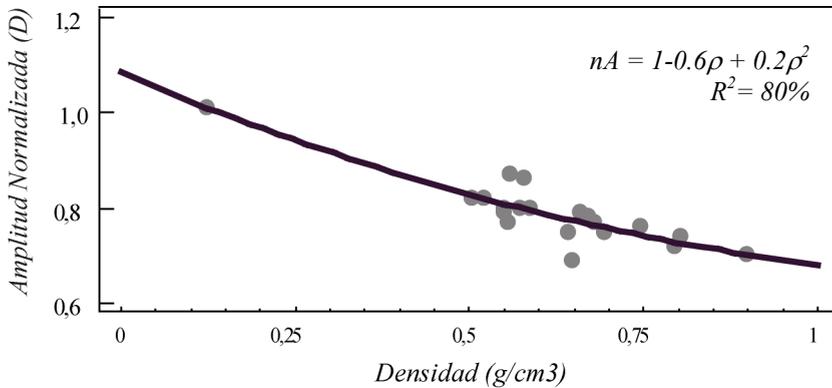


Figura 7.3.- Ajuste de amplitudes normalizadas de la onda directa con el dispositivo Cara_PerpendicularF.

Como se muestra en la figura 7.4 son cinco los máximos que se identifican en las trazas. Al analizar los tiempos de llegada de cada uno de estos máximos, se observa que el primer y segundo máximo de todas las viguetas estudiadas se localizan al mismo tiempo.

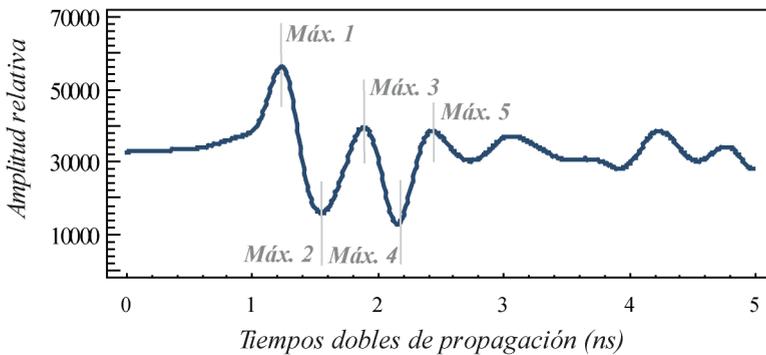


Figura 7.4.- Traza característica al adquirir los registros con el dispositivo Cara_PerpendicularF.

La diferencia máxima de unas maderas a otras es de tan sólo 0.14 ns. Sin embargo, en el tercero, cuarto y quinto máximo para las distintas maderas los desplazamientos máximos del tiempo de llegada de los máximos es 0.27, 0.33 y 0.42 ns respectivamente. Esto es debido principalmente a que en los dos primeros máximos su mayor aportación es debida a la onda directa, mientras que en los otros se cuantifican los máximos que corresponden a la cola de la onda directa y la onda reflejada solapadas.

En la tabla 7.4 se detallan las amplitudes registradas para cada máximo, que se normalizan con el primer máximo positivo de la onda al emitir al aire. Una vez normalizadas se ajustan estos valores con las densidades.

Tabla 7.4.- Amplitudes normalizadas de los máximos en las maderas de diferente densidad al adquirir los registros con el dispositivo *Cara_PerpendicularF*.

<i>Muestra</i>	<i>1^{er} Max.</i>	<i>2^o Max.</i>	<i>3^{er} Max.</i>	<i>4^o Max.</i>	<i>5^o Max.</i>
<i>1</i>	0.20	0.27	0.08	0.14	0.08
<i>2</i>	0.24	0.38	0.08	0.06	0.03
<i>3</i>	0.25	0.39	0.12	0.16	0.10
<i>4</i>	0.25	0.38	0.11	0.12	0.07
<i>5</i>	0.25	0.39	0.06	0.08	0.07
<i>6</i>	0.20	0.28	0.02	0.11	0.07
<i>7</i>	0.27	0.41	0.03	0.06	0.07
<i>8</i>	0.26	0.38	0.09	0.13	0.07
<i>9</i>	0.24	0.37	0.14	0.19	0.12
<i>10</i>	0.26	0.42	0.14	0.12	0.08
<i>11</i>	0.25	0.44	0.11	0.05	0.05
<i>12</i>	0.28	0.43	0.10	0.10	0.07
<i>13</i>	0.27	0.44	0.12	0.05	0.03
<i>14</i>	0.28	0.42	0.14	0.12	0.08
<i>15</i>	0.28	0.43	0.12	0.10	0.07
<i>16</i>	0.28	0.43	0.11	0.10	0.05
<i>17</i>	0.27	0.42	0.10	0.09	0.11
<i>18</i>	0.30	0.45	0.12	0.07	0.05
<i>19</i>	0.26	0.38	0.05	0.10	0.06
<i>20</i>	0.33	0.55	0.21	0.07	0.04

Los mejores resultados se obtienen con funciones polinómicas de segundo grado, siendo el primer máximo positivo de la onda directa la única variable que obtiene una correlación aceptable con la densidad ($R^2=80\%$). Sin embargo, esta buena correlación decrece significativamente con el resto de máximos, ya que para el segundo desciende a $R^2=64\%$, para el tercero $R^2= 37\%$ y para el cuarto y quinto $R^2<15\%$.

Todo ello indica que no se puede establecer una correlación entre las amplitudes normalizadas de las ondas reflejadas y únicamente la densidad, ya que la superposición de ondas que se produce en cada caso no es exactamente igual, entre otros factores debido al diferente espesor de las muestras. En la figura 7.5 se muestran dos trazas características: vigueta 2 ($\rho= 0.80 \text{ g/cm}^3$) y vigueta 18 ($\rho= 0.52 \text{ g/cm}^3$). En ella se aprecia como el primer máximo positivo de la onda directa de la vigueta más densa presenta menor amplitud normalizada. Sin embargo, es difícil realizar una comparativa con el resto de máximos puesto que el comportamiento al propagarse las ondas por el interior de las viguetas es significativamente diferente.

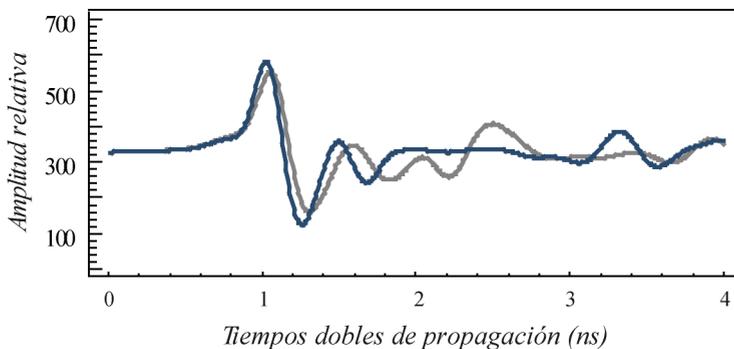


Figura 7.5.- Traza característica del radargrama de la vigueta 2 representada por la línea gris y la vigueta 18 representada por la línea azul al adquirir los registros con el dispositivo *Cara_PerpendicularF*.

Se comprueba que la amplitud normalizada del primer máximo de la onda directa es el parámetro más fuertemente influido por la densidad de la madera. A

continuación, se realiza un segundo tipo de ensayos para confirmarlo. En la adquisición de registros con el dispositivo *Cara_PerpendicularF* la onda directa y la reflejada se solapan. Para evitarlo y poder tener aislada la reflexión de la interfase aire-madera se toman los registros separando 35 cm la antena de las viguetas de madera. La separación mínima entre la antena y la madera para que las señales no se solapen es de 30 cm como mínimo (véase apartado 4.2.2). Para evitar en la medida de lo posible las pérdidas debidas el efecto de contorno (véase apartado 4.2.5), con este dispositivo de registro se emplean las viguetas y no las muestras (tabla 7.1).

En la figura 7.6 se muestran dos trazas características de los registros en dos maderas de densidad diferente con este dispositivo. En esta figura se aprecia la llegada de la onda directa (*D*), que en este caso se propaga por el aire y que se registra con la mayor amplitud. Posteriormente la señal se propaga 35 cm por el aire y se produce una reflexión en la interfase aire-madera debido al contraste de impedancias (véase apartado 2.1.4), que se denomina onda reflejada (*R*). De forma cualitativa se aprecia claramente como en el caso de la vigueta de menor densidad la amplitud de la onda reflejada es menor.

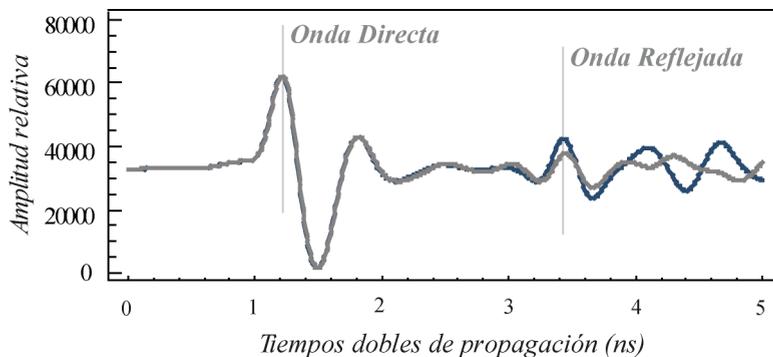


Figura 7.6.- Traza característica del radargrama de la vigueta 1 ($\rho= 0.90 \text{ g/cm}^3$) representada por la línea azul y la vigueta 19 ($\rho= 0.50 \text{ g/cm}^3$) representada por la línea gris al adquirir los registros situando la antena a 35 cm de distancia de las viguetas.

En este caso, el porcentaje de energía reflejada depende del contraste existente entre los parámetros electromagnéticos de los diferentes materiales. De esta forma, según la ecuación 2.34 cuanto menor sea la constante dieléctrica del segundo medio, en este caso la madera, la menor es el porcentaje de energía reflejada frente a la incidente y por tanto menor la amplitud de la onda reflejadas.

En la tabla 7.5 se detallan las amplitudes de la onda directa y la reflejada para cada madera, así como la resultante de normalizar la reflejada con el primer máximo positivo de la onda directa. A pesar de que se aprecia un descenso de la amplitud normalizada con la densidad, los valores del mejor ajuste, entre la densidad y las amplitudes normalizadas de la onda reflejada, no son especialmente buenos ($R^2=69\%$).

Tabla 7.5.- Amplitudes de la onda directa, reflejada y reflejada normalizada en las maderas de diferente densidad al adquirir los registros colocando la antena a 35 cm de separación de la vigueta.

<i>Vigueta</i>	A_D	A_R	$A_{R\text{Normalizada}}$
<i>1</i>	29113	7186	0.25
<i>2</i>	29113	8039	0.28
<i>3</i>	29113	7308	0.25
<i>4</i>	29234	7308	0.25
<i>5</i>	29113	6333	0.22
<i>6</i>	29869	7795	0.26
<i>7</i>	29113	5602	0.19
<i>8</i>	29478	5968	0.20
<i>9</i>	29843	4872	0.16
<i>10</i>	29356	6333	0.22
<i>11</i>	29356	6455	0.22
<i>12</i>	28869	5724	0.20
<i>13</i>	29478	5115	0.17
<i>14</i>	29600	4262	0.14
<i>15</i>	29234	5968	0.20
<i>16</i>	29113	6455	0.22
<i>17</i>	29356	2313	0.08
<i>18</i>	28991	5115	0.18
<i>19</i>	29356	4993	0.17
<i>20</i>	29478	974	0.03

Ahora bien, hasta ahora no se ha tenido en cuenta que al separar la antena de la vigueta se ha de considerar el efecto de la huella de la antena. Las antenas empleadas en el equipo de georradar son antenas direccionales, es decir, que en su diagrama de radiación hay una zona en la cual la radiación es máxima y que recibe el nombre de lóbulo principal. Este lóbulo principal se puede aproximar a un cono de radiación por el que se transmite el 90% de la energía. La superficie de intersección entre el cono principal de la radiación y el reflector, recibe el nombre de huella de la antena o zona iluminada. La superficie que ocupa esta huella se puede aproximar por varios procedimientos (véase apartado 4.2.4). Como se ve en el apartado 4.2.5 cuando el 66% de la huella de la antena no está cubierta por el reflector a estudio, las amplitudes registradas se ven afectadas por el comportamiento dieléctrico del medio circundante.

Para que toda la huella de la antena esté sobre madera la longitud de la cara de la vigueta debería ser como mínimo dos veces el radio de la circunferencia de la huella, ya se haya calculado ésta por la aproximación de la ecuación 4.5 o 4.7. En este caso se trabaja con las aproximaciones de la primera zona de Fresnel, puesto que son más conservadoras.

De esta forma se tiene que el área cubierta por la huella de la antena, según la ecuación 4.5, es de 2336 cm². A continuación se calcula el porcentaje de la huella que está cubierto por las viguetas, teniendo en cuenta que cada una de ellas tienen longitudes de cara diferentes. En primer lugar, se calcula el área de la huella cubierta por la madera ($A_{\text{rectángulo}}$), según las dimensiones de cada vigueta y posteriormente la proporción que ésta supone sobre la huella de la antena.

La proporción que ocupa la vigueta en la huella a esta distancia de separación entre la antena y la madera es muy pequeña (tabla 7.6). Tan sólo en los casos de la vigueta 12, que tiene una longitud de cara de 32.2 cm, o en el caso de la vigueta 15, que tiene una longitud de cara de 30.4 cm, los porcentajes de inclusión de la madera en la huella de la antena son superiores al 60%. Como

consecuencia de las reducidas longitudes de sus caras, hay tres viguetas (1, 9 y 17), que el porcentaje que ocupa la vigueta en la huella es menor del 35%.

Tabla 7.6.- Porcentaje de área de la vigueta que queda incluida en la huella de la antena.

<i>Vigueta</i>	<i>C_r (cm)</i>	<i>A_{rectangulo} (cm²)</i>	<i>Porcentaje área vigueta en huella antena (%)</i>
1	14.2	774	33
2	19.5	1063	46
3	23.9	1303	56
4	25.4	1385	59
5	19.4	1058	45
6	19.5	1063	46
7	20.1	1096	47
8	19.6	1069	46
9	14.1	769	33
10	19.6	1069	46
11	19.5	1063	46
12	32.2	1756	75
13	20.0	1090	47
14	18.1	987	42
15	30.4	1658	71
16	21.5	1172	50
17	14.5	791	34
18	22.1	1205	52
19	19.2	1047	45
20	20.9	1110	49

De hecho, si se extrae del ajuste aquellas lecturas de registros cuyas huellas están ocupadas tan sólo ≈35% por el material a estudio (vigueta 1, 9, 17) el ajuste entre densidades y amplitudes normalizadas de la onda reflejada mejora significativamente, alcanzando un parámetro de correlación $R^2=84\%$ (figura 7.7). Por tanto, las pérdidas de amplitud que se producen por el efecto de contorno condicionan de forma significativa las amplitudes registradas al separar la antena cierta distancia. De esta forma, para el análisis de la densidad por este

procedimiento es deseable disponer de un lote de maderas cuyas dimensiones sean lo más homogéneas posibles y de esta forma poder comparar los valores de amplitud normalizada.

Hay que encontrar, aunque resulta difícil un equilibrio entre cuál es la separación mínima de no interferencia de la onda directa y la reflejada y las dimensiones mínimas de las viguetas para que un porcentaje suficientemente representativo de madera quede incluido en la huella.

Una vez encontrado ese equilibrio para la toma de registros, este resultado es ciertamente muy interesante, puesto que sin necesidad de estar en contacto con la vigueta se obtienen correlaciones elevadas con las densidades de las mismas. Además, con este dispositivo de registro, el procedimiento de lectura de la amplitud es el más sencillo de todos los analizados en este apartado, puesto que la reflexión es fácilmente identificable y además no se solapan las señales que puede dar lugar a complicaciones en la identificación.

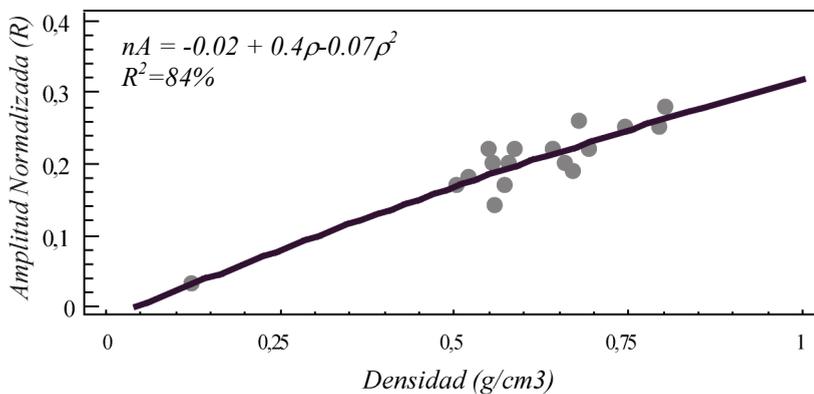


Figura 7.7.- Ajuste de amplitudes normalizadas de la onda reflejada al colocar al antena a 35 cm de separación de la vigueta del lote de viguetas de diferente densidad cuya huella esté cubierta como mínimo por un 35% de madera.

7.3.3.- ANÁLISIS ESPECTRAL

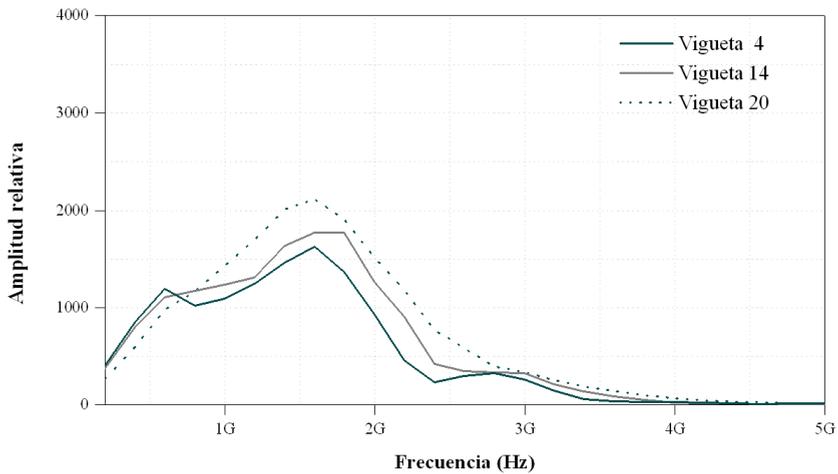
Como se ha visto en apartados anteriores, si se entiende la densidad como un factor que define la cohesión interna del material, las maderas menos densas presentarán una respuesta dieléctrica menor. De esta forma, una menor densidad ha de implicar la obtención de espectros de frecuencia más centrados en la frecuencia central de emisión y con el máximo central de mayores amplitudes.

Se observan dos tipos de espectros dependiendo del tipo de adquisición de registros que se emplean. En primer lugar, en el caso de colocar la antena sobre la vigueta se analizan los registros del dispositivo *Cara_PerpendicularF*, por ser la que mejores ajustes presenta con el resto de parámetros. Se comprueba que independientemente de la densidad de la madera la frecuencia central del espectro se sitúa sobre los 1.6 GHz, con un rango de amplitudes que varía de 1500 a 2200 (figura 7.8a).

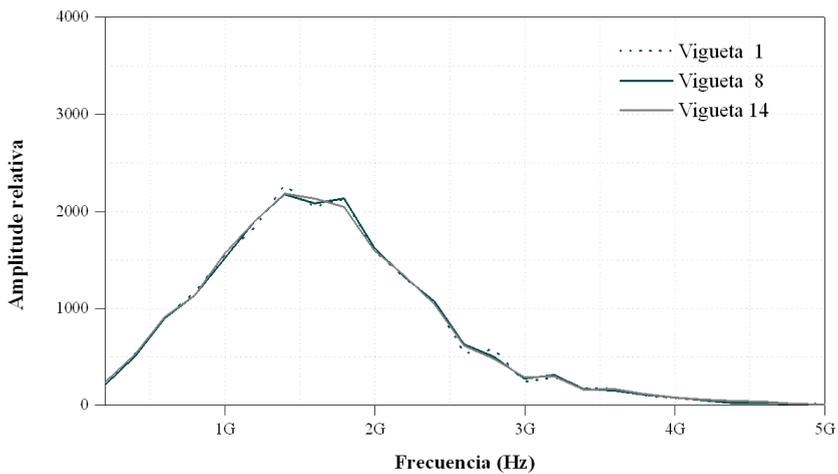
De forma general se puede establecer que cuanto menor es la densidad de la madera mayor es la amplitud. No obstante, este parámetro no resulta fiable para el análisis de la densidad puesto que no se cumple para todas las viguetas estudiadas. Por ejemplo, la vigueta 3 ($\rho = 0.80 \text{ g/cm}^3$) y la vigueta 8 ($\rho = 0.66 \text{ g/cm}^3$) tienen amplitudes del pico central sobre 1700, a pesar de tener valores de densidad significativamente distintos.

En segundo lugar, al calcular los espectros de las medidas realizadas a 35 cm de separación de la antena, las diferencias de unos espectros a otros conforme disminuye la densidad son insignificantes (figura 7.8b). La zona central del espectro presenta las mayores amplitudes a lo largo de todo un rango de frecuencias que varía de 1.4 a 1.8 GHz. Las variaciones que se producen en esta zona en cuanto a la amplitud con respecto a la densidad son mínimas, ya que todas ellas se sitúan en el mismo entorno (alrededor de 2200) y no se distingue ningún comportamiento específico como consecuencia de la densidad. Por otra

parte, esta falta de dependencia del espectro del parámetro de la densidad es obvia, puesto que la mayor parte de la señal corresponde a la trayectoria que recorre el rayo por el aire.



a



b

Figura 7.8.- (a) Espectros de frecuencia de las viguetas 4, 14 y 20 con el dispositivo de adquisición de datos *Cara_PerpendicularF*; (b) Espectros de frecuencia de las viguetas 1, 8 y 14 colocando la antena a 35 cm de la vigueta.

7.4.-SÍNTESIS DE RESULTADOS

Este estudio pone de manifiesto que las señales electromagnéticas registradas con el georradar están influidas por la densidad de la madera, revelándose por tanto, como una herramienta válida para el control o seguimiento de la variación de la misma. En concreto en este estudio se demuestra como la velocidad de propagación de las ondas y sus amplitudes aportan información determinante sobre este parámetro.

En un principio, al realizar el análisis cualitativo de los radargramas no se aprecian diferencias significativas en los tiempos de llegada y amplitudes. Ahora bien, al estudiar la correlación numéricamente de la densidad con éstos se observa el influjo que efectivamente tiene la densidad sobre las señales.

A la vista de estos resultados se comprueba que para las maderas más ligeras sus propiedades dieléctricas son menores. En todos los casos, independientemente del dispositivo de registro, es decir, de la dirección de registro respecto a las fibras, se comprueba que a mayor densidad las v son menores y, por tanto, ε mayores. Esta relación se constata a partir de realizar el ajuste entre densidad y las velocidades de propagación y entre la densidad y la constante dieléctrica.

En cuanto a las amplitudes se espera que cuanto más densa sea la madera, más atenuada se encuentre la radiación al propagarse por su interior y menores deberán ser las amplitudes de las ondas. Como ya se ha comentado, a pesar de que de forma cualitativa es difícil apreciar este efecto, al estudiar las correlaciones entre las amplitudes se obtiene información interesante.

Del análisis de los registros del primer ensayo, es decir, apoyando la antena sobre las muestras, se comprueba que cuanto mayor es la densidad menor es la amplitud de la onda. No obstante, del análisis de las ondas directas y reflejadas se desprende que su comportamiento en relación con la densidad es diferente. De

hecho las ondas reflejadas no siguen un patrón de comportamiento único frente a la densidad.

Se profundiza en el análisis de la onda directa registrada con el dispositivo *Cara_PerpendicularF*, ya que es uno de los que mejores correlaciones obtiene. Sólo el primer máximo positivo de la señal solapada está influida por la densidad, tanto en su tiempo de llegada como en amplitud, es decir, el primer máximo positivo de la onda directa ($R^2=80\%$). Sin embargo, esta buena correlación decrece significativamente con el resto de máximos. Todo ello indica que no se puede establecer correlación en las amplitudes de las ondas reflejadas en función únicamente de la densidad, ya que la superposición de ondas que se produce en cada caso no es exactamente igual.

El segundo dispositivo de adquisición de registros, es decir, separando la antena 35 cm de la vigueta resulta ser especialmente interesante. Ahora bien, para obtener ajustes representativos entre la densidad y la amplitud de la reflejada, se ha de tener en cuenta que como mínimo el 35% de la huella de la antena debe estar cubierto para la madera a estudiar. Asimismo, se ha de buscar el equilibrio entre la distancia de separación antena-vigueta y el porcentaje de la huella que esta cubierto por el material circundante por el efecto que éste produce en las amplitudes. De esta forma cuanto más homogéneas sean las dimensiones de las muestras, más comparables serán las amplitudes como consecuencia del efecto de contorno. Este resultado es ciertamente muy interesante, puesto que sin necesidad de estar en contacto con la vigueta se obtienen correlaciones elevadas con las densidades de las mismas, sobre todo para aquellas aplicaciones de la técnica *in situ* en estructuras cuyo acceso sea complicado.

En cuanto a los espectros de frecuencia de las señales al apoyar la antena en las muestras, de forma general se puede establecer que cuanto menor es la densidad de la madera mayor es la amplitud del pico central. Esto es debido a que aquellas maderas menos densas presentan una respuesta dieléctrica menor cuando se les

somete a un campo electromagnético. No obstante, este parámetro no resulta fiable para el análisis de la densidad puesto que no se cumple de igual forma para todas las viguetas estudiadas.

Finalmente, como se demuestra en este estudio, la medición con georradar es una herramienta muy interesante para la evaluación de la densidad de madera estructural. Dada la fuerte relación existente entre la densidad y las propiedades dieléctricas de la madera, el equipo de georradar permite el análisis de esta dependencia por medio del análisis de los principales parámetros de onda: velocidad de propagación y amplitud del primer máximo positivo de la onda directa con el dispositivo *Cara_PerpendicularF* de la vigueta o bien al separar la antena a determinada distancia por medio de la amplitud del primer máximo positivo de la onda reflejada.

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

PARTE 3

EVALUACIÓN DE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA CON EL RESISTÓGRAFO Y LA TÉCNICA DE ULTRASONIDOS

En la actualidad entre las técnicas no destructivas o semi-destructivas con mayor aceptación aplicadas al estudio de la madera se encuentran la técnica de ultrasonidos y el resistógrafo, tal y como se detalla en la primera parte de esta tesis. Su espectro de aplicación va desde la detección, localización y medición de defectos hasta la determinación de sus principales propiedades físicas. Es interesante, por tanto, contrastar los resultados y eficacia de cada uno de estos métodos en relación a la que aporta el georradar en el estudio de sus principales propiedades físicas.

CAPÍTULO 8

EVALUACIÓN DE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA CON EL RESISTÓGRAFO Y LA TÉCNICA DE ULTRASONIDOS. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON EL GEORRADAR

En este capítulo se realiza una serie de ensayos con la técnica de ultrasonidos y con el resistógrafo sobre los mismos lotes de madera en los que se analiza las principales propiedades físicas de la madera mediante georradar. Se analiza el efecto que produce sobre los registros tomados con estas dos técnicas la variación del contenido de humedad en las viguetas, tanto en el lote de distintas especies con densidades diferentes, como en el lote de viguetas de *Pinus pinaster* Ait. Asimismo, se analiza la capacidad de ambas técnicas para caracterizar maderas de diferentes densidades.

Por último, se contrastan los resultados obtenidos con ambas con aquellos obtenidos a lo largo de la Parte 2 de la presente tesis y se evalúa cual de ellos es más resolutivo en cada uno de los aspectos estudiados.

8.1.-EL RESISTÓGRAFO

El resistógrafo, cuyo origen se remonta a los años 80, consiste en un taladro mecánico que realiza una perforación de 3 mm de diámetro perpendicularmente a las caras de las piezas estudiadas y evalúa la resistencia que ofrece a la perforación. La resistencia a la penetración se mide mediante el consumo de potencia.

El resistógrafo consta de dos partes diferenciadas: instrumento de perforación y unidad electrónica. El instrumento de perforación consta de un mango a partir del cual se controla el proceso de perforación. En esta tesis se emplea el resistógrafo IML RESI B300 que dispone de una aguja de perforación a una velocidad constante de 1500 rpm, mientras que la de avance es variable (figura 8.1). El equipo presenta 7 rangos de velocidades que van desde los 5 cm/minuto a los 45 cm/minuto. En este caso basándonos en estudios anteriores se emplea una velocidad de 20 cm/minuto (Capuz, 2003). La geometría de la cabeza del resistógrafo permite que la aguja penetre con facilidad a los 90°, 35° y 45° respecto a la pieza ensayada.

Los registros se almacenan en la memoria de la unidad electrónica y al mismo tiempo una pequeña impresora reproduce el valor en tanto por ciento de la resistencia a la penetración. A esta representación de los registros se le denomina resistograma, donde en el eje de abscisas se representa la longitud de la perforación y en el de las ordenadas la resistencia a la perforación en % ofrecida por la pieza (*AR*).

Los perfiles resistográficos obtenidos con ángulos de 90° reflejan fielmente la geometría interna de la madera (Álvarez et al., 2005). Por ese motivo, todas las perforaciones realizadas en este estudio se realizan con este ángulo de incidencia con respecto a las viguetas.

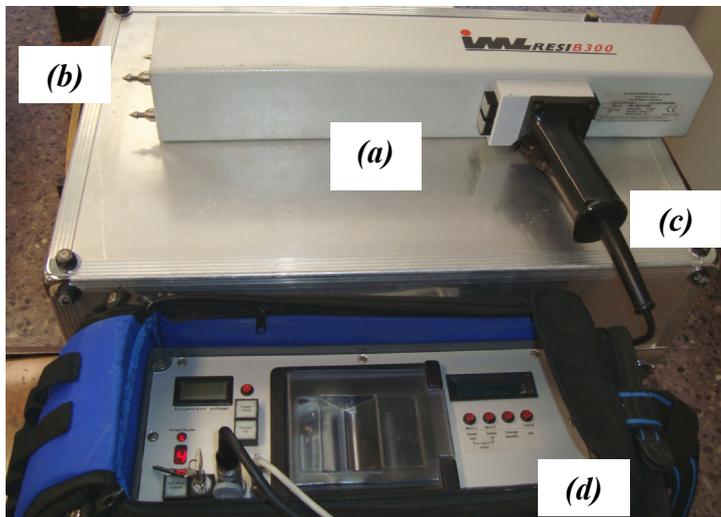


Figura 8.1.- Componentes del resistógrafo: (a) Instrumento de perforación; (b) aguja perforadora; (c) cable conexión a la unidad electrónica; (d) unidad electrónica de registro.

La resistencia que ofrece a su avance se relaciona con la densidad y es capaz de detectar los anillos de crecimiento al encontrar diferencias de densidad entre la madera de verano-otoño y la de primavera. De igual forma, cuando la madera se encuentra debilitada, la resistencia a la penetración disminuye puntualmente a medida que la aguja del resistógrafo atraviesa la madera.

Las perforaciones son de carácter local, por lo cual para analizar el grado de deterioro de una pieza es necesario perforar en distintos puntos de la pieza. Existen diversos estudios publicados donde se avala el empleo del resistógrafo como herramienta válida para la obtención de valores de resistencia y densidad de la madera como es el de Basterra et al. (2005).

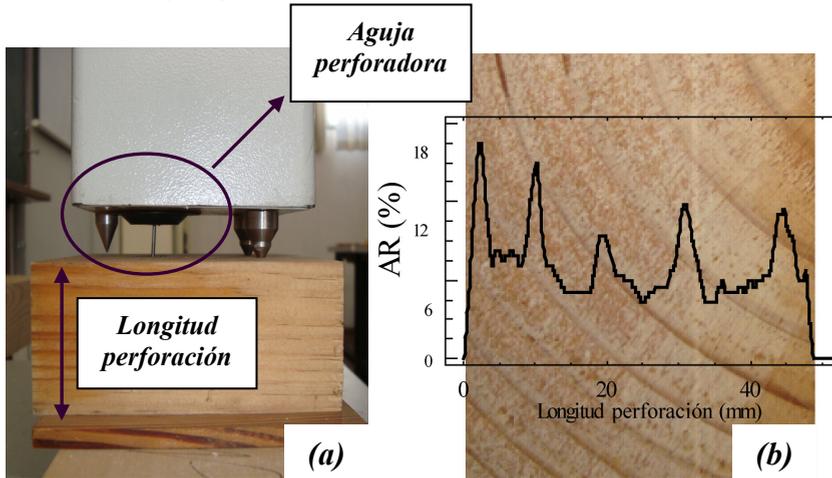


Figura 8.2.- (a) Perforación de una pieza; (b) Sección en testa de una muestra de *Pinus pinaster* Ait., donde se aprecian los anillos de crecimiento en el que se superpone el resistograma obtenido.

El resistógrafo se emplea en la detección de daños internos en árboles con la finalidad de ayudar en la toma de decisiones para su conservación o eliminación por razones de seguridad (Bethge et al., 1996). También tiene aplicaciones en la inspección de piezas de madera de estructuras antiguas (Rinn, 1994); en la inspección de pilas de puentes de madera en los Estados Unidos como lecturas complementarias a las mediciones por ultrasonidos (Anthony et al., 1998b); en la inspección de edificios históricos como técnica complementaria a otros procedimientos (Bertolini et al. 1998).

Hasta ahora se trata de una técnica incipiente y está siendo experimentada por diferentes grupos de nuestro país, tanto en laboratorio como a pie de obra. Estos estudios están orientados al desarrollo de una metodología específica para la

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

localización y evaluación de daños en elementos estructurales, con el objetivo de desarrollar una sistemática normalizada en la inspección y análisis de piezas estructurales degradadas susceptibles de ser aplicadas *in situ*; así como en el análisis de la calidad resistente tal como exponen Capuz (2003), Álvarez et al. (2005) y Morales y Jaramillo (2008).

8.2.-LA TÉCNICA DE ULTRASONIDOS

Los ultrasonidos son ondas acústicas con frecuencia por encima de la zona audible. Se emplean en los ensayos no destructivos de la madera, además de en otros materiales como el acero o el hormigón. La aplicabilidad de este método reside en la fuerte relación entre las propiedades elásticas y mecánicas del material y la velocidad de propagación de los ultrasonidos por su interior.

Al propagarse las ondas elásticas por el interior de un medio se distinguen principalmente dos tipos de ondas internas: longitudinales y transversales. Para ambas el movimiento vibratorio que realiza una partícula afectada por su propagación es un movimiento armónico simple; el desplazamiento producido sigue un movimiento sinusoidal. Ahora bien, las ondas longitudinales son aquellas en las que la oscilación de las partículas se produce en la dirección de propagación de las ondas y las transversales aquellas cuyas oscilaciones de la partícula se producen en el plano perpendicular a la dirección de propagación de las ondas.

En el caso particular de trabajar con viguetas de madera cuyas dimensiones transversales sean menores que la longitud de onda sólo se registra la onda longitudinal y con ello se simplifica la formulación (Arriaga et al., 2002). En la madera las velocidades de propagación longitudinal (v_p) se encuentran en torno a 4500 m/s y en dirección transversal en torno a 1500 m/s, lo que da lugar a longitudes de onda

(λ) del orden de 100 y 33 mm, respectivamente ($\lambda = \frac{v_p}{f}$) siendo f la frecuencia de

emisión del pulso (Esteban, 2003). Por lo tanto, dadas las secciones transversales de las viguetas con las que se trabaja en esta tesis lo que se registra es el tiempo de llegada de la onda longitudinal (t_p).

Las constantes elásticas o módulos expresan la resistencia de un material a las deformaciones. Los módulos más importantes son el de Young (E) que expresa la resistencia a la elongación y el de elasticidad transversal (G) que indica la

resistencia al esfuerzo cortante, también llamado módulo de rigidez. El módulo de Young se puede determinar de forma dinámica (E_d) por medio de métodos de resonancia o por medio de propagación de ondas elásticas.

En el caso de emplear la técnica de ultrasonidos (propagación de ondas elásticas) la obtención del módulo de Young dinámico (E_d) se realiza por medio de la siguiente ecuación:

$$v_p^2 = \frac{E_d}{\rho} \quad [8.1]$$

siendo ρ la densidad de la madera. Para la obtención de la v_p se sitúan los palpadores a una distancia conocida (L) y se mide el tiempo (t_p) que tarda la onda ultrasónica en llegar del palpador emisor al receptor.

$$v_p = \frac{L}{t_p} \quad [8.2]$$

Este módulo dinámico tiene un valor ligeramente diferente en magnitud al módulo de elasticidad estático (E_s), obtenido éste último por ensayo mecánico, como se detalla más adelante.

La técnica de ultrasonidos aporta como ventaja, la posibilidad de uso en estructuras en servicio. Con ella se pueden estimar las características mecánicas y en caso de piezas con algún defecto, cuál sería la disminución de resistencia que sufren por dicho ataque. También incluye como ventaja la facilidad de uso del equipo y la ligereza para su transporte. Admite medida tanto en madera aserrada, como en árboles en pie, pudiendo realizarse medidas directas o indirectas (colocación de los palpadores en ángulo), además de la posibilidad de tomarlas en sentido transversal o longitudinal (Acuña et al., 2006).

Si la frecuencia de las ondas ultrasónicas es elevada permite mayor precisión en la

medida del tiempo de recorrido. Pero por otro lado, en los materiales heterogéneos se precisan bajas frecuencias para conseguir grandes penetraciones, como es el caso de la madera. La frecuencia a considerar estará comprendida en el intervalo de los 20 a 220 kHz.

La técnica de ultrasonidos se puede aplicar siguiendo dos procedimientos: pulso-eco o transmisión. En el caso del pulso-eco el emisor es al mismo tiempo receptor y recibe por tanto las ondas reflejadas en la pared opuesta del material. El sistema de pulso-eco no resulta adecuado en los materiales heterogéneos como la madera, siendo más adecuado el sistema de transmisión. Éste emplea dos palpadores, un emisor y un receptor, que se acoplan a la madera y miden el tiempo que la onda ultrasónica tarda en llegar de uno a otro (figura 8.3).

Al colocar el emisor y receptor de forma enfrentada, la propagación de la onda ultrasónica tenderá a recorrer el material por el camino más corto y su velocidad dependerá de las características mecánicas del material. Los retardos que se produzcan en la llegada de la señal son debidos a una serie de factores como la densidad y su microestructura, el contenido de humedad (Bucur, 1995), la temperatura, la inclinación de las fibras respecto a la dirección de medida como demuestran Kabir (2001) y Kabir et al. (2001), las singularidades o defectos de la madera como exponen Sandoz (1989) y Karsulovic et al. (2000) y el grado de deterioro (Fuji et al., 1990).

El contenido de humedad influye ligeramente en la velocidad de propagación de los ultrasonidos. Según Sandoz (1989) por cada incremento de un 1% en el CH se produce una disminución de la v_p aproximadamente un 0.8 %, siguiendo una relación lineal para el intervalo $CH=[5-30\%]$. En cambio, si el $CH > 30\%$ la v_p no varía y por lo tanto, según Ross (2002), no resulta necesario llevar a cabo un ajuste.

La temperatura también influye ligeramente en la velocidad de transmisión de forma que un aumento de la temperatura reduce la velocidad. A su vez esta

dependencia de la temperatura es más importante cuanto mayor es el CH , por lo que algunos equipos incluyen sondas de temperatura y humedad para tener en cuenta estos dos factores. La reducción de la velocidad se estima en un 0.07 a 0.08% para cada aumento de 1°C cuando $CH=12\%$ (Sandoz et al., 2000).

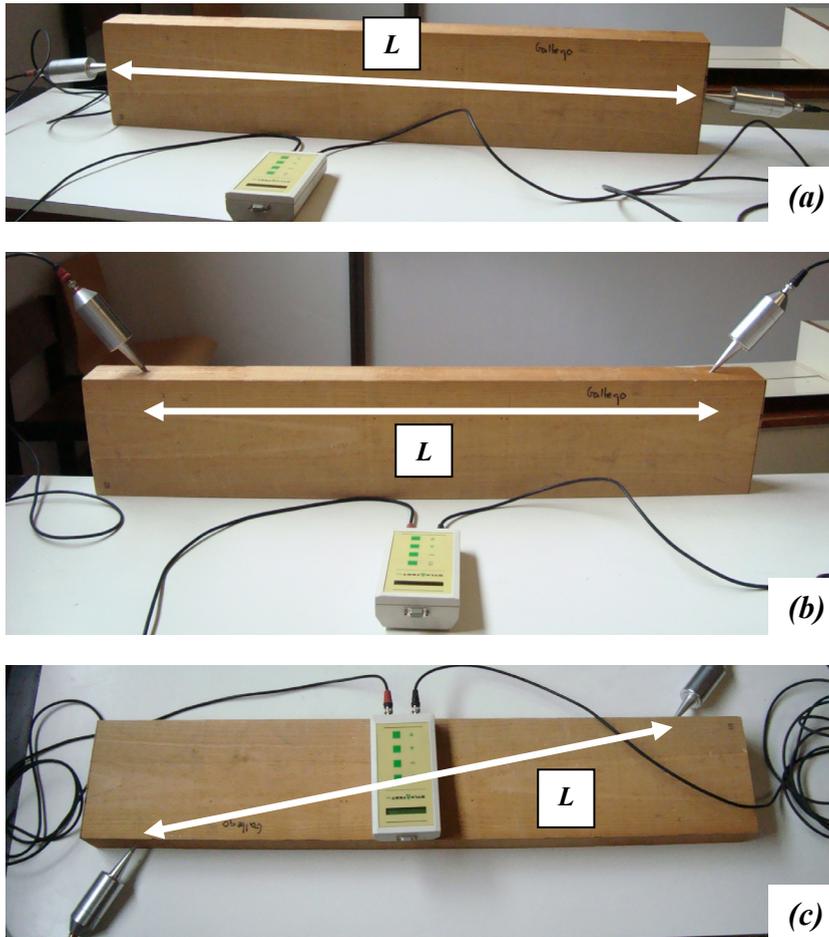


Figura 8.3.- Esquema dispositivos de registro con ultrasonidos en el estudio de la madera de forma longitudinal a las fibras: (a) Transmisión directa; (b) transmisión indirecta paralela; (c) transmisión indirecta cruzada.

Se entiende como anisotropía acústica de la madera a la dependencia de la velocidad de propagación de las ondas elásticas con los diferentes ángulos entre

la dirección de propagación del frente de ondas y la dirección principal de crecimiento de los anillos. El estudio de esta dependencia lo realizan autores como Bucur (1995), Beall (2002), Acuña et al. (2006), etc.

El tiempo empleado en la transmisión de las ondas ultrasónicas depende de la especie. Además para una misma especie, las ondas ultrasónicas se transmiten más rápidamente en el sentido de las fibras que perpendicularmente a ellas (Ross, 2002).

Además, la velocidad de propagación será mayor, cuanto menor sea la presencia de defectos en la madera, debido a que, por ejemplo las fendas, las desviaciones de fibras generales o las locales producidas por los nudos, provocan la interrupción de la continuidad de transmisión de la onda. Esto da lugar a un retardo en el tiempo de llegada al receptor, ya que el camino seguido por las ondas ultrasónicas es mayor al tener que sortear el obstáculo.

Suzuki y Sasaki (1990) investigaron el efecto de la desviación de la fibra en la velocidad longitudinal. Obtienen que para mediciones en la dirección paralela a la fibra, las velocidades son constantes si la muestra tiene longitudes superiores a los 5 cm. No obstante, las velocidades disminuyen rápidamente conforme aumenta la desviación de la fibra. De hecho, estudios recientes demuestran que la velocidad de propagación de los ultrasonidos se ve modificada por la distancia entre emisor y receptor y por el ángulo que forma la dirección de la medida con la inclinación de las fibras, debiendo ser corregida cuando se trabaja con piezas de madera de tamaño estructural (Acuña et al., 2006).

Los equipos disponibles en el mercado más extendidos para el estudio de la madera son el Sylvatest y el Pundit. El equipo Pundit (Portable Ultrasonic Non destructive Digital Indicating Tester) es un equipo portátil con generador de impulsos con una frecuencia de 54 kHz y mide el tiempo con precisión de décimas de microsegundo. Tiene dos palpadores de forma cilíndrica con una superficie de contacto de 5 cm de

diámetro. Para el acoplamiento de los palpadores sobre la superficie de la madera se emplea una capa delgada de vaselina.

En la figura 8.4 se muestra el equipo Sylvatest. Se trata de un equipo portátil, que está específicamente desarrollado para madera y que es el empleado en esta tesis. Emite a una frecuencia de 30 kHz y registra los tiempos de transmisión de ultrasonidos por medio de unos palpadores cónicos. Presenta la limitación de sólo poder registrar los tiempos de llegada en viguetas cuya longitud no exceda los 5 m. Para conseguir la emisión y recepción correcta de las ondas, se realizan unos orificios cónicos de 5 mm de diámetro y 1 cm de profundidad, donde se introducen los palpadores.

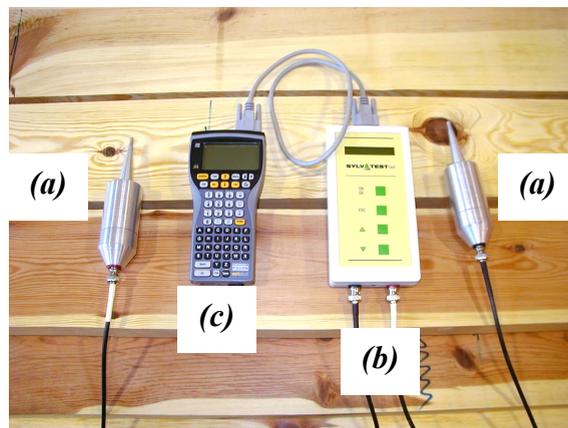


Figura 8.4.- (a) Equipo Sylvatest DUO de ultrasonidos: (a) palpadores; (b) unidad de control; (c) sistema de almacenamiento de registros.

En los ensayos realizados en esta tesis se mide la velocidad de propagación longitudinal de los ultrasonidos en cada una de las piezas por el método de transmisión directa, ya que es el más adecuado en el estudio de materiales no homogéneos como la madera (Arriaga et al., 2002). Dado que en este caso se pueden realizar las perforaciones en testa para introducir los palpadores (registro directo), se obtienen las v_p en la dirección paralela a la fibra.

8.3.- ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN VIGUETAS DE DIFERENTE DENSIDAD

En este apartado de la tesis se analiza la capacidad del resistógrafo y de la técnica de ultrasonidos para evaluar el contenido de humedad en un lote de viguetas de diferente densidad que son sometidas a procesos de humidificación y secado.

Para ello se emplean las 7 viguetas de diferente densidad empleadas en el apartado 6.2 para el estudio de la variación del CH por medio de georradar. Las densidades, dimensiones y contenidos de humedad iniciales de estas viguetas se muestran en la tabla 6.4 y las secciones en testa de cada una de estas viguetas se pueden ver en la figura 5.3.

Estas viguetas se encuentran inicialmente a su HEH y posteriormente se someten a diferentes procesos de secado y humidificación. Para el cálculo del contenido de la humedad inicial (CH_{INI}) se sigue la norma UNE-EN 13183-1:2002 (véase apartado 3.4). Seguidamente, se reduce el CH de las viguetas introduciéndolas en un horno a 60°C y humedad constante durante un mes (CH_{SECA}). A continuación se introducen las viguetas durante 10 días en una piscina con agua y al sacarlas se calcula su contenido de humedad (CH_{SEMI}). Los valores CH para cada estado de humedad y vigueta se muestran en la tabla 8.1.

Las mediciones con el resistógrafo y los ultrasonidos se realizan para cada uno de los estados de contenido de humedad y cada vigueta.

A.- Resistógrafo

En primer lugar, se realiza el estudio de la variación del CH por medio del resistógrafo. Como comprobación inicial se perforan las viguetas con un ángulo

de penetración de 90° en la cara y en el canto cada 15 cm a lo largo de toda la vigueta con objeto de comprobar si se presenta alguna variación como consecuencia de que la perforación sea tangencial o radial. Se comprueba como las perforaciones realizadas no muestran diferencias del valor de amplitud de resistógrafo medio (AR_m) dependiendo de la dirección de incidencia de la aguja del resistógrafo con respecto a las fibras. En la figura 8.5 se muestran, como ejemplo, los dos resistogramas obtenidos al realizar la perforación atravesando la cara y canto de la vigueta 6. Se comprueba como las amplitudes medias del resistograma (AR_m) alcanzadas son similares independientemente de si la dirección es radial o tangencial a las fibras.

Tabla 8.1.- Variación del CH (%) del lote de maderas de diferente densidad.

<i>Viguetas</i>	<i>SEC</i>	<i>INI</i>	<i>SEMI</i>
<i>1</i>	3.7	9.0	10.2
<i>2</i>	1.2	10.6	6.5
<i>6</i>	1.9	10.3	36.5
<i>8</i>	1.9	10.5	28.7
<i>11</i>	4.3	9.3	12.3
<i>13</i>	3.8	9.4	20.9
<i>19</i>	1.3	9.5	35.3

Para la obtención del valor de amplitud de resistógrafo medio por vigueta (AR_{mv}) se perfora cada 15 cm en cara y canto a lo largo de toda la vigueta con un ángulo de 90° (figura 8.6a). En primer lugar, se calcula el valor de amplitud de resistógrafo medio por perforación (AR_m) se sigue el criterio establecido por Capuz (2003) que establece que para el cálculo del AR_m se tienen en cuenta sólo los 2/3 centrales del resistograma. A continuación se promedian todos los valores de perforación en cara y canto realizados a lo largo de toda la vigueta y se obtiene la amplitud media de resistógrafo por vigueta (AR_{mv}). En la figura 8.6b se muestran las AR_{mv} para cada vigueta versus el contenido de humedad.

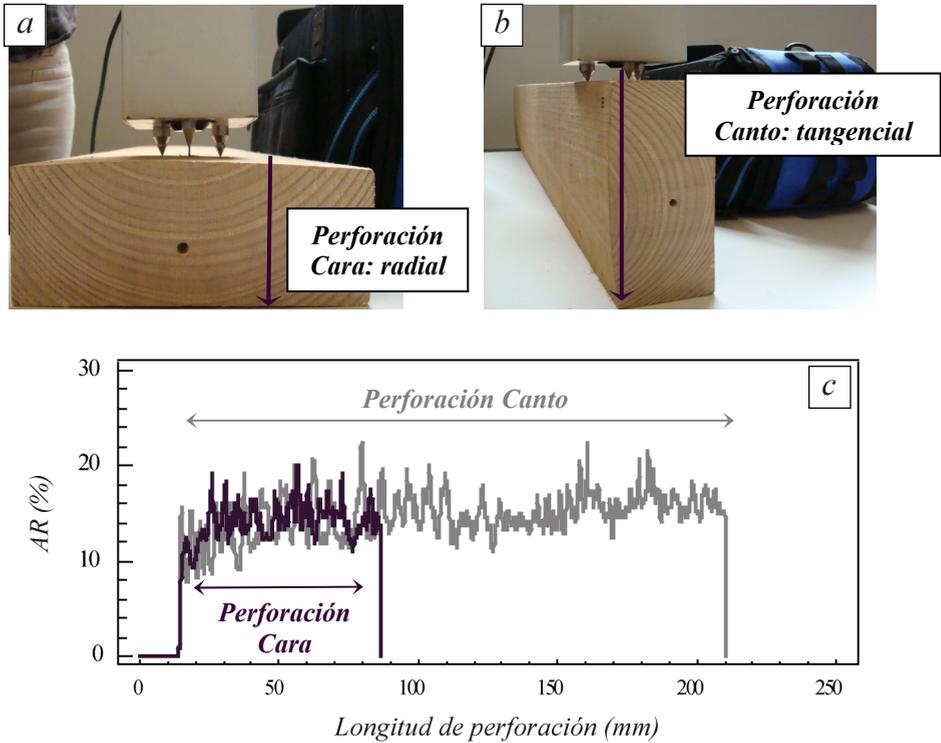


Figura 8.5.- (a) Perforación en cara en la dirección radial a las fibras; (b) Perforación en canto la dirección tangencial a las fibras; (c) Resistogramas de la vigueta 6 al atravesar el canto y la cara.

Al comparar las AR_{mv} con la variación del CH se comprueba que dependiendo de la vigueta estudiada sigue un comportamiento distinto, ya que no se detecta un comportamiento único dependiendo de la variación del CH . De hecho se presentan casos llamativos como el de la vigueta 6 en la que se obtienen valores de AR_{mv} similares para CH_{INI} y CH_{SEMI} a pesar de presentar entre estos dos estados una variación del CH del 26%. Todo ello indica la baja sensibilidad de esta técnica para evaluar la variación del CH y además que cada especie analizada presenta un comportamiento particular.

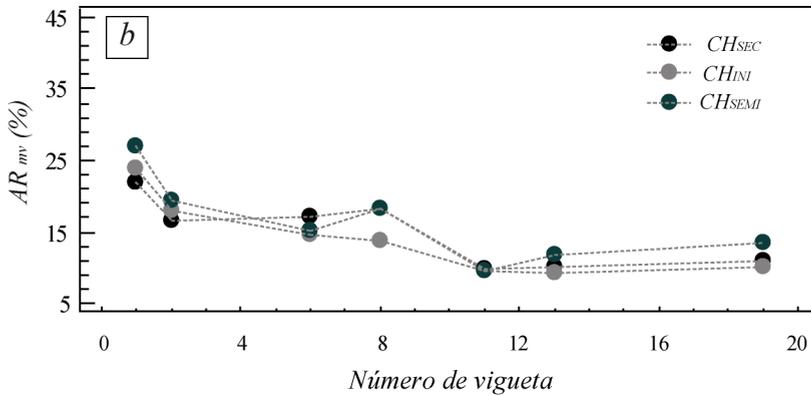
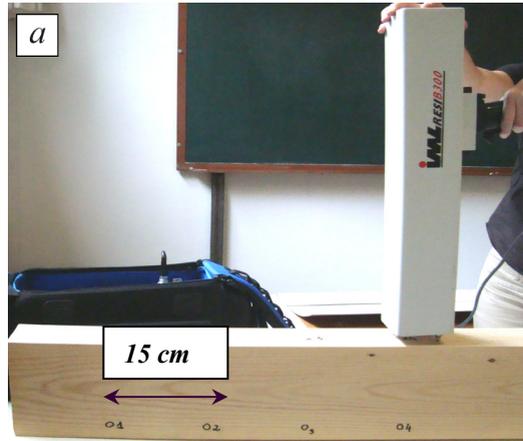


Figura 8.6.- (a) Perforaciones realizadas en el canto de la vigueta 6 cada 15 cm; (b) Efecto de la variación del CH en las amplitudes promedio por vigueta del resistógrafo (AR_{mv}) en viguetas de diferente densidad.

B.- La técnica de ultrasonidos

A continuación se aplica la técnica de ultrasonidos para comprobar como se ven afectadas las velocidades de propagación de las ondas ultrasónicas al variar el CH en maderas de diferente densidad. Tal y como se enuncia al principio del capítulo todas los registros se realizan por el método de transmisión directa en dirección longitudinal. Para ello se realiza un pequeño agujero en las testas donde se introducen los palpadores (figura 8.7).

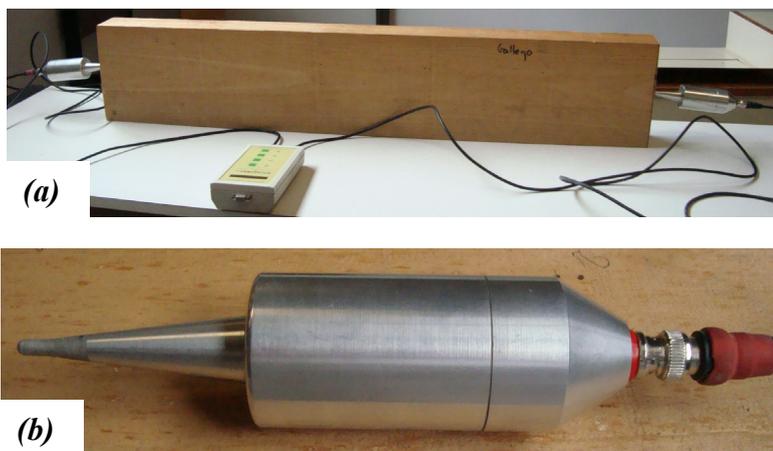


Figura 8.7.- (a) Medición por transmisión directa en la dirección longitudinal con el equipo de ultrasonidos Sylvatest; (b) detalles de los palpadores en los que se aprecia su punta cónica.

En la tabla 8.2 se detallan los valores obtenidos de v_p y E_d para los tres estados de CH calculados a partir de las ecuaciones 8.2 y 8.1.

Tabla 8.2.- Módulos de elasticidad dinámicos (E_d) y velocidades longitudinales de propagación de ultrasonidos (v_p) en diferentes estados de CH para maderas de distinta densidad.

Vigueta	E_d (MPa)			v_p (m/s)		
	SECA	INI	SEMI	SECA	INI	SEMI
1	28502	29713	28544	5825	5778	5665
2	20845	20919	21905	5203	4932	5203
6	16873	17446	15058	5303	5221	4461
8	16988	17273	15201	5321	5155	4350
11	12409	11892	12916	4586	4528	4624
13	13948	13860	11297	5130	5020	4285
19	14391	14769	11761	5655	5490	4423

En la figura 8.8 se presenta la variación de la v_p dependiendo de los distintos CH de las viguetas. Se observa que el comportamiento de las velocidades está fuertemente influido por el CH de la madera, ya que conforme disminuye la

velocidad aumenta significativamente y a la inversa. Este patrón se repite para todas las viguetas independientemente de su densidad.

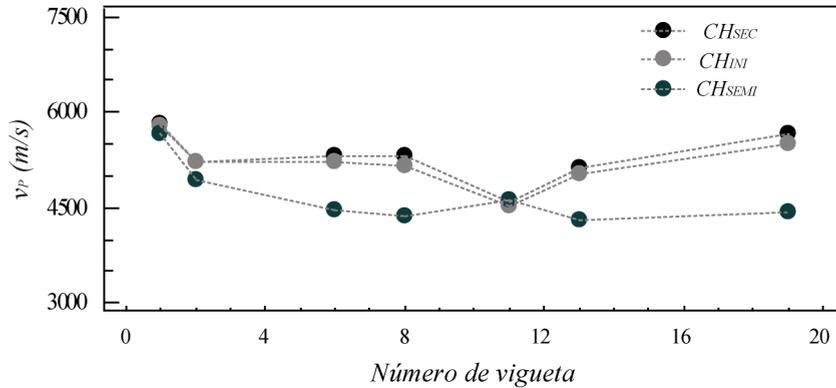


Figura 8.8.-Efecto de la variación del CH en la velocidad de propagación de ultrasonidos en viguetas de diferente densidad.

Ahora bien, la relación establecida por Sandoz (1989) según la cual por cada incremento de un 1% en el CH se produce una disminución de la velocidad de aproximadamente un 0.80%, siguiendo una relación lineal para $CH=[5-30\%]$ no se cumple para todas las viguetas analizadas. Por ejemplo, para la vigueta 1 para un aumento del $CH=1\%$ se produce una disminución promedio de la velocidad del 0.88%, mientras que para la vigueta 3 y 4 es del 0.36% y 0.61% respectivamente.

8.4.- ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN VIGUETAS DE *PINUS PINASTER* AIT.

Como se comprueba en el apartado anterior el efecto de la variación del contenido de humedad no se manifiesta de igual forma en las viguetas de diferente densidad en los registros tomados con el resistógrafo. En el caso de la técnica de ultrasonidos aunque la variación del contenido de humedad produce patrones de comportamiento similares los rangos de variación de las magnitudes estudiadas (v_p y E_d) son muy diferentes de unas viguetas a otras.

Por este motivo, en este capítulo se analiza en detalle el efecto de la variación del contenido de humedad en la AR_{mv} , la v_p y el E_d para una única especie (*Pinus pinaster* Ait.) y para un rango de variación de contenido de humedad mayor.

Para ello se realizan las mediciones con el resistógrafo y con los ultrasonidos en las viguetas empleadas en el capítulo 6.1 para el estudio del efecto de la variación del contenido de humedad en las propiedades electromagnéticas del *Pinus pinaster* Ait.

Se trata de un lote de 22 viguetas que inicialmente presentan un contenido de humedad aproximado del 100% de su masa anhidra. Posteriormente se someten a un proceso de secado, que se interrumpe en distintos momentos para realizar mediciones con georradar y mediciones de la masa de las viguetas. De este modo se obtienen registros de georradar para distintos contenidos de humedad en un rango comprendido entre el 100% y el 10% aproximadamente. Finalmente se tienen 13 sesiones de registro con georradar.

Las viguetas tienen unas dimensiones de 20 x 7.5 x 150 cm cuya densidad media, cuando se encontraban en la humedad de equilibrio higroscópico (10-12%), es $\rho=0.49 \text{ g/cm}^3$, calculada ésta según la norma (UNE 56531:1977). Las

secciones en testa de las viguetas se muestran en la figura 5.2. Las densidades promedio (de las 22 viguetas de cada sesión) se muestran en la figura 6.1.

El procedimiento operativo aplicado para la determinación del contenido de humedad por desecación hasta el estado anhidro fue el regulado por la norma UNE-EN 13183-1:2002. En la figura 6.2 se muestra la variación del *CH* durante el proceso de secado para cada una de las 13 sesiones de registro con georradar. La primera sesión corresponde al momento en el que las viguetas están recién cortadas y su contenido de humedad es máximo (Sesión S1) y la última sesión en la que las viguetas alcanzan la humedad de equilibrio higroscópico (Sesión S13). Asimismo en cada una de las sesiones de georradar se realiza la toma de registros con el resistógrafo y por medio de la técnica de ultrasonidos.

A.- Resistógrafo

El procedimiento seguido en la adquisición de registros con el resistógrafo es el mismo que el empleado en el apartado 8.3. Para el estudio con el resistógrafo se centra el rango de estudio de variación del contenido desde el *PSF* hasta la *HEH*, es decir, desde la sesión S8 de registro con georradar hasta la sesión S13, ya que para contenidos de humedad superiores el *PSF* la resistencia mecánica de la madera no se ve afectada por la variación en el *CH* (Vignote y Martínez, 2006). En la tabla 8.3 se muestran los valores promedio, máximo y mínimo del contenido de humedad de cada una de las sesiones en las que se perfora con el resistógrafo.

Tabla 8.3.- Contenido de humedad (%) promedio, máximo y mínimo de las 22 viguetas de *Pinus Pinaster* Ait. en cada sesión con el resistógrafo.

<i>CH (%)</i>	<i>S8</i>	<i>S9</i>	<i>S10</i>	<i>S11</i>	<i>S12</i>	<i>S13</i>
<i>Promedio</i>	26	22	19	18	14	12
<i>Máximo</i>	34	29	24	22	18	15
<i>Mínimo</i>	22	20	17	16	13	11

Como ejemplo de los perfiles obtenidos se muestran los resistogramas de la vigueta 1 en la sesión S8 y en la S13 en el punto central de la vigueta al perforar la cara con un ángulo de 90° (figura 8.9a). Como se aprecia en la figura existe una tendencia clara de disminución de amplitud conforme disminuye el CH .

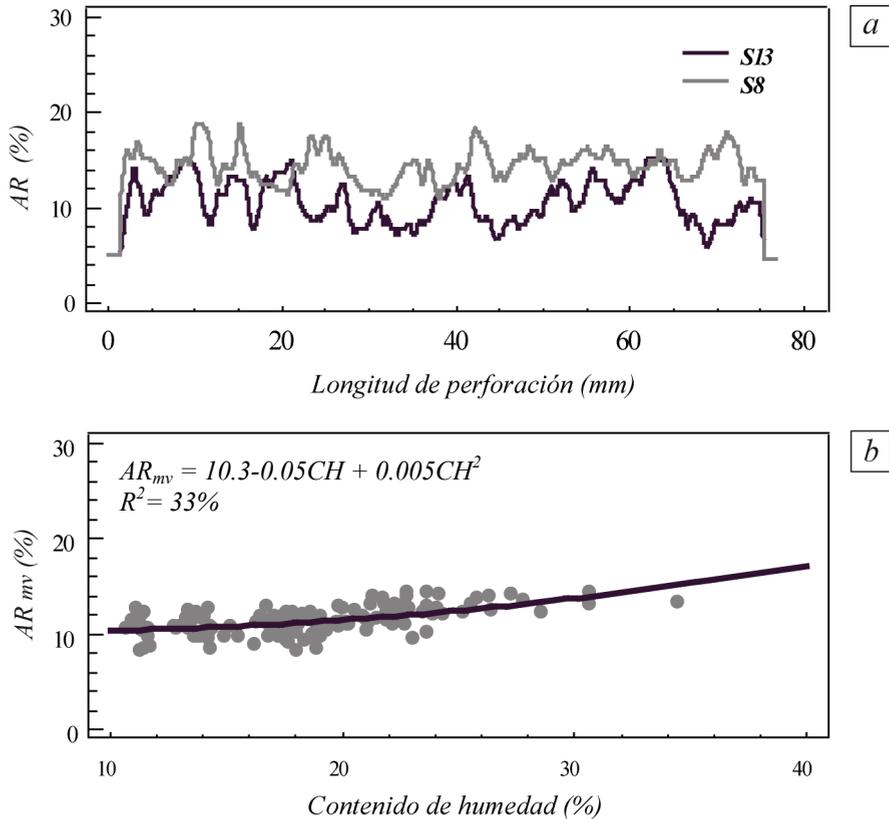


Figura 8.9.- (a) Resistogramas en el punto central de la vigueta 1 en la sesión S8 y en la sesión S13; (b) Ajuste entre la variación del CH y la AR_{mv} de *Pinus pinaster* Ait.

No obstante, a pesar de esta tendencia general el ajuste realizado entre las amplitudes del resistógrafo medio para cada vigueta y su CH , para el mejor de los casos presenta fiabilidades muy bajas ($R^2=33\%$) tal y como se observa en la figura 8.9b.

En estudios previos realizados por Álvarez et al. (2005) y Rodríguez-Abad et al. (2009b) muestran que el resistógrafo es una técnica muy eficaz para la detección de pudriciones o alteraciones en el interior de la madera. Sin embargo, como se comprueba en esta tesis su eficacia no está relacionada con la capacidad de la técnica para detectar la variación del contenido de humedad medio de la vigueta, sino sólo de alteraciones puntuales o locales de la cohesión del material. De esta forma se puede establecer que la AR_{mv} no es un parámetro que refleje con fiabilidad la variación del CH a lo largo de la misma.

B.- La técnica de ultrasonidos

En cuanto al estudio realizado con la técnica de ultrasonidos, en este caso se registran las velocidades de propagación en las mismas sesiones de registro que con el georradar, excepto en la sesión S6 y S7. En la figura 8.10 se muestran los contenidos de humedad (%) para cada vigueta y para cada sesión de medición (S1, S2, S3, S4, S5, S8, S9, S10, S11, S12, S13). Los valores promedio, máximo y mínimo para cada sesión se presentan en la tabla 6.1.

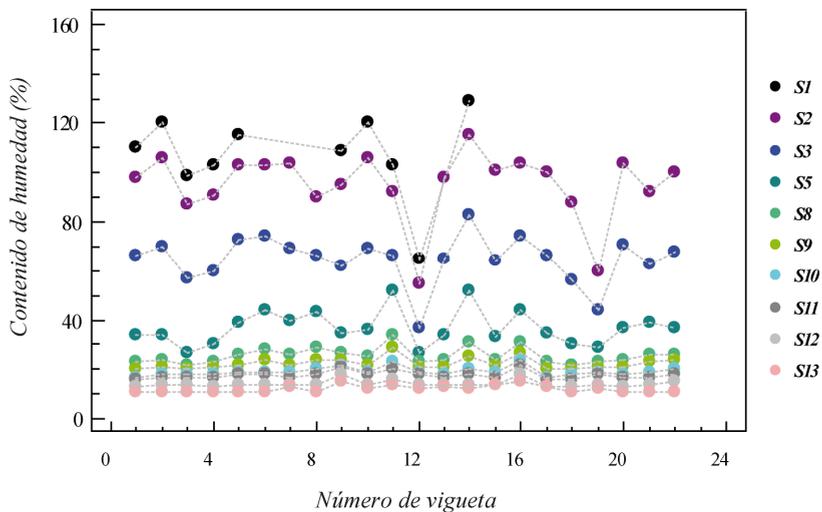


Figura 8.10.- Contenido de humedad de cada vigueta de *Pinus Pinaster* Ait. en cada una de las sesiones de registro con ultrasonidos.

El procedimiento de registro de las velocidades de propagación es el mismo que el empleado en el apartado 8.3 de este capítulo (transmisión directa longitudinal). En primer lugar, se calculan las velocidades de propagación promedio ($v_{P-media}$) registradas en todas las viguetas por sesión y se comprueba como se presenta una tendencia clara de aumento de la v_P conforme disminuye el CH (figura 8.11a). En el caso de la sesión S1 (mayor CH) se obtiene una velocidad de propagación promedio por sesión de $v_{P-media}=3095$ m/s y para la sesión S13, es decir cuando se encuentran a la HEH una $v_{P-media}=4126$ m/s. En cuanto al módulo de elasticidad dinámico (E_d) se comprueba como se presenta una tendencia de disminución del módulo conforme disminuye el contenido de humedad hasta llegar a la PSF . A partir de ahí hasta llegar a la HEH se produce un aumento del módulo conforme disminuye el CH (figura 8.11b).

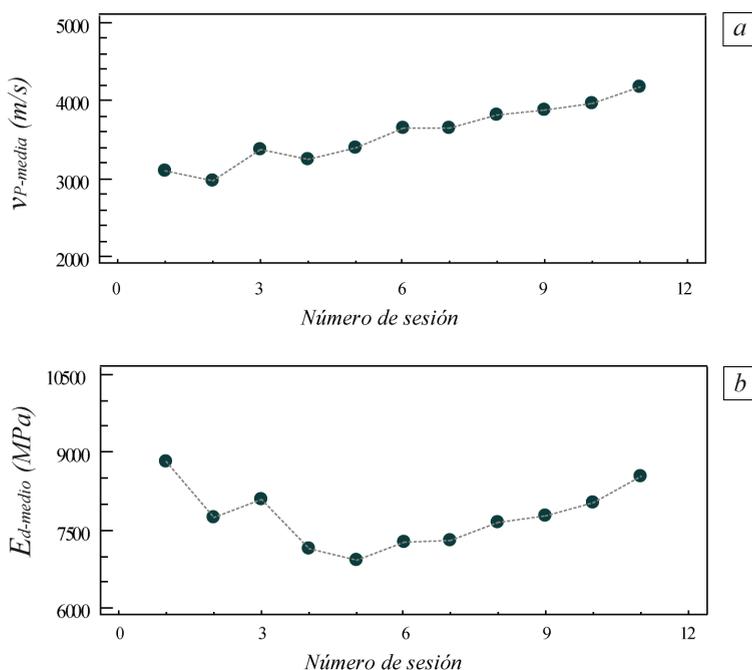


Figura 8.11.- (a) Variación de la velocidad de propagación media por sesión de los ultrasonidos y (b) variación del módulo de elasticidad dinámico en las distintas sesiones de medición para el *Pinus pinaster* Ait.

El valor promedio del módulo de elasticidad dinámico por sesión ($E_{d-medio}$), desciende desde $E_{d-medio}=8807$ MPa para la S1 hasta $E_{d-medio}=6945$ MPa para la sesión S5. Este último valor es el menor de todas las sesiones y a partir de esta sesión aumenta progresivamente conforme se secan las viguetas hasta llegar a $E_{d-medio}=8542$ MPa en la sesión S13. Es importante resaltar que los valores medios por sesión se obtienen con unas variaciones muy fuertes dentro de cada sesión. Como se aprecia en la tabla 8.4 las máximas diferencias encontradas están entre los $E_{d-medio}$ de las sesiones S1 y S5 y la S5 y S13. No obstante estas diferencias entre la sesión S1-S5 y S5-S13 son casi del mismo orden que la desviación típica (σ) que se produce al calcular el promedio para cada una de las sesiones.

Tabla 8.4.- Módulo de elasticidad dinámico promedio por sesión ($E_{d-medio}$) en MPa y desviación (σ) del promedio en cada sesión en MPa.

$E_{d-medio}$	S1	S2	S3	S4	S5	S8
Promedio	8807	7651	8203	7014	6945	7342
Desviación (σ)	1192	1710	1214	499	1178	1177
$E_{d-medio}$	S9	S10	S11	S12	S13	
Promedio	7154	7636	7822	7916	8542	
Desviación (σ)	1218	1097	1122	1224	1039	

Al estudiar la correlación existente entre la variación del CH y la velocidad de propagación de ultrasonidos (v_p) de cada vigueta se obtienen valores de $R^2 < 50\%$ (figura 8.12a). Como se observa en la figura para $CH < 40\%$ el rango de velocidades varía desde los 2900 m/s hasta los 4900 m/s sin que esta variación esté directamente relacionada con el contenido de humedad. Para valores de CH superiores las velocidades de propagación varían desde 2400 m/s hasta 3900 m/s sin seguir un patrón directamente asociable a la variación del contenido de humedad.

En cuanto al efecto que presenta la variación del CH en el E_d , se comprueba a partir del ajuste realizado que su correlación es muy baja, ya que se obtiene un

$R^2 < 10\%$. Los valores del E_d se encuentran entre 8807 y 6945 MPa independientemente del CH de la vigueta (figura 8.12b).

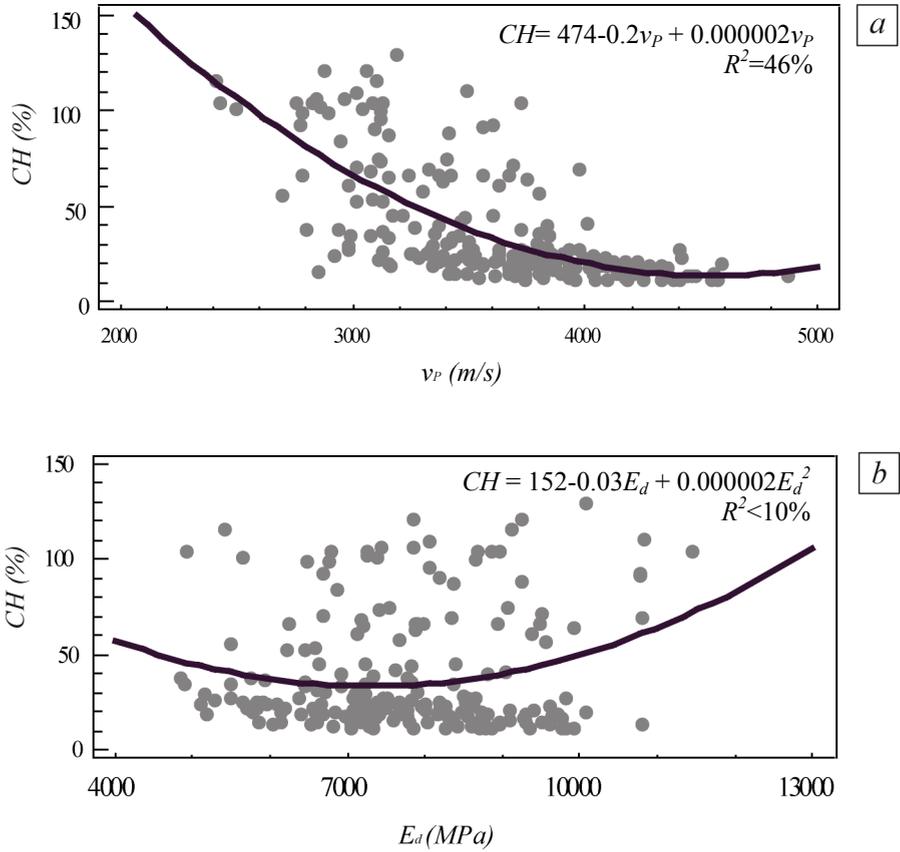


Figura 8.12.- (a) Efecto de la variación del CH en la velocidad de propagación de los ultrasonidos y (b) en el módulo de elasticidad dinámico de viguetas de *Pinus pinaster* Ait.

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

8.5.- ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA DENSIDAD

La densidad es una de las propiedades que caracteriza a la madera y está estrechamente relacionada con la mayoría de las restantes propiedades físicas, mecánicas y tecnológicas. En el capítulo 7 se analiza la capacidad del georradar para caracterizar este parámetro. Para ello se emplea un lote de 20 viguetas de madera de diferentes especies. Las dimensiones y densidades, obtenidas estas últimas según la norma UNE 56531:1977, de cada una de ellas se detallan en la tabla 7.1. Las secciones en testa de cada una de ellas se pueden ver en la figura 5.3. Para la obtención del *CH* se sigue el protocolo establecido por la norma UNE-EN 13183-1:2002 (véase apartado 3.4).

En este apartado se realizan los ensayos con el resistógrafo y la técnica de ultrasonidos sobre las mismas viguetas que se estudian con georradar y así se compara que técnica aporta mayor fiabilidad en la caracterización de la densidad.

Tanto en el estudio con el resistógrafo como con la técnica de ultrasonidos se aplican los mismos procedimientos de adquisición de registros que los aplicados en los apartados anteriores.

A.- Resistógrafo

A partir de los resistogramas obtenidos en cada vigueta en cara y canto cada 15 cm se calcula la AR_{mv} .

B.- La técnica de ultrasonidos

Al emplear la técnica de ultrasonidos se registra la v_p y se calcula el correspondiente módulo de elasticidad dinámico (E_d), obtenidos estos dos últimos parámetros a partir de las ecuaciones 8.2 y 8.1 respectivamente.

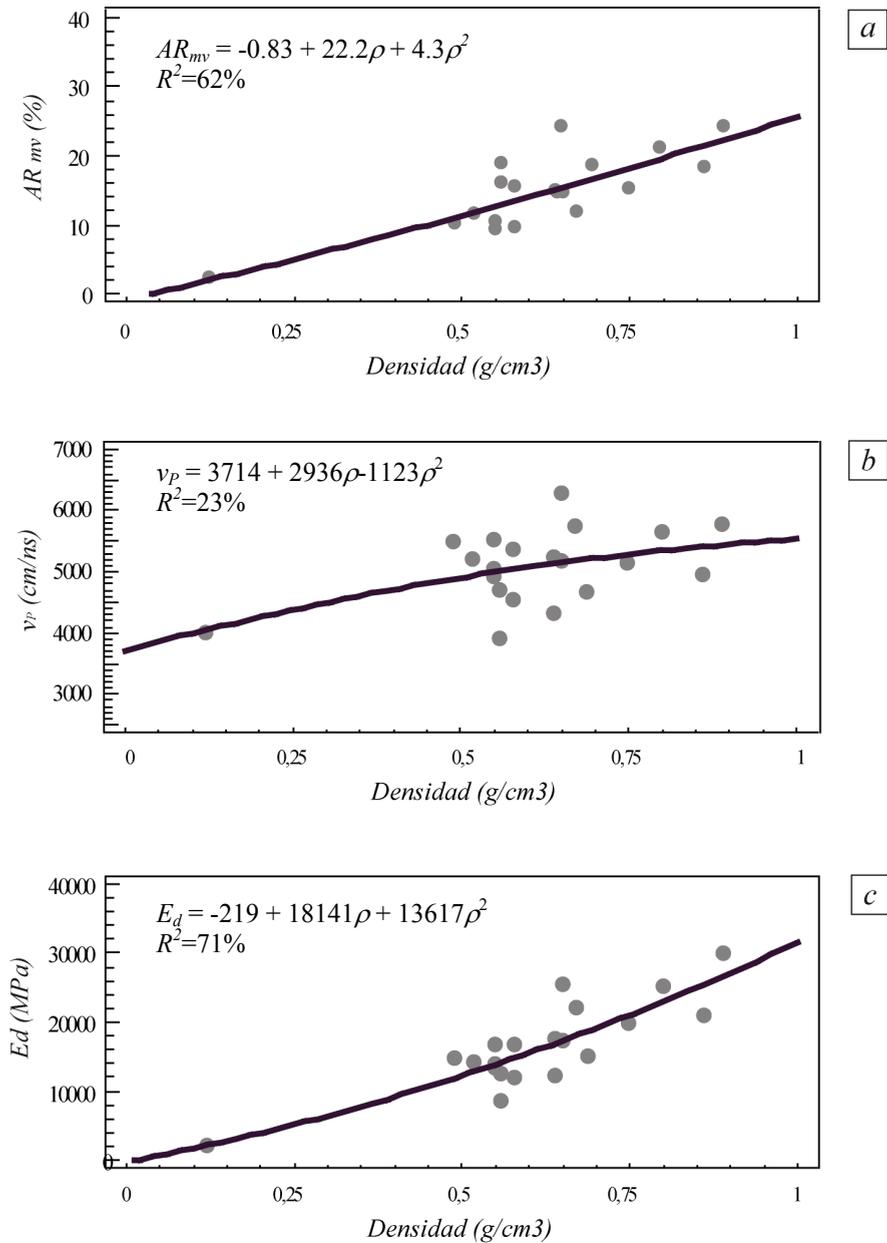


Figura 8.13.- Ajuste entre la densidad (ρ) de las viguetas con (a) la amplitud del resistógrafo media de vigueta (AR_{mv}), con (b) las velocidades de propagación de los ultrasonidos (v_p) y (c) con el módulo de elasticidad dinámico (E_d).

A continuación se evalúa el efecto que tiene la variación de la densidad en cada uno de los parámetros que se obtienen con ambas técnicas. En primer lugar, se comprueba como la AR_{mv} presenta una correlación con un $R^2=62\%$ (figura 8.13a). Estos resultados están en perfecto acuerdo con los obtenidos por otros autores como Ceraldi et al. (2001) y Rinn et al. (1990) que obtienen correlaciones del orden de $R^2 \cong 60\%$ al ajustar el valor medio de amplitud del resistógrafo con la densidad de las muestras.

En segundo lugar, se observa que la velocidad de propagación de los ultrasonidos a lo largo de una vigueta no aporta información significativa en relación a la densidad de la vigueta, ya que se obtiene un $R^2=23\%$ (figura 8.13b). Por último y como era de esperar la correlación aumenta al estudiar el módulo de elasticidad dinámico, ya que para su cálculo interviene la densidad (figura 8.13c).

El resistógrafo es un equipo capaz de detectar la variación de densidad relativa que se produce como consecuencia de los anillos de crecimiento al perforar a una sección de vigueta (figura 8.2b). Ahora bien, no resulta una técnica tan interesante para evaluar la diferencia de densidad absoluta entre viguetas de diferentes especies y evaluar las densidades a partir de la resistencia media a la perforación, dadas las bajas correlaciones obtenidas.

En cuanto a la técnica de ultrasonidos, a pesar de las baja correlación existente con la velocidad de propagación de los ultrasonidos para el módulo de elasticidad dinámico se obtienen correlaciones aceptables con la densidad de la vigueta.

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

8.6.- COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL RESISTÓGRAFO, LA TÉCNICA DE ULTRASONIDOS Y EL GEORRADAR

En los apartados anteriores se analiza la sensibilidad del resistógrafo y de la técnica de ultrasonidos para detectar los cambios en el contenido de humedad que se producen en una vigueta y diferencias de densidades entre diferentes especies. Se detallan a continuación los principales resultados obtenidos de los ensayos realizados.

A.- Variación del contenido de humedad

La resistencia mecánica de una pieza aumenta conforme una vigueta se seca desde su *PSF*. No obstante, a partir del análisis de la AR_{mv} calculada se comprueba como la resistencia a la perforación no está directamente relacionada con el contenido de humedad. Por una parte, al analizar el comportamiento de esta resistencia a la perforación al aumentar el contenido de humedad, se obtiene que no todas las viguetas analizadas de diferente densidad presentan el mismo patrón de comportamiento. Al analizar en detalle el caso del *Pinus pinaster* Ait. sí se aprecia la tendencia clara de disminución de resistencia a la perforación conforme disminuye el *CH* en este caso concreto.

En estudios previos realizados por Álvarez et al. (2005) y Rodríguez-Abad et al. (2009b) el resistógrafo resulta ser una técnica muy eficaz para la detección de pudriciones o alteraciones puntuales en el interior de la madera como consecuencia del aumento del contenido de humedad local. Sin embargo, como se comprueba en esta tesis, su eficacia no está relacionada con la capacidad de la técnica para detectar la variación del contenido de humedad medio de la vigueta, sino sólo de alteraciones puntuales o locales de la cohesión del material, sin referenciarlo a la variación del contenido de humedad que se pueda producir en

el conjunto de la vigueta. De esta forma se puede establecer que la AR_{mv} no es un parámetro que refleje con fiabilidad la variación del CH a lo largo de una vigueta dadas las bajas correlaciones obtenidas.

En cuanto a la técnica de ultrasonidos, el CH es uno de los factores que afectan a la v_p . Al analizar el comportamiento en distintas viguetas de diferente ρ , se observa que el comportamiento de las v_p está fuertemente influido por el CH de la madera, ya que conforme disminuye la velocidad aumenta significativamente y a la inversa. Este patrón se repite para todas las viguetas independientemente de su densidad. Ahora bien, no se cumple para todos los casos estudiados la relación establecida por Sandoz (1989) según la cual por cada incremento de CH 1% en el se produce una disminución de la v_p de aproximadamente un 0.80%.

En el caso concreto del *Pinus pinaster* Ait., que se analiza en detalle con un rango de variaciones de CH desde su estado en verde hasta llegar a la HEH , la tendencia sigue el comportamiento esperado y se obtienen $v_{p-media}$ mayores conforme disminuye el CH . Ahora bien, al estudiar la correlación existente entre la variación del CH y la v_p de cada una de las viguetas se obtienen ajustes con baja fiabilidad ($R^2 < 50\%$). En cuanto al efecto que presenta la variación del CH en el E_d , se comprueba a partir del ajuste realizado que su correlación es todavía más baja, ya que se obtiene un $R^2 < 10\%$.

De esta forma, se establece que la técnica de ultrasonidos puede aportar información del contenido de humedad siempre y cuando se estén evaluando CH promedio de lotes, pero no sirve como herramienta para establecer una evaluación directa del CH de una vigueta.

En la tabla 8.5 se resumen los ajustes realizados para evaluar el CH del lote de viguetas de *Pinus pinaster* Ait., con el resistógrafo, la técnica de ultrasonidos y el georradar. En esta tabla se detallan los parámetros que se han empleado en cada caso como variable indicadora del CH . Los resultados ponen claramente de

manifiesto que el georradar puede ser considerado como una herramienta útil para evaluar el estudio del *CH* de viguetas de madera, tanto si el análisis es a partir de las velocidades de propagación de las ondas electromagnéticas como si es a partir de las amplitudes. Asimismo, independientemente del dispositivo de registro empleado se comprueba como en todos los casos el grado de acuerdo obtenido por medio de georradar es significativamente mayor que con el resistógrafo y los ultrasonidos. Además, esta técnica cuenta con la ventaja de ser una metodología que permite evaluar el *CH* de forma continua a lo largo de toda la vigueta y con ello puede ayudar a determinar por imagen la presencia en su interior de bolsas de humedad, pudriciones, etc.

Tabla 8.5.- Comparación de ajuste realizados y correlaciones obtenidas al estudiar el efecto que produce la variación del contenido de humedad en viguetas de *Pinus pinaster* Ait. en los registros del resistógrafo, de la técnica de ultrasonidos y del georradar.

Parámetro ajustado	Ecuación de ajuste	R²
<i>Amplitud de resistógrafo</i>	$AR_{mv} = 10.3 - 0.05CH + 0.005CH^2$	R ² =33%
<i>Velocidad de ultrasonidos</i>	$CH = 474 - 0.2v_p + 0.000002v_p^2$	R ² =46%
<i>Módulo de elasticidad dinámico</i>	$CH = 152 - 0.03E_d + 0.000002E_d^2$	R ² <10%
<i>Velocidad propagación ondas electromag.</i>	$CH = 233 - 29v + 1.2v^2 - 0.016v^3$	R ² =96%
<i>Constante dieléctrica</i>	$CH = -4 + 7\varepsilon - 0.12\varepsilon^2 + 0.0004\varepsilon^3$	R ² =96%
<i>Onda directa: dispositivo Testa</i>	$nA = 0.93 - 0.014CH + 0.00007CH^2$	R ² =93%
<i>Onda directa: dispositivo Canto</i>	$nA = 0.92 - 0.011CH + 0.00005CH^2$	R ² =74%
<i>Onda reflejada: dispositivo Canto</i>	$nA = 0.60 - 0.031CH + 0.00043CH^2$	R ² =93%
<i>Onda directa: dispositivo Cara_ParalelaF</i>	$nA = 0.90 - 0.013CH + 0.00007CH^2$	R ² =87%
<i>Onda reflejada: dispositivo Cara_ParalelaF</i>	$nA = 0.94 - 0.014CH + 0.00007CH^2$	R ² =95%

B.- Variación de densidad

El resistógrafo es un equipo capaz de detectar la variación de densidad relativa que se produce como consecuencia de los anillos de crecimiento al perforar una sección de una vigueta. Ahora bien, no resulta una técnica tan interesante para evaluar la diferencia de densidad absoluta entre viguetas de diferentes especies y densidades a partir de la resistencia media a la perforación, dadas las bajas correlaciones obtenidas. Asimismo, se observa que la velocidad de propagación

de los ultrasonidos a lo largo de una vigueta no aporta información significativa en relación a la densidad de la misma, ya que se obtienen correlaciones especialmente bajas. Por último y como era de esperar la correlación aumenta al estudiar el E_d , ya que para su cálculo interviene la densidad.

Tabla 8.6.- Comparación de ajuste realizados y correlaciones obtenidas al estudiar el efecto que produce la variación de la densidad en 20 viguetas en los registros del resistógrafo, de la técnica de ultrasonidos y del georradar.

<i>Parámetro analizado</i>	<i>Ecuación de ajuste</i>	<i>R²</i>
<i>Amplitud de resistógrafo</i>	$AR_{mv} = -0.83 + 22.2\rho + 4.3\rho^2$	$R^2=62\%$
<i>Velocidad de ultrasonidos</i>	$v_p = 3714 + 2936\rho - 1123\rho^2$	$R^2=23\%$
<i>Módulo de elasticidad dinámico</i>	$E_d = -219 + 18141\rho + 13617\rho^2$	$R^2=71\%$
<i>Velocidad propagación ondas electromag.</i>	$v = 28-23\rho + 11\rho^2$	$R^2=86\%$
<i>Constante dieléctrica</i>	$\varepsilon = 1 + 3\rho + 0.05\rho^2$	$R^2=75\%$
<i>Onda directa con dispositivo</i>	$nA = 1 - 0.6\rho + 0.2\rho^2$	$R^2=80\%$
<i>Cara_PerpendicularF</i>		
<i>Onda directa con dispositivo antena a 35 cm</i>	$nA = -0.02 + 0.4\rho - 0.07\rho^2$	$R^2=84\%$

En la tabla 8.6 se presenta un resumen con los ajustes realizados con cada técnica, las fiabilidades obtenidas en cada caso y el parámetro empleado en cada caso como variable indicadora de la variación de la densidad.

De los resultados expuestos en la tabla 8.6 se deduce que el georradar es la técnica que aporta valores más fiables y ajustados sobre la densidad de las 20 viguetas estudiadas.

Esto pone de manifiesto el gran potencial de esta técnica para evaluar este parámetro, ya sea a partir del análisis de las velocidades de propagación de las ondas electromagnéticas y su correspondiente constante dieléctrica o las amplitudes. En todos estos casos se observa una mayor sensibilidad de la técnica para reflejar la variación en la densidad que la aportada por el resistógrafo o la técnica de ultrasonidos.

PARTE 4

EL GEORRADAR Y LA CALIDAD RESISTENTE DE LA MADERA

La clasificación en función de la resistencia mecánica de la madera estructural surge por la necesidad de controlar lo más posible los factores de variabilidad de la misma tanto entre distintos tipos de madera como dentro de un mismo grupo de madera.

Actualmente se emplean dos metodologías para la determinación de la calidad resistente aprobados por la normativa europea: el de estimación visual (UNE-EN 14081-1:2006 y UNE 56544:2007) y el de evaluación por máquina mecánica (UNE-EN 14081-1:2006). A pesar de ser los métodos regulados por la norma, estos métodos cuentan con rangos de error mayores del 40%.

Por tanto, se hace necesario la investigación de nuevos métodos no destructivos que aporten mayor objetividad y fiabilidad. En este sentido destacan los estudios que se están realizando con la técnica de ultrasonidos como son los de Hermoso et al. (2003), Fernández Golfín et al. (2003), Hermoso et al. (2005), Acuña et al. (2006), Hermoso et al. (2007) y Conde et al. (2007). Asimismo es importante resaltar los estudios que se están realizando en los últimos años en los que se aplica la técnica de las vibraciones inducidas en el análisis de la calidad resistente de la madera. En concreto en España destacan los estudios realizados por Íñiguez et al. (2007), Casado et al. (2007), Carballo et al. (2007), Casado et al. 2008 y Carballo et al. (2008). El objetivo de todos ellos es determinar algún parámetro que sirva de predictor de las propiedades mecánicas empleadas para la asignación de clases resistentes.

De este modo, el objetivo del estudio presentado en este capítulo es analizar la capacidad de una nueva técnica, la de georradar, en el análisis de la caracterización resistente de la madera estructural buscando la optimización o mejora de los métodos actuales.

CAPÍTULO 9

**PRIMEROS RESULTADOS DE LA
APLICACIÓN DEL GEORRADAR A LA
CLASIFICACIÓN RESISTENTE DE
VIGUETAS DE MADERA DE *PINUS
RADIATA* D. DON.**

Como introducción al capítulo se describe cual es el contexto normativo actual en España en lo que se refiere a la clasificación resistente de la madera estructural de sección transversal. Seguidamente se detallan las principales características de los métodos de clasificación resistente aprobados por la normativa europea (clasificación visual y por máquina mecánica UNE-EN 14081-1:2006), haciendo especial hincapié en aquellos puntos de la norma que justifican la necesidad del desarrollo de una metodología que proporcione resultados más precisos. A continuación se describen los principales estudios encaminados a la aplicación de la técnica de ultrasonidos hacia la clasificación resistente.

En este capítulo se presenta el estudio realizado para estimar la eficacia de la técnica geofísica de georradar como evaluadora de la clase resistente de la madera estructural de sección transversal. Para ello se realizan una serie de ensayos a un lote de viguetas de madera de *Pinus radiata* D. Don. y se desarrolla una metodología específica para la clasificación resistente de la madera por esta técnica.

Asimismo, sobre éstas viguetas se realizan los ensayos necesarios para clasificar las viguetas por uno de los métodos regulados por la norma (clasificación visual UNE 56544:2007) y por uno de los métodos no destructivos que actualmente se encuentra en fase experimental. De entre éstos últimos se elige trabajar con el de ultrasonidos por medio del análisis de las velocidades críticas (Hermoso et al. 2005), puesto que se dispone del equipo necesario.

Los resultados de la clasificación con cada uno de los métodos se contrastan con la clasificación real a partir de los ensayos de rotura regulados por la norma UNE-EN 408:2004 y la norma de asignación de clases resistentes UNE-EN 338:2003. Finalmente, se compara el grado de acierto de la técnica de georradar con el de cada una de las metodologías aplicadas.

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

9.1.- CONTEXTO NORMATIVO DE LA CLASIFICACIÓN RESISTENTE DE LA MADERA ESTRUCTURAL

La situación actual en el sector de la edificación resulta crítica desde la entrada en vigor de la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) y el Código Técnico de la Edificación (CTE). A esta situación no resulta ajena la madera en la construcción, resultando un momento especialmente interesante en la medida en que, por primera vez, en España se dispone de un marco normativo que sitúa a la madera estructural en igualdad de condiciones frente a otros materiales. Una de las consecuencias más inmediatas se traduce en la implantación de una serie de garantías que deben ser cubiertas con carácter obligatorio por los diferentes agentes que intervienen en el proceso de la edificación.

Pero para ello, la primera necesidad consiste en implantar en los sistemas de producción y caracterización de madera y productos derivados para uso estructural unas medidas encaminadas a garantizar sus propiedades mecánicas. El sistema de clases resistentes queda definido en la norma UNE-EN 338:2003 (véase apartado 3.7). No obstante, estos ensayos mecánicos, necesarios para determinar de forma directa y exacta el módulo de rotura a flexión imposibilita el uso posterior de la madera. Por este motivo se han desarrollado una serie de técnicas que proporcionan indicadores externos e indirectos de la calidad del material.

En este sentido, los sistemas actualmente más reconocidos e implantados en Europa y en otros países de sobrada tradición en la construcción con madera, son los basados en la clasificación visual y en la asignación de clases resistentes para la madera aserrada. El objetivo de la norma UNE-EN 14081-1:2006 es el establecimiento de unas bases comunes que sirvan de referencia a las normas nacionales de clasificación visual y clasificación mecánica por máquina. De esta

forma se pueden mantener las clasificaciones normalizadas en cada país miembro, siempre que, atiendan los requisitos de esta norma marco. La norma establece cuales son los requisitos mínimos que han de cumplir cada una de las normas nacionales en cuanto a las limitaciones para las características reductoras de la resistencia (nudos, fendas, alabeos, etc.). Asimismo, en esta norma se establece como se ha de realizar el marcado CE del producto.

Buscando un mayor grado de eficacia y objetividad en la predicción de la calidad mecánica del material, las investigaciones sobre nuevos métodos de clasificación se orientan hacia el empleo de los ensayos no destructivos.

En este campo se abre un abanico de líneas de investigación tan extenso como necesario. Para la caracterización de madera en aserradero, las normas actuales y los procedimientos de aplicación en estructuras existentes resulta muy limitada. Además, se hace necesario un nuevo enfoque para tratar de estimar las propiedades mecánicas de la madera puesta en obra. Por otro lado, la aplicación industrial de la clasificación visual puede resultar muy lenta cuando se requieren altos rendimientos y como se detalla más adelante es una metodología muy conservadora.

Con este fin, la mayor parte de las líneas actuales de investigación actuales se focalizan en el estudio de la aplicación de técnicas no destructivas que complementen la clasificación visual, mejorando la predicción de las propiedades mecánicas o la detección de discontinuidades en el material. En esta línea destacan la aplicación de técnicas basadas en medir la velocidad de propagación de ultrasonidos, la resistencia a la penetración de una varilla, la resistencia a la extracción de un tornillo, análisis de los modos de vibración natural mediante vibraciones inducidas, etc. (véase apartado 1.3 y 1.4).

9.1.1.- NORMA DE CLASIFICACIÓN VISUAL DE LA MADERA ASERRADA DE USO ESTRUCTURAL

La clasificación visual de la madera en función de su aspecto exterior ha sido, y es, el método más usado para decidir sobre la calidad mecánica de la madera. Una de las primeras normas de clasificación visual de la madera estructural data de 1923 y fue desarrollada y publicada por el Forest Products Laboratory de Madison (EE.UU.). Hacia 1950 tuvieron su desarrollo normas similares en Europa, apareciendo las primeras versiones de las normas alemana (DIN), inglesa (BSI) y la francesa (AFNOR).

La clasificación visual consiste en medir e identificar las singularidades que presentan las piezas de madera. La medición e identificación de estas singularidades es el paso donde surge la dificultad de las normas de clasificación, ya que resulta complejo establecer indicadores ajustados que diferencien adecuadamente las distintas calidades. Los indicadores de calidad son las singularidades de la madera, de las cuales, unas producen efectos más perjudiciales en la resistencia de la madera que otras (figura 9.1).

En general, los parámetros que se evalúan en la clasificación visual comunes a todas las normas nacionales y europeas son principalmente los nudos, la desviación de fibras y las fendas. Los nudos deben considerarse como el principal defecto interno de la madera y su efecto depende de dónde esté situado, si en el canto o en la cara de la probeta. Su presencia supone una desviación de las fibras adyacentes a él, causando una acumulación de tensiones concentradas en unos lados más que en otros. De igual forma, la desviación general de las fibras influye en la reducción de la resistencia, ya que provoca concentración de tensiones. Las fendas son grietas más o menos superficiales, debidas a diferentes causas que también reducen la resistencia de la pieza.

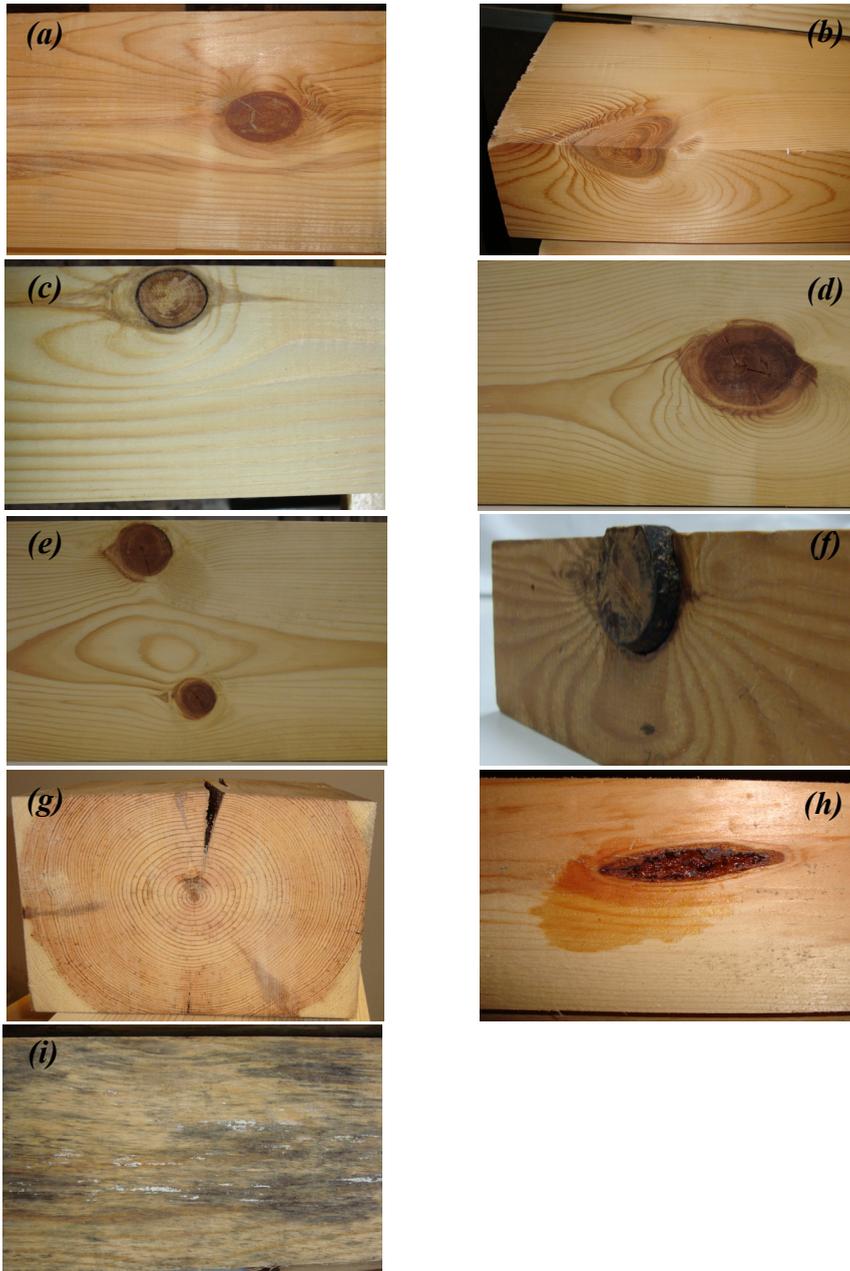


Figura 9.1.-Principales singularidades de la madera que afectan a su resistencia. (a-f) Nudos en diferentes posiciones en la vigueta y con diferentes grados de adherencia; (g) fenda; (h) bolsa de resina; (i) azulado y hongo blanco.

Otras singularidades que se han de tener en consideración son la acebolladura (separación entre los anillos de crecimiento), el entrecasco (inclusión de corteza entre las fibras), las bolsas de resina (zonas de acumulación de resinas entre las fibras). También influyen las deformaciones en la sección de la probeta, como son el alabeo, la curvatura, el atejado, etc. y las alteraciones en la estructura de la madera como los ataques biológicos, hongos, pudriciones, etc.

La norma UNE 56544:2007 sigue en sus postulados clasificatorios todo lo exigido por la norma UNE-EN 14081-1:2006 y en lo que hace referencia a la asignación de los distintos niveles de resistencia todo lo contemplado en las normas europeas UNE-EN 408:2004, UNE-EN 384:2004 y UNE-EN 338:2003. La norma UNE 56544:2007 aunque guarda todos los requisitos establecidos como indispensables en la UNE-EN 14081-1:2006, añade otras limitaciones en singularidades de la madera que considera necesarias según su criterio. Esta norma clasifica la madera en calidades: primera (*ME-1*) y segunda (*ME-2*). Las piezas que no cumplen los mínimos para la segunda clase se consideran de rechazo, y no aptas para uso estructural, aunque sí para otros usos. Su campo de aplicación se extiende actualmente a las especies: pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), pino laricio (*Pinus nigra* Arn, var. *Salzmannii*), pino gallego y pino Pinaster de la meseta (*Pinus pinaster* Ait.) y pino insigne (*Pinus radiata* D.Don). A medida que progresen los estudios, se incluirán nuevas especies españolas.

La norma UNE-EN 1912:2005+A2:2008 nace con el cometido de servir de nexo de unión entre el sistema de clases resistentes y las normas nacionales de clasificación visual. Se trata de una norma que une las calidades visuales para especies y procedencias de diferentes países y las clases resistentes definidas en la UNE-EN 338:2003 (tabla 9.1).

De esta forma un prescriptor de madera puede exigir en su proyecto una determinada clase de resistencia (por ejemplo *C30*) y el constructor podría emplear un elenco de maderas clasificadas con distintas normas (y por tanto

procedentes de distintos países) con el denominador común de poseer todas ellas la misma resistencia.

Tabla 9.1.- Ejemplo de correspondencia de clases resistentes (UNE-EN 338:2003) y calidades visuales (UNE 56544:2007) de las maderas de procedencia españolas dadas en UNE-EN 1912:2005+A2:2008.

<i>Especie- procedencia</i>	<i>C18</i>	<i>C20</i>	<i>C22</i>	<i>C24</i>	<i>C27</i>	<i>C30</i>
<i>Pino silvestre- España</i>	ME-2				ME-1	
<i>Pino radiata-España</i>	ME-2			ME-1		
<i>Pino pinaster- España</i>	ME-2			ME-1		
<i>Pino laricio- España</i>	ME-2					ME-1

Es importante tener en cuenta que un patrón común a todas las normas de clasificación visual es su elevado conservadurismo, que da lugar a eficiencias clasificadoras (porcentajes de acierto) que difícilmente superan el 50%. Por ejemplo, en España y para el pino laricio la efectividad de la norma UNE 56544:2007 es tan sólo del 53%. Esto quiere decir que las normas de clasificación visual subestiman fuertemente, la calidad mecánica del material (Fernández-Golfín et al. 2001), siendo éste el principal inconveniente. Además la identificación de las singularidades está sometida a la subjetividad del clasificador.

Además se ha de tener en cuenta que las normas de clasificación visual nacen con la idea de ser aplicadas en aserradero. Ahora bien, dado que cuando la madera forma parte de una estructura no se dispone de otro método avalado por ninguna norma, se ha extendido su aplicación para la madera colocada en obra. En este caso surgen diversos problemas, ya que no siempre es posible aplicarla con las garantías suficientes. Por otra parte, la clasificación puede resultar demasiado restrictiva teniendo en cuenta que las piezas analizadas cumplen satisfactoriamente la función estructural en el sistema desde que se instalan. A

esto se añade que el difícil acceso a las estructuras no permite la inspección de las 4 caras de una pieza para su clasificación visual. Todo ello limita fuertemente la aplicación de esta metodología en la clasificación resistente de la madera que forma parte de las estructuras.

9.1.2.-CLASIFICACIÓN NO DESTRUCTIVA POR MÉTODOS AUTOMÁTICOS: CLASIFICACIÓN MECÁNICA POR MÁQUINA

La clasificación visual no aporta la exactitud y la eficacia que se requiere, y sobre todo produce demasiadas subestimas, por ello es necesario estudiar otras técnicas que mejoren los resultados. La clasificación mecánica por máquina se basa en la determinación de la elasticidad o rigidez de la madera y en la posterior predicción de su resistencia mediante el uso de relaciones conocidas entre ambas variables. No obstante, en España es prácticamente desconocida, y poco utilizada, mientras que es habitual en aserraderos de Estados Unidos, Gran Bretaña y en los Países Nórdicos.

En la actualidad el mercado está dominado principalmente por dos equipos: Computermatic y Cook-Bolinder. Estas máquinas se basan en la evaluación de la rigidez de la madera. Dentro de esta denominación general existen unas basadas en la aplicación de una carga conocida y en la medición de la deformación resultante, como es la máquina Computermatic, que es la más ampliamente comercializada en Europa. Otro tipo de máquinas dentro de este grupo son las que miden la fuerza necesaria para producir una deformación dada. De este grupo la máquina más conocida es el Cook-Bolinder (figura 9.2), aunque existen otras en el mercado como la Timgrader de fabricación finlandesa.

Es importante tener en cuenta que para la clasificación por estas máquinas se ha de disponer de los modelos que relacionan las variables clasificadoras (módulo de elasticidad y resistencia a flexión, véase apartado 3.7) de la norma de asignación de clases resistentes UNE-EN 338:2003 con las variables indicadoras de cada tipo de máquina.



Figura 9.2.- Máquina clasificadora mecánica Cook-Bolinder (Laboratorio de estructuras de maderas CIFOR - INIA).

En la norma UNE-EN 14081-1:2006 se establecen los requisitos preliminares que ha de cumplir la madera para ser clasificada por este método, así como la metodología a seguir en el caso de que el equipo no pueda clasificar los extremos de la vigueta. La descripción de los procedimientos para establecer las equivalencias entre los tipos de máquinas y los parámetros de módulo de elasticidad, resistencia a flexión se encuentran de forma provisional en las normas pr14081-2:2005, pr14081-3:2005, pr14081-4:2005.

9.1.3.-CLASIFICACIÓN RESISTENTE POR LA TÉCNICA DE ULTRASONIDOS

La técnica de ultrasonidos se basa en la medida de la velocidad de propagación de una onda ultrasónica entre dos puntos de la vigueta de madera bajo estudio.

Esta velocidad depende de la homogeneidad de la muestra y por tanto, su valor proporciona información sobre la presencia de irregularidades en el interior de la pieza analizada (véase apartado 8.2).

La velocidad de transmisión longitudinal de la onda no es por sí misma capaz de predecir con suficiente precisión ni la resistencia ni el comportamiento a flexión de la madera estructural. Ahora bien, la utilización de las medidas por ultrasonidos alcanza una precisión mayor cuando se emplean conjuntamente con los parámetros de clasificación visual. De este modo se ha llegado a obtener coeficientes de correlación de 0,80 combinando la clasificación visual según la norma *DIN 4074* y el módulo de elasticidad obtenido por ultrasonidos, mediante un análisis de regresión múltiple (Ceccotti y Togni, 1996). En esta misma línea están los trabajos de Acuña et al. (2006), Arriaga et al. (2006), Hermoso et al. (2007) y Conde et al. (2007) que evalúan la mejora en la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual.

9.2.- DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Se ensayan 100 viguetas de madera de *Pinus radiata* D. Don., con unas dimensiones de 300 x 15 x 5 cm y numeradas del 4101 al 4200. En el momento en el que se realizan los ensayos el lote de viguetas cuenta con un contenido de humedad promedio del $CH_m=9.2\%$ y con una densidad media $\rho_m= 450 \text{ kg/m}^3$. Los valores para cada vigueta de CH y ρ se detallan en el Anexo B. La determinación del CH se realiza con un higrómetro de resistencia siguiendo el procedimiento establecido en la norma UNE-EN 13183-2:2002 (figura 9.3) y la densidad siguiendo la norma UNE 56531:1977.



Figura 9.3.- Toma de lectura del CH con el higrómetro de puntos en el lote de 100 viguetas de *Pinus radiata* D. Don.

Todas las mediciones realizadas necesarias para la clasificación resistente de la madera por los distintos métodos: clasificación visual, clasificación por ultrasonidos, clasificación por georradar y los ensayos a rotura se realizan en el Laboratorio de Estructuras de Madera de CIFOR-INIA (Madrid, España).

En primer lugar, las viguetas se clasifican por medio del método de inspección visual siguiendo el procedimiento establecido en UNE 56544:2007. Según esta norma cada vigueta se clasifica en *ME-1*, *ME-2* y Rechazo (*R*) según su calidad resistente (figura 9.4). Esta clasificación la realiza un técnico experto clasificador del Laboratorio de Estructuras de Madera de CIFOR-INIA. Posteriormente, se registran las velocidades de propagación de las ondas ultrasónicas por el método de transmisión directa longitudinal (véase apartado 8.2). Los registros se realizan con el equipo Sylvatest DUO y por tanto la toma de lecturas consiste en el registro de las velocidades de propagación (v_p) y a partir de ellas se calcula el módulo de elasticidad dinámico (E_d) según la ecuación 8.1.



Figura 9.4.- Viguetas de *Pinus radiata* D. Don. clasificadas por la norma UNE 56544:2007. En la imagen se muestran las viguetas *R4136*, *R4135*, *R4134*, *R4133* en las que se marca el resultado de la clasificación: Rechazo (R).

A continuación se toman los registros con georradar. En este caso se utiliza la unidad central SIR-3000 (GSSI) que dispone de un equipo de visualización integrado (figura 9.5). Se emplea la antena de 1.6 GHz de frecuencia central de GSSI y se realiza una adquisición dinámica; la antena se desplaza a lo largo de una cara de la vigueta (figura 9.6).

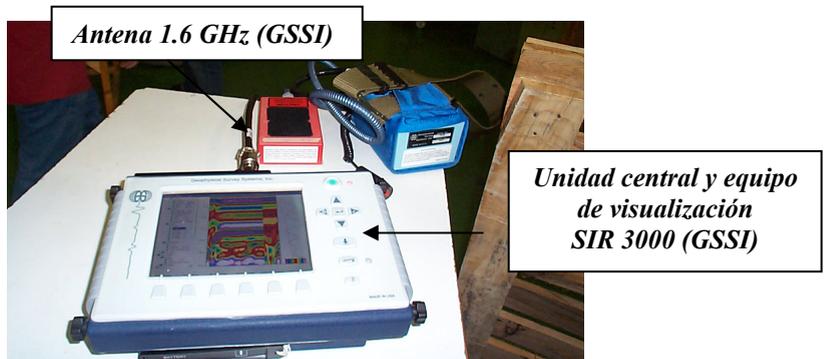


Figura 9.5.- Equipo de georradar SIR-3000 (GSSI) en el que se encuentra integrado el sistema de visualización con la unidad de control conectado a una antena de 1.6 GHz de frecuencia central.

Para facilitar la identificación de las reflexiones producidas en la base de la vigueta durante el registro, éstas se colocan apoyadas en sus extremos en unas

bases de madera con cuatro patas, cuya superficie de contacto con las viguetas es de 40 x 40 cm (figura 9.6).



Figura 9.6.- Adquisición de registros con la antena de frecuencia central de 1.6 GHz (GSSI) en el Laboratorio de Estructuras de Madera de CIFOR-INIA (Madrid, España).

Por último, las viguetas se someten a ensayo de rotura a flexión según UNE-EN 408:2003. Es obvio que este último procedimiento no puede utilizarse como método de clasificación ya que conlleva la destrucción de la pieza ensayada, pero

sí permite comprobar la fiabilidad de cada uno de los otros métodos que se valoran en esta tesis.

La norma UNE-EN 338:2003 de clases resistentes establece tres propiedades clasificadoras para la asignación de una población de madera a una clase resistente: resistencia característica a flexión ($f_{m,k}$), módulo de elasticidad longitudinal medio ($E_{m,l}$) y la densidad característica ($\rho_{m,k}$). Tal como se menciona anteriormente la determinación de los valores de dichas propiedades clasificadoras se efectúa mediante los ensayos descritos en la norma UNE-EN 408:2003 y el cálculo de los valores característicos según lo establecido en la UNE-EN 384:2004 (véase apartado 3.7).

En el Anexo B se detallan los parámetros obtenidos por cada método de clasificación para cada una de las viguetas. Para cada vigueta se detalla si es *ME-1*, *ME-2* o *R* según la norma de clasificación visual, las velocidades de propagación de ultrasonidos (v_p) y módulo de elasticidad dinámico (E_d) y si es *G1* o *G-R* según la clasificación desarrollada por georradar. La metodología aplicada para establecer la clasificación por medio de georradar se detalla más adelante. Por último, en el Anexo B se incluye los valores obtenidos del ensayo a rotura de cada vigueta ($f_{,k}, E_{,l}, \rho_k$).

9.3.-CLASIFICACIÓN RESISTENTE DE LA MADERA POR DISTINTOS MÉTODOS: ENSAYOS A ROTURA, VISUAL Y POR ULTRASONIDOS

Aunque los ensayos de rotura a flexión son los últimos que se realizan, aquí se presentan en primer lugar porque se emplean como referencia para las características mecánicas de los grupos definidos por el resto de métodos de clasificación aplicados.

En la tabla 9.2 quedan reflejados los valores medios y característicos obtenidos en la determinación de las propiedades mecánicas y la densidad de las viguetas. Estos valores se determinan de acuerdo a los principios establecidos en la norma UNE-EN 384:2004 y son necesarios para poder asignar las poblaciones a clases resistentes de la norma UNE-EN 338:2003.

Los límites para establecer que un grupo pertenece a la clase *C18* son: $\rho_{m,k} > 320 \text{ kg/m}^3$, $E_{m,l} > 9000 \text{ N/mm}^2$ y $f_{m,k} > 18 \text{ N/mm}^2$ (véase tabla 3.2). En el caso particular del lote de viguetas que se estudia se comprueba que ningún grupo extraído del lote cumpliría las condiciones para pertenecer a una clase resistente superior.

Del total del lote de 100 viguetas se le asigna a 70 de ellas la clase resistente *C18*. El resto de viguetas (30) de forma individual no cumplen los mínimos para ser *C18*. Como se muestra en la tabla 9.2 como este último grupo obtiene valores de $E_{m,l}$ y $f_{m,k}$ muy por debajo de lo exigido en esta calidad resistente. De hecho, este grupo no llega ni al mínimo valor de clase resistente *C14* definido en la norma UNE-EN 338:2003 como clase resistente última límite.

Tabla 9.2.- Propiedades mecánicas del lote de *Pinus radiata* D. Don diferenciado entre el grupo de viguetas que cumplen con la clase *C18* de la norma UNE-EN 338:2003 y las que no la cumplen (*R*).

Clase	Nº viguetas	Densidad (kg/cm³)		Módulo de elasticidad medio (N/mm²)	Módulo de resistencia a flexión (N/mm²)	
		ρ_m	$\rho_{m,k}$	$E_{m,l}$	f_m	$f_{m,k}$
<i>C</i>	<i>n</i>					
<i>C18</i>	70	469.4	403.3	9079	31.6	18.8
<i>R</i>	30	428.8	366.6	6840	14.3	7.2

En la norma UNE 56544:2007 se asignan clases resistentes para piezas de madera con sección rectangular y espesor menor de 7 cm. Para el *Pinus radiata* D. Don, cuyo nombre normalizado en español según la norma EN 13.556:2003

es pino radiata, se le asigna una clase resistente *C24* cuando se trata de una *ME-1* y una clase *C18* cuando es una *ME-2* (tabla 9.1).

La clasificación visual la realizan técnicos expertos del Laboratorio de Estructuras de Madera de CIFOR-INIA. De las 100 viguetas 16 de ellas están dentro de la categoría *ME-2* y tan sólo 1 dentro de la clase *ME-1*. Dado que en el grupo *ME-1* sólo se encuentra una vigueta, se unen el grupo *ME-1* y el *ME-2*. El resto del lote se clasifica de rechazo (*R*) por no tener la calidad estructural necesaria según la norma UNE 56544:2007, tras el análisis de todas las singularidades presentes en las viguetas. En la tabla 9.3 se detallan las clasificaciones resistentes según la norma visual y los valores medios y característicos de los grupos visuales y por último la clase resistente que se les asocia según la norma UNE-EN 338:2003.

Tabla 9.3.- Propiedades mecánicas del lote de *Pinus radiata* D. clasificado en los grupos *ME-1* + *ME-2* y *R* según la norma UNE 56544:2007.

Clasificación visual	Nº viguetas	Densidad (kg/cm³)		Módulo de elasticidad medio (N/mm²)	Módulo de resistencia a flexión (N/mm²)		Clase resistente UNE-EN 338:2003
		ρ_m	$\rho_{m,k}$	$E_{m,l}$	f_m	$f_{m,k}$	<i>C</i>
Grupo	n						
<i>ME-1</i>	17	479.3	405.3	8914	32.9	14.4	<i>C14</i>
<i>ME-2</i>							
<i>R</i>	83	452.7	389.2	8324	24.9	8.9	<i>R</i>

Los dos grupos de clasificación visual (*ME-1+ME-2* y *R*) presentan propiedades resistentes menores al ser clasificadas por este procedimiento. Por tanto, tal y como se comenta en el apartado 9.11 este tipo de clasificación subestima la calidad resistente. Se pasa de tener una calidad *C18* según los ensayos de rotura normalizados a una calidad *C14* según el método de clasificación visual. Al primer grupo de clasificación visual, constituido por 17 viguetas, se le asigna la clase *C14*, ya que cumple los requisitos de presentar una $\rho_{m,k} > 290 \text{ kg/m}^3$, un $E_{m,l} > 7000 \text{ N/mm}^2$ y un $f_{m,k} > 14 \text{ N/mm}^2$ (véase tabla 3.2). Al grupo de *R*, formado por

83 viguetas no se le puede asignar clase resistente ya que no cumple ni el mínimo definido en la norma UNE-EN 338:2003 y por tanto se rechaza.

El ensayo de ultrasonidos se realiza con el equipo Sylvatest con el que se determina la velocidad de propagación longitudinal (v_p). Para fijar el valor de corte de la velocidad (v_0) que permita asignar cada pieza al grupo estructural o al grupo rechazado se estudian las distribuciones de las poblaciones, medias y percentiles como definen Hermoso et. al. (2005) y Acuña et al. (2006). Finalmente se opta por utilizar como velocidad de corte $v_0=4685$ m/s que coincide con el quinto percentil de las viguetas clasificadas como *C18*. Las viguetas con velocidades por debajo de ésta se consideran de rechazo (*US-R*) y de esta forma todas aquellas viguetas que cumplen con esta condición se le asigna la clase *US-C18*.

Teniendo en cuenta este criterio se clasifican 87 como de clase *US-C18* y tan sólo 13 como *US-R*. En la tabla 9.4 se detallan las clasificaciones resistentes según la velocidad de corte de ultrasonidos y los valores medios y característicos de los grupos generados. Por último, se indica la clase resistente que se les asocia según la norma UNE-EN 338:2003. En este caso la calidad resistente de los grupos se encuentra subestimada. Los requisitos mínimos para que un grupo sea *C18* según la norma UNE-EN 338:2003 son: $\rho_{m,k}>320$ kg/m³, $E_{m,l}>9000$ N/mm² y $f_{m,k}>18$ N/mm². Se comprueba como efectivamente el grupo clasificado como *US-C18* no cumple estas condiciones y se le asigna la clase *C14*. En cuanto al *US-R* no cumple ni los requisitos para clasificarse como *C14*.

Tabla 9.4.- Propiedades mecánicas del lote de *Pinus radiata* D. clasificado en los grupos *US-C18* y *US-R* a partir de la velocidad de corte.

<i>Clasificación ultrasonidos</i>	<i>Nº viguetas</i>	<i>Densidad (kg/cm³)</i>		<i>Módulo de elasticidad medio (N/mm²)</i>	<i>Módulo de resistencia a flexión (N/mm²)</i>		<i>Clase resistente UNE-EN 338:2003</i>
<i>Clase</i>	<i>n</i>	ρ_m	$\rho_{m,k}$	$E_{m,l}$	f_m	$f_{m,k}$	<i>C</i>
<i>US-C18</i>	87	460.2	394.3	8684	27.8	13.2	C14
<i>US-R</i>	13	440.9	387.4	6716	19.7	7.9	R

9.4.- CLASIFICACIÓN RESISTENTE POR LA TÉCNICA DEL GEORRADAR

En primer lugar se realiza una primera inspección visual de los radargramas con objeto de caracterizar la respuesta electromagnética que presentan las viguetas.

El espesor de las viguetas (5 cm) se encuentra en el límite de la resolución vertical. Esto significa que la onda directa y la reflejada en la interfase madera-aire no están separadas en el tiempo (véase apartado 4.2.6). No obstante, a pesar de que estas dos ondas se solapan, gracias al dispositivo de adquisición de registros empleados es posible identificar el tiempo de llegada de la onda reflejada.

Tal y como se detalla en el apartado 9.2 las viguetas se apoyan en sus extremos por bases de madera de superficie cuadrada (figura 9.6). En la figura 9.7a se muestra una sección de un radargrama al desplazar la antena por la vigueta. En el primer tramo no se aprecia ninguna singularidad, pero a partir del metro 1.0 hasta el metro 1.4 se aprecian claramente las hipérbolas producidas por las reflexiones en la base de madera donde se encuentra apoyada la vigueta.

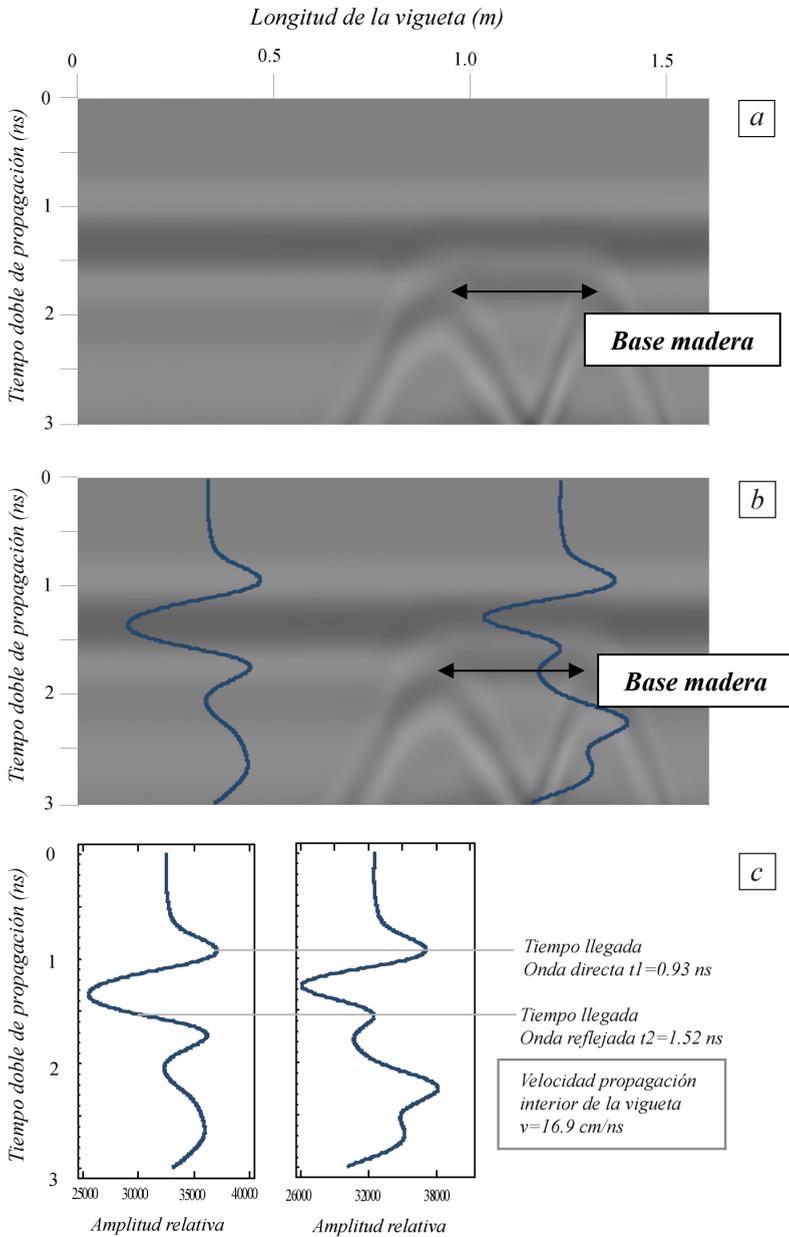


Figura 9.7.- Sección de un radargrama de una vigueta de *Pinus radiata* D. Don. apoyada en un extremo en una base de madera (a) y la superposición de las trazas características con y sin la base de madera (b); criterio de toma de lecturas de tiempos de llegada de la onda directa y reflejada (c).

Al analizar las trazas características de estos dos sectores del radargrama, se comprueba como las reflexiones no son iguales (figura 9.7b). La onda directa, como es lógico, en ambos casos se recibe al mismo tiempo y tal y como se realiza a lo largo de toda esta tesis se evalúa su tiempo de llegada en el primer máximo positivo. En cuanto a la reflejada, en el caso de la reflexión en la interfase madera-aire debido a que las señales se solapan es difícil identificar el tiempo de llegada. Ahora bien, si se compara con la reflexión producida en la interfase madera-base madera hay un punto en el que la reflexión, en este último caso, se atenúa y no sigue la tendencia que llevaba. Dado el bajo contraste dieléctrico entre la vigueta y la base de madera la absorción en el segundo medio (base madera) es mayor y esto da lugar a que la reflexión se reciba más atenuada. Finalmente este punto de la traza es el que se establece para la toma de la lectura de tiempos de llegada de la onda reflejada (figura 9.7c).

Tras la toma de los tiempos de llegada de la onda directa y reflejada se calcula la velocidad de propagación y la constante dieléctrica según las ecuaciones 2.41 y 2.42 (véase apartado 2.4.3). Finalmente se obtiene una velocidad y constante dieléctrica promedio para todo el lote de $v= 16.5$ cm/ns y $\epsilon=1.3$ respectivamente.

Una vez inspeccionados todos los radargramas, el siguiente paso es la clasificación. La clasificación se realiza atendiendo a parámetros cualitativos, es decir, la diferencia entre las categorías está en función de la homogeneidad de la respuesta electromagnética a lo largo de toda la vigueta. De esta forma las que son homogéneas en toda su longitud se clasifican como *GI* y las que presentan grado de alteración de las trazas como consecuencia de anomalías internas se clasifican como *G-R*. De esta forma los radargramas en los que se aprecian hipérbolas como consecuencia de irregularidades en el interior de la madera se clasifican como de rechazo (*G-R*).

En primer lugar, hay un porcentaje bastante significativo de viguetas (26%) que se catalogan como *GI*. El grupo de viguetas catalogado como *G-R* corresponde a

aquellas en las que se han identificado singularidades o anomalías en sus radargramas que pudieran estar asociadas a nudos, pequeñas grietas o fisuras. Este tipo de respuesta la presentan el 74% del total de las viguetas analizadas.

En la figura 9.8a se presenta un ejemplo de radargrama de cada grupo. Como ejemplo del *G1* se muestra el correspondiente a la vigueta *R4184*, donde se observa que la sección analizada presenta una respuesta homogénea a lo largo del recorrido y se identifica claramente la localización de los apoyos de madera. Como ejemplo del grupo *G-R* se presentan los radargramas de las viguetas *R4138* y *R4193*. En el radargrama de la vigueta *R4138* se observan las reflexiones en las irregularidades en el interior de la vigueta en el metro 1, 1.4 y 2.6. En el caso de la vigueta *R4193* se observan anomalías en el metro 0.7, 1.5 y 2.5. Estas anomalías en las trazas son las que condicionan que estas viguetas se clasifiquen como *G-R*.

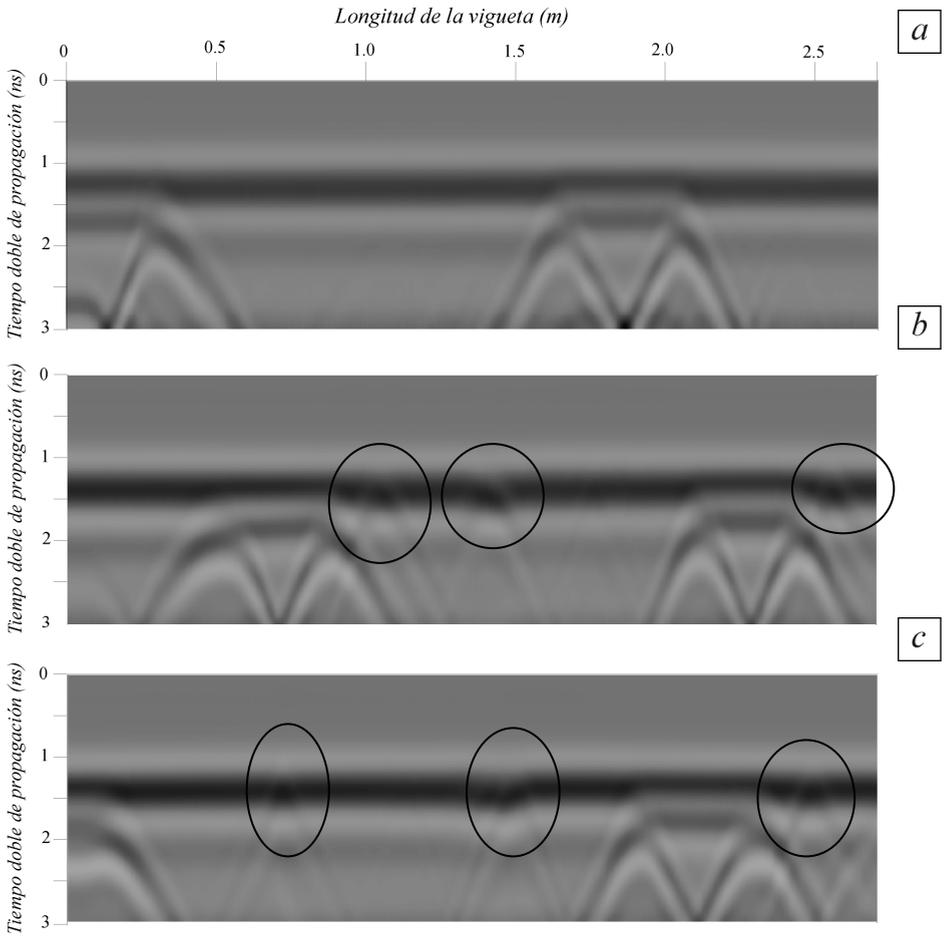


Figura 9.8.- Radargrama obtenido al desplazar la antena a lo largo de la cara de la vigueta de *Pinus radiata* D. Don. R4184 perteneciente al grupo G1 (a) y de las viguetas R4138 (b) y R4193 (c) pertenecientes al grupo G-R.

En la tabla 9.5 quedan reflejados los valores medios y característicos obtenidos de las propiedades mecánicas y la densidad de las viguetas. Se comprueba como el grupo G1 cumple los requisitos para pertenecer al grupo C18. Asimismo, se confirma como el grupo de viguetas G-R no cumple los requisitos mínimos para clasificarse como C14. Estos resultados muestran que este tipo de clasificación

presenta un gran acuerdo entre la clasificación establecida con georradar y la clasificación resistente de la norma UNE-EN 338:2003.

Tabla 9.5.- Propiedades mecánicas del lote de *Pinus radiata* D. clasificado en los grupos *G1* y *G-R* por medio de georradar a partir de la identificación de singularidades en el interior de la vigueta.

Clasificación georradar	Nº viguetas	Densidad (kg/cm ³)		Módulo de elasticidad medio (N/mm ²)	Módulo de resistencia a flexión (N/mm ²)		Clase resistente UNE-EN 338:2003
		ρ_m	$\rho_{m,k}$	$E_{m,l}$	f_m	$f_{m,k}$	C
<i>G1</i>	26	478.0	409.8	9123	33.1	18.2	C18
<i>G-R</i>	74	449.9	387.0	8170	23.9	9.5	R

9.5- COMPARACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN RESISTENTE POR DISTINTOS MÉTODOS

A continuación se comparan las clases resistentes asignadas con cada uno de los métodos de clasificación empleados. En la tabla 9.2 se detalla la calidad resistente según la norma UNE-EN 338:2003 del lote de viguetas donde se observa que el grupo formado por 70 vigas presenta una calidad *C18* y el grupo integrado por 30 viguetas se considera de rechazo.

Si comparamos estos resultados con los obtenidos por clasificación visual y por la técnica de ultrasonidos se comprueba que al realizar la clasificación siguiendo estas metodologías se está subestimando la calidad resistente de la madera analizada. Como se aprecia en la tabla 9.6, al constituir los grupos *ME-1 +ME-2* y el *US-C18*, la calidad resistente de estos grupos desciende hasta la clase *C14*, en lugar de mantenerse en la *C18*. Sin embargo, el grupo *G1* creado a partir del georradar estima de forma más eficaz la clase resistente, pues efectivamente este grupo tiene una calidad *C18*. De esta forma se aprecia una primera mejora que aporta la clasificación resistente por medio de georradar frente a los otros métodos aplicados.

Tabla 9.6.- Comparación de clases resistentes asignadas según la norma UNE-EN 338:2003 al lote de viguetas de *Pinus radiata* D. a partir de diferentes procedimientos de clasificación: visual, ultrasonidos y georradar.

<i>Método clasificación</i>	<i>Grupo clasificación</i>	<i>Nº Viguetas</i>	<i>Clase resistente UNE-EN 338:2003</i>
<i>Visual</i>	<i>ME-1 +ME-2</i>	17	<i>C14</i>
	<i>R</i>	83	<i>R</i>
<i>Ultrasonidos</i>	<i>US-C18</i>	87	<i>C14</i>
	<i>US-R</i>	13	<i>R</i>
<i>Georradar</i>	<i>G1</i>	26	<i>C18</i>
	<i>G-R</i>	74	<i>R</i>

A continuación y con el objeto de establecer una comparación entre los distintos métodos empleados para catalogar las viguetas de madera, se determina el grado de acierto de cada uno de ellos, a partir del análisis en cada grupo del porcentaje de viguetas que son *C18*. En la tabla 9.7 se muestran los resultados obtenidos de esta clasificación, indicándose para cada grupo el número de viguetas y el porcentaje de viguetas de cada uno de estos grupos que son de clase *C18* y el error que supone el haberlas incluido en ese grupo.

Tabla 9.7.- Porcentajes de las viguetas que son de clase *C18* de cada uno de los grupos obtenidos y el error que se comete por los diferentes métodos de clasificación aplicados: visual, ultrasonidos y georradar.

<i>Método clasificación</i>	<i>Grupo clasificación</i>	<i>Nº Viguetas</i>	<i>Porcentaje del grupo que son C18</i>	<i>Porcentaje de error en el grupo</i>
<i>Visual</i>	<i>ME-1 +ME-2</i>	17	82%	18%
	<i>R</i>	83	68%	68%
<i>Ultrasonidos</i>	<i>US-C18</i>	87	77%	23%
	<i>US-R</i>	13	30%	30%
<i>Georradar</i>	<i>G1</i>	26	92%	8%
	<i>G-R</i>	74	63%	63%

Comparando el método de georradar y el método visual se observa que se comete un error del 8% al clasificar todas las viguetas del *G1* como de uso estructural frente al 18% que se comete al clasificarlas como *ME-1+ME-2* por medio del método visual. De las viguetas consideradas como de rechazo, sin embargo, habría un 63% que no lo serían con el método de georradar, frente al 68% de error que se comete al clasificarlas con el método visual.

En lo que respecta a la comparación entre la fiabilidad del método de clasificación por medio de ultrasonidos y el método de georradar se distinguen dos aspectos. Por un lado, con la técnica de ultrasonidos se comete un error del 30% al catalogar las viguetas de rechazo frente al 63% de error que se comete con el de georradar. No obstante, el método de ultrasonidos queda muy del lado

de la inseguridad ya que un 23% de las viguetas que se consideran como estructurales no lo son, frente al 8% de error para el método de georradar.

La velocidad de propagación longitudinal de las ondas ultrasónicas no es una buena predictora por sí misma de las propiedades mecánicas de la madera. No obstante, sí puede aportar información que mejore la clasificación realizada por otros métodos (véase apartado 9.1.3).

Cualitativamente cabe esperar velocidades de propagación mayores en aquellas piezas que son más homogéneas, es decir, las viguetas de clase $C > C18$. Por el contrario, cuanto mayor sea el número de irregularidades (nudos, fisuras, grietas, etc.) menor debe ser la velocidad y por tanto menor su resistencia a flexión. Para poder estudiar la relación entre estos 2 parámetros en la figura 9.9 se representa un diagrama de puntos de modo que la ordenada de cada punto es el valor del f_m y la abcisa es la v_p correspondiente a cada una de las viguetas. Además se añade la información de la clasificación por medio de georradar. Las viguetas del grupo GI se representan con un punto gris y las del grupo $G-R$ con un punto verde.

En la gráfica se observa que existe una tendencia general por la que se pueden relacionar mayores valores de f_m con mayores valores de v_p . Sin embargo, dada la dispersión de los puntos, no es sencillo encontrar una expresión que relacione ambos módulos tal y como se deduce del bajo valor de R^2 obtenido.

De la comparación de estos dos métodos es interesante resaltar una serie de aspectos. En primer lugar, como era de esperar, la v_p aumenta conforme aumenta el f_m . Al analizar el grupo GI (clasificado por georradar) se comprueba como el 100% de las viguetas clasificadas como GI presentan v_p mayores a la velocidad de paso de la calidad $C18$ asignada por el método de ultrasonidos.

No obstante, en cuanto al grupo $G-R$ se observa que el comportamiento generalizado es mucho más disperso que para el GI , ya que el 63% de las muestras presentan una $v_p > 4685$ m/s y $f_m > 18$ MPa. No sólo eso, sino que además

dentro del grupo *G-R* hay algunas viguetas que presentan velocidades v_P superiores a 5500 m/s. Este resultado hace cuestionar la eficacia del análisis de la clase resistente por medio de las ondas ultrasónicas frente al georradar a la hora de considerar los rechazos.

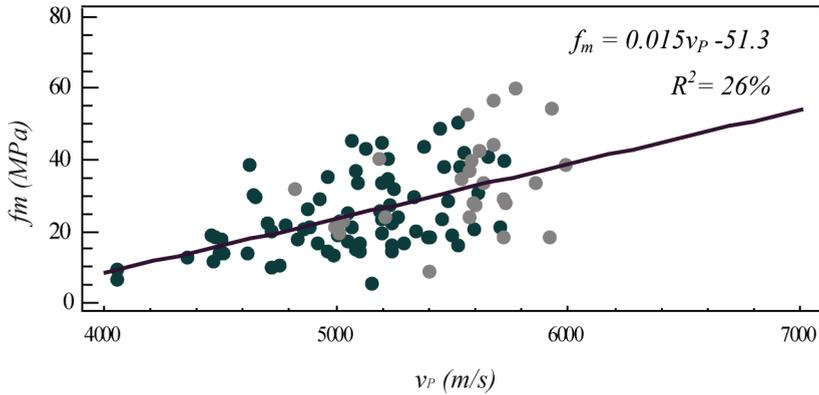


Figura 9.9.- Relación entre velocidades de propagación longitudinal de las ondas ultrasónicas con el módulo de resistencia a flexión. Las vigas de la clasificación por medio de georradar pertenecientes al grupo *GI* se representan con un punto gris y las del grupo *G-R* con uno verde.

9.6.- SÍNTESIS DE RESULTADOS

Las principales conclusiones que se obtienen de la clasificación desarrollada por medio de georradar son las siguientes. En primer lugar, la gran ventaja que supone el empleo del georradar como sistema de clasificación, ya que tanto el dispositivo de registro empleado como el procesamiento de los registros es muy sencillo (desplazamiento de la antena por una sola de las caras) y a pesar de ello los resultados son muy prometedores.

En segundo lugar, en cuanto a los resultados de clasificación obtenidos por los distintos métodos se comprueba que el método del georradar es el más eficaz a la hora de estimar la calidad resistente, ya que los grupos estructurales generados por los otros métodos (visual y ultrasonidos) la subestiman a *C14*. Además, es importante resaltar que mediante la técnica de georradar se consigue disminuir de una forma considerable el error cometido al asignar la categoría *C18* a viguetas cuyos ensayos de rotura muestran posteriormente que no lo son. El error que se comete en esta evaluación y con esta técnica es tan sólo del 8% frente al 18% de error que se comete con las técnicas visuales, y el 23% para el caso de ultrasonidos. Por otra parte, en cuanto al error cometido al rechazar viguetas para uso estructural, cuando realmente los ensayos muestran que son *C18*, se obtiene un error menor con la evaluación realizada con la técnica de georradar que con la visual.

Finalmente, se establece que los resultados de este estudio inicial realizado con el georradar orientados a analizar la calidad resistente de la madera tiene un gran potencial y su desarrollo en combinación con otros métodos puede proporcionar excelentes resultados.

Ahora bien, para poder aplicar esta técnica como clasificadora con mayor fiabilidad es necesario depurar el proceso, sobre todo en lo que respecta al sistema definido para designar las viguetas de rechazo, ya que el error es del

63%. Este error es debido a que en algunos casos las viguetas asignadas como del grupo *G-R* presentan valores de $f_m > 18$ MPa. Como ejemplo de estos casos en la figura 9.10 se muestran los radargramas de las viguetas *R4118* y *R4103*, estando ambas dentro del grupo *G-R*. Sin embargo, sus módulos de resistencia a flexión son $f_m = 35.4$ MPa y $f_m = 24.9$ MPa respectivamente.

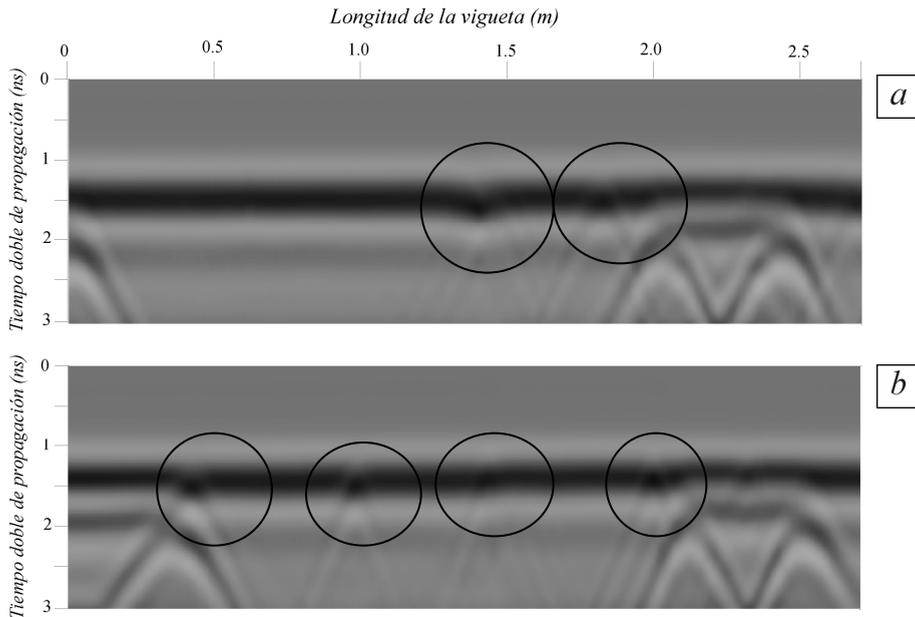


Figura 9.10.- Radargramas de las viguetas *R4118* y *R4103* clasificadas dentro del grupo *G-R* mediante georradar.

Estas viguetas se clasifican como *G-R*, ya que como se observa en la figura se presentan anomalías en el metro 1.4 y 1.8 en el radargrama de la viga *R4118* y en el metro 1.0, 1.4, 2.0 y 2.2 del radargrama de la viga *R4103*. Esto quiere decir que a pesar de la existencia de ciertas irregularidades en la pieza su calidad resistente sigue siendo elevada. Por tanto el siguiente paso para disminuir el nivel de error que se comete al clasificar este tipo de viguetas como de rechazo sería profundizar en el procesamiento de los registros. Para ello se deberá buscar un procedimiento por medio del cual se pueda establecer la relación entre la

dimensión de la anomalía y la reducción de resistencia que supone su aparición y con ello dentro del grupo de madera aceptada para uso estructural establecer diferentes calidades resistentes.

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

CAPÍTULO 10

CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Tras una breve introducción en la que se describe la situación actual del empleo de la madera estructural en edificación y las técnicas semi y no destructivas que se emplean en la inspección y análisis de su calidad resistente, se ha realizado una revisión de la teoría de la propagación de ondas electromagnéticas, así como una descripción de las principales propiedades físicas de la madera y de su proceso de secado. A continuación se describen los ensayos realizados con el georradar, pioneros en nuestro país, con el objeto de validar la técnica como herramienta en la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural.

En primer lugar se estudian por medio de georradar la anisotropía dieléctrica, la variación del contenido de humedad (CH) y la variación de densidad (ρ). En el estudio de cada uno de estos parámetros, habida cuenta de lo novedoso de esta aplicación, se abordan tanto aspectos metodológicos como de calidad y fiabilidad de los resultados obtenidos. A continuación se comparan los resultados obtenidos con georradar al evaluar el CH y la ρ con dos técnicas no destructivas emergentes en el campo de estudio de la madera estructural (el resistógrafo y la técnica de ultrasonidos). Seguidamente, se desarrolla una metodología de clasificación resistente por medio de georradar de la madera estructural nueva y se realiza un estudio pormenorizado de los beneficios de la clasificación resistente de ésta frente al resto de metodologías actuales normalizadas o en fase de estudio.

Finalmente, en este último capítulo se recogen las principales conclusiones que se desprenden de los ensayos y análisis respecto a todos los puntos tratados y se efectúan recomendaciones y líneas de investigación en las que se considera interesante seguir profundizando en su conocimiento.

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

10.1.-CONCLUSIONES

En este apartado se recopilan las conclusiones más relevantes sobre el estudio de las principales propiedades físicas mediante georradar, de la comparación con otras técnicas no destructivas en la evaluación de las principales propiedades físicas y del análisis de la calidad resistente de la madera.

10.1.1.-CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO DE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA MEDIANTE GEORRADAR

En primer lugar, hay que destacar que para la correcta interpretación de los registros el análisis del cambio de polaridad de las ondas al reflejarse en diferentes interfases realizado aporta una información determinante y sirve como herramienta clave para la posterior interpretación de los registros y la elección del criterio de la toma de lecturas en los mismos.

A partir del estudio realizado en referencia a las principales propiedades físicas de la madera las principales conclusiones se detallan a continuación.

A.-Anisotropía dieléctrica

Las diferencias encontradas en el comportamiento del campo al propagarse de forma paralela o perpendicular se interpretan como consecuencia de la diferencia en la polarización que sufre el medio dependiendo de la dirección del campo eléctrico respecto a las fibras. Las principales conclusiones deducidas del estudio realizado a este respecto son:

- Se cumple para todas las viguetas estudiadas que la $v_{(T)} > v_{(L)}$ independientemente de la densidad de la madera y por tanto siempre la $\varepsilon_{(L)} > \varepsilon_{(T)}$.
- La amplitud normalizada cuando el campo eléctrico es perpendicular es mayor que cuando es paralelo, independientemente de la onda estudiada (directa o reflejada) y de la ρ de la madera analizada.
- La variabilidad de amplitudes normalizadas de la onda reflejada de una especie a otra es mucho mayor que en el caso de la onda directa.
- La frecuencia central del espectro es menor cuando el campo eléctrico es perpendicular que cuando es paralelo y esta frecuencia central alcanza valores de amplitud relativa mayores cuando es perpendicular que cuando es paralelo. Ahora bien, cada una de las especies presenta una variación distinta de la amplitud de la frecuencia central que, en principio, no está relacionada directamente con la densidad.

Por otra parte, en cuanto a la anisotropía dieléctrica en las diferentes direcciones perpendiculares del campo eléctrico respecto a la fibra se concluye que a la frecuencia de radiación con la que se trabaja (1.6 GHZ de frecuencia central) no existe diferencia apreciable en las v , las amplitudes normalizadas de las ondas directas y reflejadas y en los espectros en las diferentes secciones independientemente de la densidad de la madera.

B.-Contenido de humedad

Como consecuencia de la presencia de agua, las propiedades dieléctricas de la madera aumentan y dan lugar a variaciones en la v , en las amplitudes y en los correspondientes espectros de las señales. Del análisis de la variación que se

produce en estos parámetros como consecuencia de la variación del CH , se concluye que:

- la disminución del CH , durante el proceso de secado del *Pinus pinaster* Ait. desde su estado en verde hasta la HEH , genera un incremento de la velocidad de propagación. De hecho se obtienen correlaciones muy elevadas entre el CH y la v o ε , magnitud derivada de la velocidad ($R^2 > 90\%$). Este comportamiento de la v también se observa de forma cualitativa en el resto de especies de diferente ρ evaluadas.
- La disminución en el CH da lugar a un aumento de la amplitud normalizada, tanto de la onda directa como de la reflejada.
- Hay un excelente grado de acuerdo entre la amplitud de la onda directa, para cualquiera de las direcciones prospectadas, con respecto a la variación del CH ($R^2 > 74\%$). Esto tiene consecuencias muy interesantes desde el punto de vista de la aplicación de la técnica, ya que la onda directa es la mas sencilla de registrar e identificar.
- Con todos los dispositivos de registros se observa claramente el efecto que produce en el espectro de frecuencias el descenso del CH . Conforme se van secado las viguetas las amplitudes relativas de las frecuencias centrales aumentan significativamente.

C.- Variación de densidad

A la vista de los resultados se concluye que:

- independientemente de la dirección de registro respecto a las fibras, se comprueba que a mayor densidad las v , las amplitudes normalizadas de la onda directa y la amplitud de la frecuencia central del espectro son menores. No obstante, este último parámetro no resulta fiable para este

análisis puesto que no se cumple de igual forma para las maderas de diferente densidad.

- Las amplitudes normalizadas de las ondas reflejadas no siguen un patrón de comportamiento único frente a la ρ .
- Al separar la antena 35 cm de la vigueta se obtienen conclusiones muy interesantes, ya que se trata de un dispositivo de registro que permite evaluar la ρ sin necesidad de estar en contacto directo con la misma. No obstante, para obtener ajustes representativos entre la ρ y la amplitud normalizada de la onda reflejada en la superficie de la madera, se han de tener en cuenta dos aspectos. Por una parte, como mínimo el 35% de la huella de la antena debe estar cubierta por la madera. Por otra, es necesario buscar el equilibrio entre la distancia de separación antena-vigueta y el porcentaje de la huella que está cubierto por el material circundante (efecto de contorno).

De esta forma, al emplear el georradar en el análisis de las principales propiedades físicas de la madera, el primer objetivo de la tesis puede considerarse plenamente logrado, ya que se obtiene con éxito información sobre la anisotropía dieléctrica de la madera, la variación del CH y la variación de ρ .

Los valores obtenidos de la relación entre la $\epsilon_{(L)}$ y $\epsilon_{(T)}$ están en perfecto acuerdo con los estudios realizados por otros autores por técnicas de microondas. Pero no sólo eso, sino que por otra parte y lo que es más relevante, supone un gran avance ya que este fenómeno es perfectamente identificable y por tanto se distingue de las posibles anomalías o irregularidades causadas por diferentes alteraciones de la madera a esta frecuencia de radiación.

Al no registrarse diferencia significativa en los parámetros de onda en las distintas direcciones perpendiculares del campo eléctrico respecto a la fibra, se simplifica significativamente la adquisición de registros. De esta forma, cuando se inspecciona una estructura de madera en servicio no es necesario adquirir los registros de todas las viguetas siempre en la misma dirección perpendicular de estudio respecto a la fibra. Esto facilita muchísimo el proceso, ya que al estudiar viguetas que forman parte de una estructura no siempre todas las secciones son accesibles y han sido cortadas de la misma sección del árbol.

*Por una parte, la variación del CH en viguetas de *Pinus pinaster* Ait. se puede evaluar con un alto grado de confianza por medio de georradar. Por otra parte, el estudio realizado con las demás especies apuntan a que se pueden obtener resultados igualmente interesantes si se evalúa su comportamiento en su rango completo de variación de CH y en las diferentes direcciones de propagación del campo respecto a las fibras. Todo ello corrobora la hipótesis de que por medio de la técnica del georradar se puede obtener un parámetro indicador de la variabilidad del CH para una misma vigueta a lo largo del tiempo o definir zonas de CH diferencial a lo largo de la misma.*

Las maderas menos densas presentan propiedades dieléctricas menores y además estas diferencias se pueden identificar con el equipo y antena empleados.

10.1.2.-CONCLUSIONES DE LA COMPARACIÓN CON OTRAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS EN LA EVALUACIÓN DE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES FÍSICAS.

Las conclusiones de la comparación de diferentes técnicas no destructivas y el georradar a la hora de evaluar la variación del CH y de la ρ se resumen a continuación.

A.-Contenido de humedad

- La amplitud media del resistógrafo por vigueta (AR_{mv}) no es un parámetro que refleje con fiabilidad la variación del CH dadas las bajas correlaciones obtenidas ($R^2 < 35\%$).
- Las v_p están influidas por el CH , ya que conforme disminuye el CH la velocidad aumenta significativamente y a la inversa. Ahora bien, las correlaciones obtenidas entre ambos parámetros no superan valores de $R^2 > 50\%$ para el caso del *Pinus pinaster* Ait.

B.-Variación de densidad

- Las AR_{mv} están fuertemente influidas por la variación de la ρ . No obstante, no resulta una técnica tan interesante para evaluar la diferencia de ρ absoluta entre viguetas de diferentes especies y densidades dadas las bajas correlaciones obtenidas ($R^2 < 50\%$).
- La v_p a lo largo de una vigueta no aporta información significativa en relación a la ρ de la misma, ya que se obtienen correlaciones especialmente bajas. Por último y como era de esperar la correlación aumenta al estudiar el E_d , ya que para su cálculo interviene la ρ .

Los resultados ponen claramente de manifiesto que el georradar puede ser considerado como una herramienta más fiable para evaluar el estudio de la variación del CH y de la ρ de viguetas de madera, tanto si el análisis es a partir de las v como si es a partir de las amplitudes, ya que las correlaciones obtenidas en todos los casos son muy superiores. De esta forma se concluye que el segundo objetivo de la tesis se ha cumplido con éxito.

10.1.3.-CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE LA CALIDAD RESISTENTE DE LA MADERA POR MEDIO DE GEORRADAR

A partir de la clasificación resistente por medio de georradar y su posterior comparación con otras técnicas de clasificación se concluye que:

- el método de clasificación visual y la técnica de ultrasonidos subestiman la calidad resistente de la madera.
- El grado de acierto al considerar las viguetas tanto como de uso estructural como de rechazo es significativamente inferior con la clasificación visual que el obtenido al realizar la clasificación por medio de georradar. De hecho, el método de georradar estima de forma más eficaz la clase resistente.
- Se demuestra que el método de ultrasonidos queda muy del lado de la inseguridad ya que un alto porcentaje de las viguetas se consideran como estructurales a pesar de no serlo. Mientras que con el georradar este error se reduce a la tercera parte.
- La aplicación del georradar supone otra gran ventaja, ya que tanto el dispositivo de registro empleado como el procesamiento de los registros

es muy sencillo (desplazamiento de la antena por una sóla de las caras) y a pesar de ello los resultados son muy prometedores.

Finalmente, se establece que los resultados de esta clasificación preliminar realizada con el georradar orientada a analizar la calidad resistente de la madera tiene un gran potencial y su desarrollo en combinación con otros métodos puede proporcionar excelentes resultados. Con ello se alcanza el tercer objetivo de la tesis de forma satisfactoria.

Ahora bien, para poder aplicar esta técnica como clasificadora con mayor fiabilidad es necesario depurar el proceso, sobre todo en lo que respecta al sistema definido para designar las viguetas de rechazo. Esta mejora pasa por la identificación en los radargramas de cuales son aquellas anomalías o singularidades que hacen mermar la calidad resistente de la madera y son registradas por georradar.

10.2.- FUTUROS TRABAJOS Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Para finalizar este capítulo se proponen las líneas de investigación en las que se considera más interesantes profundizar para avanzar e implementar la aplicación de la técnica no destructiva del georradar en la inspección, el diagnóstico y el análisis resistente de la madera estructural.

A.-Propuestas metodológicas

Tomando como punto de partida los resultados de este trabajo y como continuación de estas investigaciones se aconseja profundizar en los siguientes aspectos en cuanto a la metodología de adquisición de registros.

Es necesario para alcanzar la precisión requerida en los registros el desarrollo de prototipos instrumentales que mejoren y faciliten la adquisición en los siguientes aspectos:

- el desplazamiento de la antena a lo largo de las viguetas se debería realizar por medio de algún dispositivo automatizado para permitir que la adquisición se realice de forma más cómoda para el operador.
- El dispositivo deberá desplazar la antena a velocidad constante y deberá ser lo suficientemente versátil como para que la adquisición de registros se pueda realizar también a cierta distancia de separación de la vigueta.
- También se deberá tener en cuenta en su desarrollo que en la inspección de madera que forma parte de una estructura, en muchos casos se trata de vigas de difícil acceso y por tanto se hace necesario poder manipular la antena a cierta distancia del operador.

En cuanto al procesado de registros es interesante desarrollar una serie de algoritmos y desarrollo de software que permitan automatizar el procesado y análisis de los mismos, como son:

- desarrollo de macros que permitan de forma automática identificar los tiempos de llegada de las ondas y almacenar las lecturas de tiempos, el registro de las amplitudes y su normalización.
- Desarrollo de macros para el procesado por lotes y con ello el cálculo automatizado de velocidades de propagación y constantes dieléctricas a partir de las lecturas de tiempo de propagación y amplitudes registradas.
- Desarrollo de algoritmos específicos para la selección de trazas en un radargrama y el cálculo automático de sus espectros de frecuencias.

B.- Propuestas para el análisis de principales propiedades físicas de la madera

A lo largo de esta tesis se analiza la capacidad del georradar para estudiar la anisotropía dieléctrica de la madera y la sensibilidad de la técnica para detectar la variación del *CH* por medio de georradar con una antena de 1.6 GHz. Estos análisis se realizan para diferentes especies y de forma pormenorizada para el *Pinus pinaster* Ait. Dada la gran heterogeneidad que caracteriza a la madera, el estudio que se ha realizado debería ser completado, siguiendo el protocolo de estudio definido para el *Pinus pinaster* Ait., tanto para las especies más comunes que actualmente encontramos en las estructuras de edificación susceptibles de ser rehabilitadas, como para las que actualmente se comercializan.

En cuanto al estudio de la variación de densidad también resultaría interesante completar el estudio realizado con el análisis de un mayor número de maderas y así completar el patrón de comportamiento para el rango completo de densidades e intentar diferenciar en su comportamiento las coníferas de las frondosas.

C.-Propuestas de mejora de la clasificación resistente de la madera estructural por georradar

Con respecto al análisis de la calidad resistente se propone mejorar la metodología atendiendo a dos aspectos. En primer lugar, en lo que respecta a la adquisición de registros se trataría de diseñar dispositivos de registros que aceleren el proceso de la toma de datos para facilitar el procesado por lotes. En segundo lugar, en cuanto al análisis y procesado de los mismos:

- con objeto de disminuir el nivel de error que se comete al clasificar este tipo de viguetas como de rechazo sería necesario profundizar en el procesado de los registros. Para ello se deberá buscar un procedimiento por medio del cual se pueda establecer la relación entre la dimensión de la anomalía y la reducción de resistencia que supone su aparición.
- Definir la capacidad de resolución del georradar para identificar las singularidades de la madera: tamaño de nudo mínimo detectable, distancia entre ellos, distancia a la arista, desviación de la fibra, etc.
- Desarrollo de una metodología de procesado de registros que permita a partir de una serie de criterios cuantificadores clasificar las viguetas asociándole una clase resistente.
- Modelado de las principales singularidades de la madera como herramienta de detección y contrastación por medio de la correlación cruzada del grado de acierto entre el modelado y la singularidad real.

Para ello será necesario realizar pruebas con el georradar sobre partidas de viguetas de madera de las especies más empleadas en edificación y comparar los resultados con las técnicas más comúnmente empleadas.

Tras la elaboración del catálogo de clasificación por medio de georradar y la asignación de clases resistentes por medio de los métodos clásicos tanto destructivos como no destructivos se establecerá la nueva clasificación basada en la integración de todos los métodos no destructivos analizados. De tal forma que este nuevo protocolo aporte una alternativa a la actual clasificación.

D.-Nuevas áreas de investigación en la madera estructural

La aplicación del georradar a la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera desarrollada a lo largo de esta tesis es un primer paso hacia el desarrollo de una metodología no destructiva eficaz y objetiva. No obstante, como nueva línea de investigación son muchos los aspectos que pueden ser estudiados. A continuación se apuntan algunos de los que se consideran que pueden ser más interesantes:

- adaptación de nuevos sistemas de adquisición de registros específicos para la madera que faciliten la interpretación de los mismos y aporte mayor información sobre las propiedades dieléctricas de la madera como la adaptación de sistemas de registros sísmicos con una o varias antenas: Common Mid Point (CMP), reflexión y refracción de gran ángulo (WARR), transiluminación, etc.
- Adquisición de registros con antenas de mayor resolución que en los últimos años se han presentado en el mercado (2.5 GHz) y comparar si mejoran los resultados obtenidos en comparación con la antena empleada en esta tesis.
- Otro tema interesante en relación al anterior, es desarrollar sistemas de adquisición de registro con antenas de mayor resolución (2.5 GHz) que permitan llegar a obtener imágenes 3D del comportamiento electromagnético del interior de las piezas.

- Por último y fundamental aplicar la técnica a la inspección y diagnóstico en casos reales en las que las vigas o viguetas están empotradas o bajo capas de otros materiales (hormigón, pétreos, etc.).

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

RESEÑAS BIBLIOGRÁFICAS

Acuña L., Llorente A., Casado M. y Herrera C. (2001) "*Clasificación de la madera de Pinus Sylvestris L. mediante ensayos no destructivos*". Actas del III Congreso Forestal Español, Granada, España.

Acuña L., Casado M. y Basterra A. (2004) "*Evaluación resistente no destructiva de madera de Pinus pinaster Ait. de las regiones de procedencia "Gredos" y "Burgos-sierra de Oña"*". Actas del 1º Congreso Iberico a Madeira na Construção, Guimaraes- Braga, Portugal.

Acuña L., Diez R. y Casado M. (2006) "*Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación al Pinus pinaster Ait.*". Boletín CIDEU, no. 2, pp. 7-26.

al Hagrey S.A. y Muller C. (2000) "*GPR study of pore water content and salinity in sand*", Geophysical Prospecting, vol. 48, no. 1, pp. 63-85.

al Hagrey S.A. (2007) "*Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity*", Journal of Experimental Botany, vol. 58, no. 4, pp. 839-854.

Álvarez H. y Seoane I (1983) "Contenido de humedad de la madera según su empleo". Editorial AITIM, no.114, pp. 4-9.

Álvarez L., Basterra A., Casado M. y Acuña L. (2005) "*Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en estructura de madera*". Actas del I Jornadas de Investigación en Construcción, Madrid, España.

Annan A.P. (2003) "*Ground Penetrating Radar: Principles, Procedures and Applications*". Sensors And Software Inc. Mississauga.

Anthony R.W., Pandey A.K. y Arnette C.G. (1998a) "*Inspection and assesment of timber piles*". Actas del 5th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Suiza.

Anthony R.W., Renforth L. y Nelson R.F. (1998b) "*Non destructive strength evaluation of Pinus sylvestris poles in the U.K.*". Actas del 5th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Suiza.

Arcone S.A. (1996) "*High resolution of glacial ice stratigraphy: A ground-penetrating radar study of Pegasus runway, McMurdo station, Antarctica*", Geophysics, vol. 61, no. 6, pp. 1653-1663.

Argüelles R. y Arriaga F. (2003) "*Estructuras de madera. Diseño y cálculo*". Editorial AITIM, 712 pp.

Arriaga F. (1999) "*La madera estructural en la construcción*". Actas del I Congreso Nacional de la Madera, Madrid, España.

Arriaga F., Peraza F., Esteban M., Bobadilla I. y García F. (2002) "*Intervención en estructuras de madera*". Editorial AITIM, 507 pp.

Arriaga F., Íñiguez G. y Esteban M. (2005) "*Assessment of strength and stiffness properties using longitudinal stress wave on structural gross cross section timber of radiata pine (Pinus radiata D. Don)*". Actas del 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Hannover, Alemania.

Arriaga F., Iniguez G., Esteban M. y Fernandez-Golfin J.I. (2006) "*Structural Tali timber (Erythrophieum ivorense A. Chev., Erythrophleum suaveolens Brenan.): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods*", Holz Als Roh-und Werkstoff, vol. 64, no. 5, pp. 357-362.

Avramidis S. y Zwick R.L. (1992) "*Exploratory Radiofrequency Vacuum Drying of 3 Bc Coastal Softwoods*", Forest Products Journal, vol. 42, no. 7-8, pp. 17-24.

Avramidis S. y Liu F. (1994) "*Drying Characteristics of Thick Lumber in A Laboratory Radiofrequency Vacuum Dryer*", Drying Technology, vol. 12, no. 8, pp. 1963-1981.

Avramidis S., Liu F. y Neilson B.J. (1994) "*Radiofrequency Vacuum Drying of Softwoods - Drying of Thick Western Redcedar with Constant Electrode Voltage*", Forest Products Journal, vol. 44, no. 1, pp. 41-47.

Avramidis S. y Zwick R.L. (1996) "*Commercial-scale RF/V drying of softwood lumber .2. Drying characteristics and lumber quality*", Forest Products Journal, vol. 46, no. 6, pp. 27-36.

Avramidis S., Zwick R.L. y Neilson J.B. (1996) "*Commercial-scale RF/V drying of softwood lumber .1. Basic kiln design considerations*", Forest Products Journal, vol. 46, no. 5, pp. 44-51.

Baradit E., Aedo R. y Correa J. (2006) "*Knots detection in wood using microwaves*", Wood Science and Technology, vol. 40, no. 2, pp. 118-123.

Barsottelli M.A., Dourado T.C. y Machado S. (2006) "*The water content determination using AVA analysis of GPR Data acquired around Abaeté Lagoon, Salvador (Brasil)*". Actas del 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, Ohio, EE. UU.

Basterra A., Ramón G., Barranco I., López G., Acuña L., Relea E. y Casado M. (2004) "*Non destructive strength evaluation of Pinus sylvestris poles in the U.K.*". Actas del 1º Congresso Iberico a Madeira na Construção, Guimaraes- Braga, Portugal.

Basterra A., Ramón G., Barranco I., López G., Acuña L. y Casado M. (2005) "*Avance de propuesta metodológica para el diagnóstico y análisis de estructuras de madera históricas*". Actas del IV Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cadiz, España.

Beall F. C. (2002) "*Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties*". Wood Science and Technology, no. 36, pp. 197-212.

Beall F.C. (2007) "*Industrial applications and opportunities for non destructive evaluation of structural wood members*", *Maderas.Ciencia y Tecnología*, vol. 9, no. 2, pp. 127-134.

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.

Bertolini C., Brunetti M., Cavallero P. y Macchioni N. (1998) "*A non destructive diagnostic method on ancient timber structures: some practical application examples*". *Actas del 5th World Conference on Timber Engineering*, Montreaux, Suiza.

Bethge K., Mattheck C. y Hunger E. (1996) "*Equipment for detection and evaluation of incipient decay in trees*", *Arboricultural Journal*, vol. 20, pp. 13-37.

Bobadilla I., Esteban M., Íñiguez G., Arriaga F., Ballarín D. y Monteagudo J. (2007) "*Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del módulo de elasticidad*", *Informes de la Construcción*, vol. 59, no. 506, pp. 107-116.

Brancheriau L. y Bailleres H. (2003) "*Use of the partial least squares method with acoustic vibration spectra as a new grading technique for structural timber*", *Holzforschung*, vol. 57, no. 6, pp. 644-652.

Brancheriau L. (2006) "*Influence of cross section dimensions on Timoshenko's shear factor - Application to wooden beams in free-free flexural vibration*", *Annals of Forest Science*, vol. 63, no. 3, pp. 319-321.

Bucur V. (1995) "*Acoustic of wood*". Editorial New York: CRC Press Inc., 121pp.

Bucur V. (2003) "*Nondestructive Characterization and Imaging of Wood*". Editorial Springer (Series in Wood Science), 354 pp.

Butnor J.R., Doolittle J.A., Kress L., Cohen S. y Johnsen K.H. (2001) "*Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States*", *Tree Physiology*, vol. 21, no. 17, pp. 1269-1278.

Butnor J.R., Doolittle J.A., Johnsen K.H., Samuelson L., Stokes T. y Kress L. (2003) "*Utility of ground-penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems*", *Soil Science Society of America Journal*, vol. 67, no. 5, pp. 1607-1615.

Cabrera J.M., López F.J. y Agulló F. (1993) "*Óptica electromagnética*". Editorial Addison-Wesley Iberoamericana, 256 pp.

Cai J. y Mcmechan G.A. (1995) "*Ray-Based Synthesis of Bistatic Ground-Penetrating Radar Profiles*", *Geophysics*, vol. 60, no. 1, pp. 87-96.

Capuz R. (2003) " *Métodos de ensayo no destructivos para la estimación de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas*", Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Valencia, España.

Capuz-Lladró 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.

Carballo J., Hermoso E. y Fernández-Golfin J.I. (2007) " *Evaluación de técnicas vibratorias en la clasificación de la madera aserrada de pino radiata destinada a fines estructurales*". Actas del 11º Congreso Español de Ensayos No Destructivos, Gijón, España.

Carballo J., Hermoso E. y ernandez-Golfin J.I. (2008) " *Influencia del tamaño en la predicción del módulo de elasticidad de vigas de madera de Pinus pinaster con técnicas vibratorias*". Actas del II Jornadas de Investigación en Construcción, Madrid, España.

Carcione J.M. (1996a) " *Ground-penetrating radar: Wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media*", Geophysics, vol. 61, no. 6, pp. 1664-1677.

Carcione J.M. (1996b) " *Wave propagation in anisotropic, saturated porous media: Plane-wave theory and numerical simulation*", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 99, no. 5, pp. 2655-2666.

Casado M., Pinazo O., Martínez C., Vegas F., Pando V., Acuña L., Relea E., Basterra A., Ramón G. y López G. (2005) " *Determinación de la capacidad resistente mediante métodos no destructivos*". Actas del IV Congreso Forestal Español, Zaragoza, España.

Casado M., Acuña L., Vecilla D., Basterra A., Pando V. y Relea E. (2007) " *Determinación de la capacidad resistente de madera estructural de Pinus sylvestris mediante PLG*". Actas del 11º Congreso Español de END Ensayos no Destructivos, Gijón, España.

Casado M., Acuña L., Basterra A. y Relea E. (2008) " *Clasificación de madera estructural de Pinus pinaster mediante técnicas vibratorias*". Actas del II Jornadas de Investigación en Construcción, Madrid, España.

Casper D.A. y Kung K.J.S. (1996) " *Simulation of ground-penetrating radar waves in a 2-D soil model*", Geophysics, vol. 61, no. 4, pp. 1034-1049.

Ceccotti A. y Togni M. (1996) " *NDT on ancient timber beams: assement of strength/stiffness properties combining visual and instrumental methods*". Actas del 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Lausanne, Suiza.

Ceraldi C., Mormone V. y Russo E. (2001) " *Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics*", Materials and Structures, vol. 34, pp. 59-64.

Chazelas J.L. (1991) " *Caractéristiques pyhisques et mécaniques locales du bois dans la zone des noeuds*", Tesis Doctoral de la Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, Francia.

Cilas C., Golin, C., Grenier, D., Montagnon C. y Baillères H. (2002) " *Variability in the rigidity of Coffea canephora Pierre stems determined by acoustic analysis*". *Trees Structure and Function*, vol 16, no. 1, 23-27.

Conde M., Fernández-Golfín Seco, J.I. y Hermoso Prieto E. (2007) " *Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual*". *Materiales de Construcción*, vol. 57, no. 288, pp. 49-59.

Conyers, L.B. y Goodman, D. (1997) " *Ground-Penetrating Radar. An Introduction for Archaeologists*". Editorial AltaMira Press, 200 pp.

Daian G., Taube A., Birnboim A., Shramkov Y. y Daian M. (2005) " *Measuring the dielectric properties of wood at microwave frequencies*", *Wood Science and Technology*, vol. 39, no. 3, pp. 215-223.

Daian G., Taube A., Birnboim A., Daian M. y Shramkov Y. (2006) " *Modeling the dielectric properties of wood*", *Wood Science and Technology*, vol. 40, no. 3, pp. 237-246.

Díez R. y Fernández-Golfín J.I. (1998) " *Influencia de diversos factores en la calidad de la madera de uso estructural de P. sylvestris L.*", *Investigación Agraria.Sistemas y Recursos Forestales*, vol. 7, no. 1, 2, pp. 41-52.

Divos F. y Tanaka T. (2000) " *Effect of creep on modulus of elasticity determination of wood*". *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 122, no. 1, pp. 89-92.

Duke S. (1990) " *Calibration of ground penetrating radar and calculation of attenuation and dielectric permittivity versus depth*", Tesis Doctoral de la Colorado School of Mines, EE. UU.

Esteban M. (2003) " *Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera conífera*", Tesis Doctoral de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid, España.

Esteban M., Argüelles R., Arriaga F., Íñiguez G. y Bobadilla I. (2007) " *Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España*", *Informes de la Construcción*, vol. 59, no. 506, pp. 15-27.

Fernández-Golfín J.I., Díez R. y Hermoso E. (2001) " *Análisis del estado del arte de la técnica de la clasificación mecánica por máquina de la madera aserrada estructural*", *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, vol. 10, no. 1, pp. 5-19.

Fernández Golfín J.I., Díez R. y Hermoso E. (2003) "*Relaciones entre las variables clasificadoras de la madera estructural de los pinos silvestre y laricio de procedencia española*", *Materiales de Construcción*, vol. 53, no. 270, pp. 45-55.

Forest Products Laboratory (1999) "*Wood Handbook. Wood as an engineering material*". Forest Products Laboratory USDA Forest Service, Madison, Wisconsin, 483 pp.

Forrer J.B. y Funck J.W. (1998) "*Dielectric properties of defects on wood surfaces*", *Holz Als Roh-und Werkstoff*, vol. 56, no. 1, pp. 25-29.

Fujii Y., Noguchi M., Imamura Y. y Tokoro M. (1990) "*Using Acoustic-Emission Monitoring to Detect Termite Activity in Wood*", *Forest Products Journal*, vol. 40, no. 1, pp. 34-36.

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.

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.

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.

Gracia V.P., Canas J.A., Pujades L.G., Clapes J., Caselles O., Garcia 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.

Gurel L. y Oguz U. (2000) "*Three-dimensional FDTD modeling of a ground-penetrating radar*", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 4, pp. 1513-1521.

Harald B., Schniewind P. y Jonson C. (2000) "*Ultrasonic energy propagation through wood: where, when, how much*". Actas del 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Sopron, Hungría.

Hermoso E. (2001) "*Caracterización mecánica de la madera estructural de Pino sylvestris L.*", Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Madrid, España.

Hermoso E., Fernandez-Golfín J.I. y Díez R. (2002) "*Madera estructural de pino silvestre: caracterización mecánica*", *Investigación Agraria.Sistemas y Recursos Forestales*, vol. 11, no. 2, pp. 425-440.

Hermoso E., Fernandez-Golfín J.I. y Díez R. (2003) "*Evaluación de la clasificación resistente de la madera estructural mediante ultrasonidos*". Actas del 10º Congreso Nacional de Ensayos no Destructivos, Cartagena, España.

Hermoso E., Fernandez-Golfín J.I. y Díez R. (2005) "*Evaluación de la clasificación resistente de la madera estructural mediante ultrasonidos*". Actas del IV Congreso Forestal Español, Zaragoza, España.

Hermoso E., Fernandez-Golfín J.I., Díez R. y Mier R. (2007) "*Aplicación de los ultrasonidos a la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera en rollo de pequeño diámetro*", Informes de la Construcción, vol. 59, no. 506, pp. 87-95.

Hruska J., Cermak J. y Sustek S. (1999) "*Mapping tree root systems with ground-penetrating radar*", Tree Physiology, vol. 19, no. 2, pp. 125-130.

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.

Ichijo B. (1953) "*On the New Method of Measuring Dielectric Constant and Loss Angles of Semiconductors*", Journal of Applied Physics, vol. 24, no. 3, pp. 307-311.

Íñiguez G. (2006) "*Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural*", Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Madrid, España.

Íñiguez G., Arriaga F., Esteban M. y Argüelles R. (2007) "*Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de la propiedades resistentes de la madera aserrada estructural*", Informes de la Construcción, vol. 59, no. 506, pp. 97-105.

James W.L. y Hamill D.W. (1965) "*Dielectric properties of Douglas-fir measured at microwave frequencies*", Forest Products Journal, vol. 15, pp. 51-56.

James W.L. (1977) "*Dielectric Behavior of Douglas-Fir at Various Combinations of Temperature, Frequency, and Moisture-Content*", Forest Products Journal, vol. 27, no. 6, pp. 44-48.

James K. y Rice D. (2002) "*Finding termites with thermal imaging*". Actas del Infrared Camera Applications Conference, Boston, EE.UU.

Jazayeri S. y Ahmet K. (2000) "*Detection of transverse moisture gradients in timber by measurements of capacitance using a multiple-electrode arrangement*", Forest Products Journal, vol. 50, no. 11/12, pp. 27-32.

Jiménez F. J. (1999) "*La madera: propiedades básicas*". Editorial GET Grupo de Estudios Técnicos, 154 pp.

Johansson J., Hagman O. y Fjellner B.A. (2003) "*Predicting moisture content and density distribution of Scots pine by microwave scanning of sawn timber*", Journal of Wood Science, vol. 49, no. 4, pp. 312-316.

Jordan T.E., Baker G.S., Henn K. y Messier J.P. (2004) "*Using amplitude variation with offset and normalized residual polarization analysis of ground penetrating radar data to differentiate an NAPL release from stratigraphic changes*", Journal of Applied Geophysics, vol. 56, no. 1, pp. 41-58.

Kabir M.F., Khalid K.B., Daud W.M. y Aziz S.H.A. (1997) "*Dielectric properties of rubber wood at microwave frequencies measured with an open-ended coaxial line*", Wood and Fiber Science, vol. 29, no. 4, pp. 319-324.

Kabir M.F., Daud W.M., Khalid K. y Sidek H.A.A. (1998) "*Dielectric and ultrasonic properties of rubber wood. Effect of moisture content, grain direction and frequency*", Holz Als Roh-und Werkstoff, vol. 56, no. 4, pp. 223-227.

Kabir M.F., Daud W.M., Khalid K.B. y Sidek A.H.A. (2000) "*Equivalent circuit modeling of the dielectric properties of rubber wood at low frequency*", Wood and Fiber Science, vol. 32, no. 4, pp. 450-457.

Kabir M.F. (2001) "*Prediction of ultrasonic properties from grain angle*", Journal of the Institute of Wood Science, vol. 15, no. 89, pp. 235-246.

Kabir M.F., Daud W.M., Khalid K.B. y Sidek H.A.A. (2001) "*Temperature dependence of the dielectric properties of rubber wood*", Wood and Fiber Science, vol. 33, no. 2, pp. 233-238.

Kaestner A.P. y Baath. L.A. (2000) "*Microwave polarimetry based wood scanning*". Actas del 12th International Symposium on Non destructive Testing of Wood, Sopron, Hungria.

Karsulovic J.T. y León L.A. (1994) "*Reflexiones de ondas de esfuerzo por la presencia de nudos en la madera de pino radiata (Pinus radiata D. Don)*", Revista de Ciencias Forestales, vol. 9, pp. 1-2.

Karsulovic J.T., Leon L.A. y Gaete L. (2000) "*Ultrasonic detection of knots and annual ring orientation in Pinus radiata lumber*", Wood and Fiber Science, vol. 32, no. 3, pp. 278-286.

Kasal B., Drdacky M. y Jirovsky I. (2003) "*Semi-destructive methods for evaluation of timber structures*". Actas del International Conference on Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture, Halkidiki, Grecia.

Kasal B. (2003) "*Semi-destructive method for in-situ evaluation of compressive strength of wood structural members*", Forest Products Journal, vol. 53, no. 11-12, pp. 55-58.

Kharadly M. (1985) "*Microwave diagnostics for stress-rating of dimension lumber*". Actas del 5th Nondestructive Testing of Wood Symposium, Pullman, E.E.U.U.

King R.J., James W.L. y Yen Y.Y (1985) "*A microwave method for measuring moisture content, density and grain angle of wood*". Actas del 1st International Conference on Scanning Technology in Sawmilling, San Francisco, EEUU.

Klysz G., Balayssac J.P. y Laurens S. (2004) "*Spectral analysis of radar surface waves for non-destructive evaluation of cover concrete*", NDT & E International, vol. 37, pp. 221-227.

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.

Kollman F. (1959) "*Tecnología de la madera y sus aplicaciones*". Editorial del Ministerio de Agricultura de España IFIE, 675 pp.

Kröner K. y Pungs L. (1952) "*Zur dielektrischen Anisotropie des Naturholzes im grossen Frequenzbereich*", Holzforschung, vol. 6, no. 1, pp. 13-16.

Laffarga J. (1992) "*Aplicación de la programación de ondas ultrasónicas para el estudio de las maderas*", Revista de Edificación, vol. 2, pp. 21-28.

Laurens S., Balayssac J.P., Rhazi J. y Arliguie G. (2002) "*Influence of concrete relative humidity on the amplitude of Ground-Penetrating Radar (GPR) signal*", Materials and Structures, vol. 35, no. 248, pp. 198-203.

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.

Lin R.T. (1967) "*Review of the dielectric properties of wood and cellulose*", Forest Products Journal, vol. 17, pp. 61-66.

Liu F., Avramidis S. y Zwick R.L. (1994) "*Drying Thick Western Hemlock in a Laboratory Radiofrequency Vacuum Dryer with Constant and Variable Electrode Voltage*", Forest Products Journal, vol. 44, no. 6, pp. 71-75.

Lorenzo E. (1994) "*Prospección geofísica de alta resolución mediante georradar. Aplicación a obras civiles*", Tesis Doctoral de la Universidad Complutense de Madrid, España.

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.

Lundgren N., Hagman O. y Johansson J. (2006) "*Predicting moisture content and density distribution of Scots pine by microwave scanning of sawn timber II: evaluation of models generated on a pixel level*", Journal of Wood Science, vol. 52, no. 1, pp. 39-43.

Lunt I.A., Hubbard S.S. y Rubin Y. (2005) "*Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data*", Journal of Hydrology, vol. 307, no. 1-4, pp. 254-269.

Maierhofer C., Leipold S., Binda L. y Saisa A. (1998a) "*Determination of moisture distribution in the outside walls of St. Maria Rossa using radar*". Actas del 7th International Conference on Ground Penetrating Radar, Kansas, EEUU.

Maierhofer C., Leipold S. y Wiggenhausere H. (1998b) "*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.

Maierhofer C. (2003) "*Nondestructive evaluation of concrete infrastructure with ground penetrating radar*", Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 15, no. 3, pp. 287-297.

Maijala P. (1992) "*Application of some seismic data processing methods to ground penetrating radar*". Actas del 4th International Conference on Ground Penetrating Radar, Rovaniemi, Finlandia.

Mariño R., Fernandez M. E. y Fernandez C. (2000) "*Análisis comparativo de la densidad de mamadera Pinus Sylvestris L. mediante la utilización del resistógrafo*". Revista CIS- Madera, no. 9, pp. 60-70.

Mariño R., Fernández M.E. y Méndez M. (2007) "*Nuevas tecnologías para la inspección de estructuras de madera: el Arbotom*". Actas del IV Congreso Nacional y I Congreso Ibérico de Agroingeniería, Albacete, España.

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

Martin P., Collet R., Barthelemy P. y Roussy G. (1987) "*Evaluation of Wood Characteristics - Internal Scanning of the Material by Microwaves*", Wood Science and Technology, vol. 21, no. 4, pp. 361-371.

Matteo A., Pettinelli E. y Slob E. (2008) "*Early-time GPR signal measurements and simulations to estimate shallow soil permittivity*". Actas del 12th International Conference on Ground Penetrating Radar Birmingham, Birmingham, Reino Unido.

Morales E. y Jaramillo A. (2008) "*Obtención de un método no contaminante y sustentable que permita la conservación de edificios antiguos construidos en madera. Aplicación al centro histórico de Morella (Méjico)*". Actas del IX Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación, Sevilla, España.

Norimoto M. y Yamada T. (1971) "*The dielectric properties of wood V, on the dielectric anisotropy of wood*", Wood Research, vol. 51, pp. 12-32.

Norimoto M. y Yamada T. (1972) "*The dielectric properties of wood VI, on the dielectric properties of chemical constituents of wood and the dielectric anisotropy of wood*", Wood Research, vol. 52, pp. 30-43.

Olmi R., Bini M., Ignesti A. y Riminesi C. (2000) "*Dielectric properties of wood from 2 to 3 GHz*", Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, vol. 35, no. 3, pp. 135-143.

Oloyede A. y Groombridge P. (2000) "*The influence of microwave heating on the mechanical properties of wood*", Journal of Materials Processing Technology, vol. 100, no. 1-3, pp. 67-73.

Pellerin R.F. y Ross, J.R. (2002) "*Transverse vibration and longitudinal stress wave non-destructive evaluation methods*". Forest Products Society. Nondestructive Evaluation of Wood, pp. 13-37.

Pereira M., Rial F., Lorenzo H. y Arias P. (2005) "*Analysis and calibration of GPR shielded antennas*". Actas del 3rd International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, Delft, Holanda.

Pérez V. (2001) "*Radar del subsuelo. Evaluación en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*", Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Cataluña, España.

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.

Peyskens E., Depourcq M., Stevens M. y Schalck J. (1984) "*Dielectric-Properties of Softwood Species at Microwave-Frequencies*", Wood Science and Technology, vol. 18, no. 4, pp. 267-280.

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.

Ramírez M., García F., Rodríguez I., Martínez R. y Benlloch J. (2008) "*Ground-penetrating radar survey for subfloor mapping and analysis of structural damage in the Sagrado Corazón de Jesús Church, Spain*". Archaeological Prospection, vol. 15, no. 4, pp. 285-292.

Ramón G., Basterra A., Casado M. y Acuña L. (2005) "*Análisis de las técnicas de diagnóstico de madera estructural en edificios existentes y propuesta de integración*

orientada al proyecto". Actas del I Jornadas de Investigación en Construcción, Madrid, España.

Ramón G., Basterra A., Acuña L., Casado M. y López G. (2008) "*Codificación y representación de resultados en las inspecciones de estructuras de madera del patrimonio histórico orientadas a la elaboración del proyecto de restauración arquitectónico*". Actas del II Jornadas de Investigación en Construcción, Madrid, España.

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.

Reynolds J. (1997) "*An introduction to applied and environmental geophysics*". Editorial John Wiley and Sons, 796 pp.

Rial F.I., Pereira M., Lonrezo H., Arias P. y Novo A. (2006) "*Ajuste preciso del tiempo cero en registros de radar de subsuelo*". Actas del 5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Sevilla, España.

Rinn F., Becker B. y Kromer B. (1990) "*Penetration resistance measurements: density profiles of conifers and deciduous trees*". Actas del Lund Symposium on Tree Rings and Environment ystad, Suecia.

Rinn F. (1994) "*Resistographic inspection of building timber*". Actas del Pacific Timber Engineering Conference, Gold Coast, Australia.

Rinn F. (2003) "Arbotom Typical Cross Sections". <http://www.rinntech.com>.

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

Roberts R.J. (2000) "*Effect of antenna-surface distance on the radiation of a GPR antenna*". Actas del 8th International Conference on Ground Penetrating Radar, Gold Coast, Australia.

Roberts R.L. y Daniels J.J. (1997) "*Modeling near-field GPR in three dimensions using the FDTD method*", Geophysics, vol. 62, no. 4, pp. 1114-1126.

Rodríguez E. y Richter K. (1985) "*Datación de edificios históricos mediante la dendrocronología. La madera en la conservación y restauración del Patrimonio Cultural*". Ministerio de Cultura, pp.101-110.

Rodríguez E. (1997) "*La dendrocronología y el carbono 14 en la datación de bienes culturales*". Editorial AITIM, no. 188, pp. 52-57.

Rodríguez C., Rubio R. y Gómez J.C. (1998) "*Application of ultrasonic techniques, as a non destructive method, for the evaluation of timber structures*". Actas del 5th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Suiza.

Rodríguez E. (2000) "*Datación dendrocronológica y restauración de bienes culturales*". 2ª Reunión Científica: Calidad y nuevas tecnologías en la madera de uso estructural, Universidad de Valladolid e ITAGRA.

Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., García-García F., Capuz-Lladró R., Díez R. y Tort I. (2007a) "*Use of Ground Penetrating Radar Technique for Structural Timber Grading-Comparison analysis of grading methods*". Actas del 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Near Surface Geophysics, Estambul, Turquía.

Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., Tort I., García-García F., Díez R. y Capuz-Lladró 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.

Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., García-García F., Capuz-Lladró 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.

Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., Capuz-Lladró 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.

Rodríguez-Abad I., Martínez-Sala R., Capuz-Lladró 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.

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.

Ross R. J. (2002) "*Inspection of timber structures using stress wave timing Nondestructive evaluation tools*". Forest Products Society. Nondestructive Evaluation of Wood, pp. 139-142.

Roth C.H., Malicki M.A. y Plagge R. (1992) "*Empirical-Evaluation of the Relationship Between Soil Dielectric-Constant and Volumetric Water-Content As the Basis for Calibrating Soil-Moisture Measurements by Tdr*", Journal of Soil Science, vol. 43, no. 1, pp. 1-13.

Sahin H. (2002) "*Dielectric properties of natural and impregnated wood species at microwave frequencies*", Tesis Doctoral de la Karadeniz Tech. Univ., Turquía.

Sahin H. y Nürgül A. (2004) "*Dielectric properties of hardwood species at microwave frequencies*", Journal of Wood Science, vol. 50, pp. 375-380.

Sandoz J.L. (1989) "*Grading of Construction Timber by Ultrasound*", Wood Science and Technology, vol. 23, no. 1, pp. 95-108.

Sandoz J.L., Benoit Y. y Demay L. (2000) "*Wood testing using acousto-ultrasonic*". Actas del 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Sopron, Hungría.

Sbartai Z.M., Laurens S., Balaýssac 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.

Sbartai Z.M., Laurens S., Balaýssac J.P., Ballivy G. y Arliguie G. (2006b) "*Effect of concrete moisture on radar signal amplitude*", ACI Materials Journal, vol. 103, no. 6, pp. 419-426.

Schmalz B., Lennartz B. y Wachsmuth D. (2002) "*Analyses of soil water content variations and GPR attribute distributions*", Journal of Hydrology, vol. 267, no. 3-4, pp. 217-226.

Schajer G.S. y Orhan F.B. (2006) "*Measurement of wood grain angle, moisture content and density using microwaves*". Holz Roh- Werkstoff, vol. 64, no. 6, pp. 483-490

Sobue (2000) "*Measurement of Moisture Gradient in Wood by Electrode Scanning Moisture Analysis ESMA*". Actas del 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Sopron, Hungría.

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.

Steele P. H. y Cooper J.E. (2000) "*Estimating Lumber Strength With Radio Frequency Scanning*". Actas del 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Sopron, Hungría.

Steelman C. y Endres A. (2008) "*Monitoring seasonal variations in shallow soil water content using multiple High-Frequency GPR direct ground waves*". Actas del 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, Birmingham, Reino Unido.

Stewart D.C., Anderson W.L., Grover T.P. y Labson V.F. (1994) "*Shallow Subsurface Mapping by Electromagnetic Sounding in the 300 Khz to 30 Mhz Range - Model Studies and Prototype System Assessment*", Geophysics, vol. 59, no. 8, pp. 1201-1210.

Stoffregen H. yaramanci U., Zenker T. y Wessolek G. (2002) "*Accuracy of soil water content measurements using ground penetrating radar: comparison of ground penetrating radar and lysimeter data*", Journal of Hydrology, vol. 267, no. 3-4, pp. 201-206.

Sutinen R. (1992) "*Glacial deposits, their electrical properties and surveying by image interpretation and ground penetrating radar*". Geological Survey of Finland. Bulletin no. 359, Geologian tutkimuskeskus, 132 pp.

Suzuki H. y Sasaki E. (1990) "*Effect of grain angle on the ultrasonic velocity of wood*", Mokuzai Gakkaishi, vol. 36, no. 2, pp. 103-107.

Taras A. y Lordanescu M. (1998) "*NDE of wood utility poles integrating results of gamma densitometry and of visual inspection*". Actas del 5th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Suiza.

Tiitta M., Savolainen T., Olkkonen H. y Kanko T. (1999) "*Wood moisture gradient analysis by electrical impedance spectroscopy*", Holzforschung, vol. 53, no. 1, pp. 68-76.

Tinga W.R. (1969) "*Dielectric properties of Douglas fir at 2.45GHz*", Journal of Microwave Power, vol. 4, pp. 161-164.

Topp G.C., Davis J.L. y Annan A.P. (1980) "*Electromagnetic Determination of Soil-Water Content - Measurements in Coaxial Transmission-Lines*", Water Resources Research, vol. 16, no. 3, pp. 574-582.

Torgovnikov G.I. (1993) "*Dielectric properties of wood and wood-based materials*". Editorial Springer, 196 pp.

Turner G. (1994) "*Modelling Antenna-Ground Interactions*". Actas del 5th International Conference on Ground Penetrating Radar, Ontario, Canada.

Turner G. y Siggins A.F. (1994) "*Constant Q-Attenuation of Subsurface Radar Pulses*", Geophysics, vol. 59, no. 8, pp. 1192-1200.

Uduwawala D., Norgren M., Fuks P. y Gunawardena A.W. (2004) "*A deep-parametric study of resistor-loaded bow-tie antennas for ground-penetrating radar applications using FDTD*", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 42, no. 4, pp. 732-742.

Ulriksen C.P.F. (1982) "*Application of impulse radar to civil engineering*", Tesis Doctoral de la Departamento de Ingeniería Geológica. Lund University of Technology, Suecia.

Van der Kruk J. y Slob E.C. (2004) "*Reduction of reflections from above surface objects in GPR data*", Journal of Applied Geophysics, vol. 55, no. 3-4, pp. 271-278.

Vermaas H.F. (1973) "*Regression equations for determining the dielectric properties of wood*", *Holzforschung*, vol. 27, no. 4, pp. 132-136.

Vignote S. y Martínez I. (2006) "*Tecnología de la madera*". Editorial Mundi-Prensa, 687 pp.

Viriyametanont K., Laurens S., Klysz G., Balaýssac 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.

VV. AA. (2003) "*Madera Aserrada Estructural*". Editorial AITIM, 160 pp.

VV. AA. (2004a) "*Especies de maderas para construcción, carpintería y mobiliario*". Editorial AITIM, 896 pp.

V.V.A.A. (2004b) "*Tableros de Madera de Uso Estructural*". Editorial AITIM, 220 pp.

Warren C. y Giannopoulos A. (2008) "*Simulating Commercial GPR Antennas. How close we get?*". Actas del 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, Birmingham, Reino Unido.

Xu T. y McMechan G.A. (1997) "*GPR attenuation and its numerical simulation in 2.5 dimensions*", *Geophysics*, vol. 62, no. 2, pp. 403-414.

Yelf R. (2004) "*Where is True Time Zero?*". Actas del 10th International Conference on Ground Penetrating Radar, Delft, Holanda.

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.

Zonghou X. y Tripp A.C. (1997) "*Ground-penetrating radar responses of dispersive models*". *Geophysics*, vol. 62, no. 4, pp. 1127-1131.

NORMAS DE REFERENCIA

UNE-EN 338:2003

Madera estructural. Clases resistentes. *Structural timber. Strength classes.*

UNE-EN 384:2004

Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad. *Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density*

UNE-EN 408:2004

Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para su uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. *Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties*

UNE-EN 1912:2005+A2:2008

Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies. *Structural timber. Strength classes. Assignment of visual grades and species.*

UNE 56531:1977

Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del peso específico. *Physical-mechanical characteristics of wood. Determination of specific weight.*

UNE 56544:2007

Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. *Visual grading for structural sawn timber. Coniferous timber.*

UNE-EN 13183-1:2002

Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa. *Moisture content of a piece of sawn timber. Part 1: Determination by oven dry method.*

UNE-EN 13183-2:2002

Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica. *Moisture content of a piece of sawn timber. Part 2: Estimation by electrical resistance method.*

UNE-EN 13556:2004

Madera aserrada y madera en rollo. Nomenclatura de las maderas utilizadas en España. *Round and sawn timber. Nomenclature of timbers used in Europe.*

UNE-EN 14081-1:2006

Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales. *Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 1: General requirements*

ANEXO A

**NOMENCLATURA DE
MADERAS EMPLEADAS
SEGÚN LA NORMA
UNE-EN 13556:2004**

En la siguiente tabla se especifica el código, el nombre normalizado en español y la especie a la que pertenecen según la norma UNE-EN 13556:2004 las 20 maderas de diferente densidad empleadas en los distintos ensayos. Así mismo, se especifica a que grupo pertenecen, a las frondosas (F) o al de las coníferas (C).

Tabla A.1.- Nomenclatura de las distintas especies de madera empleadas a lo largo de la tesis según la norma UNE-EN 13556:2004.

COD	NORMALIZADO ESPAÑOL	ESPECIE	GRUPO
1	Eucalipto blanco	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	F
2	Elondo	<i>Erythrophleum ivorense</i> A. Chev.	F
3	Eucalipto blanco	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	F
4	Tali	<i>Sauveolens</i> (Guill&Perr.) Brenan	F
5			
6	Pino pinaster	<i>Pinus pinaster</i> Ait.	C
7	Mansonia	<i>Mansonia Altissima</i> A. Chev.	F
8	Pino pinaster	<i>Pinus pinaster</i> Ait.	C
9	Eucalipto blanco	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	F
10	Pino pinaster	<i>Pinus pinaster</i> Ait.	C
11	Pino laricio	<i>Pinus nigra</i> Arnold subsp.	C
12	Cerezo americano	<i>Prunus Serotina</i> Ehrh.	F
13	Pino silvestre	<i>Pinus sylvestris</i> L.	C
14	Arce	<i>Acer campestre</i> L.	F
15	Abura	<i>Hallea ciliata</i>	F
16			
17	Cerejeira	<i>Amburama cearensis</i> (Fr. Allem) A. C.	F
18	Pino radiata	<i>Pinus radiata</i> D. Don	C
19	Pino radiata	<i>Pinus radiata</i> D. Don	C
20	Balsa	<i>Ochroma lagopus</i> Sw.	F

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

ANEXO B

**TABLAS DE CODIFICACIÓN,
DENSIDAD, CONTENIDO DE
HUMEDAD Y CLASIFICACIÓN
RESISTENTE POR DIFERENTES
MÉTODOS PARA EL LOTE DE
VIGUETAS DE
PINUS RADIATA D. DON**

En la tabla B.1 se especifican los valores del lote de madera de *Pinus radiata* D.

Don de:

CH: Contenido de humedad (%)

ρ : Densidad (kg/m³)

f_m : Módulo de resistencia a flexión (N/mm²)

$E_{m,i}$: Módulo de elasticidad (N/mm²)

v_p : Velocidad de propagación longitudinal ultrasónica (m/s)

E_d : Módulo de elasticidad dinámico calculado con la técnica de ultrasonidos (MPa).

En la tabla B.2 se especifica el grupo de clasificación resistente al que pertenece cada vigueta del lote de madera de *Pinus radiata* D. Don según los distintos métodos de clasificación aplicados:

C-338: Asignación de clase resistente según la norma UNE-EN 338:2003.

C-V: Clasificación visual según la norma UNE 56544: 2007.

C-US: Clasificación por medio de las velocidades de corte de las ondas ultrasónicas.

C-GR: Clasificación por medio de la técnica de georradar.

Tabla B.1.- Código, dimensiones y parámetros registrados durante los ensayos de flexión a rotura y con la técnica de ultrasonidos del lote de madera *Pinus radiata* D. Don

TABLA B.1						
CÓD	CH	ρ	f_m	$E_{m,l}$	v_p	E_d
4101	7.7	400.1	18.0	5934	4483	8042
4102	8.6	447.1	16.9	8708	5051	11406
4103	8.9	407.1	24.8	8682	5051	10385
4104	8.6	460.3	59.5	8292	5769	15318
4105	9.0	447.3	16.1	9217	5293	12532
4106	7.7	403.5	21.8	7479	4712	8958
4107	9.0	463.5	23.9	7510	5274	12891
4108	7.5	440.0	14.4	8811	5249	12123
4109	7.6	375.1	13.6	6275	4506	7615
4110	8.6	520.7	37.6	12215	5538	15969
4111	8.9	384.0	33.3	7643	5098	9980
4112	8.9	447.6	11.5	5844	4478	8975
4113	8.8	454.8	28.4	8819	5490	13708
4114	9.1	417.9	18.7	7191	4465	8331
4115	9.3	459.3	27.3	9197	5237	12598
4116	9.2	480.7	28.7	7736	4938	11721
4117	8.9	452.9	19.8	7502	4727	10121
4118	9.0	468.1	35.2	6936	4966	11545
4119	8.8	440.3	17.8	6543	5409	12881
4120	9.4	586.8	29.5	7524	4658	12732
4121	9.3	457.7	19.9	7737	5351	13106
4122	8.9	501.2	20.8	8304	5710	16341
4123	9.5	446.0	22.3	7404	5017	11226
4124	8.9	430.8	13.1	5937	4994	10744
4125	9.1	408.1	14.9	6552	5092	10582
4126	9.0	435.9	10.3	6388	4763	9888
4127	9.1	395.5	14.3	8469	5110	10326
4128	9.0	511.5	23.0	8777	5463	15264
4129	7.7	388.7	16.6	5214	4927	9435
4130	9.1	433.6	20.3	7049	4862	10250
4131	7.6	425.7	29.3	9477	5338	12131
4132	9.2	435.3	44.4	7048	5200	11771
4133	8.0	358.1	21.4	5276	4784	8196
4134	8.0	434.1	14.2	6602	4972	10732

TABLA B.1

CÓD	CH	ρ	f_m	$E_{m,l}$	v_P	E_d
4135	7.8	356.9	9.9	5435	4727	7976
4136	9.1	393.9	26.1	5641	4884	9395
4137	8.9	491.1	15.8	7444	5531	15023
4138	8.2	473.1	23.1	7554	5200	12792
4139	9.4	407.9	40.0	7166	5230	11156
4140	8.7	401.6	20.8	7175	4994	10016
4141	7.1	463.9	17.4	8991	4836	10848
4142	7.8	403.2	22.3	7695	5028	10193
4143	8.9	456.1	52.1	9369	5566	14131
4144	9.0	542.3	23.8	9498	5573	16842
4145	8.4	482.9	18.1	7956	5916	16902
4146	9.7	506.4	27.1	10235	5601	15886
4147	9.1	486.7	49.9	9744	5531	14888
4148	9.2	443.6	36.4	10184	5573	13777
4149	10.1	422.9	20.1	9447	5601	13268
4150	10.5	559.1	38.1	7887	4628	11974
4151	8.2	556.1	44.8	9364	5074	14318
4152	10.4	567.2	31.3	8018	4825	13205
4153	10.4	502.7	43.9	10750	5680	16217
4154	10.7	528.3	34.5	12050	5230	14450
4155	10.5	461.1	27.3	7771	5587	14392
4156	9.5	499.3	36.8	9937	5086	12916
4157	8.8	476.7	43.3	8882	5383	13812
4158	9.5	415.3	41.9	9092	5559	12835
4159	10.6	502.3	39.6	11144	5732	16502
4160	10.3	454.1	28.5	9686	5717	14843
4161	10.4	484.0	5.0	5405	5163	12902
4162	9.8	412.9	0.0		5318	11678
4163	9.8	429.5	39.2	8130	5580	13372
4164	9.7	486.1	8.3	7162	5403	14191
4165	9.4	514.5	38.2	11615	5988	18449
4166	10.5	496.4	18.3	9319	5717	16224
4167	10.3	496.5	16.4	8096	5104	12935
4168	10.4	506.8	34.1	11555	5538	15543
4169	10.1	480.5	48.4	10605	5449	14268
4170	10.2	521.7	33.3	11337	5861	17922
4171	10.2	469.3	55.8	9266	5673	15105

TABLA B.1

CÓD	CH	ρ	f_m	$E_{m,l}$	v_p	E_d
4172	10.3	470.0	33.1	9502	5630	14898
4173	11.7	467.5	19.0	7558	5200	12640
4174	9.6	455.3	13.5	5991	4619	9715
4175	10.3	436.1	18.9	6788	5504	13212
4176	10.1	480.1	23.6	7277	5212	13043
4177	10.2	480.1	53.9	11273	5924	16850
4178	9.1	498.0	41.9	10369	5615	15701
4179	9.1	477.7	30.3	19971	5615	15062
4180	8.7	424.8	31.7	8766	5255	11731
4181	9.9	438.5	20.8	7625	5069	11268
4182	9.2	477.5	27.2	7863	5732	15688
4183	9.7	450.4	25.3	8624	5194	12151
4184	10.0	463.2	39.7	8222	5181	12434
4185	9.2	417.5	8.8	8222	4059	6878
4186	8.7	445.1	6.5	6090	4063	7347
4187	7.8	405.6	29.7	7954	4653	8781
4188	9.0	396.8	20.9	8015	4895	9508
4189	9.1	496.8	22.0	10215	5243	13657
4190	9.1	460.4	37.8	8678	5470	13776
4191	8.8	464.1	40.5	12520	5659	14864
4192	9.0	413.7	12.3	5979	4368	7894
4193	8.8	412.1	17.5	6413	4515	8401
4194	8.9	532.3	33.1	10803	5200	14392
4195	9.0	452.1	13.4	8269	5133	11913
4196	8.9	460.5	18.8	7695	5011	11564
4197	8.9	395.6	13.8	6007	4520	8082
4198	9.7	510.4	18.1	10836	5403	14900
4199	9.1	430.1	42.7	10051	5133	11333
4200	8.2	438.3	15.7	7698	5243	12048

Tabla B.2.- Grupo de clasificación resistente al que pertenece cada vigueta del lote de *Pinus radiata* D. Don según los distintos métodos.

TABLA B.2				
CÓDIGO	C-338	C-V	C-US	C-GR
4101	R	R	US_R	G-R
4102	R	R	US_C18	G-R
4103	C18	ME-2	US_C18	G-R
4104	C18	R	US_C18	G-1
4105	R	R	US_C18	G-R
4106	C18	R	US_C18	G-R
4107	C18	R	US_C18	G-R
4108	C18	R	US_C18	G-R
4109	R	R	US_R	G-R
4110	C18	R	US_C18	G-R
4111	C18	R	US_C18	G-R
4112	R	R	US_R	G-R
4113	C18	R	US_C18	G-R
4114	C18	R	US_R	G-R
4115	C18	R	US_C18	G-R
4116	C18	R	US_C18	G-R
4117	C18	R	US_C18	G-R
4118	C18	R	US_C18	G-R
4119	R	R	US_C18	G-R
4120	C18	R	US_R	G-R
4121	C18	R	US_C18	G-R
4122	C18	R	US_C18	G-R
4123	C18	R	US_C18	G-R
4124	R	R	US_C18	G-R
4125	R	R	US_C18	G-R
4126	R	R	US_C18	G-R
4127	R	R	US_C18	G-R
4128	C18	ME-2	US_C18	G-R
4129	R	R	US_C18	G-R
4130	C18	R	US_C18	G-R
4131	C18	R	US_C18	G-R
4132	C18	R	US_C18	G-R
4133	R	R	US_C18	G-R
4134	R	R	US_C18	G-R

TABLA B.2

CÓDIGO	C-338	C-V	C-US	C-GR
4135	R	R	US_C18	G-R
4136	R	R	US_C18	G-R
4137	R	R	US_C18	G-R
4138	C18	R	US_C18	G-R
4139	C18	R	US_C18	G-R
4140	C18	R	US_C18	G-1
4141	R	R	US_C18	G-R
4142	C18	R	US_C18	G-1
4143	C18	ME-2	US_C18	G-1
4144	C18	R	US_C18	G-1
4145	C18	R	US_C18	G-1
4146	C18	R	US_C18	G-1
4147	C18	R	US_C18	G-R
4148	C18	R	US_C18	G-1
4149	C18	R	US_C18	G-R
4150	C18	ME-2	US_R	G-R
4151	C18	ME-2	US_C18	G-R
4152	C18	ME-2	US_C18	G-1
4153	C18	R	US_C18	G-1
4154	C18	R	US_C18	G-R
4155	C18	R	US_C18	G-1
4156	C18	R	US_C18	G-R
4157	C18	ME-2	US_C18	G-R
4158	C18	R	US_C18	G-R
4159	C18	R	US_C18	G-R
4160	C18	ME-2	US_C18	G-1
4161	R	R	US_C18	G-R
4162	R	R	US_C18	G-R
4163	C18	ME-2	US_C18	G-1
4164	R	R	US_C18	G-1
4165	C18	R	US_C18	G-1
4166	C18	R	US_C18	G-1
4167	R	R	US_C18	G-R
4168	C18	R	US_C18	G-1
4169	C18	R	US_C18	G-R
4170	C18	ME-2	US_C18	G-1
4171	C18	R	US_C18	G-1
4172	US	R	US_C18	G-1

TABLA B.2

CÓDIGO	C-338	C-V	C-US	C-GR
4173	C18	R	US_C18	G-R
4174	R	R	US_R	G-R
4175	C18	R	US_C18	G-R
4176	C18	R	US_C18	G-1
4177	C18	R	US_C18	G-1
4178	C18	ME-1	US_C18	G-1
4179	C18	R	US_C18	G-R
4180	C18	R	US_C18	G-R
4181	C18	R	US_C18	G-R
4182	C18	R	US_C18	G-1
4183	C18	R	US_R	G-R
4184	C18	R	US_R	G-1
4185	R	R	US_C18	G-R
4186	R	R	US_C18	G-R
4187	C18	R	US_R	G-R
4188	C18	R	US_C18	G-R
4189	C18	R	US_C18	G-R
4190	C18	R	US_R	G-R
4191	C18	R	US_C18	G-R
4192	R	R	US_C18	G-R
4193	R	R	US_R	G-R
4194	C18	ME-2	US_C18	G-R
4195	R	ME-2	US_C18	G-1
4196	C18	R	US_C18	G-R
4197	R	ME-2	US_R	G-R
4198	C18	R	US_C18	G-R
4199	C18	ME-2	US_C18	G-R
4200	R	ME-2	US_C18	G-R