

Materiales de Construcción  
Vol. 61, 301, 143-156  
enero-marzo 2011  
ISSN: 0465-2746  
eISSN: 1988-3226  
doi: 10.3989/mc.2010.49608

## Estudio de la variación del contenido de humedad en el *Pinus pinaster* Ait por medio de la técnica no destructiva del georradar

### *Assessment of the variation of the moisture content in the Pinus pinaster Ait using the non destructive gpr technique*

I. Rodríguez-Abad<sup>(\*)</sup>, R. Martínez-Sala<sup>(\*)</sup>, R. Capuz Lladró<sup>(\*)</sup>, R. Díez Barra<sup>(\*\*)</sup>; F. García-García<sup>(\*)</sup>

Recepción/Received: 29-XII-08  
Aceptación/Accepted: 21-V-09  
Publicado online/Online publishing: 15-III-10

#### RESUMEN

La variación en el contenido de humedad (*CH*) tiene una influencia significativa tanto en las propiedades físico-químicas de la madera, como en sus propiedades electromagnéticas y por tanto afecta a las características de la propagación de las ondas. En concreto, en este trabajo se estudia la capacidad del georradar (*GR*) empleando una antena de 1.6 GHz de frecuencia central para registrar las variaciones que se producen en la velocidad y en la amplitud de las ondas electromagnéticas cuando se propagan en unas viguetas de madera de *Pinus pinaster* Ait de uso estructural cuyo *CH* va disminuyendo. Se comprobó que cuando el *CH* descendía la velocidad de propagación y las amplitudes, tanto de la onda directa como de la reflejada aumentaban. Los altos factores de correlación encontrados demuestran que el *GR* es una técnica capaz de evaluar, de forma no destructiva, el *CH* de la madera de uso estructural.

**Palabras clave:** Madera, caracterización, patología, propiedades eléctricas, rehabilitación.

#### SUMMARY

*The moisture content variations in wood have a significant influence in wood's physicochemical properties, as well as in its electromagnetic properties and to specific effects upon waves' characteristics. In particular, this paper focuses on the analysis of the Ground-penetrating Radar's (GPR) using an antenna of 1.6 GHz central frequency capacity to register the velocity and the amplitude of the electromagnetic waves' variation during the drying process of Pinus pinaster Ait timber joists. The results showed that when timber MC descended, the propagation velocity and amplitude of both the direct and the reflected wave increased. The high correlation found between the variables studied demonstrates GPR efficiency and the innovative application of this technique as a non-destructive evaluation tool for timber structures, particularly when studying its moisture content.*

**Keywords:** Timber, characterization, pathology, electric properties, restoration.

<sup>(\*)</sup> Universidad Politécnica de Valencia (Valencia, España).

<sup>(\*\*)</sup> Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. M<sup>o</sup> Ciencia e Innovación (Madrid, España).

## 1. INTRODUCCIÓN

El contenido de humedad (*CH*) de la madera es una propiedad básica puesto que la madera se contrae o se dilata cuando disminuye o aumenta su contenido de humedad. Por esta razón, la madera cuyo *CH* cambia de forma significativa en uso será más propensa a agrietarse, a combarse, a que se abran las juntas y a que se resquebrajen las testas. Además, el *CH* 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  $CH > 20\%$ . La dificultad para evaluar el *CH*, fundamentalmente cuando la madera es parte de la estructura de un edificio, nos llevó a investigar una nueva técnica no destructiva para evaluar este parámetro *in situ*.

La madera intercambia agua con el aire. La cantidad y la dirección de este intercambio (ganancia o pérdida) dependen de la humedad y de la temperatura del aire y de la cantidad de agua presente en la madera. Cuando la madera es secada al aire el *CH* alcanza un equilibrio con la humedad del aire (*HEH*), siendo su valor una función de la humedad relativa y de la temperatura de éste.

El *CH* de la madera se define como la masa de agua contenida en la madera, expresada en tanto por ciento, respecto de la masa anhidra de madera, determinada tras su secado en estufa a 103 °C. En los árboles, el *CH* puede variar desde un 30% hasta más del 200%, siendo variable este parámetro incluso en una vigueta cortada de un mismo árbol.

La humedad en la madera puede existir como agua líquida (agua libre) o como vapor de agua en las células del lumen y las cavidades y como agua químicamente unida (agua ligada) en las paredes de las células. El *CH* al cual sólo las paredes de las células están completamente saturadas, es decir, todo es agua ligada y no hay agua en las células se le denomina punto de saturación de la fibra (*PSF*) y este valor es aproximadamente el 30% para las especies de las zonas templadas.

Las propiedades eléctricas de la madera varían con su *CH*, de modo que los métodos comúnmente utilizados en la industria maderera para medir el *CH* son medidores de parámetros eléctricos. Los más habituales, especialmente cuando la madera forma parte de una estructura (1), son los que miden la resistencia o la constante dieléctrica. Ambos poseen la misma precisión ( $\pm 2\%$ ) para aproximadamente el mismo rango de humedad y ninguno proporciona lecturas precisas para  $CH > 25\%$ .

El contenido de humedad puede ser considerado como el parámetro que más influye en las propiedades electromagnéticas, y por lo tanto en la propagación de las

## 1. INTRODUCTION

*The moisture content (MC) of wood is a basic property because wood shrinks and swells as it either loses or gains moisture content. For this reason, wood whose MC changes significantly in use will be prone to splitting, warping, opening of glue joints and cracking in its squared ends Besides, MC is a critical parameter for most wooden physicochemical pathologies. In the case of structural wood, a  $MC > 20\%$  can be dangerous for the structure it is part of. The complexity of evaluating timber moisture content when it is part of a building structure led us to search for a new non-destructive technique to evaluate this parameter on-site.*

*Wood exchanges moisture with air, the amount and direction of exchanges (gain or loss) depend on the relative humidity and temperature of the air and the current amount of water in the wood. When wood is air dried, MC eventually comes to equilibrium with air moisture (HEH) and its value is a function of both relative humidity and temperature of the surrounding air.*

*MC of wood is defined as the water mass in wood expressed as a percentage of the mass of oven-dry timber (103 °C). In trees, MC can range from about 30% to more than 200% and indeed variability of MC exists even within individual joists cut from the same tree.*

*Moisture can exist in wood as liquid water (free water), water vapour in lumen cells and cavities, and as water held chemically (bound water) within cell walls. The MC at which only the cell walls are completely saturated (all bound water) but at which no water exists in cell lumens is called the fibre saturation point (FSP), and for wood species in temperate zones, is around 30%.*

*The electrical properties of wood vary with its MC, so that the methods of MC measurement commonly found in the lumber and furniture industries are electric meters. Most hand held moisture meters are typically resistance or dielectric meters, especially when wood is part of a structure (1). Both types of meters offer the same accuracy ( $\pm 2\%$ ) over about the same range of moisture contents and none of these meters provide accurate readings when  $MC > 25\%$ .*

*The water content can be considered as one of the most important parameter influencing the electromagnetic properties of wood, and thus, the propagation of*

ondas electromagnéticas. En la última década se han desarrollado técnicas para determinar el *CH* de la madera basadas en la propagación de ondas electromagnéticas en el rango de las microondas.

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 muy prometedor para el estudio rápido de estructuras. De hecho, el georradar (*GR*) ya se ha aplicado y con buenos resultados en el estudio de la variación del contenido de humedad de suelos (2-4), de otros materiales como el hormigón (5, 6) y en áreas de investigación diversas en el campo de la construcción como el estudio de muros de obra de fábrica (7, 8), etc.

El principio general de la prospección con *GR*, basado en la propagación de impulsos electromagnéticos, ha sido descrito por muchos autores (9, 10). Una antena situada sobre la superficie de un material le transmite una onda que se propaga hacia su interior y que es 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 para medir el tiempo de propagación, la velocidad de propagación y la amplitud de las ondas directa y reflejada.

Una señal de *GR* transmitida a través de la madera se verá afectada por las propiedades dieléctricas de ésta. Como muchos autores han mostrado, el valor de la constante dieléctrica se ve afectado por el *CH* en el rango de las bajas frecuencias y de las microondas, produciéndose como consecuencia cambios en la atenuación y en la fase de la señal (11-13). Sin embargo, todavía no ha sido estudiada la habilidad de un sistema de *GR* con frecuencia central de 1,6 GHz para caracterizar el contenido de humedad de la madera estructural.

Este trabajo muestra los efectos que produce la variación del *CH* de unas viguetas de madera estructural de *Pinus pinaster* Ait sobre las medidas de *GR* realizadas en laboratorio. Con el propósito de poner de manifiesto estos efectos, se han analizado y confrontado la velocidad de propagación y la variación en la amplitud de las ondas electromagnéticas con el *CH* a medida que se han ido secando las viguetas.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio se utilizaron veintidós viguetas de *Pinus pinaster* Ait, con dimensiones de 20 (lado A) x 7,5 (lado B) x 125 cm cuya densidad media, cuando se encontraban al 12% de contenido de humedad, era de 0,49 g/cm<sup>3</sup>.

*electromagnetic waves. Over the last decade, techniques that involve propagating electromagnetic waves in the range of microwave are being developed to determine the MC of wood.*

*At present, GPR technology, that uses electromagnetic radiation in the microwave band of the spectrum, has many applications in a number of fields and is a promising non-destructive testing method for the rapid sounding of structures. In fact, the GPR has already been applied and interesting results have been obtained on the analysis of the variation of moisture content in soil (2-4), in other materials such as concrete (5, 6) and in diverse research fields such as the study of brickworks walls (7, 8) etc.*

*The general principle of GPR sounding, based on the propagation of electromagnetic impulses, has been reported by many authors (9, 10). Waveforms are transmitted into the structure using an antenna coupled to the surface. The incident wave propagates through the materials and partially reflects on interfaces presenting a dielectric contrast. The electromagnetic response of the structure, consisting of all the reflected waves, is then recorded, processed and analysed to measure the travel time, propagation velocities and amplitude of the direct and reflected waves.*

*A GPR signal transmitted through wood will be affected by the dielectric properties of the wood. As many authors have shown, MC affects the dielectric constant of wood at low and microwave frequencies, consequently influencing the attenuation and phase shift of the signal (11-13). However, the ability of GPR systems to characterize wood moisture content with a 1.6 GHz central frequency antenna has not been studied.*

*This paper shows the effects of timber MC variations on GPR measurements performed with a commercial antenna on Pinus pinaster Ait joists. In order to highlight these effects, the variation of the electromagnetic velocity and the variation of waveform amplitude whilst the joists were drying was analysed and compared to joists MC measurements.*

## 2. MATERIALS AND METHODOLOGY

*Twenty two timber joists of Pinus pinaster Ait were used in this study, the dimensions of which were 20 (side A) x 7.5 (side B) x 125 cm and the average density of which was 0.49 g/cm<sup>3</sup> when its moisture content was equal to that of hygroscopic equilibrium (MC=12%).*

Se cortaron cinco muestras de 4 cm en ambos extremos de cada vigueta para calcular el valor de la humedad de equilibrio higroscópico (HEH) cuando la masa de la vigueta ya no variaba. El procedimiento operativo aplicado para la determinación del contenido de humedad por desecación hasta el estado anhidro fue el regulado por la norma (14). El CH de estas muestras era muy similar ya que la dispersión de los resultados era del 1%. Por tanto, se asumió que el CH se encontraba uniformemente distribuido en la dirección longitudinal de las viguetas.

Las viguetas se pesaban antes de cada sesión de medida con GR con el objeto de conocer su CH. Las masas ( $M_{HEH}$ ) y los contenidos de humedad a la humedad de equilibrio higroscópico ( $CH_{HEH}$ ), así como las masas ( $M_i$ ) y los contenidos de humedad iniciales ( $CH_i$ ), es decir, recién cortadas las viguetas junto con las masas teóricas anhidras calculadas ( $M_0$ ) se presentan en la Tabla 1. Como era de esperar, al principio las viguetas tenían un contenido de humedad muy diferente entre sí (desde 115% hasta 55%). Sin embargo, durante el proceso de secado estas diferencias entre las viguetas fueron haciéndose cada vez más pequeñas, alcanzando finalmente todas ellas un contenido de humedad aproximado del 12%.

*Fives samples of 4 cm length were cut from both squared ends to determine HEH, when the joists mass did not vary. The operational procedure applied to determine moisture content through desiccation to an anhydrous state was the one regulated by (14). The MC of all the samples presented a maximum scattering parameter of 1%. Therefore, the MC was assumed to be evenly distributed in the longitudinal direction of the joists.*

*In order to know the MC of the joists, each board was weighed before GPR measurements. The mass ( $M_{HEH}$ ) and hygrosopic equilibrium moisture content ( $MC_{HEH}$ ), as well as the initial mass ( $M_i$ ) and initial moisture content ( $MC_i$ ) –i.e. when the joist has just been cut-, together with the theoretic anhydrous mass calculated ( $M_0$ ) can be seen in Table 1. As expected, there was a large variation in the MC between the joists at the beginning (from 115% to 55%). However, during the drying process, the MC variation of the joists progressively decreased, until the final session, when all of them reached approximately MC=12%.*

Tabla 1 / Table 1  
Masas y contenidos de humedad de las viguetas.  
Masses and moisture contents of the joists.

Código vigueta / Joist code	$M_i / M_i$ (kg)	$M_{HEH} / M_{HEH}$ (kg)	$M_0 / M_0$ (kg)	$MC_i / CH_i$ (%)	$MC_{HEH} / CH_{HEH}$ (%)
1	18.28	9.64	8.62	112	12
2	19.54	9.86	8.80	122	12
3	17.74	9.58	8.83	101	12
4	17.22	9.40	8.39	105	12
5	18.06	9.32	8.31	117	12
6	18.42	9.54	8.51	116	12
7	18.18	9.28	8.22	121	13
8	17.28	9.54	8.51	103	12
9	17.02	9.00	8.02	112	12
10	18.86	9.49	8.45	123	12
11	17.42	9.26	8.52	104	13
12	15.34	10.34	9.20	67	12
13	17.60	9.36	8.28	113	13
14	18.76	9.12	8.11	131	12
15	18.04	9.42	8.33	117	13
16	18.36	9.07	8.39	119	12
17	16.18	8.50	7.54	115	13
18	16.10	8.88	7.93	103	12
19	15.78	10.44	9.32	69	12
20	16.60	8.54	7.62	118	12
21	16.66	8.99	8.04	107	12
22	18.20	9.20	8.47	115	12

Las mediciones con GR se realizaron con un sistema SIR-10H y una antena equipada con un emisor y receptor de 1,6 GHz de frecuencia central, ambos desarrollados por Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI) (Figura 1).

*GPR measurements were carried out using a SIR-10H system and a 1.6 GHz ground coupled antenna, both developed by Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI) (Figure 1). This antenna is a double coupled antenna*

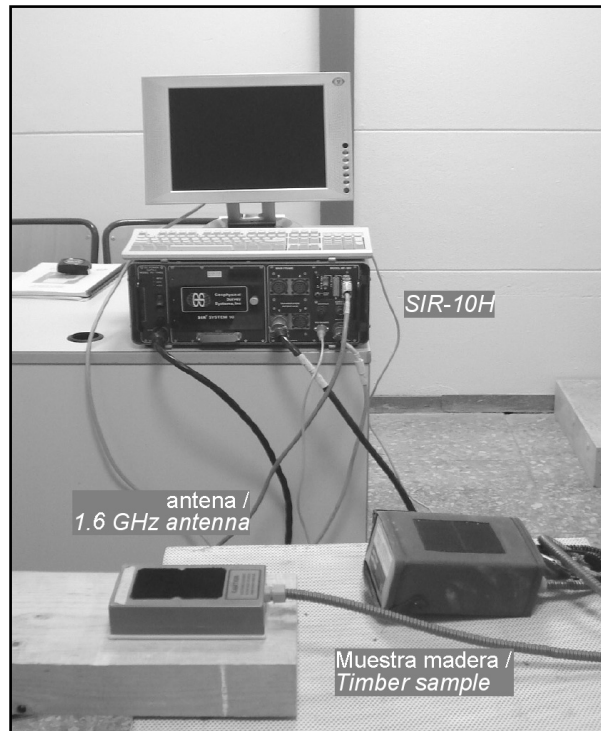


Figura 1. Equipo SIR-10H conectado a la antena de 1.6 GHz (GSSI) y medición con GR sobre una muestra de madera.  
 Figure 1. SIR-10H equipment connected to a 1.6 GHz antenna (GSSI) and GPR measurements on timber sample.

Generalmente este tipo de antena es adecuada para auscultar, dependiendo del *CH* del medio, hasta profundidades de 30 a 50 cm.

*made up to dipolar elements, one used as the transmitter and the other as the receiver. Generally, this type of antenna is suitable for auscultation at a depth between 30 and 50 cm depending upon moisture content.*

Los ensayos se llevaron a cabo a intervalos de tiempo regulares para poner de relieve los efectos del secado de las viguetas sobre la respuesta de las mediciones de GR. Los tipos de medidas realizadas se muestran en la Figura 2, donde se observa que la antena se sitúa apoyada sobre la superficie de las viguetas y que en el lado opuesto se coloca un reflector metálico para aumentar la amplitud de las reflexiones. La energía se propagaba en la dirección longitudinal de la vigueta cuando la antena estaba apoyada en las testas y en la dirección transversal

*The tests were performed at regular time intervals to highlight the effects of drying on the GPR response. The antenna was coupled to the joist surface and the measurement process is described in Figure 2. In order to enhance the reflected waveforms a metallic reflector was placed at the bottom of the joist. There are two main directions in data acquisition: longitudinal and transversal. When the antenna was placed on the squared ends of the joist, the energy was radiated into the timber joist in its longitudinal direction; when the antenna was placed on*

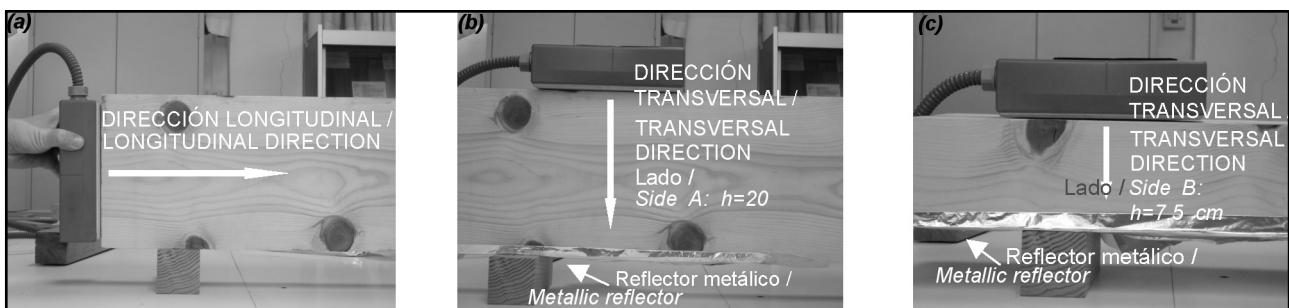


Figura 2. Posiciones de la antena en la adquisición de registros: (a) Dirección longitudinal; (b) Dirección transversal al atravesar el lado A; (c) Dirección transversal al atravesar el lado B.  
 Figure 2. Positions of the antenna in the acquisition of data (a) Longitudinal direction acquisition; (b) Transversal direction acquisition across side A; (c) Transversal direction acquisition across side B.

cuando la antena se apoyaba en la cara o en el canto. Puesto que la sección transversal de la vigueta era rectangular, el recorrido del rayo reflejado era diferente dependiendo del lado en el que se situaba la antena (lado A o lado B). En cada sesión se realizaron medidas dinámicas desplazando la antena a lo largo de las viguetas para comprobar que los registros eran muy similares independientemente de la sección transversal de la vigueta que se analizase.

Las señales de GR se procesaron y analizaron con el software RADAN NT (GSSI). Con el objeto de eliminar en la señal las frecuencias no deseadas, se aplicó un filtrado de paso baja y alta a los registros.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Descripción de las señales características

La señal registrada puede separarse en dos partes. La primera parte de la señal corresponde a la onda directa ( $O_d$ ). En este caso, la energía es radiada directamente hacia la antena receptora, propagándose en los primeros centímetros de espesor de la vigueta a lo largo de la superficie donde está situada la antena. La parte posterior de la señales la debida a la onda reflejada ( $O_r$ ) en la base de la vigueta, en el contacto entre la madera y el reflector metálico. Esta energía se propaga en la dirección perpendicular a la superficie donde se sitúa la antena, atravesando el espesor de la vigueta. En la Figura 3 se muestra la forma de las señales características registradas al recorrer el lado A (b) y al recorrer el lado B (c).

Con el objeto de efectuar la lectura de tiempos de llegada y amplitudes de las ondas, se estableció el criterio que a continuación se describe. En cuanto a la  $O_d$ , se tomó la lectura de ambos parámetros (amplitudes y tiempos de llegada) en el primer máximo positivo, ya que era muy difícil apreciar el primer máximo negativo en todos los casos. En lo que respecta a la  $O_r$ , la lectura de tiempos de llegada de la onda se efectuó en el primer máximo positivo tanto para el lado A como para el lado B. Cuando la señal viajaba a lo largo del lado A, las lecturas de tiempo se realizaron sólo para CH comprendidos en el intervalo (34-11%), ya que para valores superiores de CH la gran atenuación que se producía no permitía identificar esta parte de la señal. Las lecturas de las amplitudes de la  $O_r$ , cuando la señal recorría el lado B, se tomaron en el primer máximo positivo. Al atravesar el lado A las lecturas se efectuaron en el segundo máximo positivo, de amplitud siempre mayor que la del primero, lo que nos permitió identificar esta fase hasta CH del 44%. Dada la longitud de las viguetas (125 cm) en el estudio longitudinal de las mismas sólo se registró la  $O_d$ .

*the sides of the joist, the energy was radiated in its transversal direction. Since the joist's cross section is rectangular, the path of the reflected wave was different depending on which side the antenna was placed (side A or B). In every session, longitudinal acquisitions along the joists were performed sliding the antenna across the boards to check that the records were very similar regardless of the analysed transversal cross section.*

*GPR signals were processed and analysed by RADAN NT software (GSSI). To remove unwanted frequency components from the signals and to enhance the wanted ones, high pass and low pass filters were applied to the records.*

### 3. RESULTS

#### 3.1. Typical waveform recorded on joists

*The typical signal may be broken into two parts. The direct signal ( $W_d$ ), corresponding to the energy radiated directly towards the receiving antenna, appears as the first recorded signal. It propagates in the first centimetres of joists along the surface where the antenna is coupled. The second part is due to the energy reflected ( $W_r$ ) at the bottom of the joist, which is a timber-metallic reflector interface. It propagates quite normally thorough the joists thickness towards the opposite side. Figure 3 shows the shape of the typical signals registered when the wave travels across side A (b) and across side B (c).*

*The criterion described as follows was established to record wave travel times and amplitudes. In the case of  $W_d$ , the reading of both parameters (amplitudes and travel times) was taken in the first positive peak, since it was very difficult to appreciate the negative peaks in all the joists. In the case of  $W_r$ , the reading of the wave's arrival times was carried out at the first positive peak both for side A and side B. When the wave travels across side A, these readings were limited to the MC interval of (34-11%) since the first wave phase was too attenuated to be identified for any higher moisture content. Regarding readings of the amplitudes of  $W_r$ , the amplitude of the first positive peak was used in the particular case of the wave travelling across side B. In the case of crossing side A the readings were carried out in the second positive peak which, having amplitudes higher than the first peak, allowed us to better identify this phase up to 44% MC. Given the length of the joists (125 cm), only  $W_d$  was registered in the longitudinal direction of study.*

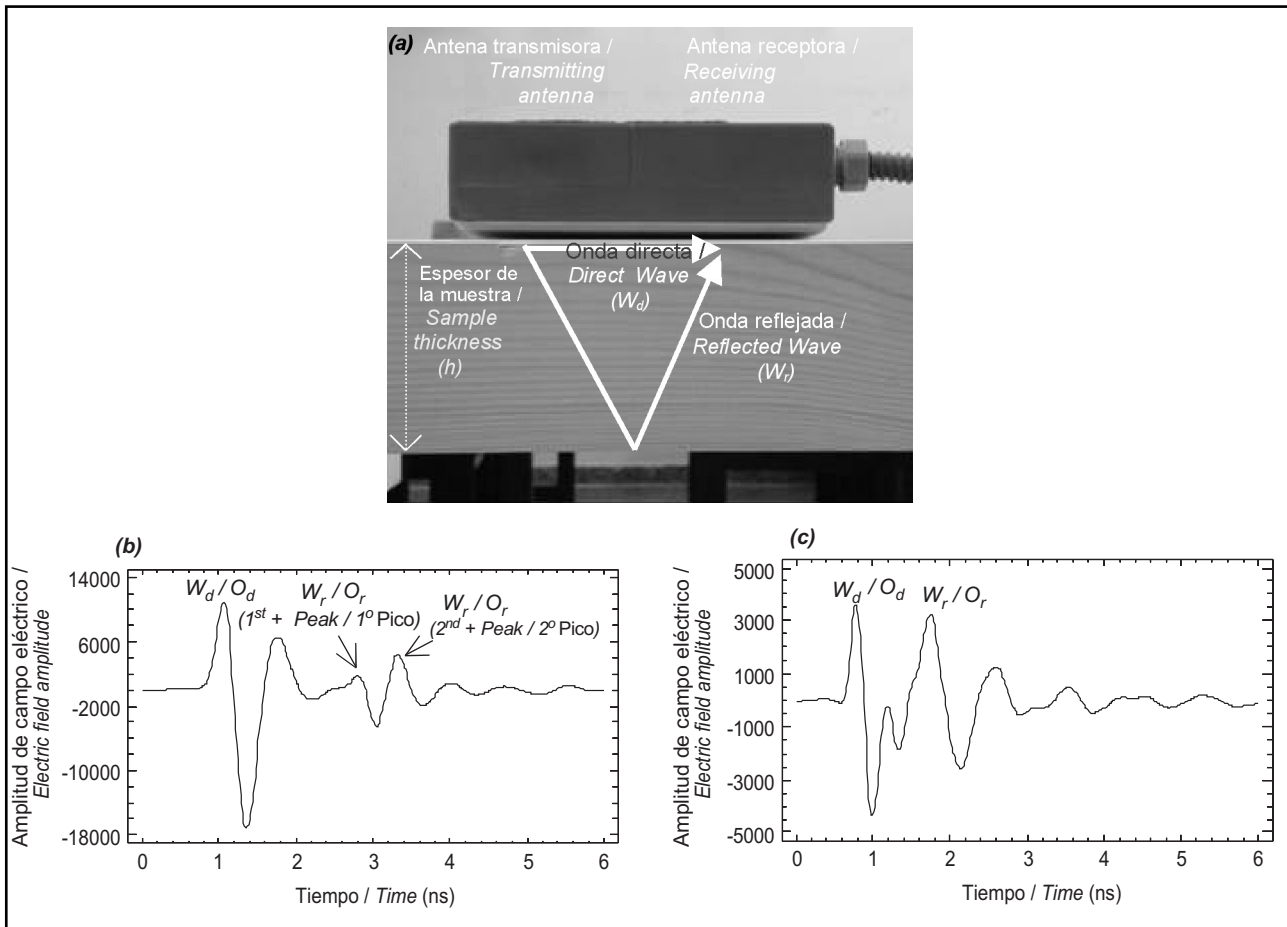


Figura 3. (a) Recorrido de la onda directa y reflejada; (b) Señal característica registrada al atravesar el lado A; (c) Señal característica registrada al atravesar el lado B.

Figure 3. (a) Paths of direct ( $W_d$ ) and reflected waves ( $W_r$ ); (b) Typical signal recorded on crossing side A; (c) Typical signal recorded on crossing side B.

### 3.2. Efecto del secado en la onda electromagnética

La Figura 4 recoge dos trazas registradas con 20 días de diferencia en el proceso de secado. La variación en el CH conduce a una clara modificación de las señales, mostrando la sensibilidad del GR con respecto a este parámetro.

En el análisis de las amplitudes, se puede observar que una disminución en el CH dio lugar a un incremento en la amplitud de las dos ondas ( $O_{dr}$ ,  $O_r$ ). 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 la constante dieléctrica disminuye. Esto produce un ensanchamiento en el patrón de radiación y explica el incremento de la amplitud de la  $O_d$ . Por otro lado, la disminución de la constante dieléctrica

### 3.2. Effects of drying on electromagnetic wave propagation

Figure 4 presents two waveforms recorded twenty days apart in the drying process. The variation in MC during drying led to clear modifications of the signals. This showed the sensitivity of the GPR technique to this parameter.

With regard to the amplitudes, it can be observed that a decrease in MC led to an increase in the amplitude of the two waves ( $W_d$ ,  $W_r$ ). The amplitude of electromagnetic waves depends on the attenuation they undergo during propagation. A decrease in MC leads to a decrease in the electrical conductivity and consequently to a decrease in the wave attenuation. Moreover, the dielectric constant of the propagation medium influences the radiation pattern of the antenna. Drying of timber, which is accompanied by a reduction of the dielectric constant, leads to a widening of the radiation pattern that explains the increase in the  $W_d$  amplitude. In addition, the reduction of the dielectric constant of timber during

genera un incremento en la velocidad de propagación. Este hecho se observa en la Figura 4 donde en la traza de la vigueta más seca se aprecia un desplazamiento de la  $O_r$  como consecuencia de la disminución del tiempo de propagación de las ondas (distancia  $a-b$ ).

drying also generates an increase in the propagation velocity. This phenomenon can be observed in Figure 4 through the phase shift of the signal during drying indicating that the travel time of the waves ( $a-b$  distance) became shorter.

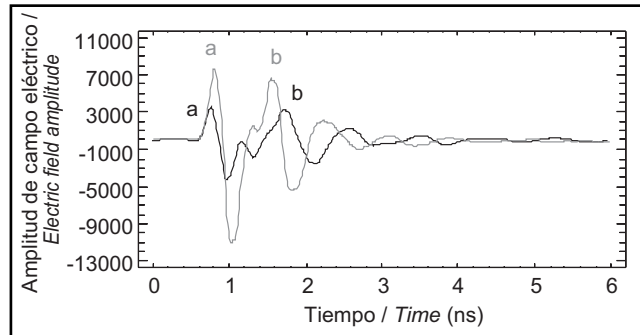


Figura 4. Comparación entre las señales registradas en viguetas con distintos contenidos de humedad: línea negra CH=70%; línea gris CH= 25%.

Figure 4. Comparison between signals recorded on wet joists (black line: MC=70%) and on drier joists (grey line: MC= 25%).

#### 4. DISCUSIÓN

##### 4.1. Efecto de la variación del contenido de humedad sobre la velocidad de propagación de la onda electromagnética

La velocidad se estimó a partir del recorrido de la onda reflejada y del tiempo de propagación de esta onda con la expresión dada en la ecuación [1]:

$$v = \frac{2 \cdot h}{\Delta t_a^b} \quad [1]$$

donde  $h$  es el espesor de la vigueta y  $\Delta t_a^b$  es la diferencia de tiempo de llegada entre la  $O_d$  y la  $O_r$  (Figura 4). De acuerdo con la teoría electromagnética para los medios de baja conductividad, la constante dieléctrica  $\epsilon_r$  fue calculada con la siguiente expresión [2]:

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad [2]$$

donde  $c$  es la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío ( $3 \times 10^8$  m/s).

En cada sesión se tomó lectura y se calculó las velocidades de propagación en las 22 viguetas. Hay que señalar que un elevado contenido de humedad dificulta la identificación de los tiempos de llegada debido a la fuerte atenuación y dispersión que se produce en la señal. Es por ello que en las primeras sesiones algunas lecturas no se pudieron efectuar, incluso en las mediciones al atravesar el lado B.

#### 4. DISCUSSION

##### 4.1. Effect of moisture content variation on electromagnetic velocity

In this study the propagation velocity of electromagnetic waves in the timber joist was calculated with the equation [1]:

$h$  is the joist thickness and  $\Delta t_a^b$  is the difference in travel time between  $W_d$  and  $W_r$  (Figure 4). According to the electromagnetic theory in low conductive media, the dielectric constant ( $\epsilon_r$ ) was calculated as follows [2]:

where  $c$  is the propagation velocity of electromagnetic waves in free space ( $3 \times 10^8$  m/s).

In every session, readings of the 22 joists were taken and their propagation velocities calculated. We have to point out that high MC makes the identification of travel time difficult due to the strong attenuation and dispersion of the signal. As a result, some of the readings in the first sessions could not be carried out, even for measurements crossing side B.



Cuando la cantidad de agua en la matriz de la madera es mayor, es de esperar un mayor valor de la constante dieléctrica por dos razones. En primer lugar, la constante dieléctrica del agua es mucho mayor que la de la madera y en segundo lugar conforme aumenta el CH desde la condición anhidra los componentes polares de las paredes celulares alcanzan mayor libertad de rotación. Por tanto, la disminución del contenido de humedad 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.

La Figura 5 muestra en (a) la velocidad de propagación versus CH y en (b) la constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) versus CH. En ella se puede comprobar cómo la constante dieléctrica aumenta conforme lo hace el CH, siguiendo la tendencia descrita por (11). En su trabajo, Torgovnikov muestra que la tasa de incremento de la constante dieléctrica es mayor para CH por encima del PSF. No obstante, las rectas de regresión parecen tener también una pendiente significativa por debajo del PSF. Estas rectas representan la respuesta dieléctrica media sólo para maderas, cuyas densidades se encuentran dentro de un intervalo determinado.

When the quantity of water in wood's matrix increases there are two reasons to expect an increase in the wood's dielectric constant. Firstly, the dielectric constant of water is much higher than wood's and secondly, as the MC increases from the anhydrous condition, polar components of cellular walls reach a higher freedom of rotation. Therefore, the decrease of the water content during the drying process leads to a decrease in the polarization and conduction mechanism, which produces an increase in the propagation velocity.

Figure 5 presents (a) the propagation velocity ( $v$ ) versus MC and (b) the dielectric constant ( $\epsilon_r$ ) versus MC. This figure shows how the dielectric constant increases in line with humidity content, following the trend described by (11). Torgovnikov shows in his work, via plotted regressions, that the rate of increase in the dielectric constant is higher for MC above the FSP. The slopes of the regression lines also appear to have significant gradient below the FSP. These regression lines, however, represent the mean dielectric response for a range of specific gravity values of wood.

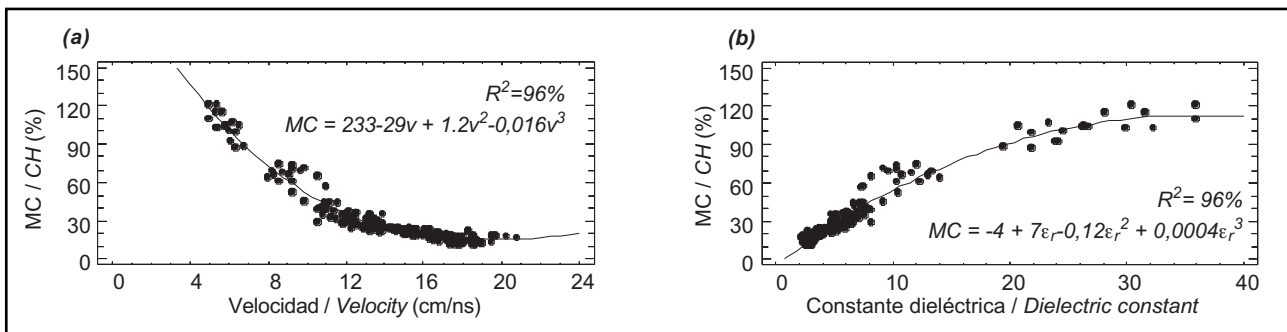


Figura 5. Efecto de la variación del contenido de humedad en la velocidad de propagación de las ondas (a) y la constante dieléctrica (b).  
Figure 5. Effect of moisture content variation on signal velocity (a) and dielectric constant (b).

La relación entre la  $\epsilon_r$  y el CH 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 (15-23). Recientemente (13) 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 obtuvieron para funciones polinómicas de tercer grado. Como observamos en la Figura 5, el valor del parámetro  $R^2 = 96\%$  obtenido para las curvas de regresión revela el buen grado de ajuste de las variables estudiadas en ambos casos.

Existen algunas funciones de calibración comúnmente aceptadas en el estudio del contenido de humedad del

The relation between  $\epsilon_r$  and the MC has always been an interesting issue. This relation has been interpreted as lineal, logarithmic or exponential for low moisture content values at frequencies within the microwave range (15-23). A recent study (13) has found that for various study frequencies, second order equations offer the best adjustment for wood moisture content and dielectric constant. However, in this study, the best correlations were obtained with third degree equations. As observed in Figure 5, these curves show a good correlation between the variables studied, as the parameter  $R^2 = 96\%$  reveals in both cases.

There are some widely accepted calibration functions when studying soil moisture content (24, 25), and some

suelo (24, 25); e incluso trabajos recientes que comparan unas con otras (26, 4). Es interesante destacar que tanto el comportamiento dieléctrico de la madera como el del suelo frente a la variación de su contenido de humedad proporcionan mejores correlaciones cuando se ajustan las variables con ecuaciones de tercer orden.

#### **4.2. Efecto de la variación del contenido de humedad sobre la amplitud de la onda electromagnética**

En este punto se analizan las variaciones de las amplitudes de la  $O_d$  y de la  $O_r$  en función del  $CH$  para cada vigueta. Estas amplitudes fueron normalizadas dividiéndolas por la amplitud del primer pico positivo de la  $O_d$  emitida al aire.

El comportamiento de la  $O_d$  es especialmente interesante, ya que los ensayos mostraron que ésta se encontraba fuertemente influenciada por el  $CH$  de la madera. Además, la sensibilidad de la  $O_d$  frente a las variaciones del  $CH$  es un factor importante en la caracterización de la madera, teniendo en cuenta que siempre es la señal más fácil de registrar.

En la Figura 6 se puede observar que la variación de la amplitud normalizada de la  $O_d$  con el contenido de humedad es muy similar en los tres casos estudiados, aumenta su valor cuanto más seca se encuentra la vigueta analizada. Asimismo, se aprecia que para  $CH$  superiores al  $PSF$  la dispersión de los datos es significativamente mayor que cuando está por debajo. Como ya se ha dicho la  $O_d$  viaja por la zona más superficial de la vigueta y para la antena utilizada la distancia que recorre el rayo es siempre aproximadamente 6 cm (distancia entre el emisor y el receptor). De modo que el aumento notable de la amplitud normalizada no debía estar asociado simplemente a una disminución de la atenuación de la onda, que en un trayecto tan corto no sería tan ostensible. Este aumento se debería básicamente a la mayor amplitud del haz como consecuencia de la disminución del  $CH$ .

En los ajustes calculados entre la  $O_d$  y el  $CH$ , se obtuvieron para todos los casos estudiados unos valores de correlación muy altos. Para el caso en el que la antena estaba apoyada en la testa de la vigueta se obtuvo  $R^2=93\%$ , mientras que cuando la antena se colocó en lado  $B$  o en lado  $A$  estos valores de correlación fueron  $R^2=74\%$  y  $R^2=87\%$ , respectivamente. Esta diferencia en el grado de los ajustes se podría atribuir al hecho de que el valor del contenido de humedad con el que se están comparando las ondas directas es un valor promedio para toda la vigueta. En la sección transversal de las viguetas existía un gradiente de humedad ya que la

*recent studies even compare one to another (26, 4). It is interesting to highlight that the dielectric behavior of wood and soil as regards the variation of their moisture content provide a better correlation when the variables are adjusted to third order equations.*

#### **4.2. Effect of the moisture content variation on the electromagnetic wave amplitude**

*Amplitude measurements of the  $W_d$  and of the  $W_r$  were plotted against the MC variations in the timber joists. The amplitudes were normalized dividing by the amplitude of the first positive peak of the  $W_d$  when the antenna was emitting in air.*

*The behavior of the direct signal is particularly interesting, since this experiment showed that it was greatly influenced by the timber MC. In addition, the sensitivity of the  $W_d$  to the MC variations is an important factor in the characterization of timber, since the registration of this signal is always the easiest.*

*In Figure 6 it can be observed that the variation of the normalized amplitude of the  $W_d$  with the MC is very similar in the three cases studied: its value increases the drier the analyzed joist is. It has also been observed that when the MC is higher than the FSP data dispersion is significantly higher than when it is lower. As mentioned above, the  $W_d$  travels along the shallow subsurface of the joist and for the antenna used in the experiments the distance covered by the ray is always approximately 6cm (distance between the transmitter and the receiver). Therefore the remarkable increase of normalized amplitude was not simply linked to a decrease of the wave's attenuation. It would have not been as ostensible in such a short path, but it might be because of the widening of the radiation pattern resulting from a decrease in MC.*

*When calculating the adjustments between the  $W_d$  and the MC, the correlation values were very high in all prospected directions.  $R^2=93\%$  was obtained when the antenna was placed on the squared ends of the joists, whilst  $R^2=74\%$ ,  $R^2=87\%$  were obtained when the antenna was placed on sides B and A, respectively. These differences could be ascribed to the fact that the MC value used to compare direct waves is an average value for the whole joist. A moisture gradient existed in the joist cross section, overall for high MC, since the most external parts were drier. So that, the moisture gradient was the smallest in side A ( $h=20$  cm) and with*

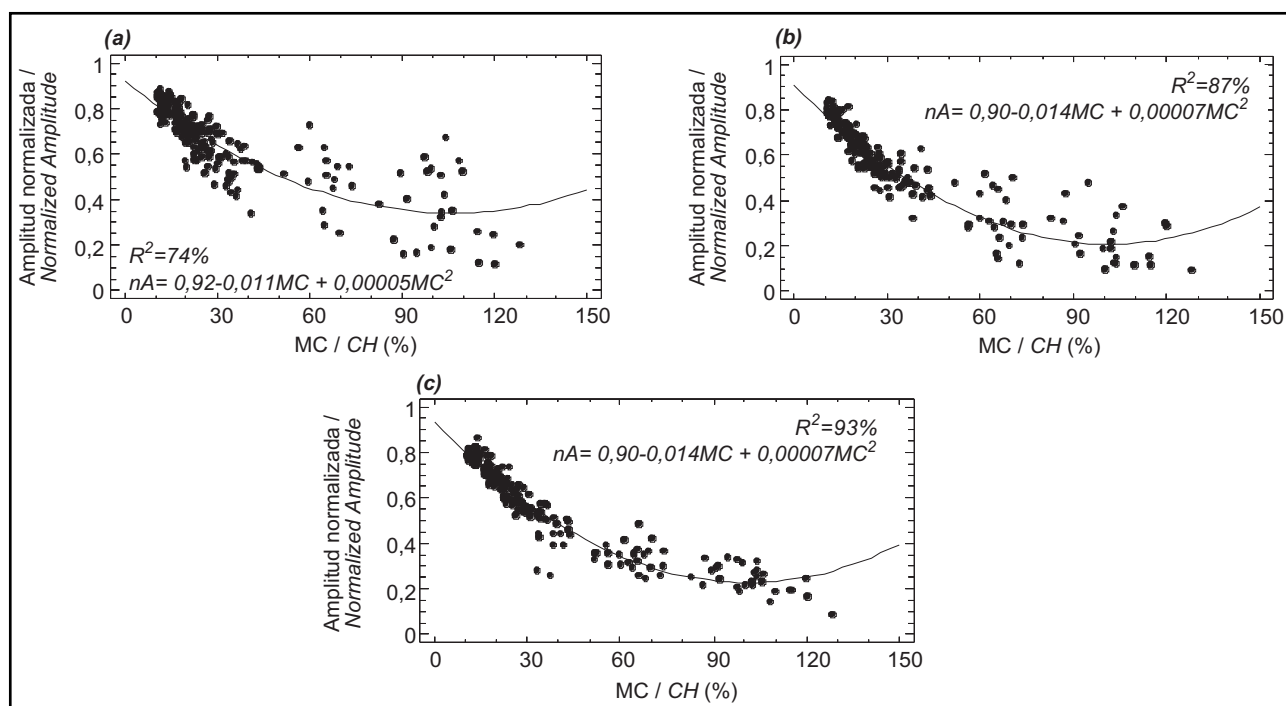


Figura 6. Efecto de la variación del contenido de humedad en la amplitud normalizada de la onda directa al apoyar la antena en el lado B (a), en el lado A (b) y en la testa (c).

Figure 6. Effect of moisture content variation on the direct wave normalized amplitude placing the antenna on side B (a), on side A (b) and at the squared ends (c).

parte interna se encontraba más húmeda que la externa, sobre todo para contenidos de humedad altos. De este modo, en el lado A ( $h=20$  cm) la sección presentaba el menor valor del gradiente de humedad y con la antena situada en el lado B la  $O_d$  viajaba por la parte más seca de la sección. Esto puede explicar por qué las amplitudes normalizadas en este caso eran superiores a las esperadas. Sin embargo, tanto en el caso de la antena situada en la testa o sobre el lado A, la onda directa atravesaba una parte que se encontraba más cercana al centro de la sección y, por tanto, con una humedad más próxima a la media. En lo que respecta a la  $O_d$  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.

En la Figura 7 se muestra el comportamiento de la amplitud de las  $O_r$  al apoyar la antena en el lado A y lado B frente a las variaciones del CH. Se observó que en los dos casos la amplitud aumentó, de forma general, a medida que las viguetas estaban más secas. Además, el grado de ajuste de las amplitudes para las curvas de regresión obtenidas era elevado, tanto para la onda atravesando el lado A ( $R^2=93\%$ ) como para el lado B ( $R^2=95\%$ ).

the antenna placed on side B the  $W_d$  went along the driest part of the cross section. This may explain why in this case the normalized amplitudes were higher than the expected ones. However, in the other two cases, with the antenna placed on the squared ends and on side A, the  $W_d$  travelled closer to the center of the joist. The MC in these parts was more or less equivalent to the average value. It is interesting to point out two outstanding results from these adjustments regarding the  $W_d$  amplitudes. On one hand, the correlations between the studied variables are very high and in the other hand the equations in the three cases are almost the same.

Figure 7 shows the normalized amplitude of the  $W_r$  for measurements when the antenna was placed on side A and on side B versus MC. It can be seen that the general tendency, in both cases, is for the normalized amplitude of the  $W_r$  to increase as the joists dry. Besides, the correlation levels with the MC are high, both when crossing side A ( $R^2=93\%$ ) and side B ( $R^2=95\%$ ).

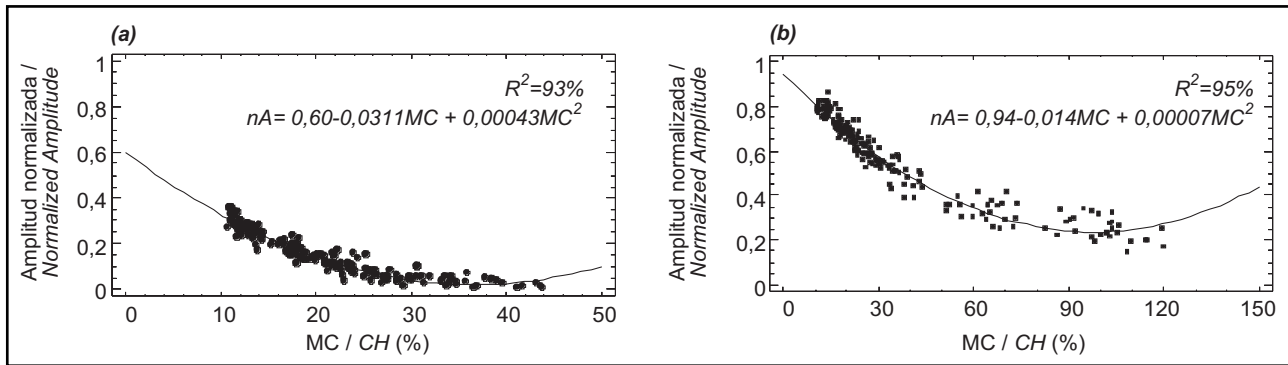


Figura 7. Efecto de la variación del contenido de humedad en la amplitud normalizada de la onda reflejada con la antena situada en el lado B (a) y en el lado A (b).

Figure 7. Effect of moisture content variation on the reflected wave normalized amplitude when the antenna is placed on side B (a) and on side A (b).

Los valores de las amplitudes de las  $O_r$  registradas al atravesar el lado A eran menores que las del lado B. En el primer caso, al ser mayor el recorrido del rayo, se producía una atenuación mayor. De hecho para  $CH > 45\%$  no se pudo efectuar la lectura de la amplitud de la  $O_r$  al atravesar el lado A. No obstante, la curva de regresión obtenida para este caso, a pesar de tener un grado de ajuste ligeramente inferior, su análisis es más fiable. Esto es debido a que el espesor de este lado (20 cm) era tal que no se producía el solape entre las llegadas de la  $O_d$  y de la  $O_r$  y por tanto esta última estaba perfectamente identificada.

Por último, si se compara el comportamiento de las amplitudes de las ondas  $O_d$  y  $O_r$ , se observa que, a pesar de la diferencia de magnitud, éste era bastante similar. Ambas amplitudes eran relativamente bajas para los elevados contenidos de humedad de las primeras sesiones. Asimismo, durante el proceso de secado la tasa de incremento de la amplitud aumentaba. Cualquiera de las dos variables analizadas, amplitud de  $O_d$  y  $O_r$ , tenían una alta correlación con el  $CH$ .

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo mostraron que el GR puede ser utilizado como técnica no invasiva para evaluar el contenido de humedad en viguetas de *Pinus pinaster Ait* con un alto grado de confianza.

De las variables analizadas y para todo el rango de contenidos de humedad estudiado, la mejor correlación se obtuvo para la velocidad de propagación de la onda o el valor de la constante de dieléctrica, magnitud derivada de la velocidad, versus  $CH$ .

También se analizó la influencia del  $CH$  sobre las amplitudes de las ondas directas y reflejadas, puesto que en

The normalized amplitudes of  $W_r$  registered crossing side A were smaller than crossing side B. The path covered by the ray in the first case was bigger and then the attenuation higher. In fact, when  $MC > 45\%$ , the high attenuation of the wave in the case of crossing side A made it impossible to identify the phase of the  $W_r$ . Nevertheless, although the adjustment of side A is slightly lower, its analysis is more reliable. This is due to the fact that given the thickness of side A (20 cm), an overlapping of the time arrivals of the  $W_d$  and the  $W_r$  does not occur and thus we were only analyzing the  $W_r$ .

Finally, comparing the behaviours of  $W_d$  and  $W_r$ , it can be observed that, in spite of a difference of magnitude, they were quite similar. They presented relatively low normalized amplitudes, due to the high MC existing at early age. During drying process the rate of normalized amplitude variation increased. Any of the variables used,  $W_d$  and  $W_r$ , had a high correlation with the MC.

## 5. CONCLUSIONS

The results obtained in this study showed that the GPR can be used with a high level of confidence as a non-invasive technique to evaluate the MC in *Pinus pinaster Ait* joists.

The best correlation of all the variables analyzed and of the total MC range studied was obtained for the wave's propagation velocity or the value of the dielectric constant, magnitude derived from velocity, versus MC.

The influence of the MC on the amplitude of the direct and reflected waves was also studied, since this is the

el caso de que la vigueta objeto de estudio sea de espesor desconocido será necesario recurrir a este análisis. Estas amplitudes, a pesar de la diferencia de magnitud, presentaron comportamientos muy similares cuando el *CH* iba disminuyendo. Es interesante resaltar que el grado de acuerdo entre las variables estudiadas para cualquiera de las direcciones prospectadas era excelente.

La gran atenuación de las ondas reflejadas para altos *CH* hizo que fuese más fácil identificar la señal con la antena emitiendo en la dirección del menor espesor. Ahora bien, cuando se trabajó con *CH*<50% el mejor ajuste lo proporcionaron las amplitudes normalizadas del segundo máximo positivo de la onda reflejada en la base de la vigueta con la antena emitiendo en la dirección del mayor espesor.

Por último, cuando sea difícil detectar la reflexión en el lado opuesto bien porque el espesor de la viga sea grande o el contenido de humedad muy elevado, el estudio del contenido de humedad se podrá efectuar mediante el análisis de la amplitud de la onda directa. De nuevo para la onda directa se obtuvo un gran acuerdo entre el *CH* y su amplitud. Éste era superior al 90% cuando la onda se emitía en la dirección longitudinal de la vigueta. No obstante, si las testas de la vigueta no son accesibles, cuando se trabaja *in situ*, se comprobó que en la dirección transversal los mejores resultados se obtenían cuando la antena emitía en la dirección de menor espesor.

Finalmente, el análisis aquí presentado es una aplicación novedosa de la técnica del *GR* al estudio de las propiedades físicas de la madera. Asimismo pone de manifiesto que el *GR* es una herramienta con un futuro prometedor en el estudio no destructivo del contenido de humedad de la madera estructural *in situ*.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación Español, por medio del Plan Nacional de I+D 2009-2012 a través del proyecto: "Integración de técnicas avanzadas no destructivas de evaluación de la madera estructural en la rehabilitación y conservación de edificios patrimoniales (BIA2008-00342)". Asimismo, se agradece la colaboración prestada por los compañeros del Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Gestión de la Edificación de la Universidad Politécnica de Valencia, España.

*analysis that would be used if the thickness of the joist under study were unknown. In spite of a difference of magnitude, the amplitude of both signals presented similar behavior when the MC decreased. It is interesting to point out that the agreement among the variables studied was excellent for any of the directions examined.*

*The high attenuation of the reflected waves for high MC made it easier to identify the signal with the antenna directed towards side B, where thickness was lower. However, for MC<50% the best adjustment was provided by the normalized amplitudes of the second positive peak of the reflected wave at the bottom of the joist, with the antenna pointing towards the direction of higher thickness.*

*Finally, whenever detecting the reflection in the opposite side becomes difficult, due to the thickness of the beam or to the high content of moisture, the study of MC can be carried out by analyzing the amplitude of the direct wave. Once again, a good agreement between the MC and its amplitude was obtained for the direct wave, which was higher than 90% when the wave was emitted in the longitudinal direction of the joist. Nevertheless, if the joist's squared ends are not accessible, it was observed that when working on-site, the best results in the transversal direction analysis were obtained when the antenna emitted in the direction of the smaller thickness.*

*Finally, the analysis presented is a new application of the GPR technique to the study of wood's physical properties. It is also showed that the GPR is a tool with a promising future for the non-destructive on-site study of structural wood's MC.*

## ACKNOWLEDGEMENTS

*The financial support of this research was provided by the Ministerio de Ciencia e Innovación Español, por medio del Plan Nacional de I+D 2009-2012 through the Project: "Integración de técnicas avanzadas no destructivas de evaluación de la madera estructural en la rehabilitación y conservación de edificios patrimoniales (BIA2008-00342)". We would also like thank our colleagues of the Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Gestión de la Edificación de la Universidad Politécnica de Valencia and the R&D&I Linguistic Assistance Office, Universidad Politécnica de Valencia (Spain), for translating this paper.*

## BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Arriaga, F.; Peraza, F.; Esteban, M.; Bobadilla, I.; García, F.: "Intervención en estructuras de Madera", p. 476. *AITIM, Artes Gráficas Palermo S.L.*; Madrid (2002).
- (2) Schmalz, B.; Lennartz, B.; Wachsmuth, D.: "Analyses of soil water content variations and GPR attribute distributions". *Journal of Hydrology*, vol. 267 (2002), pp. 217-226.
- (3) Huisman, J. A.; Snepvangers, J. J. J. C.; Bouten, W.; Heuvelink, G. B. M.: "Monitoring temporal development of spatial soil water content variation: comparison of ground penetrating radar and time domain reflectometry". *Vadose Zone Journal*, vol. 2 (2003), pp. 519-529.
- (4) Lunt, I. A.; Hubbard, S. S.; Rubin, Y.: "Soil moisture content estimation using ground penetrating radar reflection data". *Journal of Hydrology*, vol. 307 (2005), pp. 254-269.
- (5) Laurens, S.; Balayssac, J.; Rhazi, J.; Arliguie, G.: "Influence of concrete relative humidity on the amplitude of Ground-Penetrating Radar (GPR) signal". *Materials and Structures*, vol. 35 (2002), pp. 198-203.
- (6) Laurens, S.; Balayssac, J.; Rhazi, J.; Klysz, G.; Arliguie, G.: "Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modelling". *Materials and Structures*, vol. 38 (2005), pp. 827-832.
- (7) Maierhofer, C.; Leipold, S.; Wiggenhausere, H.: "Investigations of the influence of moisture and salt content on the dielectric properties of brick materials using radar". Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar, Kansas USA (1998), pp. 477-483.
- (8) Maierhofer, C.; Leipold, S.; Schaurich, Binda, L.; Saisa, A.: "Determination of moisture distribution in the outside walls of St. Maria Rossa using radar". Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar, Kansas, USA (1998), pp. 509-514.
- (9) García, F.: "Aplicaciones de la técnica geofísica de prospección por georradar en ingeniería civil y glaciología". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 1997.
- (10) Pérez, V.: "Radar del subsuelo. Evaluación en arqueología y en patrimonio histórico-artístico". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2001.
- (11) Torgovnikov, G. I.: "Dielectric properties of wood and wood-based materials", Springer, Berlin Heidelberg New York, 1993.
- (12) Kabir, M. F.; Daud, W. M.; Khalid, K. B.; Sidek, H. A.: "Equivalent circuit modeling of the dielectric properties of rubber wood at low frequency". *Wood Fiber Science*, vol. 32 (2000), pp. 450-457.
- (13) Sahin, H.; Nürgül, A.: "Dielectric properties of hardwood species at microwave frequencies". *Journal of Wood Science*, vol. 50 (2004), pp. 375-380.
- (14) UNE-EN 13183-1:2002. Moisture content of a piece of sawn timber. Part 1: Determination by oven dry method.
- (15) James, W. L.; Hamill, D. W.: "Dielectric properties of Douglas-fir measured at microwave frequencies". *Forest Products Journal*, vol. 15 (1965), pp. 51-56.
- (16) Tinga, W. R.: "Dielectric properties of Douglas fir at 2.45GHz". *Journal of Microwave Power*, vol. 4 (1969), pp. 161-164.
- (17) James, W. L.: "Dielectric properties of wood and hardboard: variation with temperature, frequency, moisture content, and grain orientation". *USDA Forest Service Research Paper*, FPL 245 (1975), pp. 1-32.
- (18) James, W. L.: "Dielectric behavior of Douglas-fir at various combinations of temperature, frequency, and moisture content". *Forest Products Journal*, vol. 27 (1977), pp. 44-48.
- (19) Peyskens, E.; Pourcq, M.; Stevens, M.; Schalck, J.: "Dielectric properties of softwood species at microwave frequencies". *Wood Science Technology*, vol. 18 (1984), pp. 267-280.
- (20) Jain, V. K.; Dubey, Y. M.: "Dielectric constant of some Indian timbers in axial direction at microwave frequencies". *J Ind Acad Wood Sci*, vol. 19 (1988), pp. 25-36.
- (21) Kabir, M. F.; Khalid, K. B.; Daud, W. M.; Aziz, S. H. A.: "Dielectric properties of rubber Wood at microwave frequencies measured with an open-ended coaxial line". *Wood and Fiber Science*, vol. 29, nº 4 (1997), pp. 319-324.
- (22) Kabir, M. F.; Daud, W. M.; Khalid, K.; Sidek, H. A. A.: "Dielectric and ultrasonic properties of rubber wood. Effect of moisture content, grain direction and frequency". *Holz Roh Werkstoff*, vol. (56) (1998), pp. 223-227.
- (23) Vignote, S.; Martínez, I.: *Tecnología de la madera*. 3ª edición revisada y ampliada, p. 687, Editorial Mundi-Prensa, Madrid, 2006.
- (24) Roth, C. H.; Malicki, M. A.; Plagge, R.: "Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR". *Soli Sciences*, vol. 43 (1992), pp. 1-13.
- (25) Topp, G. C.; Davis, J. L.; Annan, A. P.: "Soil water content: measurements in coaxial transmission lines". *Water Resources Research*, vol. 16 (1980), pp. 574-582.
- (26) Stoffregen, H.; Yaramanci, U.; Zenker, T.; Wessolek, G.: "Accuracy of soil water content measurements using ground penetrating radar: comparison of ground penetrating radar and lysimeter data". *Journal of Hydrology*, vol. 267 (2002), pp. 201-206.

\* \* \*