

CARLOS GALVE Y BEATRIZ SANZ

CARACTERIZACIÓN DEL PINO RADIATA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DIELECTRICA DE LA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA DEL GEORRADAR Y DEL RESISTÓGRAFO.



TALLER 23: Aplicación de técnicas no destructivas para el estudio de materiales de construcción

TUTORAS:

Isabel Rodríguez Abad

Rosa Martínez Sala

ÍNDICE

1. Introducción	3
1.1. Empleo de la madera estructural en edificación	3
1.2. Definición de objetivos	4
1.3. Resumen del contenido del proyecto	4
2. Propiedades de la madera	5
2.1. Propiedades físicas	5
2.2. La madera Pino Radiata	11
2.2.1. Ubicación Pino radiata, zonas de comercialización y producción	13
3. Técnicas no destructivas de inspección y diagnóstico de la madera estructural	15
3.1. Georradar	15
3.1.1. Instrumentación y métodos de adquisición de registros del georradar	16
3.2. Resistógrafo	20
3.2.1. Instrumentación y métodos de adquisición de registros del resistógrafo	20
4. Desarrollo experimental	21
4.1. Descripción de las probetas ensayadas	21
4.2. Descripción del equipo de georradar empleado. SIR 3000	23
4.3. Descripción de la antena empleada. Palm 2 GHz	25
4.4. Métodos y descripción de la tipología de adquisición de registros del georradar	26
4.4.1. Definición de tipos de medición	26
4.4.2. Descripción de las probetas	28
4.5. Descripción del resistógrafo empleado	29
4.6. Métodos y descripción de adquisición de datos con el resistógrafo	30
4.6.1. Descripción forma de realizar los ensayos	30
4.6.2. Descripción de las probetas	31
5. Obtención e interpretación de resultados	31
5.1. Datos del pino radiata con la utilización de georradar	31
5.1.1. Comparación resultados caso 1 vs caso 2	42
5.1.2. Comparación resultados caso 3 vs caso 4	43
5.2. Datos del pino radiata con la utilización de resistógrafo	45
6. Conclusiones	49
ANEXO 1	51
ANEXO 2	52
BIBLIOGRAFÍA	53

1. Introducción.

1.1. Empleo de la madera estructural en la edificación.

La madera se ha utilizado como material de construcción durante miles de años junto con el barro y la piedra. Más tarde, los arquitectos fueron olvidando el empleo de la madera a favor de la construcción con hormigón, acero y materiales sintéticos.

La utilización de la madera estructural no se recuperó hasta la aplicación de las resinas sintéticas a las estructuras de la madera laminada hacia 1950.

Con 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) y el Código Técnico de la Edificación (CTE) en España se integra la madera como material estructural con una normativa de obligado cumplimiento (Normas UNE). Esta situación supone para la madera un gran avance que permite ofrecer unas garantías de calidad y seguridad estructural equiparables con otros materiales.

En la actualidad cada vez resulta más necesario tener en cuenta las consecuencias ecológicas de nuestras acciones. En el mundo de la arquitectura y la construcción esto se traduce en la utilización responsable y sin derroches de los materiales naturales que se hallan a nuestra disposición. Estas consideraciones, junto con las innovaciones de la industria maderera, fueron las que condujeron al redescubrimiento de la construcción en madera, una tradición que ha sobrevivido sólo en áreas limitadas como zonas rurales o regiones del planeta no industrializadas. La madera posee cualidades únicas: como material de construcción es totalmente reciclable y las existencias se reponen de modo natural.

La preocupación por el medio ambiente es una de las razones esenciales de la actual popularidad de la madera como material de construcción. A lo largo de su ciclo vital, la madera es uno de los materiales de construcción más respetuosos con el medio ambiente. La *energía incluida* en la madera, es decir, la energía necesaria para su producción, es menor que la del aluminio, ladrillos, cemento, plástico o acero. Al necesitarse más energía para hacerlos, todos estos materiales provocan el aumento de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. (Naomi Stungo, 1999).

Tras la importancia que está adquiriendo la madera se hace necesario el desarrollo de procedimientos para caracterizar la madera y técnicas no destructivas para estructuras existentes, como el georradar y el resistógrafo.

1.2. Definición de objetivos

El trabajo a desarrollar tiene como objetivo principal la caracterización del pino radiata mediante el análisis de la respuesta dieléctrica de la técnica no destructiva del georradar y del resistógrafo. Por una parte, se caracteriza la anisotropía dieléctrica de la madera Pino radiata mediante la utilización del georradar y, por otro, se caracteriza la anisotropía de la madera Pino radiata mediante la utilización del resistógrafo.

Para poder cumplir este objetivo se debe:

- Realizar un estudio general de la madera.
- Hacer un estudio de la madera Pino radiata.
- Aprender la técnica del georradar:
 - Adquirir destreza en la medición del georradar.
 - Aprender el uso del software Radan.
 - Interpretación de los parámetros propios de la técnica del georradar.
- Aprender la técnica del resistógrafo:
 - Adquirir destreza en la medición del resistógrafo.
 - Aprender el uso del software B-Tools Pro.
 - Interpretación de los parámetros propios de la técnica del resistógrafo.

1.3. Resumen del contenido del proyecto

Para alcanzar estos objetivos, los trabajos estarán estructurados de la siguiente manera:

Una primera parte en la que se define la madera empleada Pino radiata.

Una segunda parte en la que se describen dos técnicas no destructivas de inspección y diagnóstico de la madera estructural: georradar y resistógrafo.

Una tercera parte de desarrollo experimental en la que se definen los métodos de medición y descripción de la tipología de adquisición de registros de georradar y resistógrafo sobre la madera pino radiata.

Y por último, una cuarta parte donde se interpretan y se obtienen una serie de resultados.

2. Propiedades de la madera.

2.1. Propiedades físicas.

Antes de pasar a describir las principales propiedades de la madera hay que decir que es un material heterogéneo, y por ello sus valores mecánicos y dieléctricos tienen una gran variación, incluso cuando la madera procede de una misma región.

Anisotropía

La madera es un material orgánico, producido por un organismo vivo, el árbol. Es una materia fibrosa y organizada.

La orientación de las fibras que componen la madera da lugar a la anisotropía de su estructura.

Las propiedades de la madera no son las mismas en todas las direcciones que pasan por un punto determinado. La madera presenta diferente comportamiento físico, mecánico y dieléctrico dependiendo del plano o dirección que se considere respecto las fibras, por lo que a la hora de definir sus propiedades mecánicas y dieléctricas, previamente debemos indicar qué plano o dirección consideramos respecto a las fibras.

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 2.1).

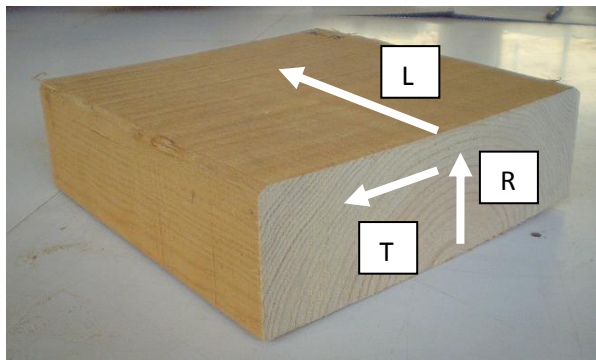


Figura 2.1.-Principales direcciones de estudio respecto a la fibra en la madera estructural: eje longitudinal (L), el eje radial (R) y el eje tangencial (T).

Higroscopicidad y humedad de equilibrio higroscópico (HEH)

Las propiedades de la madera varían en función de su contenido de humedad, de su tamaño y de la forma de realizar los ensayos, por este motivo los valores se dan referidos en torno a un 12 % de humedad, a un tamaño de probetas y a una metodología de ensayos que queda referenciada con la norma de ensayo utilizada.

La higroscopicidad es la capacidad que posee la madera de absorber humedad de la atmósfera que los rodea y retenerla en forma de agua líquida. La HEH es prácticamente constante para todas las especies de modo que con el ábaco de Kollman (1959) que se muestra en la Figura 2.2 se obtienen las curvas de HEH de la madera en función de la temperatura (°C) y la humedad relativa del aire.

La Humedad de Equilibrio Higroscópico (HEH), es la humedad expresada en % para la cual la humedad de la madera se encuentra en equilibrio con la humedad del ambiente que la rodea.

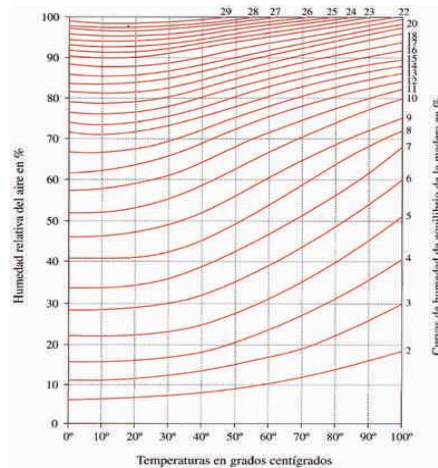


Figura 2.2.- Curvas de humedad de equilibrio higroscópico de la madera (Kollman, 1959)

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 (tabla 2.1). Una vez bajada la humedad de este punto no podrá recuperar agua libre a no ser que sea por inmersión.

Contenido de la humedad	Denominación
>30	Madera saturada
30 – 23	Madera semi-seca
22-18	Madera comercialmente
17 – 13	Madera secada al aire
< 13	Madera desecada
0	Madera anhidra

Tabla 2.1.- Denominación de la madera en función del contenido de humedad. (Capuz R., 2005).

La norma UNE-EN 13.183-1:2002 establece el procedimiento operativo para determinar el contenido de humedad por el método de desecación hasta el estado anhidro.

Densidad

La densidad, es la relación entre la masa (M) y el volumen (V) de una madera a una humedad determinada (h) y viene dada por la ecuación siguiente:

$$D = \frac{M_h}{V_h} \quad [\text{Ecuación 2.1}]$$

La densidad de una madera varía según su grado de humedad. Por tanto, la densidad está directamente relacionada con el contenido de humedad.

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. El Pino radiata posee una densidad de 500 kg/m³ referida a un contenido de humedad del 12%. (Peraza F. et al., 2004).

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 P. (2000) ha 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.

Propiedades mecánicas.

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 resistencia mecánica de una pieza de madera varía sensiblemente según el contenido de humedad (CH) y por ello, la resistencia a un esfuerzo dado no puede definirse con exactitud sino respecto a un CH determinado.

La clasificación de la madera en la norma UNE-EN 338:2004 queda definida mediante clases resistentes designadas por la letra C (coníferas) seguidas de un número relativo al valor de la resistencia a la flexión. Para la asignación de clases resistentes a calidades visuales es suficiente el cálculo de tres propiedades: el módulo de elasticidad (E), el módulo de rotura (f) y la densidad (ρ). De ellas se puede obtener el resto de propiedades mecánicas mediante fórmulas definidas en la norma UNE-EN 384. Por esta razón se las denomina propiedades clasificadoras.

- ❖ Modulo de elasticidad es la relación entre la tensión y la correspondiente deformación unitaria en un material sometido a un esfuerzo que está por debajo del límite de elasticidad del material. Es más elevado en tracción que en compresión. Este valor varía con la especie, humedad, naturaleza de las solicitaciones, dirección del esfuerzo y con la duración de aplicación de las cargas.
- ❖ El modulo de rotura: es el esfuerzo máximo en la fibra cuando se produce el fallo.
- ❖ El procedimiento para la obtención de las propiedades elasto-mecánicas de la madera se debe realizar a acorde con la norma UNE-EN 408, la cual define la disposición de la viga y las cargas.

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. Dicha norma define la madera de pino radiata junto con otras tres especies que aparecen en la tabla 2.2.

Especies	Clase de Calidad	
	ME-1	ME-2
Pino insignis (Pino radiata)	C24	C18
Pino pinaster	C24	C18
Pino silvestre	C27	C18
Pino Laricio	C30	C18

Tabla 2.2- Asignación de las combinaciones especie-calidad a clases resistentes a partir de la norma UNE 56544.

Actualmente, la mayor parte de las líneas de investigación se basan en el estudio de técnicas no destructivas para mejorar la predicción de las propiedades mecánicas o detectar discontinuidades en el material.

Propiedades eléctricas.

El estudio de las propiedades eléctricas 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 convierten el 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. 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.

○ **Conductividad eléctrica.**

La madera seca es un excelente aislante pero esta propiedad disminuye al aumentar la humedad que contiene.

Algunos autores (Vignote S. y Martínez I., 2006) proponen unos valores aproximados de resistividad, que es la inversa de la conductividad, similares (tabla 2.3), matizando que varía mucho dependiendo de la especie, dirección de la fibra y temperatura.

Humedad (%)	0	9	13	18	23	26	30	50
Resistividad (Ωm)	10^6	10^4	1000	100	10	1	0,1	0,01

Tabla 2.3.- Valores de humedad y resistividad aproximados de la madera.

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.

○ **Constante dieléctrica.**

La permitividad dieléctrica efectiva o constante dieléctrica 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.

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

Jiménez F. (1999) afirma que la constante dieléctrica es mayor para la polarización paralela a la fibra que perpendicular a ella, siendo corroborado por Sahin H. y Nürgül A. (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.

Para la madera, que es un material no magnético y de baja conductividad eléctrica, la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas se puede obtener por medio de la ecuación 2.2.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad [\text{Ecuación 2.2}]$$

Donde c es la velocidad de la luz ($\approx 3 \times 10^8$ m/s) y ϵ_r es la constante dieléctrica relativa de la madera.

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 H. y Nürgül A., 2004).

Torgovnikov G. (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.

- **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 F. (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.

2.2. La madera Pino radiata.

El estudio de georradar y resistógrafo se ha realizado sobre probetas de madera de Pino radiata (Pino insignis). Por ello, se hace necesaria una breve explicación de las características de la madera radiata y más adelante las técnicas empleadas: georradar y resistógrafo.

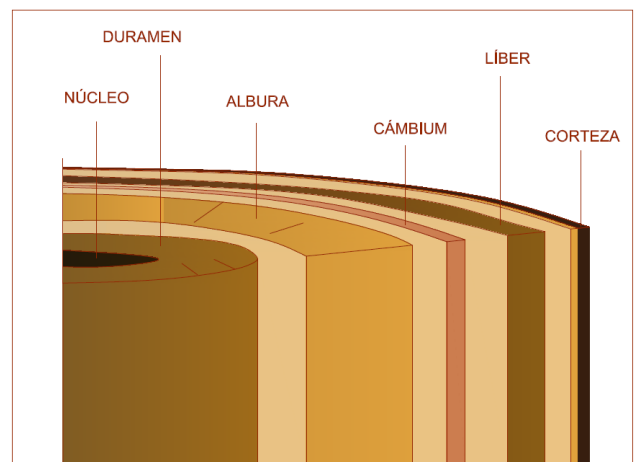
Características de la madera radiata: (Peraza F. et al., 2004).

- Nombre Botánico: (Según la norma UNE-EN 13556:2004)
 - *Pinus radiata* D. Don Syn.
- Nombres comerciales:
 - Español: Pino insignis, Pino radiata, Pino de Monterrey.
 - Inglés: Radiata pine, Monterey pine, Insignis pine, Remarkable pine.
 - Francés: Pin radiata, Pin de Monterey.
 - Italiano: Pino insigne.
 - Alemán: Monterey föhre, Radiata Pine.
- Nombres vernáculos:
 - Estados Unidos: Monterey pine.
 - Australia: Radiata pine.
 - Nueva Zelanda: Radiata pine.
 - Chile: Pino insigne.
- Descripción de la madera:

En la figura 2.3 se muestran las diferentes capas de la estructura macroscópica de un árbol. En nuestro caso, la madera de pino radiata es de albura de color blanco amarillento, que se oscurece con la luz de forma relativamente rápida, y el duramen tiene un color pardo amarillento o pardo marrón. La madera de albura está poco o medianamente diferenciada. Los anillos de crecimiento son visibles y tienen un gran espesor (de 1 a 5 cm).

La fibra es recta. El grano varía de fino a medio.

Figura 2.3.- 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 (núcleo).



➤ Propiedades físicas:

Densidad: 500 kg/m³ referida a un contenido de humedad del 12%.

Contracción: Medianamente nerviosa

Coefficientes de contracción: total

- Volumétrica: 14,5 %
- Tangencial: 7,4 %
- Radial: 4,2 %
- Dureza: 1,8 Semidura

➤ Propiedades mecánicas:

Madera libre de defectos:

- Flexión estática: 83-85 N/mm²
- Módulo de elasticidad: 8.630-8.800 N/mm²
- Compresión axial: 40-42 N/mm²
- Compresión perpendicular: 5,7-6,2 N/mm²
- Cortante: 10- 10,9 N/mm²
- Flexión dinámica: 3,6-3,7 J/mm²

➤ Propiedades tecnológicas:

El aserrado se realiza sin dificultad y se pueden utilizar los equipos convencionales. Únicamente los árboles muy viejos o muy gruesos pueden requerir tecnologías especiales.

Presenta buenas aptitudes para la obtención de chapa por desenrollo y mediante corte a la plana. La homogeneidad de la madera de verano y de primavera facilita la operación de desenrollo.

Se mecaniza con facilidad, aunque en las proximidades de los nudos se pueden producir desfibrados. El desgaste de las cuchillas y la potencia consumida son inferiores a las de otras coníferas como el pino silvestre y el pino pinaster. Se pueden emplear los útiles ordinarios.

Presenta buenas aptitudes para el encolado y se puede emplear cualquier tipo de cola. Su elevada permeabilidad aconseja que los adhesivos tengan un contenido en sólidos mayor que el requerido al trabajar con frondosas y maderas menos permeables. El clavado y atornillado se realiza sin dificultad. Antes de aplicar los productos de acabado se recomienda realizar un tratamiento previo de tapaporos. Los tintes, pinturas y barnices se adhieren bien.

➤ Durabilidad natural e impregnabilidad:

La madera está clasificada como poco durable o no durable frente a la acción de los hongos y es sensible a los cerambícidos, a los anóbidos y a las termitas.

La madera de duramen no es impregnable y la de albura varía de medianamente impregnable a poco impregnable.

➤ Aplicaciones:

- Tableros contrachapados: estructural
- Tableros alistonados
- Perfiles laminados para carpintería exterior
- Carpintería interior: revestimientos, frisos, precercos
- Carpintería de armar
- Madera laminada encolada
- Mobiliario
- Paletas
- Embalajes
- Tableros de partículas y de fibras
- Pasta de papel

2.2.1. Ubicación del Pino radiata, zonas de comercialización y producción.

El área original de procedencia del Pino radiata se reduce a una zona de la costa de California en los Estados Unidos. Actualmente se encuentra difundido por el suroeste de Europa, Nueva Zelanda, suroeste de Australia, Chile, Brasil y Sudáfrica.

En España es la conífera exótica más empleada en plantaciones forestales, siendo uno de los elementos paisajísticos más comunes de Asturias, Cantabria y País Vasco. Fue en este último lugar donde a mediados del siglo XIX Adán de Yarza introdujo la especie. Hay casi 200.000 hectáreas cultivadas de pino radiata en España, estando concentradas las dos terceras partes de las masas españolas en el País Vasco (Figura 2.4). Sus masas forestales, su producción y su exportación son importantes.

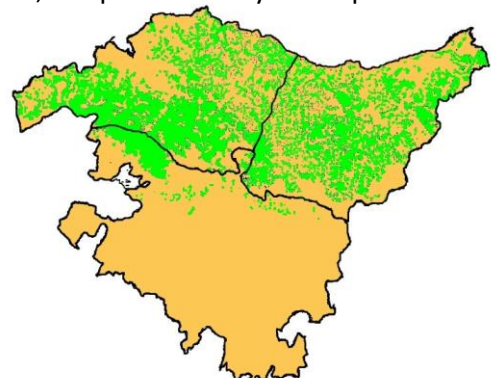


Figura 2.4.- Distribución del pino radiata en la CAPV (1996).

Aunque Valencia no es una zona rica en bosques, si que ha sido y sigue manteniendo una importante industria en ebanistería y carpintería, porque tiene uno de los puertos más importantes de España, por donde entraba el mayor porcentaje de maderas de Guinea (cuando era nuestra Colonia) y sigue entrando por razones de economía.

Para el estudio de la producción de la madera radiata en España se presenta una síntesis de la información recogida sobre el volumen maderable (Tabla 2.4) y cortas de madera (Figura 2.5), en España.

Especie forestal	Existencias (m3 c.c.)
<i>Pinus pinaster</i>	140.227.526
<i>Pinus sylvestris</i>	139.572.554
<i>Pinus halepensis</i>	73.268.741
<i>Pinus nigra</i>	70.754.024
<i>Fagus sylvatica</i>	69.540.687
<i>Quercus ilex</i>	67.798.720
<i>Eucalyptus sp.</i>	60.276.569
<i>Quercus pyrenaica</i> y <i>Quercus pubescens</i>	46.844.107
<i>Pinus radiata</i>	41.602.134
<i>Quercus robur</i> y <i>Quercus petraea</i>	39.590.255

Tabla 2.4. Análisis de las especies principales de los bosques españoles en cuanto a volumen maderable con corteza y a superficie ocupada. Anuario (2008).

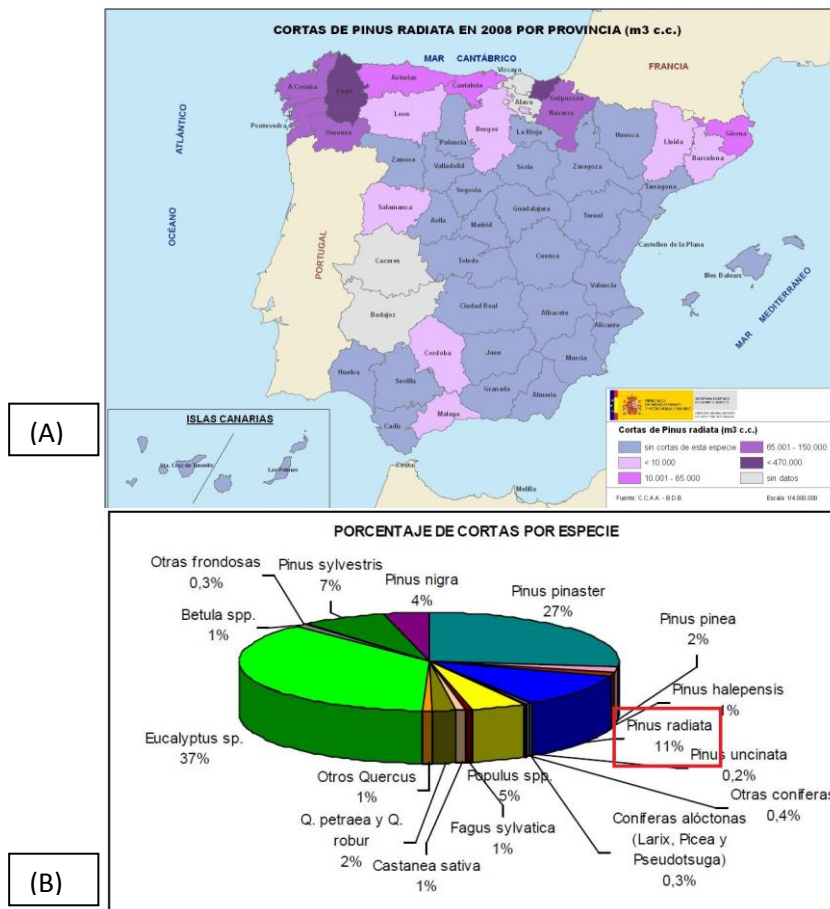


Figura 2.5.- (A) Mapa de Cortas de pino radiata con corteza en 2008 por provincia (m3 c.c) y (B) gráfico del porcentaje de cortas por especie (Anuario 2008).

3. Técnicas no destructivas de inspección y diagnóstico de la madera estructural.

Para la caracterización de la anisotropía dieléctrica de la madera Pino radiata se hace uso del georradar, así como, el resistógrafo se emplea como complemento para este estudio. Seguidamente, se definen ambas técnicas no destructivas en los siguientes apartados.

3.1. Georradar.

La técnica del georradar se basa en el reconocimiento de un medio heterogéneo mediante la emisión y recepción de ondas electromagnéticas que se propagan por ese medio. Las ondas electromagnéticas se reflejan, refractan y difractan cuando inciden en las heterogeneidades del medio siendo posteriormente detectado por una antena receptora tras su propagación por el medio material. Con este método, por tanto, se detectan los cambios en las propiedades electromagnéticas de los materiales, ya que los parámetros que definen estas propiedades son los que determinan la propagación de la energía por el medio.

Hay que tener en cuenta que durante la propagación de la onda electromagnética por un medio se producen pérdidas de energía, de modo que esta disminución de la amplitud de la onda determinara la profundidad máxima teórica de estudio que se puede alcanzar en cada caso. Además esta capacidad de penetración es menor cuanto menor es la longitud de onda utilizada. También debe tenerse en cuenta que el valor de la energía recibida puede ser menor que el esperado si existe: una mala relación señal/ruido, problemas con los equipos o un tratamiento incorrecto.

Para una mayor comprensión de los conceptos teóricos del fundamento del georradar se pueden consultar tesis como las de Cimadevilla L. (1994), García F. (1997), Pérez V. (2001) y Rodríguez-Abad I. (2010).

Aplicación del georradar:

- Ingeniería civil:
 - Búsqueda de la roca base en terreno edificable.
 - Detección de armaduras en muros de hormigón
 - Localización o cartografiado de tuberías
 - Fugas de agua
- Estudios geotécnicos y control de calidad:
 - Control de calidad de diferentes tratamientos realizados en el terreno
 - Estudio del estado de túneles y firmes
 - Obtención del cubicaje de material necesario para su reparación
 - Análisis de un terreno buscando bolsas de arcillas gravas u oquedades.

- Estudios ambientales:
 - Cubicaje de vertederos
 - Localización antiguos vertederos clausurados
- Investigaciones mineras:
 - Estado de las galerías de las minas.
 - Cubicaje de materiales en cantera
 - Estratigrafía en canteras.
- Actualmente se está aplicando en el estudio del Patrimonio Histórico Artístico gracias a la celeridad, la alta resolución, la direccionalidad, el rango de profundidades de penetración, el carácter no destructivo y la sencillez de los procedimientos de campo. Sirve para:
 - Prospección arqueológica
 - Búsqueda de lesiones en monumentos completando estudios patológicos.
 - Control de calidad en restauraciones.
 - Determinación niveles culturales.
 - Detección de humedades en el subsuelo.
 - Determinación de profundidades y espesores de zapatas de cimentación.
 - Encontrar estructuras o cavidades enterradas del subsuelo.

Recientemente se está empleando para el estudio y caracterización de materiales de construcción, así como la inspección, diagnosis y estudio de las manifestaciones patológicas de los mismos. Como por ejemplo los trabajos de Álvarez L. et al. (2005) y Rodríguez-Abad I. et al. (2009).

3.1.1. Instrumentación y métodos de adquisición de registros

Primeramente, se enumeran y describen los distintos componentes del equipo de georradar y, posteriormente, se procede a especificar los procedimientos que seguimos para obtener los registros.

○ Componentes del equipo de georradar

➤ Unidad central

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 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. 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. La fuente de alimentación de la unidad central es de corriente continua.

➤ Antenas.

Son los elementos encargados tanto de emitir el pulso electromagnético al medio como de recibir la energía que regresa a la superficie tras haber sufrido una reflexión.

Las antenas pueden ser:

- Isotrópicas si radian la energía en todas direcciones del espacio por igual y no tienen direcciones privilegiadas.
- Direccionales si tienen una dirección privilegiada de radiación y la emisión que produce no es homogénea para todas las direcciones.

A la hora de clasificar las antenas también debemos tener en cuenta la frecuencia central de su emisión. La longitud de onda (λ) del pulso emitido (ecuación 3.1) depende de esta frecuencia (f) y de la velocidad de la onda en el medio (v):

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad [\text{Ecuación 3.1}]$$

Así que debemos escoger cada tipo de antena de acuerdo con las necesidades de su utilización. 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, como se ha dicho, 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 mayores profundidades, pero debido a que tienen una longitud de onda mayor que las emisiones a más alta frecuencia, la resolución obtenida es menor.

Otra manera de clasificar las antenas es por el número de dipolos implementados:

- Las antenas monoestáticas son a la vez emisoras y receptoras de la energía. Permitiendo 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.
 - Accesorios y equipos complementarios

Se pueden añadir algunos accesorios para facilitar las tareas de adquisición de datos. Pueden ser complementos para la visualización y almacenamiento de los registros (impresoras, las pantallas de visualización, los programas informáticos y las unidades de registro de datos en soporte magnético u óptico) y los accesorios para situar los perfiles:

- Marcadores, que permiten introducir una marca en el registro cada vez que se presiona un pulsador, permitiendo introducir marcas para indicar el inicio y el final del perfil y para advertir sobre algún elemento especial dentro del perfil.
- 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.

- **Métodos de adquisición de registros, tratamiento de datos e interpretación de registros y parámetros de un registro.**

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 realizar un perfil se desplaza la antena a lo largo de una línea. Durante el desplazamiento se emite un elevado número de pulsos por segundo. Esto permite que la adquisición de datos se pueda 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. La antena puede estar situada tocando la superficie del medio que se desea estudiar, aunque no es imprescindible.

La adquisición de datos de forma puntual se realiza situando la antena en un punto dado del área de estudio. En dicho punto 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.

El registro que proporciona el georradar se denomina radargrama, obtenidos mediante el empleo del programa Radan. Es posible dar una interpretación directa de los radargramas, pero antes de llegar a una conclusión final, hay ocasiones, que se requiere un largo proceso de interpretación. Por ello, es necesario conocer los principales parámetros de un registro y calcular los parámetros que son necesarios para efectuar una correcta interpretación de los registros. En la figura 3.1 se observa un ejemplo de un radargrama y una traza de onda del mismo.

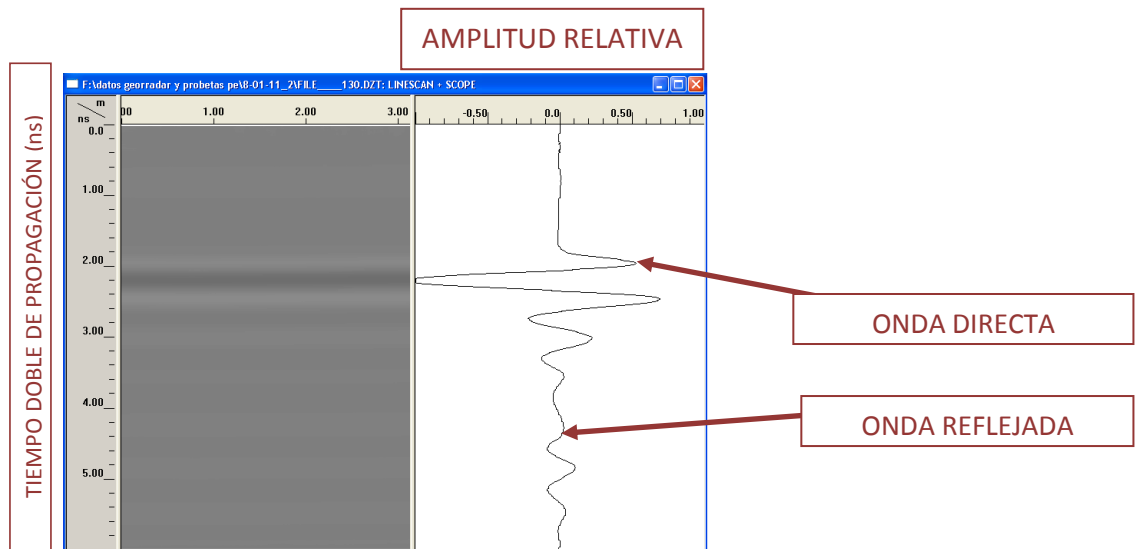


Figura 3.1.- Radargrama y traza de una probeta.

Los parámetros que definen al radargrama se recogen en la cabecera del archivo de registro (Figura 3.2). Todos los registros contienen una cabecera de texto con información sobre cómo se realiza la adquisición. Esta información incluye entre otras informaciones el nombre del fichero, la fecha de registro y las fechas de posteriores modificaciones, el rango, la posición del inicio, el número de pulsos emitidos por segundo durante la adquisición de datos, el factor de superposición de trazas, la función de ganancia y los filtros que se han aplicado sobre el radargrama durante la adquisición o en posteriores tratamientos.

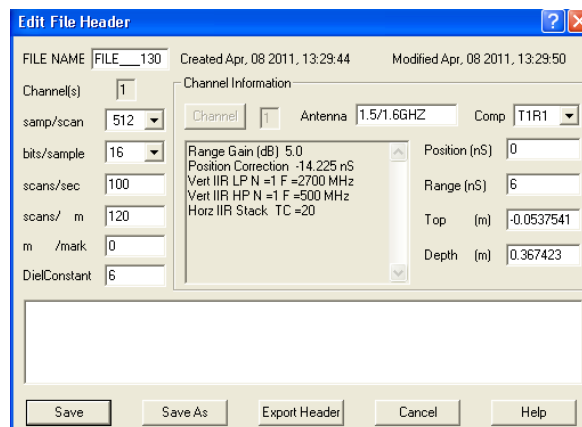


Figura 3.2.- Cabecera de un registro obtenido con el georradar SIR 3000 (GSSI), en el que se detallan los principales parámetros del registro: modelo de la antena (1.5), frecuencia central de emisión según GSSI (1.6 GHz), rango del registro (Range R=6 ns), posición de inicio de la señal (Position P=0 ns), puntos por traza (samp/scan 512), función de ganancia (Range gain (5 dB), etc.

Para un desarrollo más exhaustivo de los parámetros de un registro se puede consultar: Rodríguez-Abad I. (2010).

3.2. Resistógrafo.

El resistógrafo 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.

Aplicación del resistógrafo:

- 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.
- En la inspección de piezas de madera de estructuras antiguas.
- En la inspección de pilas de puentes de madera en los Estados Unidos como lecturas complementarias a las mediciones por ultrasonidos.
- En la inspección de edificios históricos como técnica complementaria a otros procedimientos.
 - En nuestro país se están realizando estudios orientados al desarrollo de una metodología específica para la 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 R. (2003), Álvarez L. (2005), Morales E. (2008) y Rodríguez-Abad I. (2010).

3.2.1. Instrumentación y métodos de adquisición de registros

Primeramente, se enumeran y describen los distintos componentes del equipo de resistógrafo y, posteriormente, se procede a especificar los procedimientos que seguimos para obtener los registros.

○ **Componentes del equipo de resistógrafo**

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.
- Los registros se almacenan en la memoria de la unidad electrónica y al mismo tiempo una pequeña impresora puede reproducir el valor en tanto por ciento de la resistencia a la penetración.

- **Métodos de adquisición de registros, tratamiento de datos e interpretación de registros y parámetros de un registro.**

La 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). Para el procesado de datos se empleara el programa B-Tools Pro.

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. 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 que para analizar el grado de deterioro de una pieza es necesario perforar en distintos puntos de la pieza. Existen diversos estudios publicados, por ejemplo el de Basterra A. (2005), donde se avala el empleo del resistógrafo como herramienta válida para la obtención de valores de resistencia y densidad de la madera.

A continuación se muestra un resistograma (figura 3.3) en el que se puede observar una zona, remarcada con un cuadro rojo, donde se aprecia una disminución de la resistencia que debe coincidir con un defecto de la madera.

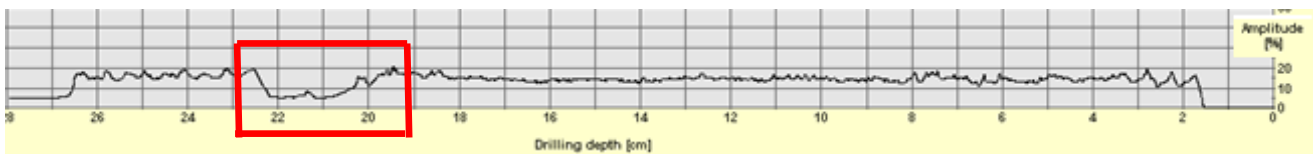


Figura 3.3.- Resistograma con posible defecto en la probeta analizada.

4. **Desarrollo experimental:**

En este apartado se da información sobre el tipo de probetas que se utilizaron, se describe el equipo de georradar, la antena, los métodos de adquisición de registros y el equipo del resistógrafo empleados para el estudio de la anisotropía del Pino radiata.

4.1. **Descripción de las probetas ensayadas**

Para el cálculo del contenido de humedad de una pieza aserrada se puede utilizar el método de secado en estufa o el método de la resistencia eléctrica. En este caso se opta por utilizar en el laboratorio el método de secado en estufa.

Cálculo del contenido de humedad del pino radiata o insignis, de nuestro lote, según la norma UNE 13.183-1:2002.

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad \text{[Ecuación 4.1]}$$

m_1 la masa de la muestra antes de secar (g).

m_0 la masa de la muestra anhidra (g).

ω contenido de humedad en tanto por ciento.

18/04/2010		Dimensiones(cm)Figura			18/04/2010	20/04/2011	ω
Tipo	Probeta	a_0	b_0	c_0	Masa ₀ (g)	Masa _f (g)	%
Insignis	1	6	7,3	24,5	657,57	583,05	12,8
Insignis	2	6	7,3	24,5	659,77	584,20	12,9
Insignis	3	6	7,3	24,5	667,99	592,50	12,7

Tabla 4.1.- Tabla para obtención de contenido de humedad y densidad de nuestro lote de madera pino radiata.

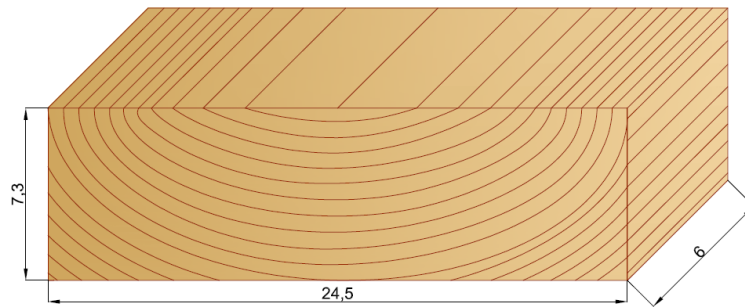


Figura 4.1 Dimensiones de las probetas para el cálculo de la densidad.

El contenido de humedad esta expresado con aproximación del 0,1%.

La media del los porcentajes del contenido de humedad sale (tabla 4.1): 12,8%

Para un contenido de humedad de 12,8%, se procede al cálculo de la densidad de madera del pino radiata o insignis, de nuestro lote, según la norma UNE 56.531:1977:

Realizamos el cálculo de la densidad de las probetas para un contenido de humedad de 12,8% con la ecuación 2.1 y las dimensiones de la figura 4.1 obteniendo los valores de la tabla 4.2.

Tipo	Probeta	D(kg/m ³)
Radiata	1	612,77
Radiata	2	614,82
Radiata	3	622,48
Densidad media		616,69

Tabla 4.2.- Densidad de las probetas extraídas del lote de madera pino radiata.

4.2. Descripción del equipo empleado: SIR 3000.

A continuación se define la unidad central del georradar en la figura 4.2. En ella podemos observar el radargrama de la medición, la traza de la onda y parámetros elegidos.

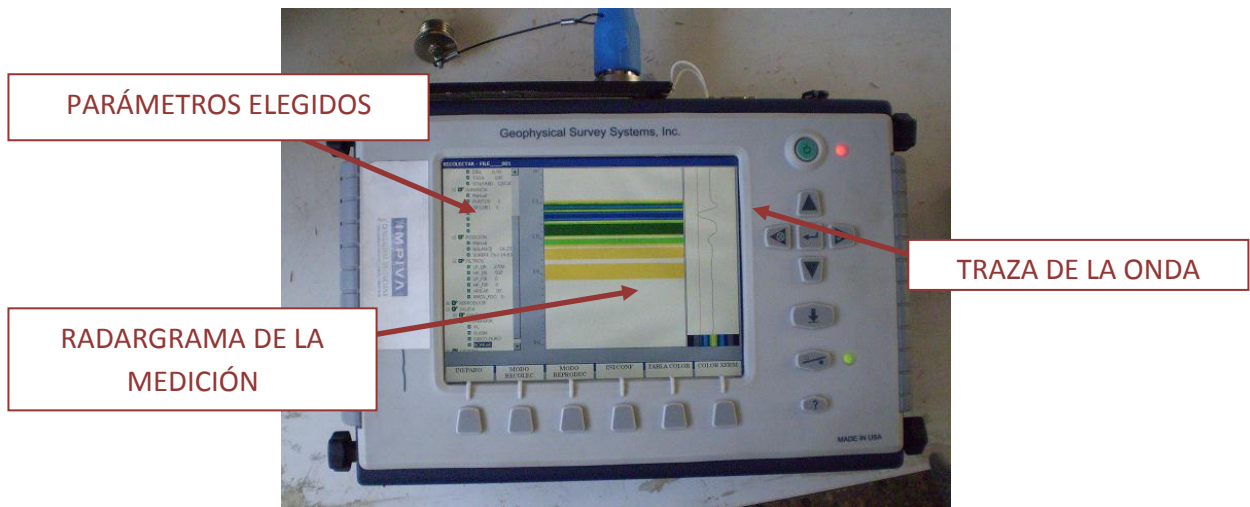


Figura 4.2 Fotografía de la unidad central empleada.

Según los datos obtenidos en la página web de GSSI obtenemos las características, especificaciones y demás datos relevantes sobre el georradar utilizado.

Características:

- Compatible con todas las antenas GSSI
- Ligero y portátil.
- Baterías recargables extraíbles.
- Interfaz de usuario de Windows.
- GPS de integración.
- Alta resolución de pantalla a color.
- Robusto y resistente a la intemperie.

Entrega de resultados:

- Extraíble para tarjetas de memoria Compact Flash.
- Almacenamiento interno de grandes cantidades de datos.

Aplicaciones:

- Inspección de hormigón.
- Investigación geológica.
- Arqueología.
- Forense.
- Minería
- Ingeniería civil

Especificaciones:

SISTEMA	
ANTENAS	Compatible con todas las antenas GSSI.
NUMERO DE CANALES	1
ALMACENAMIENTO DE DATOS	Memoria interna: 2GB Flash memory card. Puerto Compact Flash: Acepta memoria CF de 2 GB
PANTALLA	TFT, resolución 800x600, 64K colores
MODOS DE PANTALLA	Linescan, O-scope, 3D
ADQUISICION DE DATOS	
FORMATO DE DATOS	RADAN (.dzt)
SCAN RATE EXAMPLES	220 scans/sec at 256 samples/scan, 16 bit 120 scans/sec at 512 samples
INTERVALO DE EXPLORACION	Seleccionable por el usuario
NUMERO DE MUESTRAS POR EXPLORACION	256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192
MODOS DE FUNCIONAMIENTO	Free run, survey wheel, point mode
INTERVALOS DE TIEMPO	0-8,000 nanoseconds full scale, user-selectable Gain: Manual or automatic, 1-5 gain points (-20 to +80 dB)
FILTROS	Vertical: Low Pass and High Pass IIR and FIR Horizontal: Stacking, Background Removal
IDIOMAS	
	Inglés, español, alemán, francés, italiano, japonés y chino
FUNCIONAMIENTO	
TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	-10°C to 40°C ambient
REQUISITOS DE CARGADOR DE ENERGIA	15 V DC, 4 amps
BATERIA	10.8 V DC, internal
RANGO DE TRANSMISION	Up to 100 KHz
ENTRADA/SALIDA	
PUERTOS DISPONIBLES	Antenna input DC power input Serial RS232 (GPS port) Compact Flash memory USB master slave
MECÁNICA	
DIMENSIONES	12.4 (l) x 8.7 (w) x 4.1 (h) in (31.5 x 22 x 10.5 cm)
PESO	9 lbs (4.1 kg) including battery
MEDIO AMBIENTE	Resistente al agua

El sistema incluye:

- Unidad de control SIR 3000.
- 2 baterías.
- Cargador de baterías.
- Adaptador de CA (también funciona como cargador).
- Manual de usuario.
- Quitasol.

4.3. Descripción y calibración de la antena empleada. Palm 2 GHz

La antena empleada es la PALM 2 GHz. Como podemos observar en la Figura 4.3 la antena posee una rueda para poder realizar perfiles.

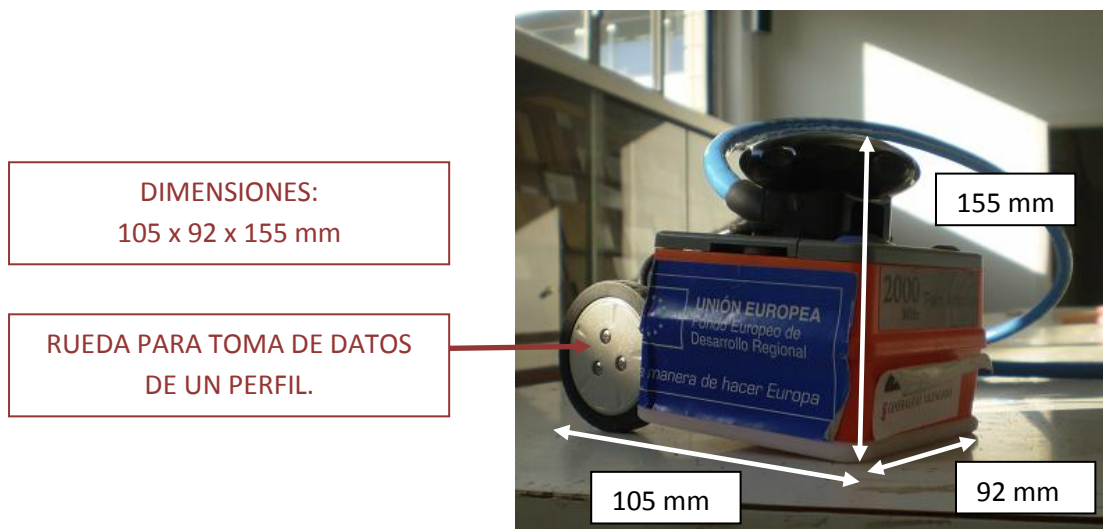


Figura 4.3 Fotografía de la antena empleada.

Características:

- Diseño compacto.
- Ideal para espacios reducidos.
- Todo en uno: antena GPR y cable
- Alta durabilidad
- Caja de plástico y placa de deslizamiento sustituibles.

Especificaciones:

- Frecuencia: 2000 MHz
- Rango de profundidad: 10-12 inches (25-35 cm)
- Peso de la antena: 1.1 pounds (.49 kg)
- Peso del cable: 2.1 pounds (.95 kg)
- Número del modelo: 62000.

Calibración de la antena.

Previa a la realización de las mediciones estáticas de 200 scans sobre las probetas de madera cuyas dimensiones son de 25 x 25 x 7.5 cm, se calibra la antena obteniendo como características óptimas las siguientes:

- Range Gain (dB)= (5) con función de ganancia.
- Vert IIR LP N=2F=2700 MHz (para la de 2 GHz).
- Vert IIR HP N=2F=500 MHz (para la de 2 GHz).
- Static Stacking N= 20.
- Scans /second= 80.
- Bits/sample= 16.
- Samples/scans=512.
- Rango= 6ns.
- Position= -0.5ns.
- Posición del equipo SIR3000: Balance: -14.23/Superficie: 14.63.

4.4. Método y descripción de la tipología de adquisición de registros del georradar.

4.4.1. Definición de tipos de medición:

Antes de nada, cabe destacar que en el caso de la antena utilizada el campo eléctrico oscila en la dirección perpendicular al dipolo (emisor E-receptor R) de la misma (ver figura 4.4)

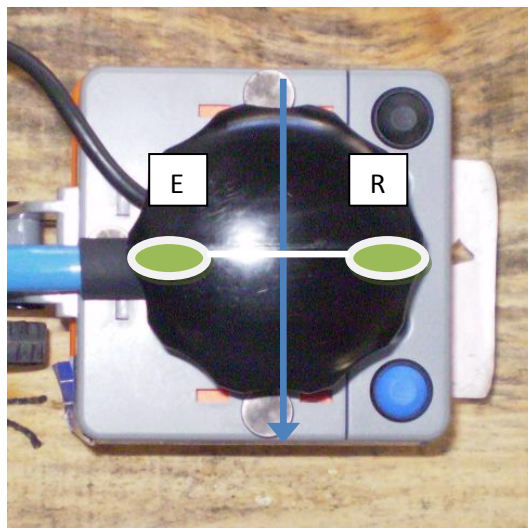


Figura 4.4 Definición de la dirección del campo eléctrico.

Como se puede observar en la figura 4.5 se han nombrado cada una de las superficies de la probeta para identificar las distintas posiciones de la antena.

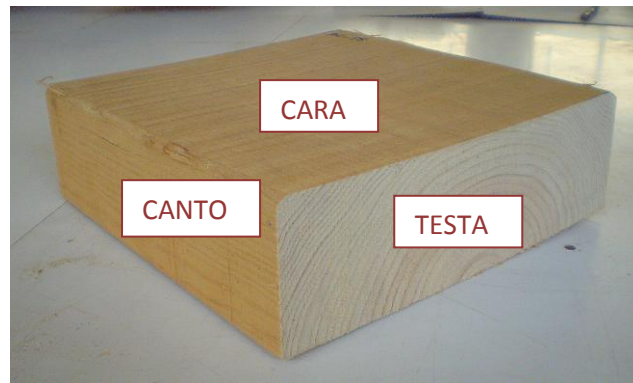


Figura 4.5 Definición de planos de la probetas.

- **Caso 1. Cara paralela:** la antena se sitúa sobre la cara de modo que el campo eléctrico oscila en la dirección paralela a la dirección de las fibras. (Figura 4.6)
- **Caso 2. Cara perpendicular:** la antena se sitúa sobre la cara de modo que el campo eléctrico oscila en la dirección perpendicular a la dirección de la fibra. (Figura 4.7).
- **Caso 3. Testa:** se coloca la antena sobre la testa de modo que el campo oscila en dirección perpendicular a las fibras. Y para la probeta que se muestra en la Figura 4.8 el campo oscila de forma radial.
- **Caso 4. Canto:** se coloca la antena en el canto de la probeta y así el campo eléctrico oscila perpendicular a las fibras. (Figura 4.9).

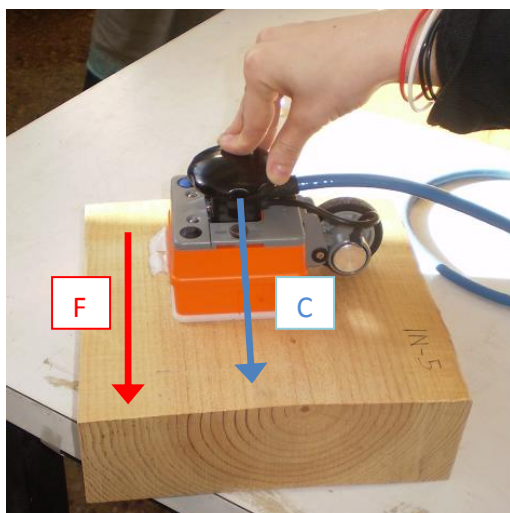


Figura 4.6 Caso 1

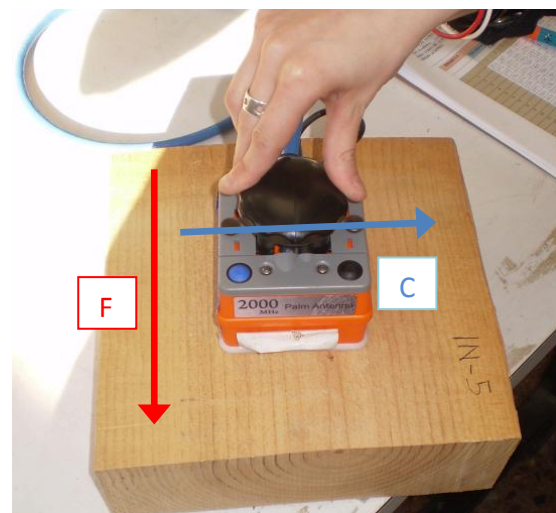


Figura 4.7 Caso 2

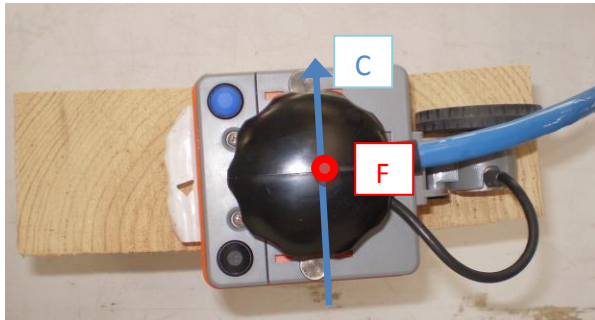


Figura 4.8 Caso 3

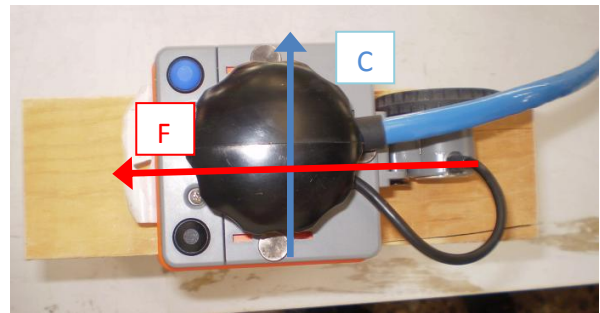


Figura 4.9 Caso 4

Para la realización de los ensayos se dispuso de un reflector metálico (papel de aluminio) para una mejor identificación de la onda reflejada. En la Figura 4.10 se puede apreciar cómo se coloca el papel sobre la probeta, de forma que quede lo mejor posible, ocupando toda la superficie de la cara a ensayar. Al realizar el ensayo el reflector queda en la cara opuesta a la que se coloca la antena.



Figura 4.10 Colocación reflector metálico

4.4.2. Descripción de las probetas:

En el ensayo se emplean muestras de Pino radiata donde las probetas presentan la misma sección de corte. Las dimensiones son: 25 x 25 x 7,5 cm, la densidad (ρ : 616,19 kg/m³) y el contenido de humedad (CH: 12,8 %) en el momento del registro con georradar.

A continuación se procede a la descripción de la testa de las probetas (figuras 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14). Como se puede apreciar las probetas presentan casi idénticas formas de los anillos en todas las testas de las probetas, por lo que, el campo eléctrico oscila en la dirección tangencial a las fibras.

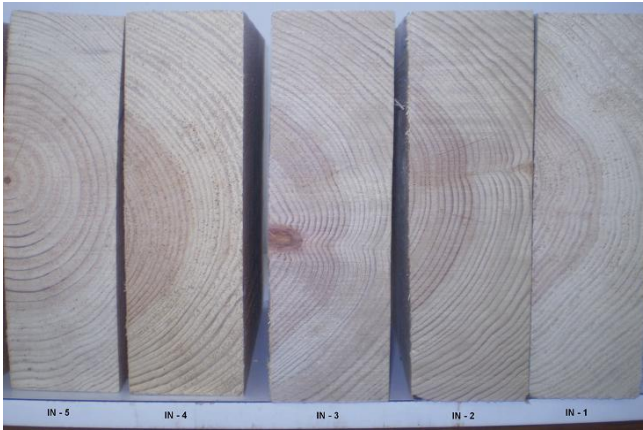


Figura 4.11 Fotografía de los testigos 1 a 5 en testa.



Figura 4.12 Fotografía de los testigos 6 a 10 en testa



Figura 4.13 Fotografía de los testigos 11 a 15 en testa



Figura 4.14 Fotografía de los testigos 16 a 20 en testa

La toma de datos se realizó en una ficha que se incluye en el anexo 1.

4.5. Descripción resistógrafo empleado.

Para la realización de este método empleamos el Resistógrafo IML RESI B300 (figura 4.15) que dispone de una aguja de perforación a una velocidad constante de 1500 rpm., mientras que la de avance es variable. Presenta 7 rangos de velocidades que van desde 5 a 45 cm/min. La velocidad que empleamos nosotros es de 20 cm/min. 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 guardarán en la memoria de la unidad electrónica (figura 4.16).

ORIFICIO DONDE SALE LA AGUJA
QUE PENETRA LA MADERA

BOTÓN DE PUESTA EN MARCHA

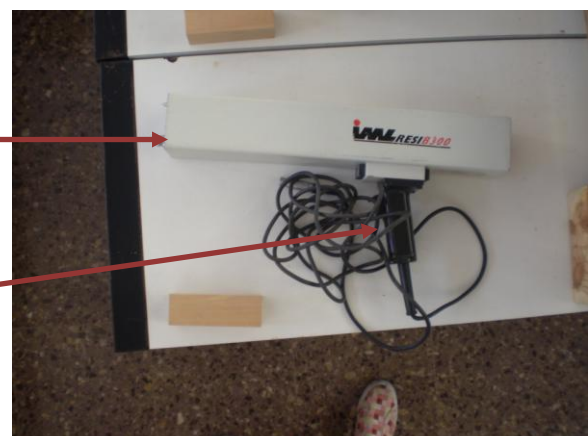


Figura 4.15 Resistógrafo

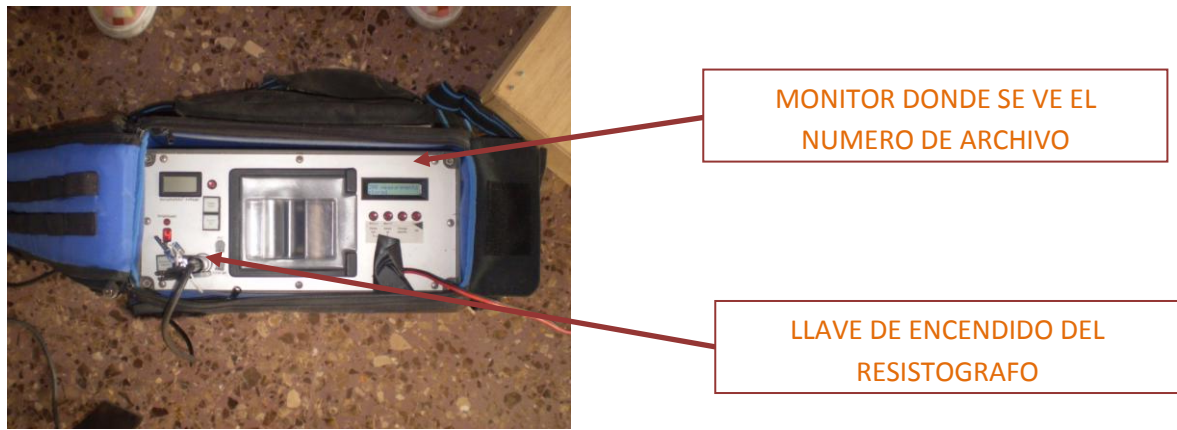


Figura 4.16 Unidad electrónica resistógrafo.

4.6. Métodos y descripción de adquisición de datos con el resistógrafo:

4.6.1. Descripción de ensayos a realizar

Las perforaciones analizadas en este estudio con el resistógrafo se realizan con un ángulo de 90º respecto a las probetas (figura 4.17), ya que es el ángulo que mejor define la geometría interna de la madera.

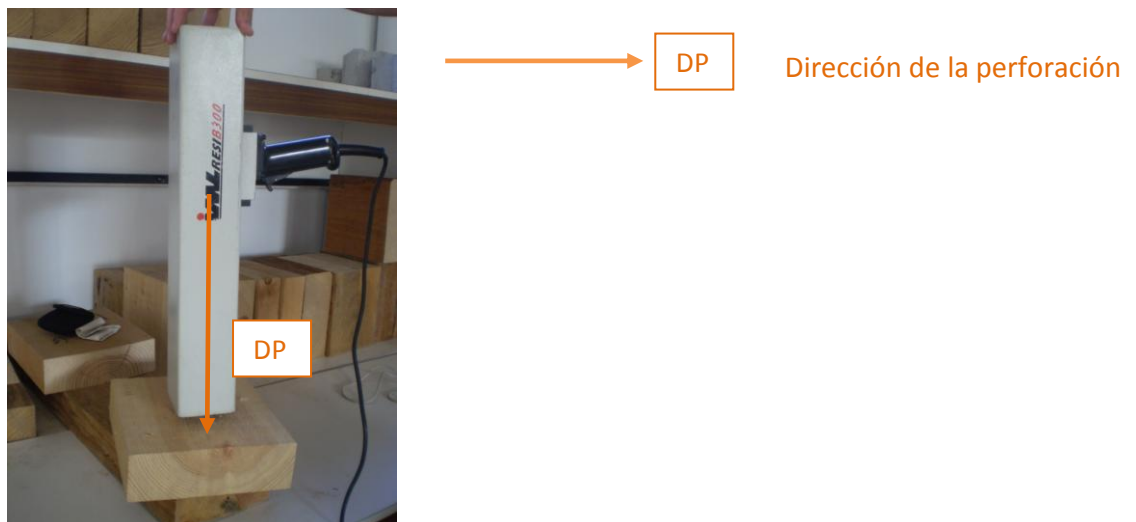


Figura 4.17 Ángulo de ensayo con el resistógrafo

El ensayo del resistógrafo se aplica a cara (figura 4.18) y canto (figura 4.19) de las probetas.



Figura 4.18 Resistógrafo en cara.



Figura 4.19 Resistógrafo en canto.

4.6.2. Descripción de las probetas

Las probetas ensayadas fueron las mismas que para el georradar.

La toma de datos se realizó en una ficha que se incluye en el anexo 2.

5. Obtención e interpretación de resultados.

Para poder interpretar los registros obtenidos con el georradar primero se establece un criterio de lectura de tiempos en las ondas obtenidas para cada caso. Posteriormente, se indican las amplitudes, velocidades, ctes dieléctricas y amplitudes normalizadas obtenidas, en dichos tiempos, necesarias para poder realizar la comparación entre casos. Caso 1 vs caso 2 por un lado, y caso 3 vs 4 por otro.

Para poder interpretar los registros obtenidos con el resistógrafo se exportan los datos obtenidos y se procesan en el programa Excel.

5.1. Datos del pino radiata con la utilización de georradar.

Criterio de lectura de tiempos y amplitudes en el radargrama:

Leyendas: Donde se toma el tiempo onda directa	_____	D
Donde se toma el tiempo onda reflejada uno.	_____	R1
Donde se toma el tiempo onda reflejada dos.	_____	R2

Casos 1 y 2:

En estos casos se toman:

Tiempo onda directa (D_{T1}) y amplitud onda directa (A_{DT1}): en el primer máximo apreciado en el radargrama.

Tiempo onda reflejada (R_{T1}) y amplitud onda reflejada (A_{RT1}): el tiempo de llegada de la reflexión en el primer punto donde se produce un cambio de la tendencia de la traza cuando hay reflector y cuando no hay reflector. Se aprecia un cambio de polaridad.

Por lo que a partir de esta posición la traza superior (con reflector) tiene un mínimo relativo y en la traza inferior (sin reflector) se aprecia un cambio de polaridad. Este tiempo será el que vamos a considerar como el de llegada de la reflexión.

Estos tiempos y amplitudes están indicados en las tablas 5.1 y 5.2.

- Caso 1: Para la visualización de las ondas utilizamos dos figuras, una con reflector y otra sin reflector, sin ganancia. Como no se pueden apreciar correctamente las ondas colocamos otra figura en la que se aplica ganancia en la probeta con reflector (Figuras 5.1 (a) (b) (c)).
- Caso 2: Para la visualización de las ondas en este caso se realiza de forma semejante al caso anterior (Figuras 5.2 (a) (b) (c)).

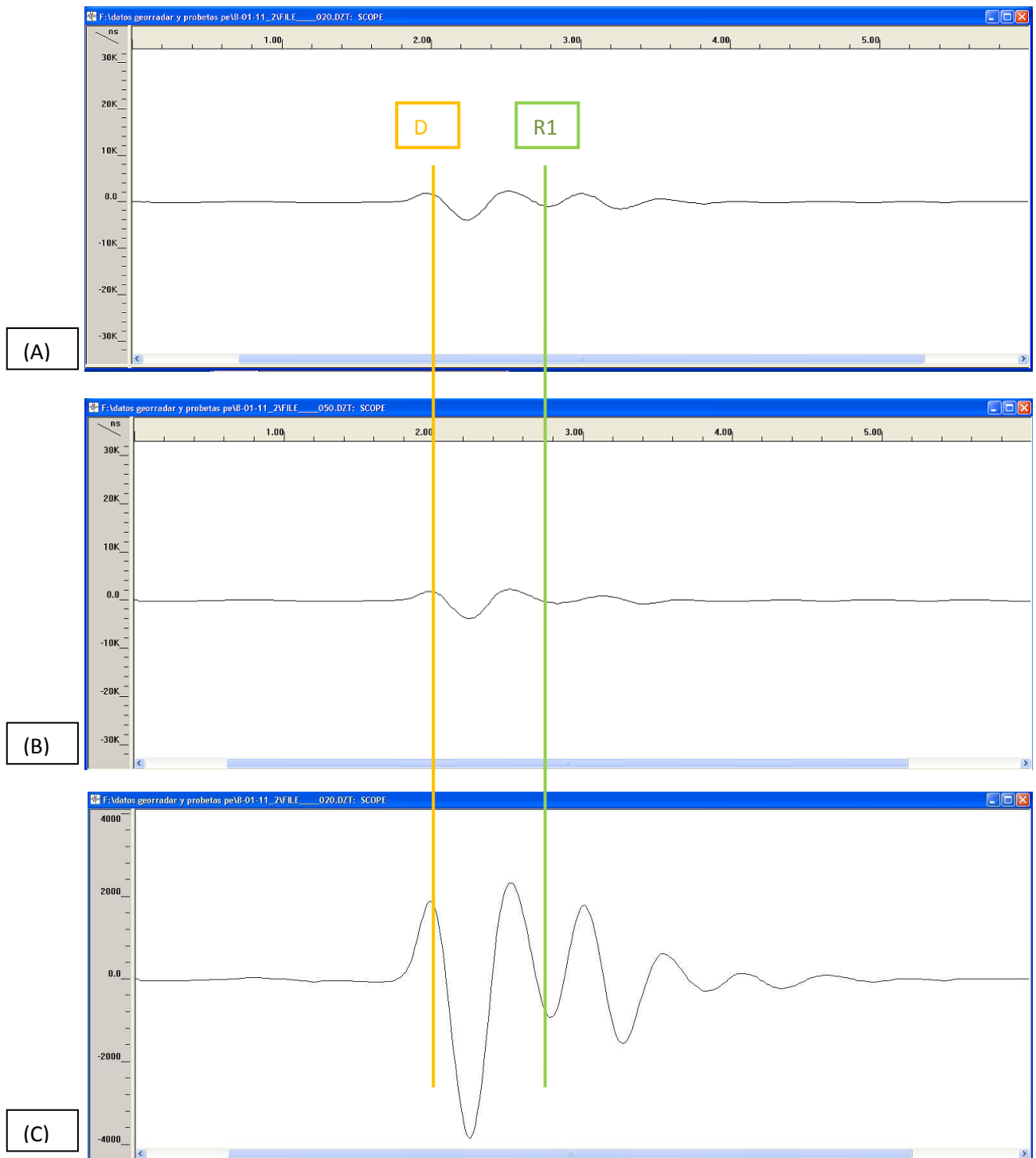


Figura 5.1 (A): Radargramas caso 1 con reflector. (B): Radargramas caso 1 sin reflector. (C) Radargramas caso 1 con reflector y ganancia.

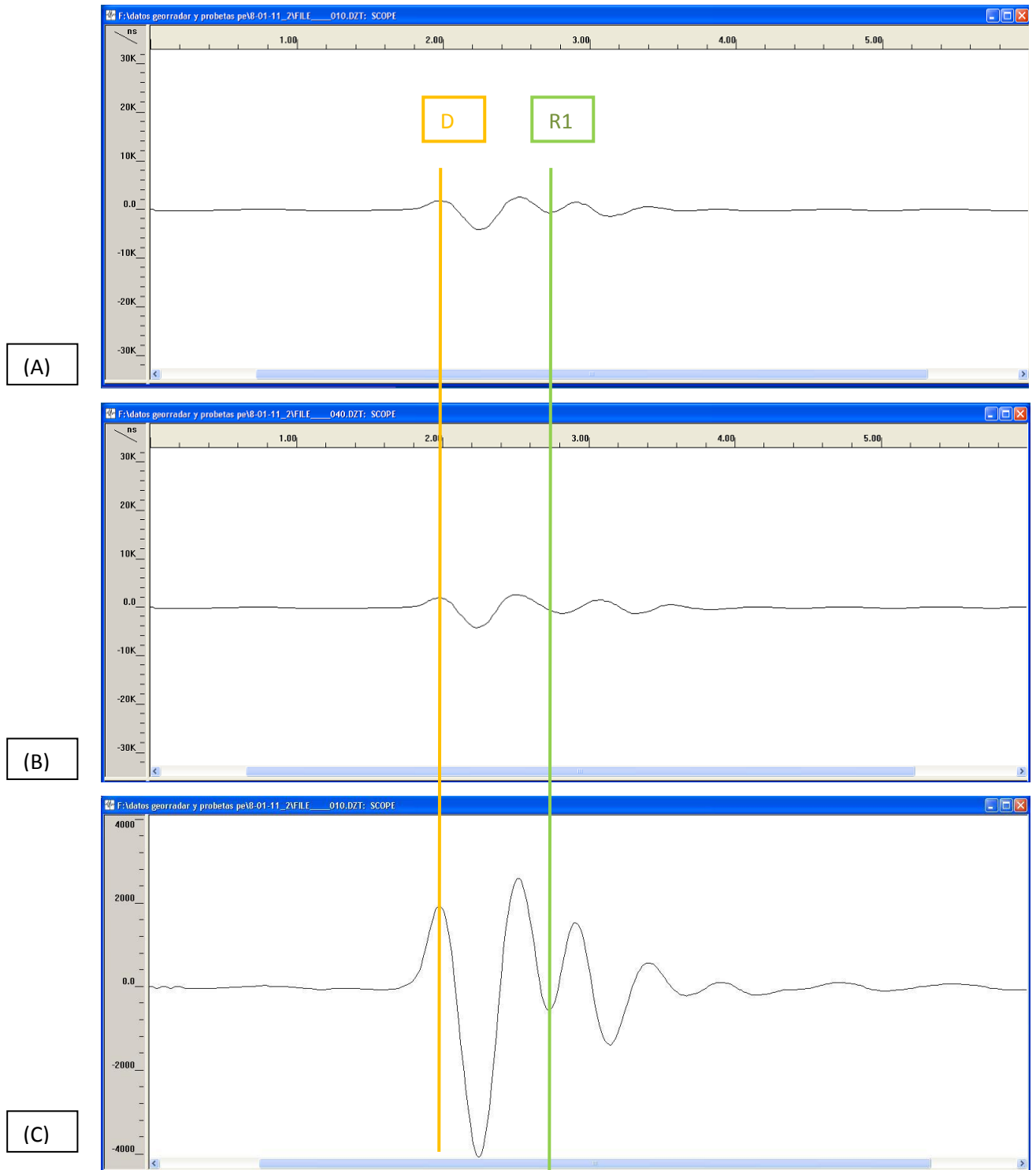


Figura 5.2 (A): Radargramas caso 2 con reflector. (B): Radargramas caso 2 sin reflector. (C) Radargramas caso 2 con reflector y ganancia.

Casos 3 y 4.

En estos casos se toman:

Tiempo onda directa (DT1) y amplitud onda directa (ADT1): en el primer máximo apreciado en el radargrama.

Tiempo onda reflejada (RT1) y amplitud onda reflejada (ART1): donde se puede apreciar un

cambio de tendencia.

Tiempo onda reflejada (RT2) y amplitud onda reflejada (ART2): en el primer máximo apreciado de la onda reflejada.

Estos tiempos y amplitudes están indicados en las tablas 5.1 y 5.2.

- Caso 3: Para la visualización de las ondas vamos a utilizar dos figuras, una con reflector y otra sin reflector, sin ganancia. Como no se pueden apreciar correctamente las ondas colocamos otra figura en la que se aplica ganancia en la probeta con reflector (Figuras 5.3 (a) (b) (c)).
- Caso 4: Para la visualización de las ondas en este caso se realiza de forma semejante al caso anterior (Figuras 5.4 (a) (b) (c)).

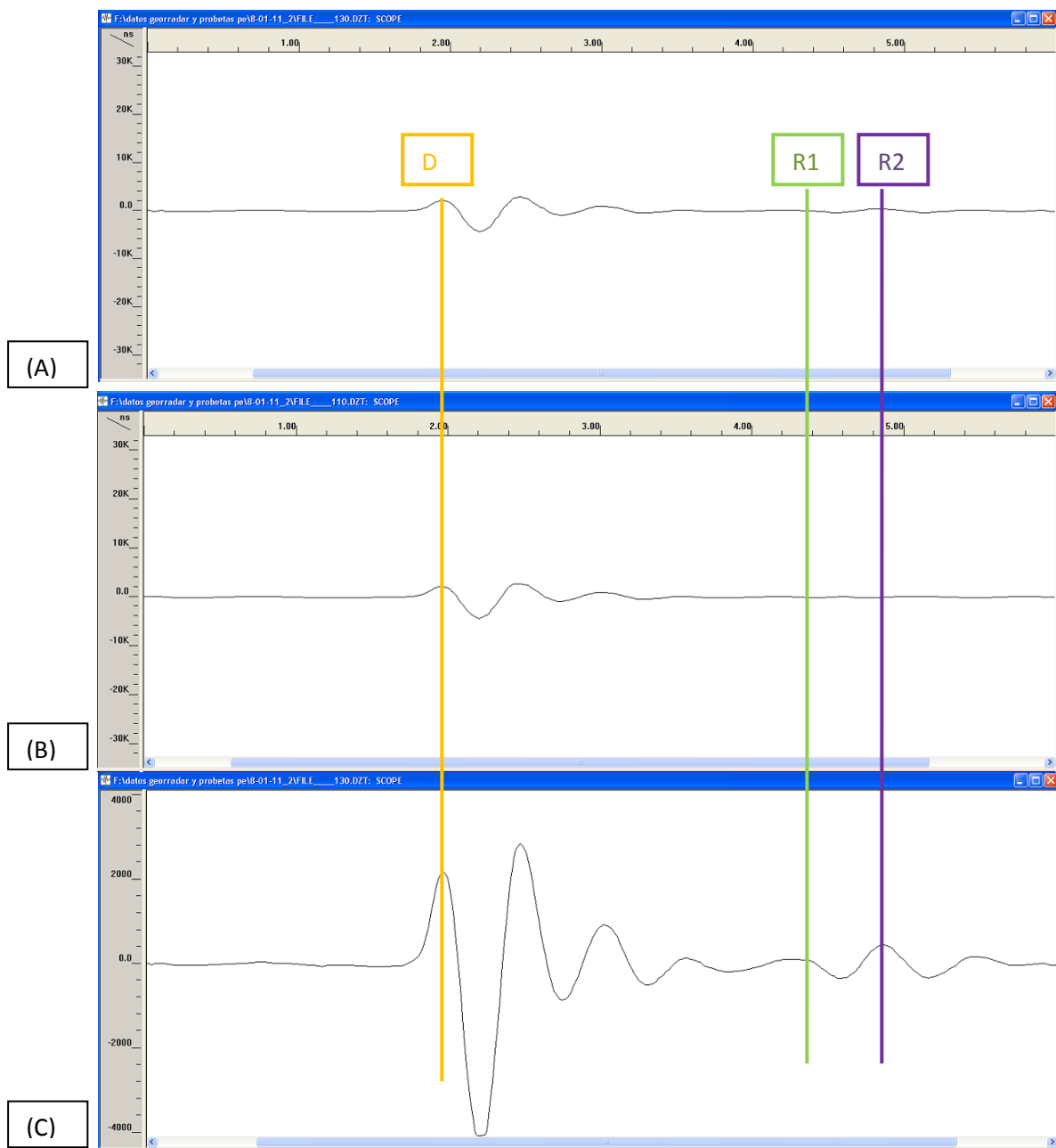


Figura 5.3 (A): Radargramas caso 3 con reflector. (B): Radargramas caso 3 sin reflector. (C) Radargramas caso 3 con reflector y ganancia.

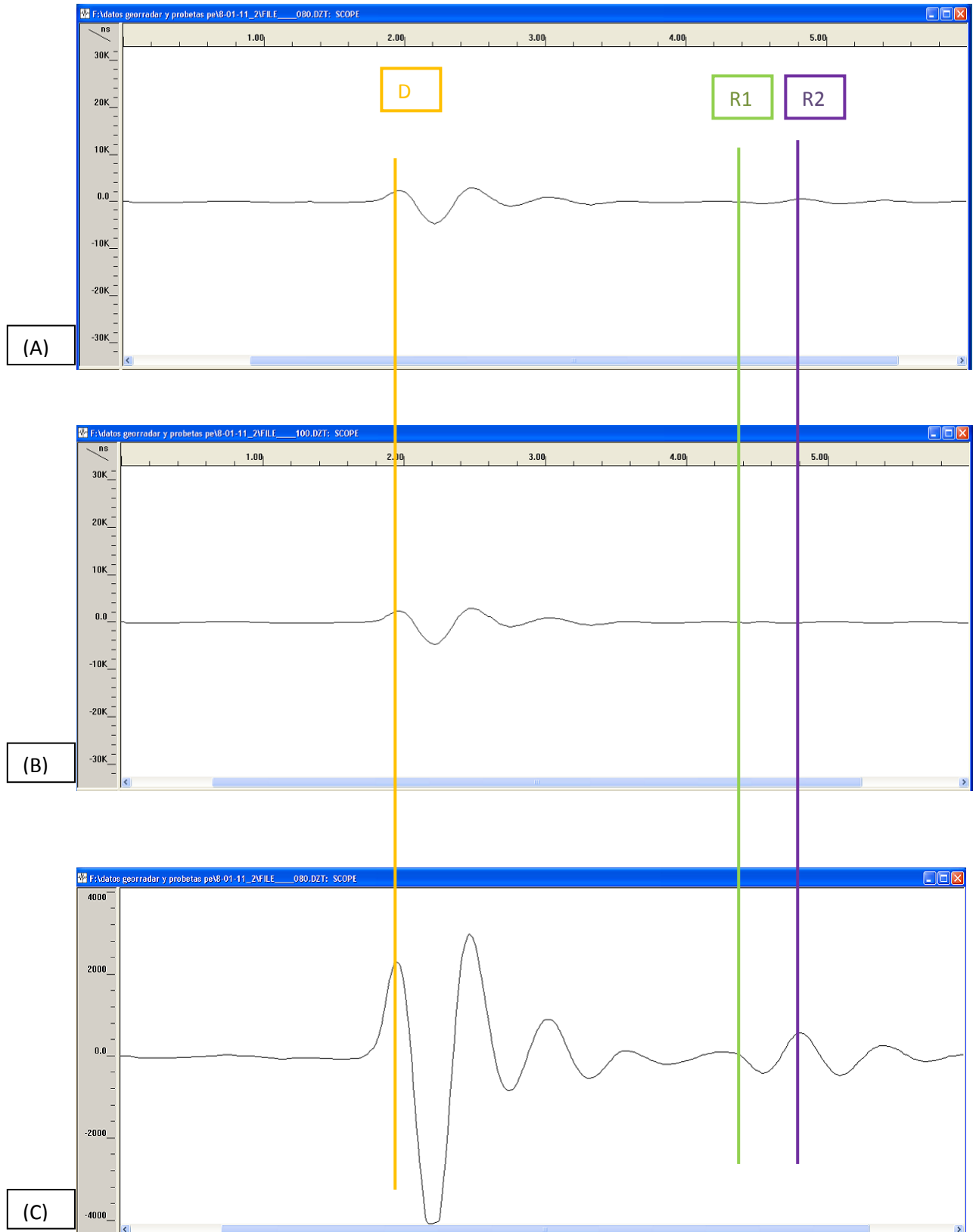


Figura 5.4 (A): Radargramas caso 3 con reflector. (B): Radargramas caso 3 sin reflector. (C) Radargramas caso 3 con reflector y ganancia.

En la tabla 5.1 se registran los datos de los tiempos expresados en nano segundos, de las ondas directas y reflejadas en cada caso.

	MADERA PINO RADIATA									
	CASO									
	CASO 1: Cara //		CASO 2: Cara ⊥		CASO 3: Testa			CASO 4: Canto		
PROBETA	D _{T1}	R _{T1}	D _{T1}	R _{T1}	D _{T1}	R _{T1}	R _{T2}	D _{T1}	R _{T1}	R _{T2}
1	1,97	2,79	1,97	2,69	1,95	4,45	4,91	1,95	4,43	4,88
2	1,98	2,80	1,98	2,71	1,95	4,47	4,91	1,97	4,44	4,85
3	1,98	2,81	1,98	2,72	1,96	4,49	4,96	1,96	4,43	4,91
4	1,98	2,82	1,97	2,73	1,95	4,56	5,00	1,96	4,45	4,87
5	1,98	2,77	1,97	2,68	1,95	4,32	4,75	1,97	4,37	4,79
6	1,98	2,77	1,98	2,68	1,95	4,35	4,82	1,95	4,36	4,76
7	1,98	2,77	1,98	2,68	1,95	4,34	4,80	1,96	4,35	4,77
8	1,98	2,77	1,98	2,68	1,95	4,36	4,88	1,95	4,37	4,77
9	1,98	2,78	1,97	2,70	1,95	4,34	4,82	1,96	4,38	4,79
10	1,98	2,78	1,98	2,72	1,95	4,33	4,85	1,96	4,34	4,82
11	1,97	2,77	1,96	2,66	1,94	4,31	4,86	1,94	4,31	4,80
12	1,97	2,76	1,95	2,66	1,95	4,43	4,95	1,95	4,28	4,75
13	1,97	2,78	1,96	2,69	1,95	4,34	4,87	1,96	4,36	4,82
14	1,97	2,77	1,96	2,67	1,95	4,36	4,91	1,96	4,32	4,78
15	1,97	2,76	1,96	2,65	1,95	4,35	4,87	1,95	4,38	4,80
16	1,99	2,76	1,95	2,67	1,95	4,47	4,99	1,95	4,38	4,80
17	1,97	2,78	1,94	2,68	1,94	4,40	4,96	1,95	4,41	4,90
18	1,97	2,79	1,94	2,69	1,96	4,47	4,90	1,96	4,39	4,84
19	1,97	2,78	1,95	2,68	1,95	4,44	4,93	1,95	4,43	4,85
20	1,97	2,78	1,96	2,68	1,96	4,42	4,93	1,96	4,42	4,83
PROMEDIO	0,08	0,13	0,12	0,14	0,07	0,26	0,25	0,09	0,22	0,22
DESVIACION TIPICA	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,07	0,06	0,01	0,05	0,05

Tabla 5.1 Listado de tiempos en ns.

En la tabla 5.2 anotamos el valor de las amplitudes según el tiempo y el caso que nos encontremos. En esta tabla registramos los datos sin unidades.

	MADERA PINO RADIATA									
	CASO									
	CASO 1: Cara //		CASO 2: Cara ⊥		CASO 3: Testa			CASO 4: Canto		
PROBETA	A _{DT1}	A _{RT1}	A _{DT1}	A _{RT1}	A _{DT1}	A _{RT1}	A _{RT2}	A _{DT1}	A _{RT1}	A _{RT2}
1	1678,00	-809,00	1871,00	-560,00	1899,00	-1,00	157,00	1844,00	-1,00	438,00
2	1678,00	-933,00	1927,00	-809,00	1927,00	-1,00	186,00	1927,00	-1,00	310,00
3	1802,00	-933,00	1927,00	-933,00	1678,00	-63,00	310,00	2051,00	-63,00	434,00
4	1678,00	-933,00	1927,00	-933,00	1927,00	-63,00	186,00	1927,00	-187,00	434,00
5	1927,00	-933,00	2175,00	-200,00	1927,00	-63,00	434,00	1927,00	-187,00	683,00
6	1802,00	-933,00	2175,00	-311,00	1927,00	-63,00	186,00	1927,00	-187,00	434,00
7	1678,00	-809,00	2175,00	-436,00	1927,00	-63,00	186,00	1927,00	-63,00	310,00
8	1802,00	-809,00	2175,00	-311,00	2051,00	-63,00	186,00	2051,00	-63,00	310,00
9	1802,00	-1058,00	1927,00	-809,00	2051,00	-63,00	434,00	2051,00	-63,00	434,00
10	1802,00	-1058,00	1797,00	-809,00	2051,00	-63,00	310,00	2175,00	-63,00	559,00
11	1802,00	-809,00	2300,00	-560,00	2051,00	-63,00	559,00	2051,00	-63,00	559,00
12	1802,00	-809,00	2300,00	-187,00	2051,00	-63,00	310,00	2051,00	-63,00	559,00

13	1553,00	-809,00	2051,00	-809,00	1927,00	-63,00	559,00	1797,00	-187,00	559,00
14	1553,00	-809,00	2051,00	-560,00	2051,00	-63,00	559,00	2051,00	-63,00	559,00
15	1802,00	-933,00	2175,00	-311,00	2051,00	-63,00	559,00	2040,00	-108,00	536,00
16	1802,00	-809,00	2300,00	-311,00	1802,00	-63,00	310,00	2051,00	-63,00	559,00
17	1553,00	-809,00	2051,00	-809,00	2051,00	-63,00	310,00	1927,00	-63,00	559,00
18	1802,00	-809,00	2051,00	-850,00	2051,00	-63,00	310,00	2051,00	-187,00	559,00
19	1802,00	-809,00	2051,00	-809,00	2051,00	-63,00	310,00	2051,00	-63,00	559,00
20	1802,00	-809,00	2051,00	-809,00	2051,00	-63,00	310,00	2051,00	-187,00	559,00
PROMEDIO	1746,10	-871,10	2066,90	-497,85	1975,10	-56,80	333,55	2059,10	-96,25	495,65
DESVIACION TIPICA	102,76	85,57	160,73	461,18	102,92	19,08	139,16	245,94	64,83	102,29

Tabla 5.2 Listado de amplitudes.

Cálculo de velocidades y constante dieléctrica.

Según el esquema que se muestra en la figura 5.5, procedemos al calculo de la velocidad y constante dieléctrica según las ecuaciones 5.1 y 5.2

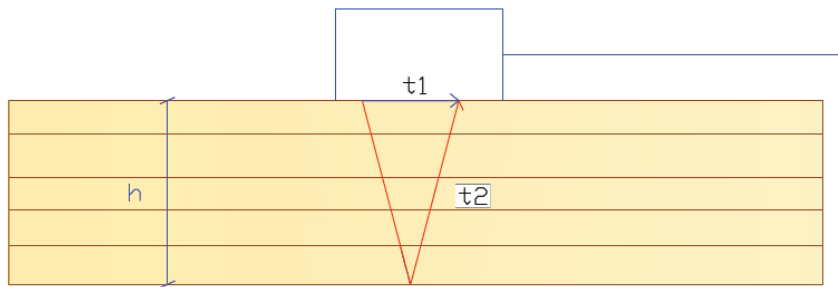


Figura 5.5 Esquema de los tiempos de la medición.

- t1 tiempo onda directa.
 - t2 tiempo onda reflejada.
 - h altura de la probeta
- } Representados en la figura 5.5.

$$v = \frac{2h}{t_2 - t_1} \quad \text{[Ecuación 5.1]}$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{[Ecuación 5.2]}$$

- C velocidad de la luz.
- ϵ_r constante dieléctrica.

Una vez aplicadas las ecuaciones 5.1 y 5.2, se procede a registrar los datos obtenidos en la tabla 5.3.

MADERA PINO RADIATA (25*25*7,5 cm)												
CASO												
	CASO 1: Cara //		CASO 2: Cara ⊥		CASO 3: Testa				CASO 4: Canto			
PROBETA	V ₁	ε ₁	V ₂	ε ₂	V _{3RT1}	V _{3RT2}	ε _{3RT1}	ε _{3RT2}	V _{4RT1}	V _{4RT2}	ε _{4RT1}	ε _{4RT2}
1	18,29	2,69	20,83	2,07	20,00	16,89	2,25	3,15	20,16	17,06	2,21	3,09
2	18,29	2,69	20,55	2,13	19,84	16,89	2,29	3,15	20,24	17,36	2,20	2,99
3	18,07	2,76	20,27	2,19	19,76	16,67	2,30	3,24	20,24	16,95	2,20	3,13
4	17,86	2,82	19,74	2,31	19,16	16,39	2,45	3,35	20,08	17,18	2,23	3,05
5	18,99	2,50	21,13	2,02	21,10	17,86	2,02	2,82	20,83	17,73	2,07	2,86
6	18,99	2,50	21,43	1,96	20,83	17,42	2,07	2,97	20,75	17,79	2,09	2,84
7	18,99	2,50	21,43	1,96	20,92	17,54	2,06	2,92	20,92	17,79	2,06	2,84
8	18,99	2,50	21,43	1,96	20,75	17,06	2,09	3,09	20,66	17,73	2,11	2,86
9	18,75	2,56	20,55	2,13	20,92	17,42	2,06	2,97	20,66	17,67	2,11	2,88
10	18,75	2,56	20,27	2,19	21,01	17,24	2,04	3,03	21,01	17,48	2,04	2,94
11	18,75	2,56	21,43	1,96	21,10	17,12	2,02	3,07	21,10	17,48	2,02	2,94
12	18,99	2,50	21,13	2,02	20,16	16,67	2,21	3,24	21,46	17,86	1,95	2,82
13	18,52	2,62	20,55	2,13	20,92	17,12	2,06	3,07	20,83	17,48	2,07	2,94
14	18,75	2,56	21,13	2,02	20,75	16,89	2,09	3,15	21,19	17,73	2,01	2,86
15	18,99	2,50	21,74	1,90	20,83	17,12	2,07	3,07	20,58	17,54	2,13	2,92
16	19,48	2,37	20,83	2,07	19,84	16,45	2,29	3,33	20,58	17,54	2,13	2,92
17	18,52	2,62	20,27	2,19	20,33	16,56	2,18	3,28	20,33	16,95	2,18	3,13
18	18,29	2,69	20,00	2,25	19,92	17,01	2,27	3,11	20,58	17,36	2,13	2,99
19	18,52	2,62	20,55	2,13	20,08	16,78	2,23	3,20	20,16	17,24	2,21	3,03
20	18,52	2,62	20,83	2,07	20,33	16,84	2,18	3,18	20,33	17,42	2,18	2,97
PRO.	18,66	2,59	20,80	2,08	20,43	17,00	2,16	3,12	20,63	17,47	2,12	2,95
DES. T.	0,39	0,10	0,55	0,11	0,56	0,38	0,12	0,14	0,38	0,28	0,08	0,09

Tabla 5.3 cálculo de velocidades cm/ns y constantes dieléctricas

Normalización de las amplitudes:

La amplitud es un parámetro adimensional que no se puede comparar por sí misma. Una forma de conseguir que las amplitudes sean comparables unas con otras es relacionarlas con la amplitud de la onda del primer máximo positivo del aire. En la figura 5.6 se muestra el radargrama y una traza de onda del aire y en la tabla 5.4 se muestra la amplitud obtenida con el software del programa Radan.

Los datos obtenidos de dividir las amplitudes en los tiempos tomados para las ondas directas y reflejadas de las probetas entre la amplitud en el tiempo tomado de la onda directa del aire se registran en la tabla 5.5.

AIRE		
1		
PROBETA	T _D	A _D
1	1,98	2797,00

Tabla 5.4 Amplitud del aire.

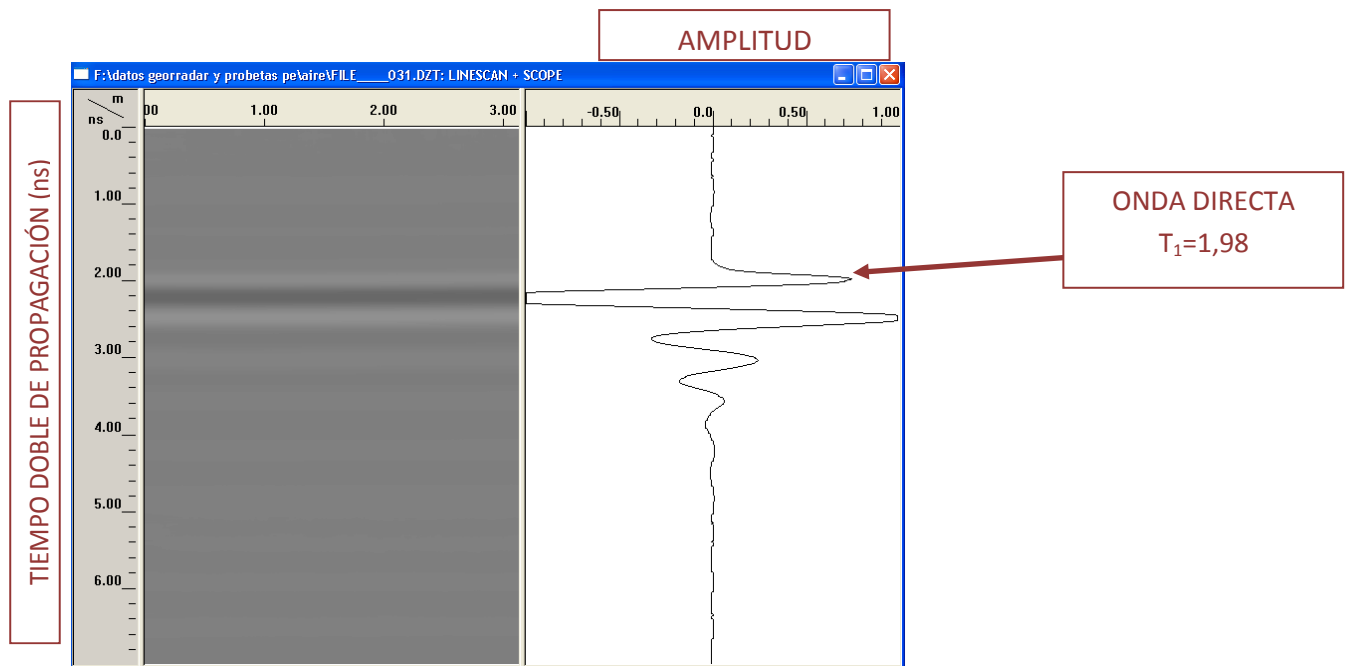


Figura 5.6 Radargrama y traza de la onda del aire.

	MADERA PINO RADIATA AMPLITUDES NORMALIZADAS									
	CASO									
	CASO 1: Cara //		CASO 2: Cara ⊥		CASO 3: Testa			CASO 4: Canto		
PROBETA	A _{DT1}	A _{RT1}	A _{DT1}	A _{RT1}	A _{DT1}	A _{RT1}	A _{RT2}	A _{DT1}	A _{RT1}	A _{RT2}
1	0,60	0,29	0,67	0,20	0,68	0,00	0,06	0,66	0,00	0,16
2	0,60	0,33	0,69	0,29	0,69	0,00	0,07	0,69	0,00	0,11
3	0,64	0,33	0,69	0,33	0,60	0,02	0,11	0,73	0,02	0,16
4	0,60	0,33	0,69	0,33	0,69	0,02	0,07	0,69	0,07	0,16
5	0,69	0,33	0,78	0,07	0,69	0,02	0,16	0,69	0,07	0,24
6	0,64	0,33	0,78	0,11	0,69	0,02	0,07	0,69	0,07	0,16
7	0,60	0,29	0,78	0,16	0,69	0,02	0,07	0,69	0,02	0,11
8	0,64	0,29	0,78	0,11	0,73	0,02	0,07	0,73	0,02	0,11
9	0,64	0,38	0,69	0,29	0,73	0,02	0,16	0,73	0,02	0,16
10	0,64	0,38	0,64	0,29	0,73	0,02	0,11	0,78	0,02	0,20
11	0,64	0,29	0,82	0,20	0,73	0,02	0,20	0,73	0,02	0,20
12	0,64	0,29	0,82	0,07	0,73	0,02	0,11	0,73	0,02	0,20
13	0,56	0,29	0,73	0,29	0,69	0,02	0,20	0,64	0,07	0,20
14	0,56	0,29	0,73	0,20	0,73	0,02	0,20	0,73	0,02	0,20
15	0,64	0,33	0,78	0,11	0,73	0,02	0,20	0,73	0,04	0,19
16	0,64	0,29	0,82	0,11	0,64	0,02	0,11	0,73	0,02	0,20
17	0,56	0,29	0,73	0,29	0,73	0,02	0,11	0,69	0,02	0,20
18	0,64	0,29	0,73	0,30	0,73	0,02	0,11	0,73	0,07	0,20
19	0,64	0,29	0,73	0,29	0,73	0,02	0,11	0,73	0,02	0,20
20	0,64	0,29	0,73	0,29	0,73	0,02	0,11	0,73	0,07	0,20
PROMEDIO	0,62	0,31	0,74	0,22	0,71	0,02	0,12	0,74	0,03	0,18
DESVIACION TIPICA	0,04	0,03	0,06	0,10	0,04	0,01	0,05	0,09	0,02	0,04

Tabla 5.5 Listado de amplitudes normalizadas.

Para una mayor comprensión de las constantes dieléctricas y que puedan ser comparadas con otros trabajos se procede a sacar la relación entre las constantes dieléctricas de los casos comparados 1-2 y 3-4, realizando las anotaciones en la tabla 5.6.

RELACIÓN CONSTANTES DIELECTRICAS		
	CASO	
	CARA	TESTA / CANTO (R _{t1})
PROBETA	$\epsilon_{1 (//)} / \epsilon_{2 (\perp)}$	$\epsilon_{3 (RADIAL)} / \epsilon_{4 (RADIAL)}$
1	1,30	1,02
2	1,26	1,04
3	1,26	1,05
4	1,22	1,10
5	1,24	0,98
6	1,27	0,99
7	1,27	1,00
8	1,27	0,99
9	1,20	0,98
10	1,17	1,00
11	1,31	1,00
12	1,24	1,13
13	1,23	0,99
14	1,27	1,04
15	1,31	0,98
16	1,14	1,08
17	1,20	1,00
18	1,20	1,07
19	1,23	1,01
20	1,27	1,00
MEDIA	1,24	1,02
DESVIACIÓN TÍPICA	0,05	0,04

Tabla 5.6 Relación constantes dieléctricas.

La relación entre las constantes dieléctricas $\epsilon_{1 (//)} / \epsilon_{2 (\perp)}$ da un valor promedio $\epsilon = 1.24$, con una desviación típica de $\sigma = 0.05$ (tabla 5.6). Estos resultados son similares a los obtenidos por otros estudios.

La relación entre las constantes dieléctricas $\epsilon_{3 (//)} / \epsilon_{4 (\perp)}$ del tiempo 1 de la onda reflejada da un valor promedio $\epsilon = 1.02$, con una desviación típica de $\sigma = 0.04$ (tabla 5.6).

Al igual que con las constantes dieléctricas, para una mayor comprensión de las amplitudes y que puedan ser comparadas con otros trabajos se procede a sacar la relación entre amplitudes de los casos comparados 1-2 y 3-4, realizando las anotaciones en la tabla 5.7.

RELACION AMPLITUDES NORMALIZADAS				
PROBETA	CASO			
	CARA D _{T1}	CARA R _{T1}	TESTA / CANTO (D _{T1})	TESTA / CANTO (R _{T1})
	$A_1 (//) / A_2 (\perp)$		$A_3 (RADIAL) / A_4 (RADIAL)$	
1	0,90	1,44	1,03	1,00
2	0,87	1,15	1,00	1,00
3	0,94	1,00	0,82	1,00
4	0,87	1,00	1,00	0,34
5	0,89	4,67	1,00	0,34
6	0,83	3,00	1,00	0,34
7	0,77	1,86	1,00	1,00
8	0,83	2,60	1,00	1,00
9	0,94	1,31	1,00	1,00
10	1,07	1,31	0,94	1,00
11	0,78	1,44	1,00	1,00
12	0,78	4,33	1,00	1,00
13	0,76	1,00	1,07	0,34
14	0,76	1,44	1,00	1,00
15	0,83	3,00	1,01	0,58
16	0,78	2,60	0,88	1,00
17	0,76	1,00	1,06	1,00
18	0,88	0,95	1,00	0,34
19	0,88	1,00	1,00	1,00
20	0,88	1,00	1,00	0,34
MEDIA	0,85	1,86	0,99	0,78
DESVIACIÓN TÍPICA	0,08	1,12	0,06	0,31

Tabla 5.7 Relación amplitudes.

La relación entre las amplitudes de la onda directa $A_1 (//) / A_2 (\perp)$ da un valor promedio $A = 0.85$, con una desviación típica de $\sigma = 0.08$ (tabla 5.7). Estos resultados son similares a los obtenidos por otros estudios.

La relación entre las amplitudes de la onda reflejada $A_1 (//) / A_2 (\perp)$ da un valor promedio $A = 1.86$, con una desviación típica de $\sigma = 1.12$ (tabla 5.7).

La relación entre las amplitudes de la onda directa $A_3 (radial) / A_4 (radial)$ da un valor promedio $A = 0.99$, con una desviación típica de $\sigma = 0.06$ (tabla 5.7). Estos resultados son similares a los obtenidos por otros estudios.

La relación entre las amplitudes de la onda reflejada $A_3 (radial) / A_4 (radial)$ da un valor promedio $A = 0.78$, con una desviación típica de $\sigma = 0.31$ (tabla 5.7). Estos resultados son similares a los obtenidos por otros estudios.

5.1.1. Comparación resultados caso 1 vs caso 2.

En la figura 5.7, se observa el gráfico que define las velocidades en la cara de las probetas, con una propagación de la onda en paralelo y perpendicular respecto a la dirección de las fibras.

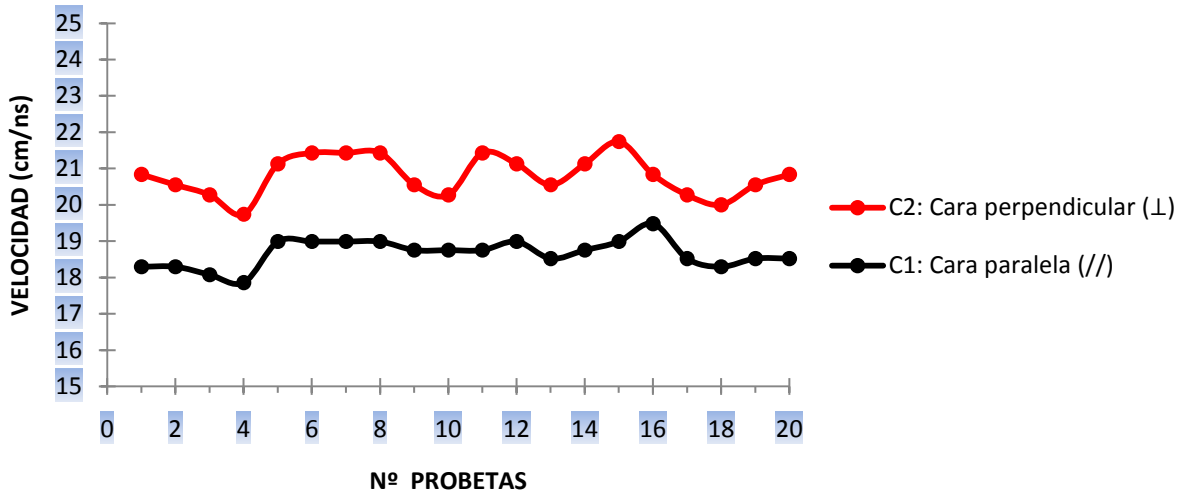


Figura 5.7 Gráfico de comparación velocidades en caras

Como se puede apreciar en la figura 5.7 la velocidad de propagación es mayor cuando las ondas viajan en la cara perpendicular (caso 2) que en la paralela (caso 1).

En la figura 5.8, se observa el gráfico que define las constantes dieléctricas en la cara de las probetas, con una propagación de la onda en paralelo y perpendicular respecto a la dirección de las fibras.

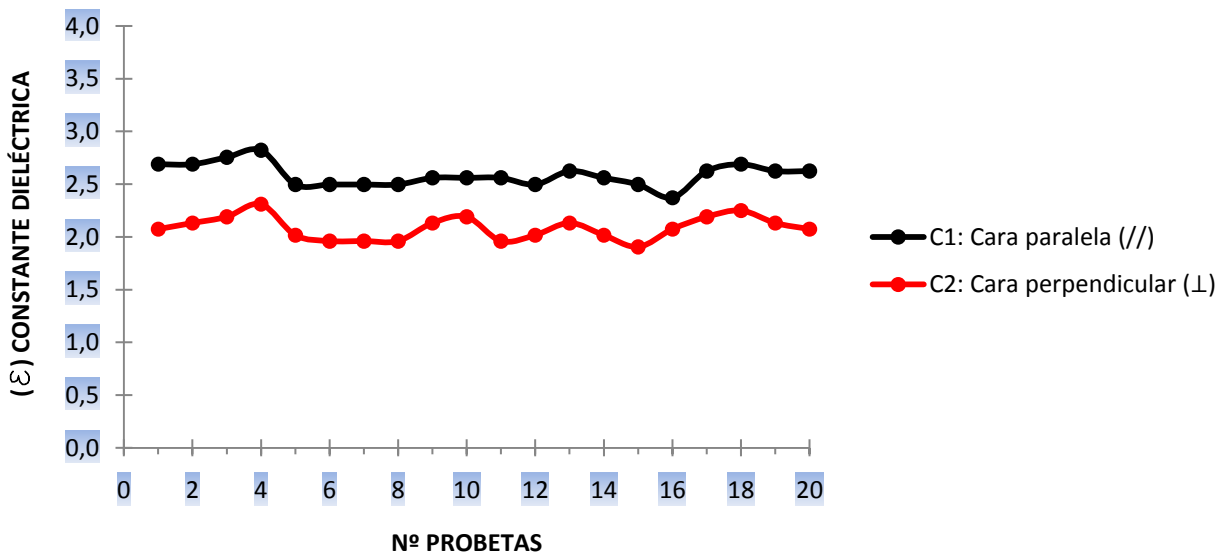


Figura 5.8 Gráfico de comparación de cte. dieléctricas en caras.

La constante dieléctrica es mayor cuando las ondas viajan en la cara paralela (caso 1) que en la perpendicular (caso 2) (figura 5.8).

En la figura 5.9, se procede a realizar la comparación de amplitudes normalizadas en la cara de

las probetas, con una propagación de la onda en paralelo y perpendicular respecto a la dirección de las fibras.

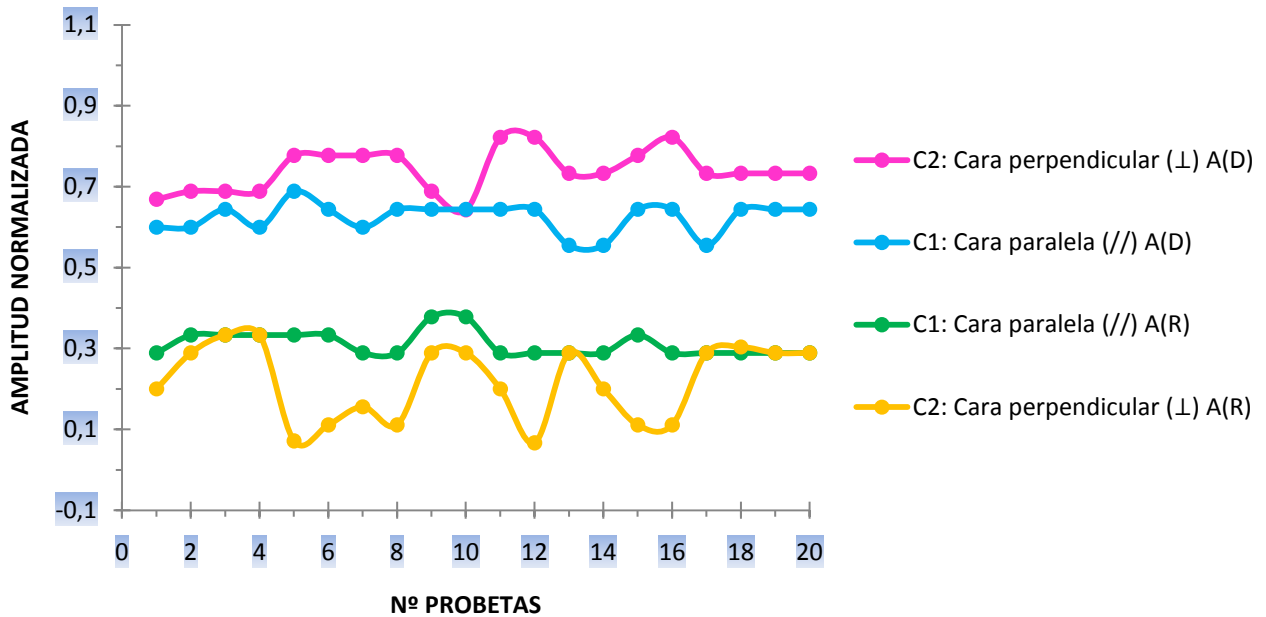


Figura 5.9 Gráfico comparación de amplitudes en cara

Las amplitudes son más grandes cuando la onda viaja en perpendicular (caso 2) que en paralelo (caso 1) para la onda directa. Asimismo, las amplitudes son mas grandes cuando la onda viaja en paralelo (caso 1) que en perpendicular (caso 2) para la onda reflejada. (figura 5.9)

Se observa que las amplitudes son considerablemente más grandes en las ondas directas que en las reflejadas.

5.1.2. Comparación resultados caso 3 vs caso 4

En la figura 5.10, se aprecia el gráfico que define las velocidades en canto y testa de las probetas, con una propagación de la onda radial respecto a la dirección de las fibras en el tiempo₁ de onda reflejada.

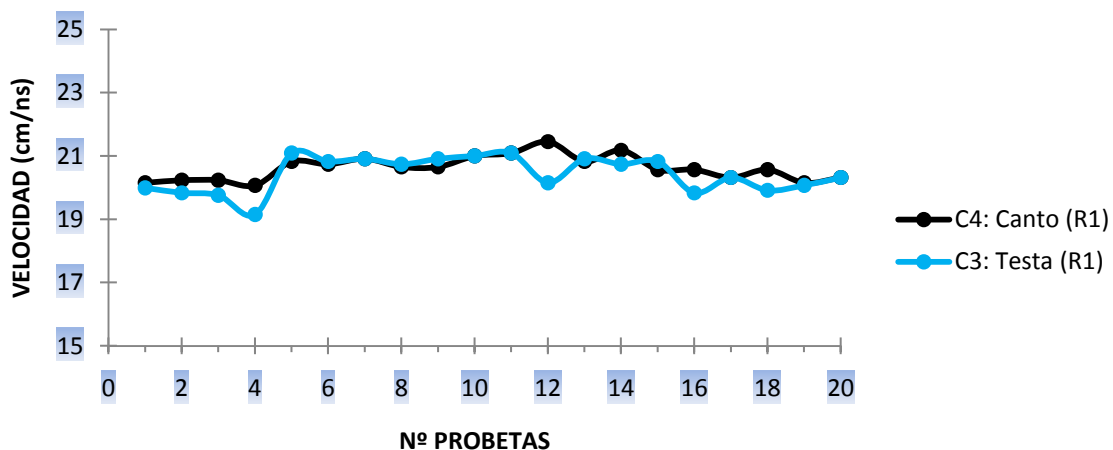


Figura 5.10 Gráfico de comparación de velocidades en testa y canto en tiempo₁ de la onda reflejada

Las velocidades de propagación son iguales o similares, para el tiempo₁ (R_{t1}) de onda reflejada tomado, cuando las ondas viajan en el canto (caso 4) y en la testa (caso 3) (figura 5.10).

Al ser la dirección de la onda perpendicular a la dirección de las fibras, estos resultados se parecen a los resultados obtenidos en el caso 2.

En la figura 5.11, se observa el gráfico que define las constantes dieléctricas en el canto y testa de las probetas, con una propagación de la onda radial respecto a la dirección de las fibras en el tiempo₁ de onda reflejada.

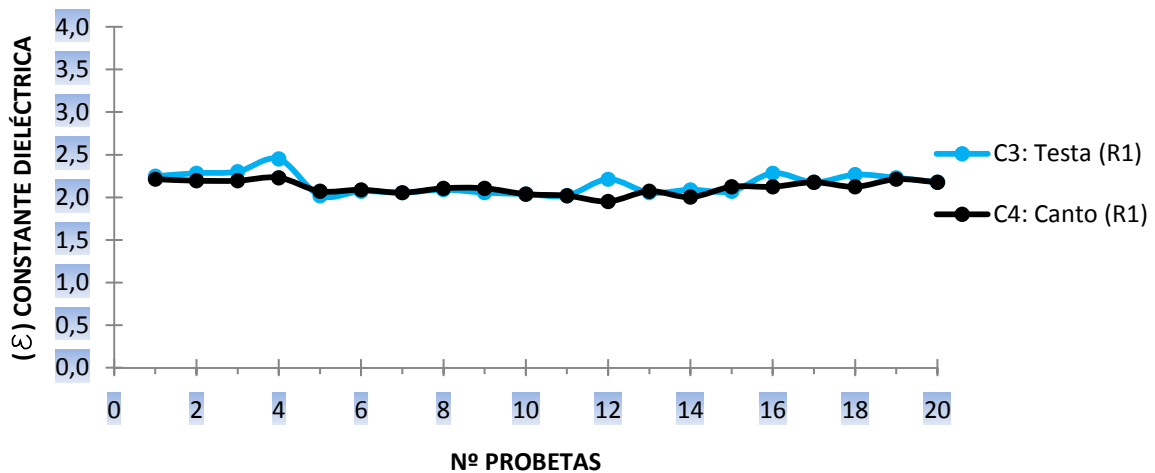


Figura 5.11 Gráfico de comparación de cte. dieléctricas en testa y canto en tiempo₁ de la onda reflejada.

Las constantes dieléctricas son iguales o similares, para el tiempo₁ (R_{t1}) de onda reflejada tomado, cuando las ondas viajan en el canto (caso 4) que en la testa (caso 3) (figura 5.11).

En la figura 5.12, se puede apreciar la comparación de amplitudes normalizadas en el canto y testa de las probetas, con una propagación de la onda radial respecto a la dirección de las fibras en el tiempo₁ de propagación de onda reflejada.

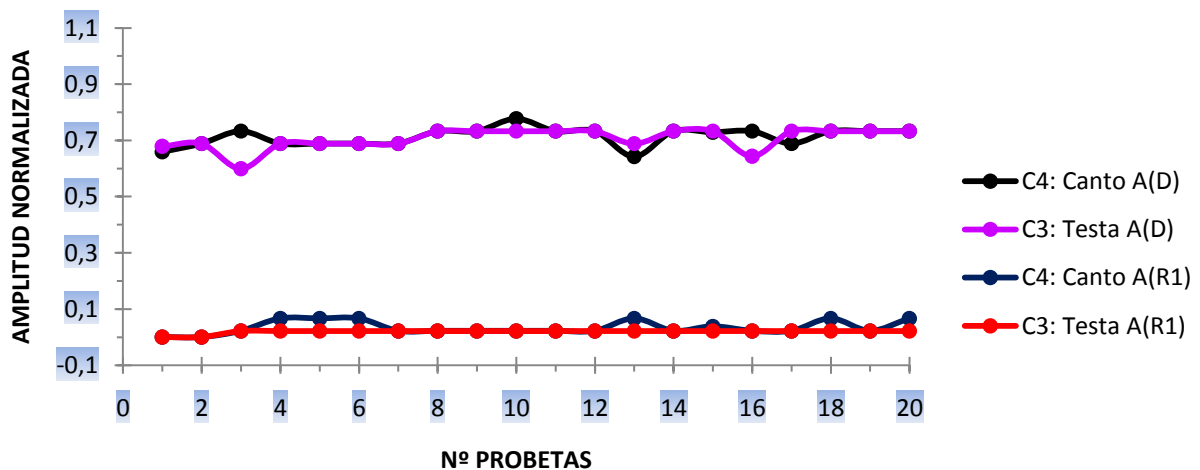


Figura 5.12 Gráfico comparación de amplitudes en testa y canto en tiempo₁ de la onda reflejada.

Las amplitudes son iguales o similares en los dos casos tomados. (Figura 5.12).

Cabe destacar que al igual que en los casos 1 y 2 las amplitudes de la onda directa son mayores a las de la onda reflejada.

En la figura 5.13, se observa el gráfico que define las velocidades en canto y testa de las probetas, con una propagación de la onda radial respecto a la dirección de las fibras en el tiempo₂ de onda reflejada.

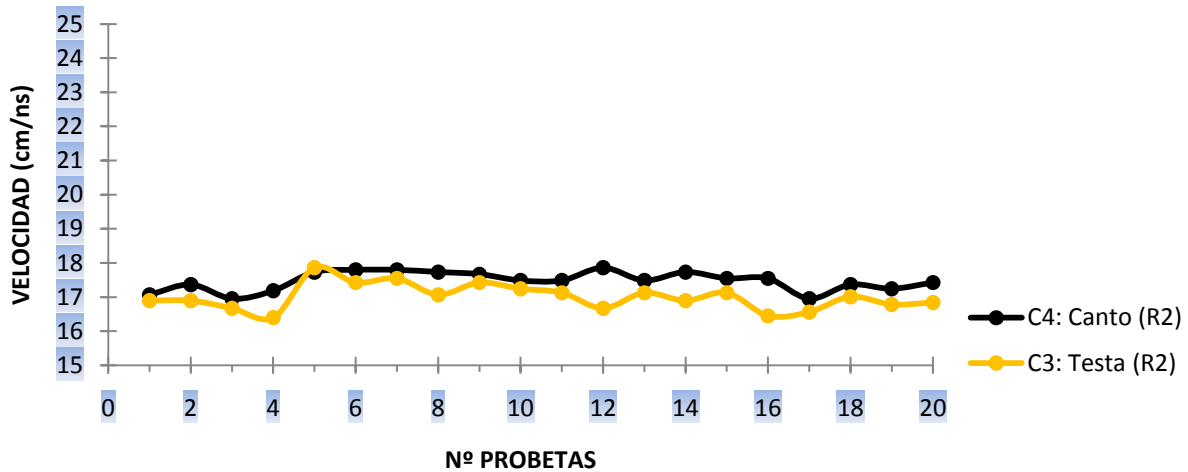


Figura 5.13 Gráfico comparación de velocidades en testa y canto en tiempo₂ de la reflejada.

En estos casos, al tener las ondas una dirección perpendicular a las fibras, deberían dar resultados similares a los resultados obtenidos en el caso 2. Pero como no es el caso, el criterio de toma de datos en el tiempo₂ de la onda reflejada es descartado.

5.2. Datos del pino radiata con la utilización de resistógrafo.

Los datos obtenidos con el resistógrafo se representan en el resistograma que nos facilita el software B-Tools Pro (figura 5.16), donde en el eje de abscisas se indica la longitud de la perforación y en el de las ordenadas la resistencia a la perforación en % ofrecida por la pieza (A_r).

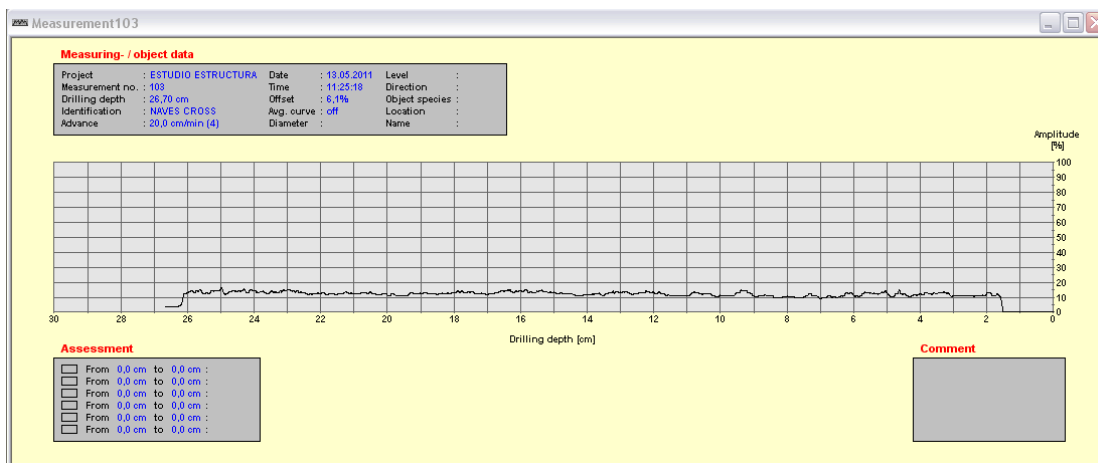


Figura 5.16 Ejemplo de resistograma.

Para interpretar los datos exportamos los datos obtenidos a un libro de Excel del que eliminamos aquellos valores de resistencia a la perforación que son 0. Una vez realizada esta acción procedimos a eliminar un sexto de los datos del principio y del final.

A continuación, se calcula la media, varianza y desviación típica anotando los datos en la tabla 5.8.y 5.9.

CANTO	MEDIA PONDERADA	VARIANZA	DESVIACIÓN
PROBETA 1	11,67	1,52	1,23
PROBETA 2	12,53	2,23	1,49
PROBETA 3	12,32	2,11	1,45
PROBETA 4	11,85	1,41	1,18
PROBETA 5	8,05	1,43	1,19
PROBETA 6	9,01	1,46	1,21
PROBETA 7	10,32	2,48	1,57
PROBETA 8	9,42	1,14	1,07
PROBETA 9	10,83	2,17	1,47
PROBETA 10	13,13	24,57	4,95
PROBETA 11	11,40	1,42	1,19
PROBETA 12	10,66	1,02	1,01
PROBETA 13	11,17	1,44	1,20
PROBETA 14	10,50	1,43	1,19
PROBETA 15	10,60	1,25	1,11
PROBETA 16	10,86	1,20	1,09
PROBETA 17	12,97	8,98	2,99
PROBETA 18	12,27	1,64	1,28
PROBETA 19	12,31	1,03	1,01
PROBETA 20	12,11	1,19	1,09
TOTAL SIN DESCARTADOS	10,99	1,54	1,24
TOTAL TODOS	11,20	1,78	1,33

Tabla 5.8 Media, varianza y desviación típica de los datos obtenidos con el resistógrafo en el canto de las probetas.

La media ponderada de las resistencias en canto da un valor de 10.99, con una desviación típica de $\sigma = 1,24$ (tabla 5.8).

CARA	MEDIA PONDERADA	VARIANZA	DESVIACIÓN
PROBETA 1	10,51	2,80	1,67
PROBETA 2	11,20	3,13	1,76
PROBETA 3	11,58	3,89	1,97
PROBETA 4	10,24	2,55	1,59
PROBETA 5	8,17	2,67	1,63
PROBETA 6	7,99	1,86	1,36
PROBETA 7	8,58	3,09	1,76
PROBETA 8	8,61	2,32	1,52
PROBETA 9	12,04	2,64	1,62

PROBETA 10	9,85	4,19	2,04
PROBETA 11	9,19	2,18	1,47
PROBETA 12	9,13	2,04	1,42
PROBETA 13	9,07	3,15	1,77
PROBETA 14	9,09	3,12	1,76
PROBETA 15	9,25	2,80	1,67
PROBETA 16	9,19	1,92	1,38
PROBETA 17	11,51	4,53	2,13
PROBETA 18	11,26	3,61	1,90
PROBETA 19	11,44	3,41	1,84
PROBETA 20	11,81	4,01	2,00
TOTAL DESCARTADOS	9,91	1,81	1,34
TOTAL TODOS	9,99	1,75	1,32

Tabla 5.9 Media, varianza y desviación típica de los datos obtenidos con el resistógrafo en la cara de las probetas.

La media ponderada de las resistencias en cara da un valor = 9,91, con una desviación típica de $\sigma = 1,34$ (tabla 5.9).

Al realizar el promedio de todas las probetas en canto, se distingue un aumento de resistencia en la probeta 10 y una disminución en la probeta 17. Seguidamente, se observa las discontinuidades en los resistogramas (figura 5.18 y 5.19), en comparación con la probeta 11 (figura 5.17) cercana a la media de la resistencia característica.

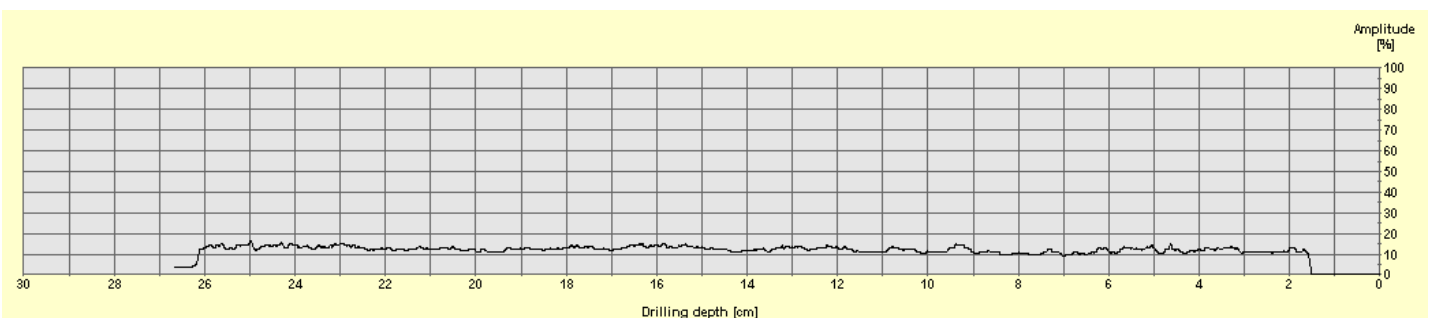


Figura 5.17 Resistograma del canto de la probeta 11.

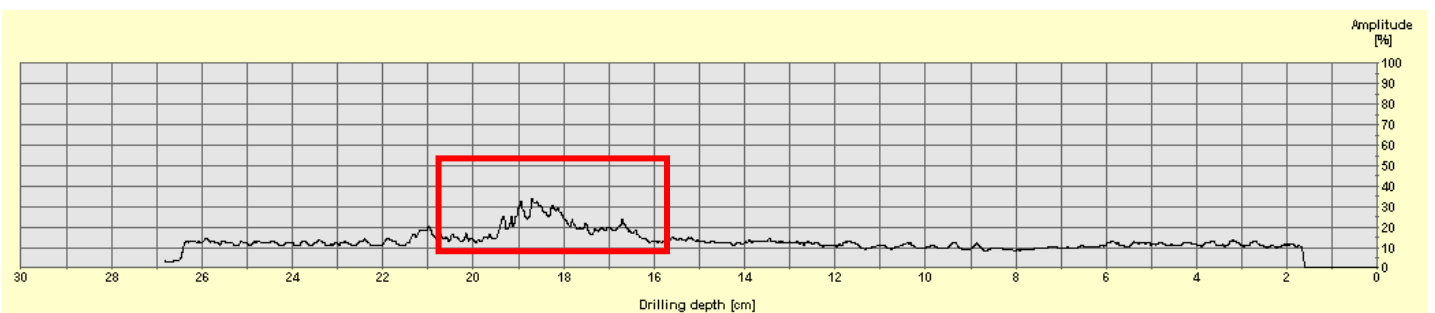


Figura 5.18 Resistograma del canto de la probeta 10.

Para comprobar a qué se podría deber el aumento de resistencia, se examina la probeta en cara. Y como refleja la figura 5.20 puede ser debido a la existencia de un nudo.



Figura 5.20 Fotografía de la cara de la probeta 10.

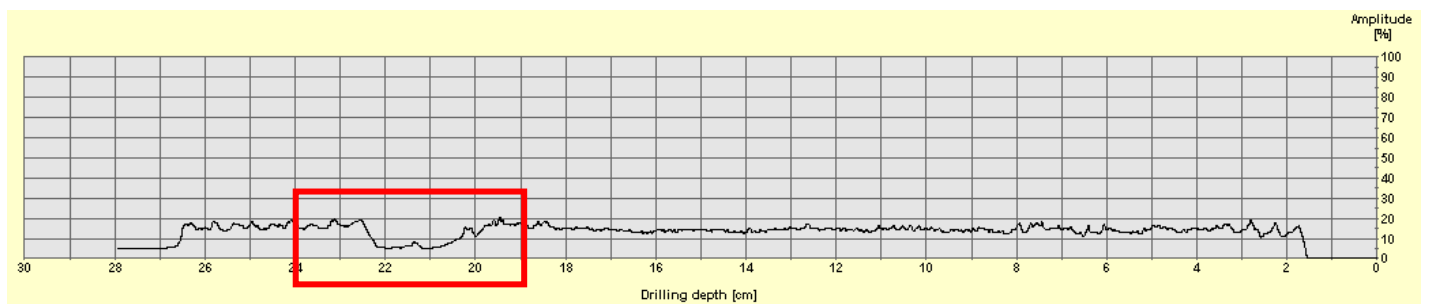


Figura 5.19 Resistograma del canto de la probeta 17.

Al igual que para el aumento de resistencia, se examina la probeta en cara. Y como refleja la figura 5.21, la disminución de resistencia también puede ser debida a la existencia de un nudo suelto.

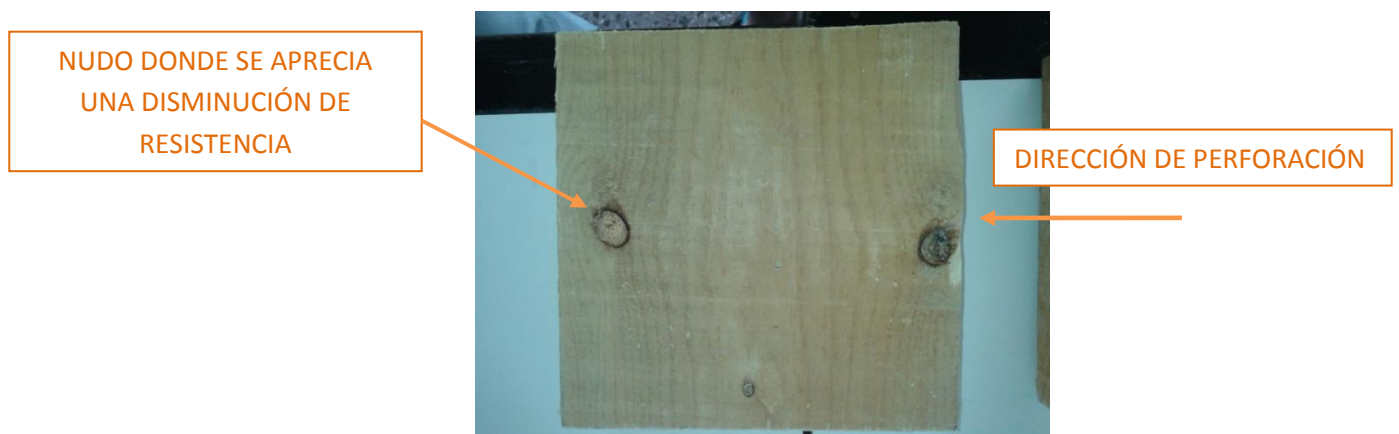


Figura 5.22 Fotografía de la cara de la probeta 17.

Tras lo observado, para el cálculo de la media total de los promedios obtenidos en la tabla 4.8 y 4.9, se descarta las probetas 10 y 17.

La media total de los promedios obtenidos de la cara es 9.91 y desviación típica de 1.34.

La media total de los promedios obtenidos del canto es 10.99 y desviación típica de 1.24.

6. Conclusiones.

Uno de los objetivos principales consistía en la caracterización de pino radiata mediante el análisis de la respuesta dieléctrica de la técnica del georradar y el resistógrafo. Por lo que en este apartado vamos a recopilar las conclusiones más importantes de dicha respuesta dieléctrica.

Otra parte importante consistía en tratar de conocer el funcionamiento de las técnicas del georradar y resistógrafo, y del software necesario para la interpretación de los resultados. Por lo que también tratamos de enunciar las conclusiones obtenidas durante este proceso de aprendizaje.

Conclusiones obtenidas con la utilización del georradar

(a) Conclusiones obtenidas durante el proceso de aprendizaje:

Tras el empleo del georradar en el laboratorio se puede concluir que es una técnica rápida y cómoda de aplicar. Pero para poder realizar los ensayos la antena debía estar bien posicionada, esto hace que la técnica no sea tan cómoda de aplicar en zonas con difícil acceso.

También cabe destacar que el número de personas idóneo para realizar el ensayo es de tres, ya que uno debe estar pendiente de la antena, otro de la unidad central y otro de la toma de datos.

(b) Análisis de la respuesta dieléctrica para la cara de las probetas (caso 1 vs caso 2):

De los resultados obtenidos para el pino radiata con una antena de 2 GHz de frecuencia se puede concluir que los tres parámetros de la onda analizados (velocidad de propagación, constante dieléctrica y amplitud de las ondas reflejada y directa) difieren dependiendo de la dirección en que oscila el campo eléctrico con respecto a la dirección de las fibras, ya sea paralelo, en perpendicular o radial.

La velocidad de propagación de las ondas es siempre mayor cuando el campo eléctrico es perpendicular a las fibras de la madera, por lo que ϵ es siempre menor ($\epsilon_{(//)} / \epsilon_{(\perp)} = 1.24$). Estos resultados están de acuerdo con los estudios realizados por otros autores con una frecuencia similar.

La amplitud de las ondas directas son más grandes cuando el campo eléctrico es perpendicular a la fibra que cuando es paralelo y la amplitud de las ondas reflejadas son más grandes cuando el campo eléctrico es paralelo a las fibras que cuando es perpendicular ($A_{D1(//)} / A_{D2(\perp)} = 0.85$ y $A_{R1(//)} / A_{R2(\perp)} = 1.86$).

(c) Análisis de la respuesta dieléctrica para el canto y testa de las probetas (caso 3 vs caso 4).

La velocidad de propagación de las ondas es igual o similar en estos casos, debido a que las direcciones de las fibras en testa son muy semejantes, produciendo que el campo eléctrico oscile radialmente a las fibras en los dos casos. Por lo que $\epsilon_{3(\text{radial})} / \epsilon_{4(\text{radial})}$ debe ser muy próximo a 1.

En nuestro caso obtenemos para T_1 $\epsilon_{3(\text{radial})} / \epsilon_{4(\text{radial})} = 1.02$, por lo que efectivamente se cumple que

la dirección de las ondas son perpendiculares en los dos casos.

Cabe destacar que los resultados obtenidos para las velocidades en el caso 3 y 4 deberían ser similares al del caso 2, ya que las ondas siguen una dirección perpendicular a las fibras. En nuestros datos las velocidades obtenidas en el tiempo₁ de onda reflejada si se parecen a los del caso 2.

Los resultados obtenidos en este trabajo son esenciales para el desarrollo de la técnica de georradar y estudio de las principales propiedades dieléctricas de la madera, diferentes en cada dirección. Como conclusión final, se puede decir que el georradar demuestra ser un instrumento muy útil e importante para el estudio de la madera.

Conclusiones obtenidas con la utilización del resistógrafo.

(a) Conclusiones obtenidas durante el proceso de aprendizaje

El resistógrafo es una técnica muy sencilla de aplicar, el problema radica en que para poder realizar el ensayo el mecanismo de aplicación debe estar en perpendicular a la probeta ensayada, por lo que, creemos que la técnica sería complicada de aplicar en lugares de difícil acceso.

Para esta técnica solo sería necesaria la presencia de dos personas, una para realizar el ensayo y otra para la toma de datos.

(b) Análisis de las propiedades físicas de la madera con resistógrafo:

El resistógrafo nos da datos que reflejan fielmente las resistencias de las capas de la madera. Por lo que podemos definir los posibles defectos internos que encuentra la aguja a su paso.


Tras analizar los datos obtenidos, nos sale una media de la resistencia un punto superior en canto que en cara, pero podemos decir que tiene resistencias muy parejas. Este hecho es debido a que la aguja perfora perpendicularmente a la dirección de las fibras en los dos casos.

Este aparato puede ser muy útil, como complemento del estudio con georradar.


La utilización del resistógrafo en el ámbito de la restauración permite conocer qué zonas de la estructura se encuentran atacadas y qué zonas de la estructura se conservan en buen estado y no necesitan ser sustituidas o reforzadas.

ANEXO 1:

A continuación, se presenta la ficha de toma de datos del Pino Radiata que se empleó durante la realización de las medidas con el georradar (Figura a1).



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Escuela Técnica Superior de
Ingeniería de Edificación

FICHA N° 5

FECHA: 8/4/11

FRECUENCIA ANTENA: 2 GHz

TIPO MADERA: INSIGNIS

DIRECTORIO DE ALMACENAMIENTO: 8/4/11 - ②

OBSERVACIONES:

PROBETA	Número de archivo							
	Sin colocar reflector metálico				Colocando reflector metálico			
	CASO				CASO			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	41	31	101	91	11	1	121	71
2	42	32	102	92	12	2	122	72
3	43	33	103	93	13	3	123	73
4	44	34	104	94	14	4	124	74
5	45	35	105	95	15	5	125	75
6	46	36	106	96	16	6	126	76
7	47	37	107	97	17	7	127	77
8	48	38	108	98	18	8	128	78
9	49	39	109	99	19	9	129	79
10	50	40	110	100	20	10	130	80
11	21	151	111	81	51	61	131	141
12	22	152	112	82	52	62	132	142
13	23	153	113	83	53	63	133	143
14	24	154	114	84	54	64	134	144
15	25	155	115	85	55	65	135	145
16	26	156	116	86	56	66	136	146
17	27	157	117	87	57	67	137	147
18	28	158	118	88	58	68	138	148
19	29	159	119	89	59	69	139	149
20	30	160	120	90	60	70	140	150



ETS INGENIERIA de EDIFICACIÓN Camino de Vera, s/n. 46022 VALENCIA - Tel. 963 87 71 20 - Fax 963 87 71 29

Figura a1 Ficha de toma de datos. Georradar.

ANEXO 2:

A continuación, se presenta las fichas de toma de datos del Pino Radiata que se empleó durante la realización de las medidas con el resistógrafo (Figura a2).

Terminado

Toma de registros con el resistógrafo

Las medidas se realizan perforando en cara y canto cada una de las probetas



FICHA Nº 1

FECHA: 09/05/2011
 TIPO MADERA: **RADIATA**
 DIRECTORIO DE ALMACENAMIENTO:
 OBSERVACIONES:

ARCHIVO 2
12/5/11 ←

Nº Probeta	Nº ARCHIVO PERFORACION	
	CARA	CANTO
1	182	
2	178	183
3	197	184
4	199	185
5	189	186
6	192	187
7	191	188
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		

ETS INGENIERIA de EDIFICACIÓN Camino de Vera, s/n. 46022 VALENCIA. Tel. 963 87 71 20. Fax 963 87 71 29

Terminado

Toma de registros con el resistógrafo

Las medidas se realizan perforando en cara y canto cada una de las probetas

FICHA Nº 1

FECHA: 12/5/11 y 13/05/2011
 TIPO MADERA: **RADIATA**
 DIRECTORIO DE ALMACENAMIENTO:
 OBSERVACIONES:

Nº Probeta	Nº ARCHIVO PERFORACION	
	CARA	CANTO
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8	88	97
9	90	99
10	92	102
11	93	103
12	94	105
13	95	106
14	96	107
15	25	39
16	28	40
17	30	43
18	31	45
19	32	47
20	34	51

13/5/11
12/5/11

ETS INGENIERIA de EDIFICACIÓN Camino de Vera, s/n. 46022 VALENCIA. Tel. 963 87 71 20. Fax 963 87 71 29

Figura a2 Fichas de toma de datos. Resistógrafo.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] 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.
- [2] Anuario (2008). Anuario de estadística forestal 2008 España.
- [3] 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, Cádiz, España.
- [4] 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.
- [5] Capuz R. (2005). Denominación de la madera en función del contenido de humedad. Materiales Orgánicos: Maderas. Editorial: UPV.
- [6] Cimadevilla L. (1994) "Prospección geofísica de alta resolución mediante georradar. Aplicación a obras civiles". Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- [7] Forest Products Laboratory (1999) "Wood Handbook. Wood as an engineering material". Forest Products Laboratory USDA Forest Service, Madison, Wisconsin, 483 pp.
- [8] García F. (1997) "Aplicaciones de la técnica geofísica de prospección por georradar en ingeniería civil y glaciología". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- [9] Jiménez F. (1999) "La madera: propiedades básicas". Editorial GET Grupo de Estudios Técnicos, 154 pp.
- [10] Kollmann, F. (1959). Tecnología de la Madera y sus aplicaciones. Tomo I – Editorial: Gráficas Reunidas, S. A. Madrid.
- [11] 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.
- [12] Naomi Stungo (1999). Arquitectura en madera: Nuevas tendencias. Editorial Blume. Madrid España.

[13] Norma UNE-EN 338:2003. Madera estructural. Clases resistentes. Structural timber. Strength classes.

[14] Norma 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.

[15] Norma 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.

[16] Norma UNE-EN 13.183-1:2002. 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.

[17] Norma UNE-EN 13.183-2:2002. 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.

[18] Norma UNE-EN 13.556:2004. Madera aserrada y madera en rollo. Nomenclatura de las maderas utilizadas en España. Round and sawn timber. Nomenclature of timbers used in Europe.

[19] Norma UNE 56.531:1977. Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del peso específico. Physical-mechanical characteristics of wood. Determination of specific weight.

[20] Norma UNE 56.544:2007. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Visual grading for structural sawn timber. Coniferous timber.

[21] Peraza F., et al. (2004) Especies de maderas. AITIM: Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho.

[22] Pérez V. (2001) "Radar del subsuelo. Evaluación en arqueología y en patrimonio histórico-artístico". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

[23] Rodríguez-Abad I., Martínez R., Capuz R., García-García F., Cabrelles L. (2009) "Application of the non-destructive ground-penetrating radar technique to the restoration works of a timber structure". Actas del I Congreso Internacional de Investigación en Edificación, Madrid, España.

[24] Rodríguez-Abad I., (2010) "Evaluación no destructiva del Georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera. Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Valencia. España.

[25] Sahin H. y Nürgül A. (2004) "Dielectric properties of hardwood species at microwave frequencies", Journal of Wood Science, vol. 50, pp. 375-380.

[26] Steele P. (2000) y Cooper J. "Estimating Lumber Strength With Radio Frequency Scanning". Actas del 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Sopron, Hungría.

[27] Torgovnikov G. (1993) "Dielectric properties of wood and wood-based materials". Editorial Springer, 196 pp.

[28] Vignote S. y Martínez I. (2006) Tecnología de la madera. 3rd Edition. Mundi-Prensa, Madrid, 687.

[29] Web GSSI : "<http://www.geophysical.com/Documentation/Brochures/GSSI-SIR-3000Brochure.pdf>"