

Aplicación del resistógrafo a la obtención de la densidad y la diferenciación de especies de madera

Application of resistograph to obtain the density and to differentiate wood species

L. Acuña^(*), L. A. Basterra^(**), M^a M. Casado^(*), G. López^(**), G. Ramón-Cueto^(**), E. Relea^(*),
C. Martínez^(*), A. González^(*)

Recepción/Received: 14-II-10
Aceptación/Accepted: 31-V-10
Publicado online/Online publishing: 14-VII-10

RESUMEN

En este trabajo se aporta una metodología para realizar el análisis de los perfiles resistográficos obtenidos de piezas de madera y poder con ello obtener con precisión determinados datos de las mismas.

Los ensayos se realizaron sobre madera sana de seis especies distintas, así como sobre piezas de madera "antigua" en uso, pertenecientes a estructuras de edificaciones con unos 80-120 años de servicio.

A partir de los datos recogidos por el resistógrafo se definieron una serie de variables, y fueron analizadas estadísticamente. Del análisis de los datos cabe destacar la magnífica relación existente entre las variables resistográficas y la densidad de la madera ($R^2 > 90\%$). Igualmente, en el caso de madera sana, el análisis de las variables definidas permite asignar con una probabilidad muy elevada, la especie a la que pueda pertenecer y, por consiguiente, sus valores resistentes indirectos.

Palabras clave: resistógrafo, madera, inspección, densidad, especie.

SUMMARY

This project offers a methodology for the analysis of resistographic profiles obtained from samples of wood and the extraction of precise data from these profiles.

Tests were conducted on healthy samples of wood from six different species, as well as on "old" wood in use as part of timber structures with an age of 80-120 years.

Based on the data collected using the resistograph, a series of variables was determined, and statistically analysed. An analysis of the data reveals the close relation between the resistographic variables and wood density ($R^2 > 90\%$). Equally, in the case of healthy wood, an analysis of the defined variables permits the identification of the species of the sample with a very high probability and, therefore, its indirect resistance values.

Keywords: resistograph, timber, inspection, density, species.

^(*) Universidad de Valladolid. Palencia (España).

^(**) Universidad de Valladolid. Valladolid (España).

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los siglos, y hasta la fecha, la madera ha sido abundantemente utilizada como elemento estructural. Aún hoy puede verse en numerosas edificaciones antiguas que continúan cumpliendo su función, lo que demuestra su eficacia. No obstante, como consecuencia de la composición orgánica de la madera, diferentes agentes bióticos y abióticos pueden degradarla, lo que ha contribuido a generar una imagen de obsolescencia e ineficacia. Afortunadamente, gracias a una muy diferente valoración social, económica y cultural del patrimonio, desarrollada en los últimos años, las obras de conservación y rehabilitación de estructuras de madera han ido ganando mercado, haciéndose indispensable que este campo se especialice y tecnifique lo suficiente para proporcionar a los agentes intervinientes herramientas fiables para dictaminar con garantías sobre el estado de conservación del patrimonio heredado.

En este trabajo se utiliza el resistógrafo como técnica pseudo-no destructiva para evaluar el estado de conservación de elementos estructurales de madera. El resistógrafo es un equipo que permite realizar un taladro en la madera, utilizando una broca extremadamente fina, registrando la resistencia que presenta el material a la penetración de la broca a velocidad constante, mediante un potenciómetro conectado al motor eléctrico. Se parte de la hipótesis de que dicha resistencia se puede relacionar con la densidad de la pieza, en el supuesto de que a mayor densidad, mayor será la oposición al paso de la aguja, o bien, y a igualdad de otras condiciones, cuanto menor sea la resistencia al avance, mayor será el estado de degradación de la pieza. El equipo presenta la ventaja de ser portátil, presentándose así como una herramienta especialmente adecuada para la inspección de estructuras en servicio.

Los orígenes de las técnicas resistográficas aplicadas a la madera se remonta a 1985, fecha en la que fue utilizado para el estudio del estado de conservación de postes en Alemania y en la medición de los perfiles de densidad en paneles compuestos de madera (1). Posteriormente fue empleado en la valoración del arbolado en pie, gracias a su particularidad de tratarse de una técnica no destructiva (1), así como para la determinación de la densidad de diferentes progenies de *Pinus pinaster* (2).

Se han encontrado trabajos realizados sobre todo por autores alemanes, portugueses e italianos, si bien pocos, o muy pocos, presentan una metodología científica suficientemente rigurosa, limitándose a realizar descripciones de la técnica. En España empieza a ser

1. INTRODUCTION

Throughout the centuries wood has been abundantly used as a structural element, and even today there are numerous old structures which continue to serve their function, demonstrating the effectiveness of this material. However, given the organic composition of wood, different biotic and abiotic factors can lead to degradation and decay, which has contributed to an image of wood as an obsolete and ineffective construction material. Fortunately, thanks to a changing social and economic consideration of our cultural heritage in recent years, conservation and rehabilitation projects of wooden structures have gained interest. Given this change, it is more necessary than ever to specialise and develop techniques which provide reliable tools to determine the state of conservation of this invaluable heritage.

In this project, a Resistograph was used as a non-destructive technique for the evaluation of the state of conservation of wooden structural elements. A Resistograph is a tool which uses an extremely fine drill bit turning at a constant speed to penetrate the wood, registering the resistance of the material to penetration using a potentiometer connected to the electric engine. This technique is based on the hypothesis that said resistance is related to the density of the wood, where the greater the density the greater the resistance to the bit and, conversely, under equal conditions, the less the resistance the greater the state of decay. This equipment offers the advantage of portability and is especially appropriate for the inspection of existing structures.

*The origins of resistographic techniques applied to wood date from 1985, when they were used for the study on the conservation of posts in Germany and the evaluation of the density profiles of wood panels (1). Later, the technique was used in the evaluation of standing trees, thanks to the non-destructiveness of the evaluation (1), as well as for the determination of the densities of different progenies of *Pinus pinaster* (2).*

A number of projects have been conducted, particularly by German, Portuguese and Italian authors, although very or very few offer a sufficiently rigorous scientific methodology, and are mostly limited to mere descriptions of the technique. This technique is beginning to be known

una técnica conocida, y en los últimos años varios grupos de investigación han trabajado sobre ella, destacándose los proyectos de investigación de la Universidad de Valladolid (3, 4), la Universidad de Santiago de Compostela (5) y los de la Universidad Politécnica de Valencia (6).

La interpretación de los perfiles resistográficos llevada a cabo por Rinn (7) es uno de los trabajos más minuciosos desarrollados hasta el momento, y sienta las bases para la realización de nuestro estudio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Instrumental

Para el desarrollo del presente estudio, se ha utilizado un resistógrafo de la casa comercial alemana RINN-TECH; modelo RESISTOGRAPH® 3450-S (Figura 1).

Esta herramienta evalúa la resistencia que la madera opone a la penetración de una aguja de acero de 1,5 mm de diámetro, siendo la longitud de la misma utilizada en nuestro caso de 50 cm. La aguja gira mientras se introduce en la madera, siendo el valor de la resistencia a la penetración medido como porcentaje de consumo de energía del motor que mueve el taladro. La anchura de la punta de la aguja (Figura 2) es dos veces el diámetro del vástago, midiendo 3 mm en el extremo del útil de corte. Avanza a una velocidad constante de 30 cm/minuto, girando a 1.500 r.p.m.



Figura 1. Resistógrafo empleado en el estudio.
Figure 1. Resistograph used in this study.

El registro de datos se realiza: a) gráficamente, a través de una pequeña impresora que, en tiempo real, reproduce los perfiles resistográficos a escala 1:1 (Figura 3); b) mediante un banco de memoria en el que los datos quedan almacenados para su posterior análisis, registrándose 100 medidas por cada milímetro penetrado.

in Spain and in recent years various research groups have produced work on this subject, including notable projects from the University of Valladolid (3, 4), the University of Santiago de Compostela (5) and the Polytechnic University of Valencia (6).

The interpretation of resistographic profiles carried out by Rinn (7) is one of the most painstaking tasks undertaken up to this time, and provides the basis of our study.

2. MATERIALS AND METHODOLOGY

2.1. Instruments

For the present study a RINN-TECH resistograph, model RESISTOGRAPH® 3450-S (Figure 1), was used.

This tool evaluates the wood resistance to a steel drill bit 1.5mm in diameter, with a length, in our case, of 50 cm. The drill bit turns while being introduced into the wood, with the value of resistance to penetration measured as a percentage of energy consumed by the motor. The width of the cutter of the drill bit (Figure 2) measures 3 mm, twice the diameter of the shank. The bit advances at a constant speed of 30 cm/minute, turning at 1500 r.p.m.

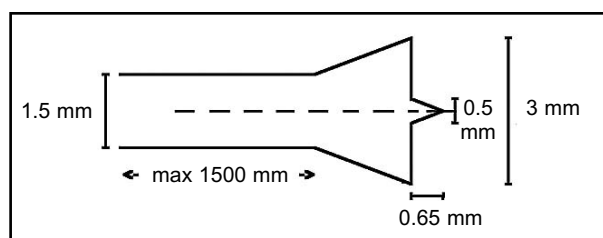


Figura 2. Dimensiones de la aguja (www.rinntech.com).
Figure 2. Drill dimensions (www.rinntech.com).

The collected data is registered: a) graphically, using a small printer which reproduces the resistographic profile in real time at a scale of 1:1 (Figure 3); b) using a memory bank in which the data is stored for later analysis, taking 100 measurements per millimetre of penetration.

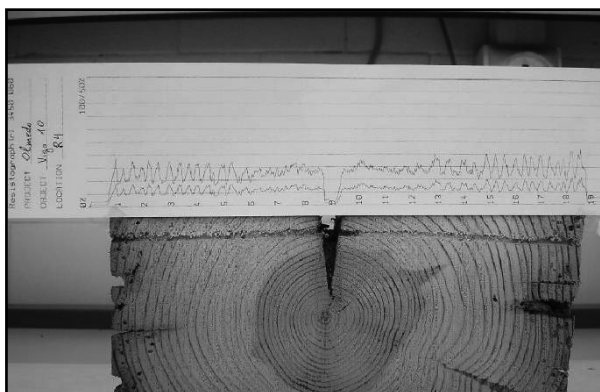


Figura 3. Resistograma de madera de Pinus y corte de la probeta en la sección del taladro.
 Figure 3. Resistogram of a Pinus wood sample and the cutaway of the sample where drilled.

2.2. Probetas

Para los ensayos se utilizaron piezas de madera de 6 especies distintas, recogidas en la Tabla 1. Las probetas de madera presentaban unas dimensiones aproximadas de 15 x 10 x 10 cm, realizándose el ensayo en dirección radial, lo que permite atravesar perpendicularmente los anillos de crecimiento. Las muestras utilizadas (Tabla 1) proceden de pies con edades comprendidas entre 75 y 90 años para todas las especies, utilizándose para los ensayos aquellas zonas de las piezas en la que no se presentaba madera juvenil. La procedencia de los pies de cada una de las especies ha sido elegida atendiendo tanto a su amplia disponibilidad en el mercado, así como a su extensa presencia en las estructuras de madera existentes en España.

2.2. Samples

For the tests, samples of 6 different types of wood were used, indicated in Table 1. The dimensions of the samples were approximately 15 x 10 x 10 cm, with tests being performed in a radial direction which permitted the growth rings to be penetrated perpendicularly. The samples (Table 1) were taken from trees of between 75 and 90 years of age from all species, using zones which were not juvenile wood. The origin of the samples of each tree species has been chosen according to their wide availability in the market and their extensive use in wooden structures in Spain.

Tabla 1 / Table 1
 Especies de madera utilizadas en el estudio.
 Species of wood used in the study.

Especie / Species	Nº de pies-piezas / Nº tree-pieces	Procedencia / Origin
<i>Pinus sylvestris</i> L. (p. silvestre / Scots pine)	55/110	Sierra de Guadarrama y Montes Universales / Guadarrama mountains and Montes Universales range
<i>Pinus nigra</i> Arnold. (p. laricio / Black pine)	30/60	Sistema Ibérico Meridional / Southern Iberian System
<i>Pinus pinaster</i> Ait. (p. resinero / Maritime pine)	30/60	Meseta castellana / Castilian plateau
<i>Castanea sativa</i> Mill. (castaño / Chestnut)	30/60	Vertiente septentrional cantábrica / Northern Cantabrian range
<i>Juglans regia</i> L. (nogal / Walnut)	30/60	Páramos del Duero / Plateau of the Duero river
<i>Quercus robur</i> L. (roble / Oak)	30/60	Cordillera cantábrica meridional / Southern Cantabrian range

La aguja taladradora se reemplazó cada 50 ensayos, tratando de evitar de esta forma la posible influencia que el desgaste del útil de corte pudiese tener sobre el consumo de energía del motor del equipo.

The drill bit was replaced every 50 tests, in order to reduce the effect the wearing of the cutting tool may have on the energy consumption of the equipment.

Para la realización de los análisis estadísticos se utilizaron los programas Excel de Microsoft, y los paquetes estadísticos Statistica y Statgraphics.

2.3. Definición de variables resistográficas

El resistograma (Figura 4) representa gráficamente la energía que el motor eléctrico que hace girar la broca consume para lograr la penetración de la aguja a velocidad constante. Por consiguiente, atendiendo a la constitución interna de la madera, se podrán definir una serie de variables que relacionen las características propias del material con la energía consumida en cada momento.

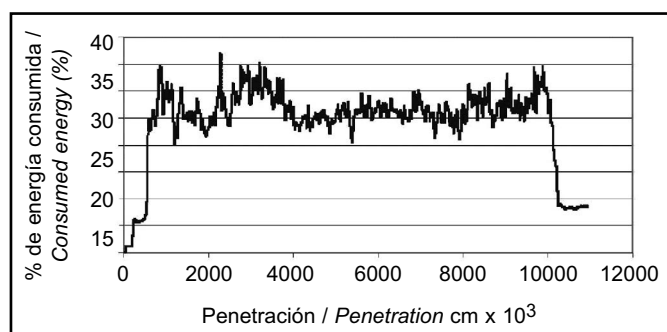


Figura 4. Resistograma de madera de *P. pinaster*.
Figure 4. Resistogram wood from a *P. pinaster*.

Inicialmente, cabe pensar que la energía total empleada en la penetración de la aguja tendrá una fuerte relación con la cantidad de materia que debe ser atravesada y, siendo la madera un material poroso, debería existir una fuerte relación con su densidad.

Igualmente, y dependiendo de la especie con la que se trabaje, la densidad de la madera perteneciente a la zona de "primavera" de los anillos de crecimiento, madera que se forma en pleno periodo vegetativo, es, por su constitución anatómica, apreciablemente menos densa que la formada al final del anillo de crecimiento —madera de verano o, más correctamente, madera de otoño o tardía en las regiones mediterráneas—. Por ello, en el resistograma aparecerán una sucesión de crestas y valles, correspondientes a la diferente dificultad que presenta el equipo para penetrar esas distintas zonas, y sabiendo que la proporción de estos tipos de madera (primavera-otoño) en nuestra latitud es sensiblemente constante, se podrá establecer algún algoritmo que permita reflejarlo a partir del resistograma. También se podrán detectar fendas, galerías, etc., a través de la disminución del consumo de energía.

Para ello se definieron las siguientes variables resistográficas:

- 1) *Valor medio* (V_{med}): esta primera variable, representa el área total bajo la curva resistográfica por unidad

The statistical analyses of the data collected were performed on Microsoft Excel program, using the statistical packages Statistica and Statgraphics.

2.3. Definition of resistographic variables

The resistogram (Figure 4) provides a graphic representation of the energy consumed by the electric engine in penetrating the sample with the drill bit at a constant speed. Thus, given the internal constitution of the wood, a series of variables can be determined relating the characteristics of the material to the amount of energy consumed at each moment.

Initially, it should be supposed that the total energy consumed in penetrating the sample would be closely related to the amount of material to be penetrated and, as wood is a porous material, there should be a close relation with its density.

Equally, and depending on the wood species, the "spring wood" region of the tree rings, wood formed during the full growth period, due to its anatomical nature, is appreciably less dense than that formed at the end of the growth ring —"summer wood" or, more accurately, "late wood" in Mediterranean regions. Thus, the resistogram appears as a succession of peaks and valleys, corresponding to the varying difficulty in penetrating these different areas. As the proportion of these types of wood (spring-summer) are generally constant in our latitude, an algorithm can be established to reflect this from the resistogram. Cracks, cavities, and other anomalies can also be detected through a decrease in the amount of energy consumed.

The following resistographic variables have been defined:

- 1) *Average value* (V_{med}): this first variable represents the total area under the resistographic curve for the

de longitud penetrada [ec.1] (Figura 5) y mide el consumo medio del equipo por centímetro penetrado. Así, el valor medio podría expresarse como:

penetrated longitude [eq.1] (Figure 5) and measures the average energy consumption per centimetre penetrated. Thus, the Average value can be expressed as follows:

$$\text{Media} = V_{\text{med}} = \frac{\int_0^A f(x)}{0A} \quad [1]$$

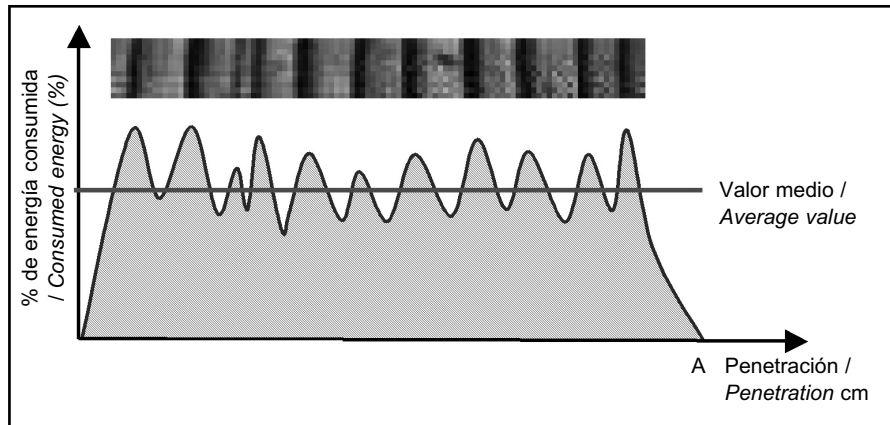


Figura 5. Media total.
Figure 5. Total average.

- 2) *Variabilidad* ($V_{DES} - V_{CV}$): se han elegido la desviación típica (V_{DES}) y el coeficiente de variación (V_{CV}) como variables que pueden representar adecuadamente la variabilidad de la energía de penetración consumida. Se hace así porque estas dos herramientas estadísticas, al representar la "dispersión" de la muestra, pueden plasmar la homogeneidad o heterogeneidad del material. Se espera que presente un valor sensiblemente constante para cada especie o, al menos, valores semejantes para especies afines.
- 3) *Media de máximos* (M_{max}): esta variable tratará de indicar cuál es el valor medio en todas las "crestas" del resistograma [ec.2] y, en definitiva, cuál es el valor medio del consumo de energía que presenta la madera de otoño (más densa) en su penetración por la aguja resistográfica (Figura 6). Siendo n el número de máximos, se expresará como:

- 2) *Variability* ($V_{DES} - V_{CV}$): The typical variation (V_{DES}) and variation coefficient (V_{CV}) have been chosen as variables as they adequately represent the variability of the energy consumed in the penetration of the sample. This is so because these two statistical elements, as they represent the "dispersion" of the sample, can indicate the homogeneity or heterogeneity of the material. This should provide a relatively constant variable for each species or, at least, similar values for similar species.
- 3) *Average Maximums* (M_{max}): This variable indicates the average values of all "crests" of the resistogram [eq.2] and, ultimately, the average energy consumption in the penetration of the autumn growth (more dense) by the resistograph (Figure 6). Where "n" represents the number of maximums, expressed as follows:

$$\text{Media de máximos} = M_{\text{max}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n} \quad [2]$$

- 4) *Media de mínimos* (M_{min}): de forma semejante al caso anterior, esta variable indicará el valor medio de los "valles" del resistograma [ec.3] y, en definitiva, el valor medio del consumo de energía que presenta la madera de primavera en su penetración por la aguja (Figura 6). Siendo n el número de mínimos, se expresará como:

- 4) *Average Minimums* (M_{min}): Similar to the variable above, this indicates the average value of all "valleys" of the resistogram [eq.3] and, ultimately, the average energy consumption in the penetration of the springwood (Figure 6). Where "n" represents the number of minimums, expressed as follows:

$$\text{Media de mínimos} = M_{\min} = \frac{\sum_{j=1}^m m_j}{m} \quad [3]$$

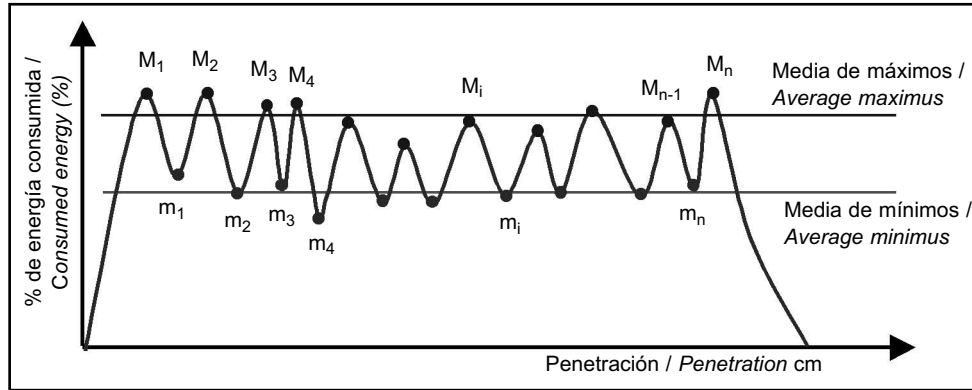


Figura 6. Media de máximo y media de mínimos resistográficos.
 Figure 6. Average maximums and average minimums of the resistograph.

- 5) $M_{\max} - M_{\min}$: la diferencia entre el valor medio de los máximos y el de los mínimos tratará de evaluar la distinta densidad que se presenta entre la madera de otoño y la de primavera. Si fuese sensiblemente constante y su variabilidad dentro de cada especie no fuese excesiva, nos permitiría detectar pudriciones tempranas, ya que muchos ataques afectan de forma más intensa a la madera de primavera, de forma que, en este caso, la variable definida aumentaría de forma significativa su valor.
- 6) *Valor Máximo (V_{\max})*: representa el valor máximo absoluto que aparece en el resistograma (Figura 7). Analizando estadísticamente este valor, si se encontrase significativamente fuera de la población que forman el resto de máximos relativos (crestas), podría indicar la presencia de algún nudo interno u otra anomalía con densidad extremadamente alta que represente un inconveniente mecánico para el funcionamiento de la pieza.

- 5) $M_{\max} - M_{\min}$: The difference between the average value of the maximums and the minimums, indicating the varying densities of the spring and autumn growth. If this is reasonably constant and without significant variations within each species it will permit the detection of early decay, as decay often affects springwood with more intensity and will cause the variable to increase significantly.
- 6) *Maximum Value (V_{\max})*: This represents the maximum absolute value which appears on the resistogram (Figure 7). A statistical analysis of this value, if it is significantly outside the grouping of the rest of the relative maximums (crests), may indicate an internal knot or other anomaly of extreme density which may pose a mechanical inconvenience for the equipment.

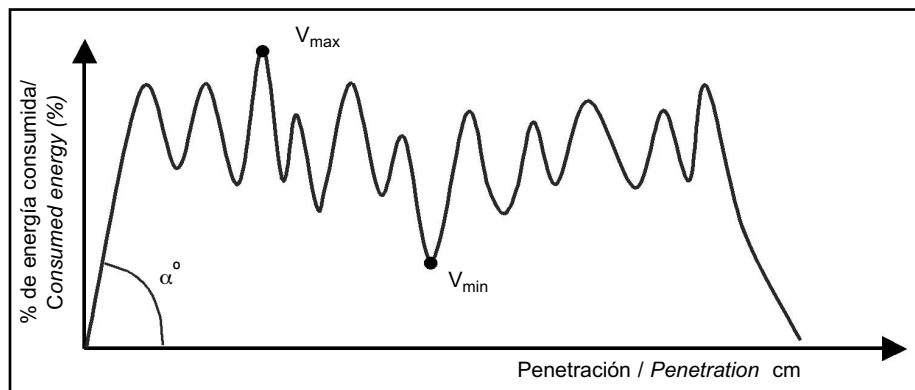


Figura 7. Variación inicial del consumo de energía y valores máximo y mínimo absolutos.
 Figure 7. Initial variation of energy consumption and absolute maximum and minimum values.

- 7) *Valor Mínimo (V_{min}):* este valor (Figura 7) si presenta valores excesivamente bajos podría indicar la presencia de fendas internas, galerías, etc., no detectables exteriormente.
- 8) *Variación inicial del consumo de energía (A1000 - A1500):* con estas variables se trata de evaluar la mayor o menor dificultad que tiene la aguja para penetrar en la madera en su zona más externa. Para ello, se determinaron los ángulos que forma el resistograma desde su origen hasta alcanzar 1 cm y 1,5 cm de penetración. Conocido el comportamiento de la madera sana, esta variable podría ser útil para detectar pudriciones o ataques superficiales que se traducirán en un menor consumo de energía y en una variación del ángulo inicial (Figura 7) observado en el resistograma.

Junto a estas variables principales, se definieron otras que por su significado mecánico-anatómico pudieran ser utilizadas, en algún caso, para explicar el comportamiento o el estado de degradación del material. Éstas fueron:

- 9) *Media de máximos menos Media total ($M_{max} - V_{med}$).*
- 10) *Media de mínimos menos Media total ($M_{min} - V_{med}$), expresado en valor absoluto.*
- 11) *Máximo menos media de máximos ($V_{max} - M_{max}$).*
- 12) *Mínimo menos media de mínimos ($V_{min} - M_{min}$).*
- 13) *Valor J:* expresa, en porcentaje respecto a la media total, la diferencia entre el valor máximo absoluto y la media total de la población.
- 14) *Valor H:* expresa, en porcentaje respecto a la media total, la diferencia entre el valor mínimo absoluto y la media total de la población en valor absoluto.

2.4. Selección de variables significativas

En este apartado se analizan las variables anteriormente descritas, seleccionando aquellas que mejor expliquen su relación con los fenómenos estudiados. Estas variables se definieron para tres zonas distintas del resistograma, que se denominaron intervalos resistográficos A, B y C, siendo:

- Intervalo A: las variables se obtienen utilizando la totalidad de los valores del resistograma.
- Intervalo B: las variables se obtienen eliminando el primer y último *centímetro* del resistograma de cada muestra.
- Intervalo C: las variables se obtienen eliminando el primer y último *centímetro* y *medio* del resistograma en cada muestra.

Las medidas obtenidas sobre los intervalos resistográficos "B" y "C" tratan de paliar posibles valores anómalos

- 7) *Minimum Value (V_{min}):* If this value (Figure 7) indicates excessively low figures may indicate the presence of internal cracks, cavities or other anomalies not previously detected.
- 8) *Initial variation of energy consumption (A1000 - A1500):* These variables are used to evaluate the lesser or greater difficulty in penetrating the wood at its most external area. This is identified by the angles formed at the beginning of the resistogram from the start to the first 1 cm and 1.5 cm of penetration. When the behaviour of healthy wood is known this variable may be useful in detecting superficial decay or attacks identified by lower energy consumption and a variation in the initial angle (Figure 7) observed in the resistogram.

In addition to these principal variables, others were defined due to their mechanical-anatomical significance and can be used, in some cases, to explain the behaviour or state of degradation of the material. These are:

- 9) *Maximum Average minus the Total Average ($M_{max} - V_{med}$).*
- 10) *Minimum Average minus Total Average ($M_{min} - V_{med}$), expressed as an absolute value.*
- 11) *Maximum Value minus Average Maximums ($V_{max} - M_{max}$).*
- 12) *Minimum Value minus Average Minimums ($V_{min} - M_{min}$).*
- 13) *J Value:* this expresses, as a percentage of the total average, the difference between the absolute maximum value and the total average.
- 14) *H Value:* this expresses, as a percentage of the total average, the difference between the absolute minimum value and the total average as an absolute value.

2.4. Selection of significant variables

This section is an analysis of the variables indicated above, selecting those which best illustrate the relation with the studied phenomena. These variables are defined for three distinct zones of the resistogram, referred to as intervals A, B and C, where:

- Interval A: the variables obtained using the totality of the values of the resistogram.
- Interval B: the variables obtained eliminating the first and last centimetre of the resistogram of each sample.
- Interval C: the variables obtained eliminating the first and last centimetre and a half of the resistogram of each sample

The measurements obtained on the resistographic intervals "B" and "C" are used to mitigate possible

que se pudiesen producir en los estadios iniciales y finales de la penetración de la aguja-taladro.

anomalies in values which may occur initially and at the end of the penetration with the drill bit.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la primera fase de este trabajo, utilizando madera nueva y sana, se analizó la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tres intervalos resistográficos para cada una de las variables anteriormente definidas. Para ello se comprobó la normalidad e independencia de cada una de ellas como paso previo a la realización de un test de análisis de la varianza que establezca, en cada caso, la existencia de diferencias entre los valores medios de las variables en los 3 intervalos. Seguidamente, se determinó, en el caso de que fuese necesario, mediante un test de rango múltiple, cuál es el intervalo en el que la variable es diferente de los otros dos.

La escala utilizada para el eje de ordenadas (% de energía consumida) ha sido la misma para todas las especies, siendo los resultados obtenidos para los valores medios de las variables correspondientes a la totalidad de las muestras los recogidos en la Tabla 2.

De la lectura de la Tabla 2 se puede concluir que es innecesario utilizar las variables resistográficas definidas sobre el intervalo C, ya que no aporta nada significativamente diferente a lo que ya hacen las definidas sobre el intervalo B. Las variables que se han mostrado significativamente distintas se han destacado con un asterisco, y para las que

3. RESULTS AND DISCUSSION

During the first phase of this project, using new and healthy wood samples, any significant statistical differences between the three resistographic intervals were analysed for each of the variables defined above. The normality and independence of these results was verified in order to proceed with an analysis of the variance demonstrated in each case by the differences between the average values in the 3 intervals. This was followed by the determination, using a multiple range test where necessary, of the interval in which this variable is significantly different from the other two.

The scale used for the axis of precession (% of energy consumed) has been the same for all species. The average values obtained for the different variables for all samples are provided in Table 2 below.

From the data provided in Table 2 it can be concluded that it is not necessary to use the resistographic variables defined for Interval C as this does not provide any significant difference from that defined for Interval B. The variables which have provided significant differences are highlighted with an asterisk. Where there

Tabla 2 / Table 2
 ANOVA y test de rango múltiple para los intervalos resistográficos definidos.
ANOVA and multiple range test for defined resistographic intervals.

Código / Code	Variables / Variables	ANOVA entre grupos / ANOVA among groups		Intervalos resistográficos / Resistographic Intervals		
		Valor F / Value F	p val. / p val.	A	B	C
1	V_{med} ⊗	2.93	0.053 *	318.4 +	340.4	339.6
2	V_{DES} ⊗	207.54	0.000 *	79.0	40.9 +	42.3
3	V_{CV}	542.66	0.000 *	26.5	13.5 +	13.9
4	V_{min} ⊗	0.40	0.520		239.6 +	234.8
5	V_{max} ⊗	0.22	0.800	510.5	498.4 +	504.8
6	Valor J	39.54	0.000 *	57.2 +	44.4	46.4
7	Valor H	4.04	0.044 *		28.2 +	29.7
8	M_{max} ⊗	0.03	0.966	352.4 +	355.0	354.6
9	M_{min} ⊗	0.03	0.968	317.1 +	319.4	319.1
10	$M_{max} \cdot M_{min}$	0.00	0.983		34.5 +	34.6
11	$M_{max} - V_{med}$	0.20	0.652	(10.2)	4.5 +	4.7
12	$M_{min} - V_{med}$	0.02	0.891		5.5 +	5.5
13	$V_{max} \cdot M_{max}$	0.82	0.366	(129.7)	116.9 +	121.3
14	$V_{min} - M_{min}$	1.30	0.254		2.3 +	2.3
15	Ang1000 ⊗	2.93	0.053	16.8 +		
16	Ang1500 ⊗	207.54	0.000	16.9 +		

⊗ - Variables independientes / Independent variables.

+ - Intervalo resistográfico seleccionado para cada variable / Resistographic interval selected for each variable.

no han presentado diferencias entre los distintos intervalos, se tomarán como predictoras, para continuar con el resto de análisis, el valor que toman en el intervalo B.

3.1. Relación entre la densidad y las variables resistográficas

Para llevar a cabo el estudio de la relación entre la densidad y las variables resistográficas se utilizaron una regresión lineal simple, una regresión lineal múltiple y, finalmente, un modelo lineal generalizado, en el que se incluyó la "especie" de madera como variable categórica. La Tabla 3 recoge los modelos, que son altamente explicativos, y las variables regresoras que han resultado significativas en cada uno de ellos.

Si bien este último valor de R² ajustado del modelo lineal generalizado resulta óptimo en el ajuste, para no perder el sentido práctico y poder utilizar una formulación suficientemente sencilla, consideramos que el modelo de regresión simple (Figura 8), es lo suficientemente preciso y la aplicación de la ecuación obtenida [ec.4] da resultados plenamente satisfactorios (R²=81,81%) para poder ser utilizada en la mayoría de los casos:

$$\text{Densidad} = 394,797 + 0,7598 * A V_{med} \quad [4]$$

Tabla 3 / Table 3
Modelo lineal generalizado para la densidad de la madera.
General lineal model for wood density.

Modelo / Model	Variable regresora / Independent variable	Razón-F / Reason-F	Valor-P / Value-P	R ² -ajustado % / R ² -ajusted %
Regresión simple / Simple independent	A V _{med}	1831.50	0.0000	81.8101
Regresión múltiple / Multiple independent	A V _{med}	15.1173	0.0000	82.4234
	B V _{min}	-3.665	0.0003	
	Ang1500	2.28736	0.0227	
Modelo lineal generalizado / Generalised lineal model	Especie	2.17	0.0572	91.0369
	A V _{med}	41.58	0.0000	
	B V _{DES}	8.94	0.0030	
	Ang1500	1.21	0.1271	

A V_{med} = Variable V_{med} en el intervalo resistográfico A / Variable V_{med} in resistographic interval A.
 B V_{min} = Variable V_{min} en el intervalo resistográfico B / Variable V_{min} in resistographic interval B.
 B V_{DES} = Variable V_{DES} en el intervalo resistográfico B / Variable V_{DES} in resistographic interval B.
 Ang1500 = Variable Ang1500, definida únicamente en el intervalo A / Variable Ang1500, only defined in interval A.

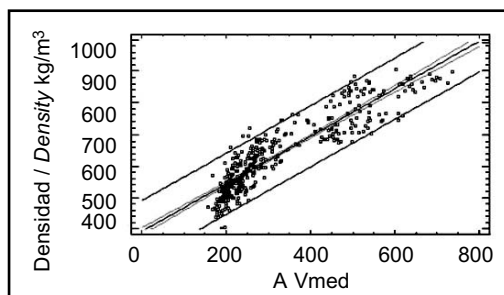


Figura 8. Gráfico del modelo ajustado de regresión lineal.
Figure 8. Graph of the adjusted lineal independent model.

are no significant differences between intervals, these are taken as indicators, and the values of interval B are used for the rest of the analysis.

3.1. Relation between density and resistographic variables

For the study of the relation between density and resistographic variables, different models were used: a simple linear regression, a multiple linear model and a generalized linear model, which included the species of the wood as a categorical variable. Table 3 indicates the models, which are highly explanatory, and the independent variables which have been significant in each case.

While the final R² value of the generalised lineal model is optimum in the adjustment, in practical terms and in order to use a simple formulation, we consider the simple independent model (Figure 8) to be sufficiently precise and the application of the obtained equation [eq.4] provides satisfactory results (R²=81.81%) to be used in the majority of cases:

3.2. Diferenciación entre las especies utilizadas

Con todas las variables definidas, y tomando cada una de ellas para su intervalo resistográfico seleccionado, signo + en la Tabla 2, se realizó un análisis (ANOVA) para comprobar las diferencias que aparecían entre las distintas especies. Del análisis inicial, se puede destacar la semejanza que muchas de ellas presentan en su comportamiento con las tres especies de pinos, mientras que las tres especies de frondosas presentan mucha mayor variabilidad entre ellas y con las anteriores (Tabla 4). En cuanto a la madera de *P. sylvestris* que se utilizó de dos regiones de procedencia distinta, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ellas para ninguna de las variables definidas.

3.2. Differentiation between species used

With all the variables defined, and taking the selected resistographic interval for each, indicated with "+" in Table 2, an analysis was made (ANOVA) to determine the differences appearing among the different species. From an initial analysis, it can be noted the similarities demonstrated by the three species of pine while the deciduous species offer greater variability from each other and the others (Table 4). With regards to *P. sylvestris*, with samples taken from two different regions of origin, no significant statistical differences were seen in any of the defined variables.

Tabla 4 / Table 4

Diferencias de comportamiento de cada una de las variables para las 6 especies. Análisis estadístico de grupos homogéneos. Test HDS de Tuckey.

Behavioural differences for each of the variables for the 6 species. Statistical analysis of homogeneous groups. Tuckey's HDS Test.

Código variables / Variables code	1 - 9	2	3	4	5	6	7	8 - 10	12	13- 14	15 -16
<i>P. pinaster</i> / Maritime pine	a	b	c	a	a	b	b c	a	b	a	a
<i>P. Silvestre</i> / Scots pine	ab	a	b	a b	a	a	b	a	a	a	a
<i>P. laricio</i> / Black pine	b	a	a	b	a	a	a	a	a	a	b
Castaño / Chestnut	c	c	d	b	b	a	d	b	c	b	c
Nogal / Walnut	d	c	a b	c	c	b	a b	c	b c	b	d
Roble / Oak	e	c	c	d	c	b	c	d	d	c	d e

Realizando un análisis discriminante con las 8 variables independientes definidas anteriormente, marcadas con ⊗ en la Tabla 2, se obtiene que todas, excepto V_{min} , son significativas en el modelo para las 6 especies de madera sana con las que se trabajó.

A discriminating analysis using the 8 independent variables indicated above, marked with an f in Table 2, shows that all variables, except V_{min} , are significant in the model for the 6 species of healthy wood used in the analysis.

En la validación del modelo, el porcentaje de casos correctamente clasificados es del 72,55%, pudiendo observarse en la Figura 9 el distinto comportamiento antes referido entre coníferas y frondosas.

In the validation of the model, the percentage of correctly classified cases is 72.55%. Figure 9 illustrates the behaviour referred to above regarding coniferous and deciduous woods.

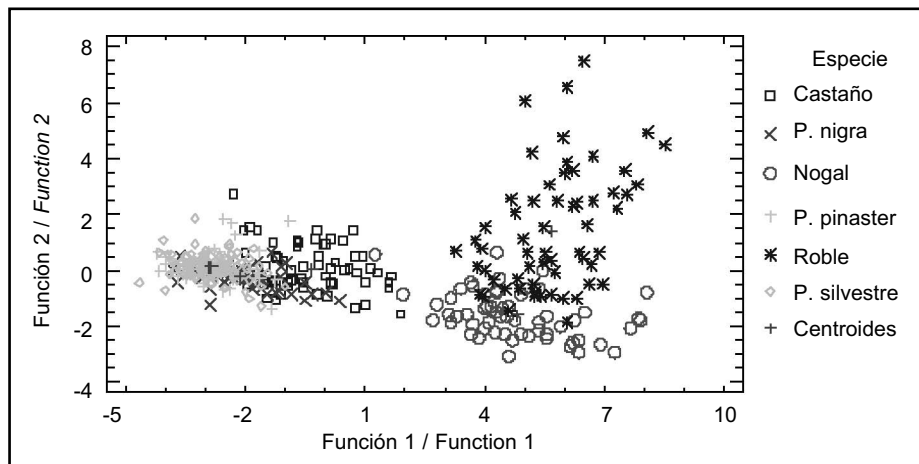


Figura 9. Gráfico de funciones discriminantes.
Figure 9. Graph of discriminating functions.

Esta técnica de análisis discriminante, utilizada exclusivamente con las tres especies de pinos (Figura 10), fue aplicada con éxito por los autores en la determinación de la especie de madera que forma la estructura de madera vista de la Plaza Mayor de Chinchón (4), determinándose que, con una probabilidad del 85%, la madera allí empleada fue pino silvestre.

This technique of discriminating analysis, used exclusively with the three species of pine (Figure 10), was successfully applied by the authors in the determination of the species of wood used in the timber structures found in the Plaza Mayor of Chinchón (4), determining with a probability of 85% that the wood used was Pinus sylvestris L..

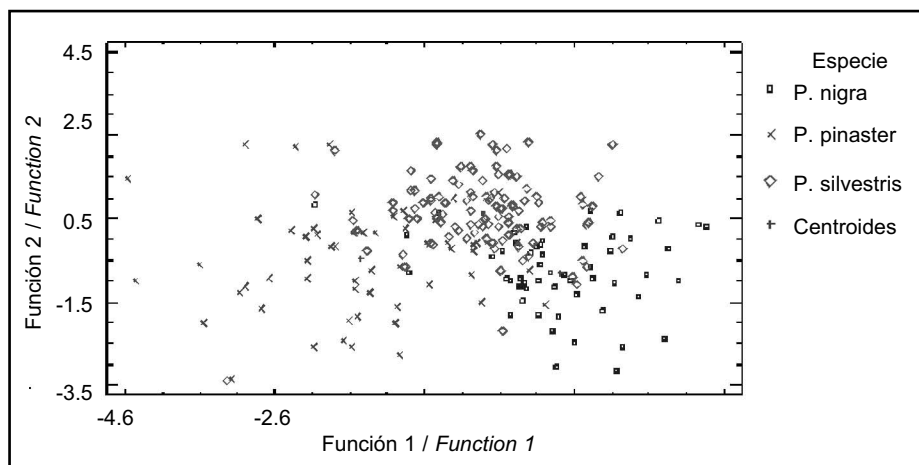


Figura 10. Gráfico de funciones discriminantes para las 3 especies de pinos.
 Figure 10. Graph of discriminating functions for the 3 species of pine.

4. CONCLUSIONES

- Se debe tener presente que los ensayos resistográficos son "ensayos puntuales" y nunca deben servir para validar una pieza estructural en su conjunto. Sin embargo, el hecho de que en un resistograma se detecten fallos importantes (pequeños valores del valor medio, galerías internas, etc.) sí que supone una herramienta útil para la toma de decisiones.
- La falta de normalización de los equipos resistográficos implica tener que realizar con cada uno de ellos los trabajos necesarios para asegurar tanto su correcto funcionamiento como su calibración particular en cada caso. Igualmente, sería deseable la elaboración de un banco de datos de resistogramas de distintas especies, utilizando diferentes equipos y modelos, ya que, en términos absolutos, los valores obtenidos con cada aparato no deberían ser directamente exportables a otro.
- Las piezas que presentan pudriciones internas importantes, ataques masivos de xilófagos, etc., se detectan claramente con estos equipos, obteniéndose resistogramas típicos, con perfiles muy bajos, bajadas bruscas de resistencia o falta absoluta de resistencia a la penetración (Figura 11).
- Los ataques superficiales de xilófagos se detectan con bastante precisión a través de las variables Media

4. CONCLUSIONS

- It should be noted that resistographic testing is a "spot test" and should never be used to validate a structure as a whole. However, the fact that a resistogram can detect significant failures (low average figures, internal cavities, etc.) it does represent a useful tool in decision making.*
- The lack of harmonisation among resistographic equipment requires that the correct operation and calibration of this equipment must be ensured in each case. Equally, the creation of a database of resistograms of different species would be ideal, using different resistographic equipment and models as, in absolute terms, the values obtained from one resistogram are not necessarily directly exportable to another.*
- Pieces with significant internal decay, massive infestations of insects, etc., are clearly detected with this equipment, providing resistograms with very low profiles, sudden drops in resistance or the absolute lack of penetration resistance (Figure 11).*
- Superficial infestations of insects can be detected with significant precision using the variables Total*

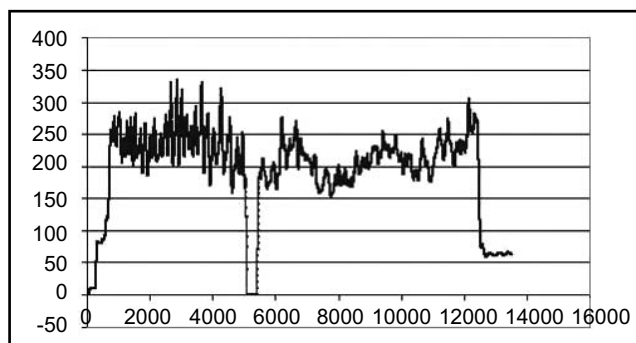


Figura 11. Detalle de un resistograma que detecta una galería o una fenda interna.
Figure 11. Detail of a resistogram which detects an internal cavity or crack.

total (V_{med}) y Ángulo de penetración ($A1000$ y $A1500$), pudiendo evaluarse con bastante exactitud la profundidad del ataque. Esto servirá para determinar cuál es la sección resistente eficaz de una pieza en uso.

- e) La determinación de la densidad con estos equipos es realmente precisa, superando, sin lugar a dudas, a otro tipo de dispositivos o ensayos cuyo objetivo esencial es éste. Como se ha comentado, las relaciones obtenidas entre las variables definidas utilizadas como regresoras de la densidad reportan unos valores de R^2 ajustado de más del 80%, relación que permite utilizar la densidad así obtenida con plenas garantías. A ello se añade la ventaja de resultar un ensayo factible de realizar en obra, por las características de portabilidad del equipo.

Average (V_{med}) and Angle of penetration ($A1000$ and $A1500$), which allow the depth of the infestation to be determined with considerable accuracy. This will serve to identify the resistant sections of any wooden structure.

- e) The determination of density using this equipment is very precise, exceeding without a doubt other types of equipment or testing with the same purpose. As indicated above, the relation between the defined independent variables for density provide adjusted R^2 values of more than 80%, more than sufficient to ensure results obtained are fully reliable. To this must be added the advantage of being able to perform testing in situ, given the portability of the equipment.*

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido realizado gracias a la financiación aportada por parte de la Junta de Castilla y León, en el marco de las ayudas concedidas a proyectos de investigación a iniciar en el año 2004 (ref. VA076/04). Los autores también desean agradecer la contribución de la empresa TRYCSA que, a través del correspondiente convenio de investigación, ha cedido a los autores el equipo empleado.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported with funding provided by the Junta de Castilla y León, through grants provided for research projects at the start of 2004 (ref. VA076/04). The authors would also like to thank TRYCSA for their contribution through the research agreement granting the authors the use of the research equipment used.

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Rinn, F.: "Catalogue of relative density profiles of trees, poles and timber derived from resistograph micro-drillings". *Proceedings of the 9th International Symposium on Non Destructive Testing of Wood*, 22-24 September 1993, pp. 61-67. Wisconsin, USA, 1993.
- (2) Bouffier, L.; Charlot, C.; Raffin, A.; Rozenberg, P.; Kremer, A.: "Can wood density be efficiently selected at early stage in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)?". *Ann. For. Sci.*, vol. 65 (2008), article nº 106. DOI: 10.1051/forest: 2007078.
- (3) Álvarez, L.; Basterra, L. A.; Casado, M.; Acuña, L.: "Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en Estructuras de madera". *Proceedings of I Jornadas de Investigación en Construcción*, 2-4 June 2005, pp. 165-181. Madrid, España, 2005.
- (4) Basterra, L. A.; Acuña, L.; Casado, M.; Ramón-Cueto, G.; López, G.: "Diagnóstico y análisis de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas: aplicación a la Plaza Mayor de Chinchón (Madrid)". *Informes de la Construcción*, vol. 61, nº 516 (2009), 21-36.

- (5) Mariño Allegue, R; Fernández Rodríguez, M^a. E; Fernández Rodríguez, C.: "Análisis comparativo de la densidad de la madera *Pinus sylvestris* L. mediante la utilización del Resistógrafo". *Revista CIS-Madera*, nº 9 (2002), 60-70.
- (6) Capuz, R.: "Métodos de ensayo no destructivos para la estimación de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas". Ph.D. diss., Universidad Politécnica de Valencia, España, 2003.
- (7) Rinn, F.: "One minute pole inspection with resistograph micro drillings". *Proceedings of the International Conference wood poles & piles*. 20-23 March 1994, pp. 12-18. Colorado, USA, 1994.

* * *