

**LOS ULTRASONIDOS Y LA CALIDAD DE LA MADERA ESTRUCTURAL.
APLICACIÓN A PINUS PINASTER AIT.**

Acuña, L.* (1); Díez, M.R. (2); Casado, M. (1)

(1) Laboratorio de Maderas de la Universidad de Valladolid

(2) Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, CIFOR-INIA

Avda. de Valladolid 44 (Yutera), 34071 – Palencia, España

*Autor para la correspondencia: maderas@iaf.uva.es

Boletín del CIDEU 2: 7-26 (2006)
ISSN 1885-5237

Resumen .

Los resultados de este trabajo muestran que el valor de la medida de la velocidad de propagación de los ultrasonidos se ve modificada por la distancia de medida y por el ángulo que forma la dirección de medida con la inclinación de las fibras, debiendo ser corregida cuando se trabaja con piezas de madera de tamaño estructural. Asimismo, se observa una buena relación entre las características determinadas por la técnica ultrasónica y los ensayos de flexión estática y rotura, e indica que esta técnica no destructiva se puede utilizar con garantías en *P. pinaster* para llevar a cabo una clasificación resistente de la madera, aportando un rendimiento mayor que con la clasificación visual, UNE 56.544.

Palabras clave: Ensayos no destructivos, END, Pino, Clases resistentes, Módulo de elasticidad, Módulo de rotura.

Summary

The ultrasonounds and the structural wood quality, an application to *Pinus pinaster* Ait.

The results of this work show that the value of velocity measurement of ultrasounds wave is modified by the distance of transducers and by the angle formed by the direction of measurement with the grain angle, having to be corrected when works with wood pieces of structural size. Also, a good relation between the characteristics determined by the ultrasonic technique and the tests of static flexion is observed, showing that this nondestructive technique can be used with guarantees in *P. pinaster* to carry out a resistant classification of wood, obtaining a greater yield than the visual grading, UNE 56.544.

Keywords: Ultrasound, Non-destructive evaluation, NDE, Pine, Strength classes, Modulus of elasticity, Bending strength

Introducción

Los métodos de ensayo no destructivos (NDT - *Nondestructive testing*; NDE – *Nondestructive evaluation*) se pueden definir como técnicas que permiten examinar los materiales o sus componentes sin que se vean afectadas sus propiedades, su integridad y su utilidad final. Los métodos NDT se pueden utilizar para detectar, localizar, medir y evaluar defectos, para determinar propiedades de los materiales, así como su composición o para garantizar su adecuado comportamiento en uso.

Entre las técnicas no destructivas aplicadas a la madera se encuentran aquellas que se basan en el uso de los ultrasonidos (Beall, F.C. 2002; Hermoso, E. 2003) habiendo sido muchos los investigadores que han comprobado la eficacia del método de ultrasonidos para determinar las constantes elásticas de la madera, (Bucur, V. 1984 a; Waubke, N.V. 1981, Sandoz, J.L. 1989, Herzig, L. 1992, Koubaa, A. et al. 1997, Hernández, R. et al. 1998). La técnica de ultrasonidos puede ser aplicada, esencialmente, siguiendo los procedimientos de transmisión o pulso eco, siendo los primeros los que más amplia aplicación están teniendo en la madera, utilizándose muy ampliamente aquellos que consisten en dos transductores, uno emisor y otro receptor que, perfectamente acoplados a la madera, miden el tiempo que tarda la onda ultrasónica en llegar de uno a otro (TOF.- *Time of fly*).

La aplicabilidad del método reside en la fuerte relación existente entre las propiedades elastomecánicas del material (Rajeshwar, B. 1997) en particular el módulo de elasticidad, y la constante dinámica (C_{11}) obtenida a partir de la velocidad de propagación de los ultrasonidos. En estudios realizados sobre

probetas pequeñas libres de defectos se han obtenido buenos resultados en la predicción del módulo de elasticidad a través de la velocidad de propagación de ultrasonidos y la densidad en equipos automáticos (Boström, L. 1994).

Los frecuencias ultrasónicas que utilizan este tipo de equipos para trabajar con madera, que es un material dispersivo, son bajas, entre 20 y 200 kHz normalmente, ya que permiten un mayor alcance de los impulsos y no se ven fuertemente afectadas por la falta de homogeneidad del material. Una emisión a frecuencias bajas permite suponer una distribución del haz de ondas con un frente de onda esférico cuyo centro se sitúa en el palpador emisor y cuya dirección radial concentra la máxima presión sonora.

Al colocar los palpadores emisor y receptor de manera enfrentada, la propagación de la onda ultrasónica tenderá a recorrer el material por el camino más corto y su velocidad dependerá esencialmente de las características mecánicas de la pared celular. Así, los retardos de señal que se produzcan podrán ser debidos a una serie de factores como la especie, tanto por su densidad como por su microestructura (Rodríguez Liñán, C. y Rubio de Hita, P. 2000), la inclinación de las fibras respecto a la dirección de medida (Bucur, V. 1984 b; Kabir, M.F. 2001), la humedad (Bucur, V. 1995; Simpson, W.T. y Wang, X. 2001), las singularidades o defectos de la madera (Sandoz, J.L. 1989; Karsulovic, J.T. 2000) y el grado de deterioro (Gerhards, C.C. 1982, Wilcox, W.W. 1988; Pellerin, R.F. et al. 1985; Beall, F.C. et al. 1991, 1994, 1998; Fujii, Y.; 1990). Es por todo ello por lo que, para la misma especie y para una humedad controlada, la técnica se presenta bastante útil para la realización de una

clasificación por calidades de la madera (Acuña, L. 2001).

Sin embargo, la mayor parte de la información científica existente se centra en piezas de pequeñas y muy pequeñas dimensiones, normalmente libres de defectos, cuyos resultados son difícilmente extrapolables en la aplicación de piezas estructurales de tamaño real, encontrándose importantes disparidades entre los valores de velocidad de paso obtenidos en ambos casos, pudiéndose comprobar experimentalmente con maderas de dimensiones estructurales que existe una tendencia a disminuir el valor de la lectura de la velocidad con la distancia recorrida por la onda. Esto supone un obstáculo importante para tratar de asignar a cada especie unos valores mínimos de velocidad ultrasónica para cada calidad existente.

La sencillez del método ha llevado a desarrollar multitud de investigaciones tomando como base de trabajo los equipos comerciales existentes, prácticamente considerados como “patrones” y dando validez a las medidas realizadas con ellos, sin atender a los errores que se observan tras realizar un minucioso análisis con ellos.

Los ensayos y análisis realizados que se incluyen en este trabajo se encuadran dentro del proyecto del Plan Nacional AGL2002-03386 subvencionado por el MCYT.

Material y métodos

Determinación de la velocidad longitudinal y tangencial. Análisis de la influencia de la inclinación de fibra y de la longitud de la pieza.

Para la realización de esta parte del trabajo se han utilizado piezas de madera sana de tamaño estructural y calidad visual ME1 (UNE 56.544) de 5 especies: *Pinus sylvestris* L., *Pinus radiata* D.Don, *Pinus pinaster* Ait., *Fagus sylvatica* L y *Chlorophora excelsa* Benth & Hook f. - ahora *Milicia excelsa* (Welw.) C.C. Berg-.

Las piezas fueron dimensionadas con una cinta métrica (mm) y se acondicionaron en el laboratorio hasta alcanzar un 12% de humedad, aproximadamente, determinándose ésta con exactitud en cada pieza tras la realización de los ensayos, para lo que se tomó una muestra representativa de la que se determinó su peso en esas condiciones ambientales y su peso anhidro.

La determinación de las velocidades de paso se realizaron con un equipo Sylvatest®, figura 1, que trabaja con un generador de ultrasonidos a una frecuencia de 30 kHz y dos palpadores, uno emisor y otro receptor, que se sitúan a una distancia conocida (L), midiéndose el tiempo (t) que tarda la onda ultrasónica en llegar de uno al otro, pudiéndose determinar así la velocidad de paso de la onda medida en esa distancia, V_L , ecuación (1)

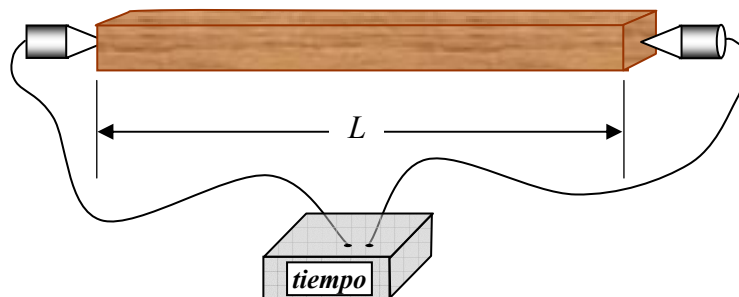


Figura 1.- Esquema de la disposición del equipo de medida, en este caso entre testas.

$$V_L = L/t \quad (1)$$

Atendiendo a la relación que existe entre la velocidad de propagación longitudinal de una onda ultrasónica en un material con sus propiedades elásticas se puede establecer desde el punto de vista práctico, ecuación (2):

$$V^2 = \frac{C_{11}}{\rho} \cong \frac{E_l}{\rho} \quad (2)$$

Siendo: C_{11} = primer coeficiente de la matriz de rigidez

ρ = densidad de la madera

E_l = Modulo de elasticidad longitudinal

donde se asume la propagación en una sola dirección (longitudinal), algo perfectamente aceptable en el caso de piezas esbeltas.

Con el fin de conseguir un acoplamiento óptimo entre los palpadores y la madera, se practica un orificio de 5 mm de diámetro y 1 cm de profundidad, aproximadamente, donde se introducen los extremos cónicos de las sondas, trabajando, de este modo, por contacto directo entre la madera y los palpadores. Éstos fueron situados, en todas las ocasiones, perpendicularmente al plano de las piezas.

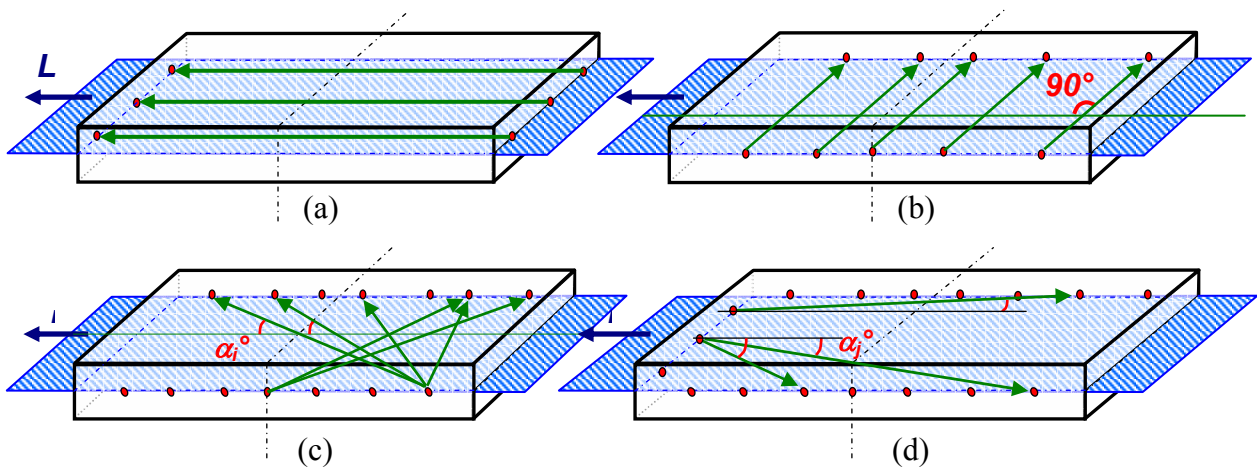


Figura 2.- Posicionamiento de los palpadores en las medidas longitudinales (a), transversales (b) y con un ángulo α (c y d)

Para llevar a cabo el análisis de la influencia directa que pueda tener la distancia entre los palpadores frente a la velocidad de propagación de la onda se utilizaron muestras de dos especies, *P. pinaster* y *P. radiata*, en las que se procedió midiendo la velocidad entre testas,

realizándose 3 medidas en la pieza completa y otras tantas en las piezas que fueron resultando de ir cortando la pieza de 10 en 10 centímetros desde uno de sus extremos. Los cortes se realizaron hasta llegar a tener una pieza de 50 cm de longitud.

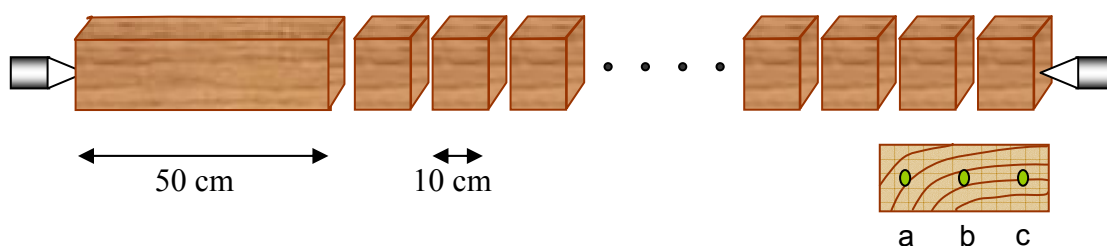


Figura 3.- Corte de las piezas de madera y medida desde las testas

Tabla 1.- Especie y número de piezas utilizadas en cada ensayo

Ensayo	Especie	Nº de piezas	Nº de ensayos	Distancia de medida (mm)
Velocidad longitudinal	<i>P. sylvestris</i>	12	36	450
	<i>P. pinaster</i>	38	92	400
	<i>P. radiata</i>	12	36	375
	<i>F. sylvatica</i>	12	48	350
	<i>Ch. excelsa</i>	8	32	170
Velocidad transversal	<i>P. sylvestris</i>	8	160	20
	<i>P. pinaster</i>	14	180	20
	<i>P. radiata</i>	12	140	20
	<i>F. sylvatica</i>	8	120	20
	<i>Ch. excelsa</i>	4	52	40
Velocidad a α grados	<i>P. sylvestris</i>	20	130	Variable
	<i>P. pinaster</i>	42	204	
	<i>P. radiata</i>	32	190	
	<i>F. sylvatica</i>	12	116	
	<i>Ch. excelsa</i>	8	88	
Influencia de la distancia	<i>P. pinaster</i>	26	260	Variable
	<i>P. radiata</i>	22	220	

Análisis de la calidad estructural de *Pinus pinaster* Ait. mediante ultrasonidos

Se utilizaron diferentes partidas de madera de *P. pinaster* de tamaño estructural, sobre las que se determinó la geometría y dimensiones de las piezas utilizando una cinta métrica con precisión de 1,0 mm y una escuadra metálica con precisión 1,0 mm para la medida de nudos y defectos.

Siguiendo la UNE 56.544:2003 se realizó una clasificación visual de todas las piezas antes de ser ensayadas, asignando a cada una las calidades ME1, ME2 o rechazo, que esta norma establece según los defectos y singularidades que se aprecien en la pieza de madera.

Tabla 2.- Dimensiones y procedencia de la madera ensayada de *P. pinaster*.

Procedencia	Número de piezas	L cm	a cm	b cm
Oña	176	250	6	13
Gredos	249	205	4,5	10
Gredos	108	205	5	10
Gredos	197	280	7	13,5
Gredos	62	300	7	15
Gredos	49	4000	10	20
Gredos	33	4900	15	25
Gredos	112	110	5	5
Tierra de pinares	112	300	5	15
Tierra de pinares	99	410	7	20
Tierra de pinares	100	410	10	20

Los ensayos mecánicos se realizaron con máquina universal de ensayos, Ibertest Elib 100 W, con capacidad de carga de hasta 100 kN, con posibilidad de control por

carga o por deformación, y un puente de flexión de hasta 6 m de luz. Para la medida de deformaciones se utilizaron comparadores micrométricos con precisión de 0,01 mm.



Figura 4.- Ensayo de rotura en la máquina universal de ensayo

Para establecer las propiedades resistentes y elásticas del *P. pinaster* se siguió la norma UNE-EN 408, determinándose los valores de MOR (Módulo de rotura), MOE (Módulo de elasticidad local), MOEG (Módulo de elasticidad global) y MOEGTO (Módulo de elasticidad global de canto), realizándose, cuando así se requirió, las correcciones por humedad y altura de canto necesarias.

La medida de la velocidad de onda ultrasónica se realizó con el equipo Sylvatest®, antes descrito, habiendo tomado 3 medidas directas en sentido longitudinal, entre las testas, siguiendo la dirección de las fibras, y evitando situar los palpadores sobre la médula en el caso de que estuviese presente en la pieza.

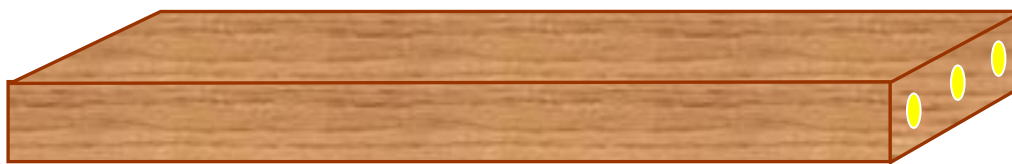


Figura 5.- Realización de 3 medidas entre testas en cada pieza

Una vez ensayada cada pieza, para la determinación del peso específico y de la humedad se extrajo una probeta de 90 mm de espesor, que según lo indicado por la

norma UNE-EN 408:2004 fue tomada en una zona próxima a la zona de rotura, *figura 6*, carente de nudos, bolsas de resina y demás singularidades.

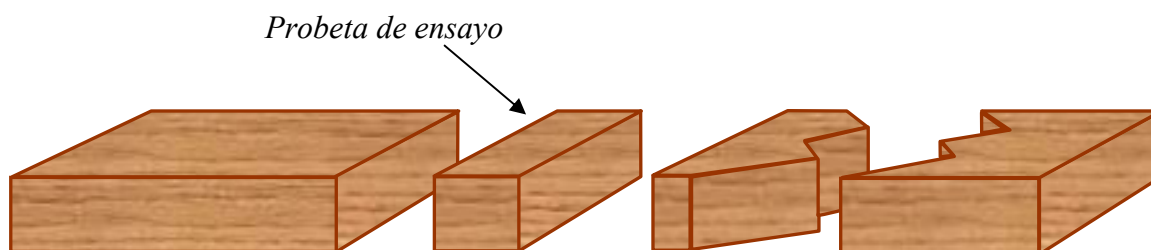


Figura 6.- Obtención de la muestra para la determinación del peso específico.

El peso de la probeta se determina en una balanza con precisión de 0,01 g y el volumen se determina por inmersión mediante el principio de Arquímedes, *figura 7*, realizándose las medidas tanto a la

humedad del ensayo como en estado anhidro tras haber permanecido la muestra en estufa, a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$, hasta peso constante.

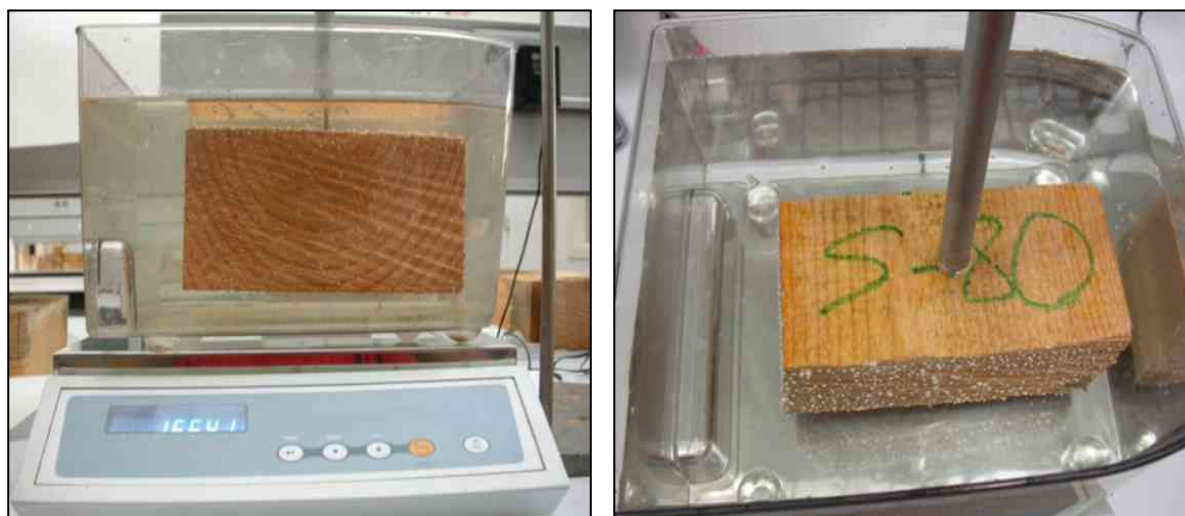


Figura 7.- Medición del volumen para la determinación del peso específico.

En todos los casos los valores obtenidos de la velocidad de ultrasonidos y de la máquina de ensayo fueron corregidos para expresarlos a una humedad de referencia del 12%.

Para la realización de los diferentes análisis estadísticos se verificaron las hipótesis de normalidad de las variables y la independencia de los residuos.

En los análisis descriptivos se han utilizado los valores de media aritmética, desviación típica y coeficiente de variación para caracterizar las variables.

Para la aplicación del análisis de varianza se comprobaron las hipótesis de independencia, normalidad y homocedasticidad de varianza de los errores experimentales. Las pruebas de rangos múltiples utilizadas fueron la de Tuckey (diferencia significativa honesta) y la LSD de Fisher para modelos no balanceados, habiendo obtenido por ambos métodos resultados similares.

Resultados

Determinación de la velocidad longitudinal y tangencial.

Tabla 3.- Velocidad de onda ultrasónica longitudinal, V_L, m/s (Coef. de variación %)

	<i>P. silvestre</i>	<i>P. pinaster</i>	<i>P. radiata</i>	<i>F. sylvatica</i>	<i>Ch. excelsa</i>
<i>Media m/s (CV) %</i>	5228,55 (0,93)	5671,8 (1,47)	5574,8 (4,15)	4974,11 (0,38)	5414,57 (1,96)
<i>Nº de medidas</i>	36	92	36	48	32
<i>Distancia de medida</i>	450 cm	400 cm	375 cm	350 cm	170 cm

Tabla 4.- Velocidad de onda ultrasónica transversal m/s (Coef. de variación)

	<i>P. silvestre</i>	<i>P. pinaster</i>	<i>P. radiata</i>	<i>F. sylvatica</i>	<i>Ch. excelsa</i>
<i>Media m/s (CV) %</i>	1500,7 (5,42)	1375,8 (2,54)	1531,1 (1,36)	1775,20 (1,74)	1826,54 (1,85)
<i>Nº de medidas</i>	160	180	140	120	52
<i>Distancia de medida</i>	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm	40 cm

Las medidas en sentido transversal se realizaron en la dirección más ancha de la sección de las piezas, que por su tamaño no presentaban en muchas ocasiones una dirección absolutamente definida –bien radial, bien tangencial- aunque era la dirección tangencial la que de forma general predominaba.

Para determinar el efecto de la anisotropía al paso de la onda ultrasónica, entendiéndose por tal la influencia del ángulo que forma la dirección de alineamiento de los palpadores (transductores) con la dirección longitudinal de las fibras, se realizaron un total de 728 medidas con distintos ángulos, entre 0° (longitudinal puro) y 90° (transversal puro), y a diferentes distancias. Representando en un gráfico las velocidades en m/s obtenidas frente a los ángulos que forman los palpadores con la dirección longitudinal, *figura 8*, se obtiene una clara tendencia descendente de la velocidad con el aumento del ángulo formado.

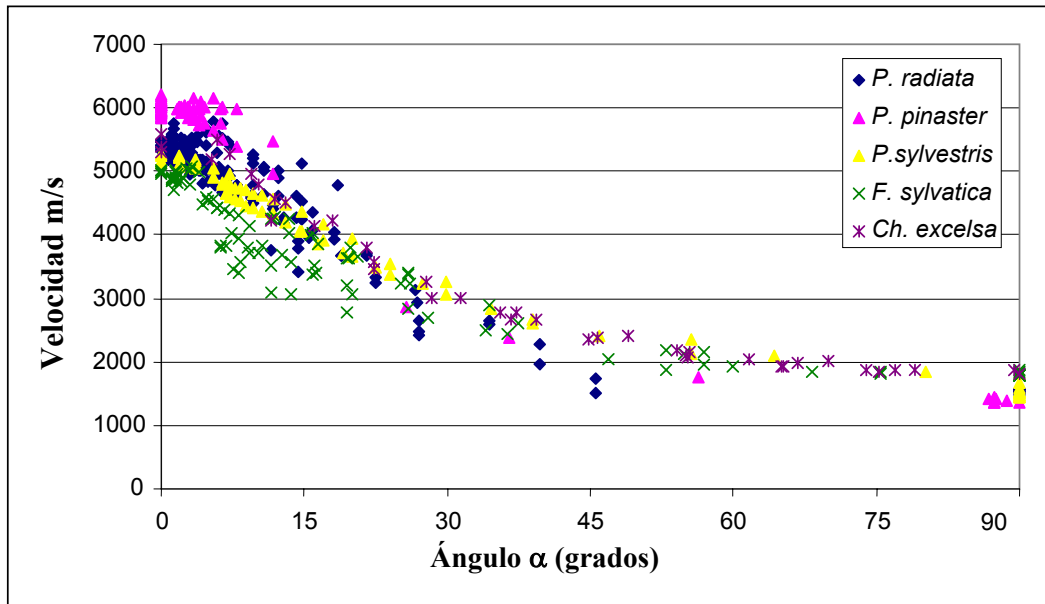


Figura 8.- Relación entre la velocidad de ultrasonidos (m/s) y la dirección de las fibras

Estableciendo un modelo de 2º orden para cada una de las especies, se obtienen unos ajustes altamente significativos, y en los

que el porcentaje explicado por la variable “ángulo” para todas y cada una de las especies es considerablemente alto.

Tabla 5.- Relación velocidad de ultrasonidos vs. ángulo α para las 5 especies.

Ecuación ajustada: $V = a \alpha^2 + b \alpha + c$						
Especie	a	b	C	R ² ajust.	ANOVA del modelo	
					F	p val.
<i>P. sylvestris</i>	0,477	-84,92	5297,5	0,992	4658,6	0,0000
<i>P. pinaster</i>	0,657	-112,66	6160,3	0,973	1259,1	0,0000
<i>P. radiata</i>	0,730	-111,52	5619,4	0,946	1601,9	0,0000
<i>F. sylvatica</i>	0,582	-85,772	4855,7	0,9189	515,6	0,0000
<i>Ch. excelsa</i>	0,680	-101,73	5613,3	0,984	1181,9	0,0000
Todas las especies	0,719	-108,61	5593,4	0,922	2315,2	0,0000

Los resultados obtenidos del análisis directo, realizado mediante el corte paulatino de las piezas de madera para determinar la influencia de la distancia con la medida de la velocidad de los ultrasonidos se han recogido en la tabla 6.

Las dos rectas de regresión presentan una pendiente negativa y supone que el retraso que sufre la medida de la onda por metro lineal sea de 109 m/s en el caso de *P. pinaster* y de 182 m/s en el caso de *P. radiata*.

Tabla 6.- Relación Velocidad de ultrasonidos vs. distancia entre palpadores

Ecuación ajustada: $V = aL + b$			
Especie	a	b	R^2
<i>P. pinaster</i>	-1,087	6106,7	0,81
<i>P. radiata</i>	-1,82	5902,1	0,87

Análisis de calidad estructural de Pinus pinaster Ait. mediante ultrasonidos

La muestra de madera se clasificó en 3 grupos, ME1 (calidad 1), ME2 (calidad 2) y rechazo, atendiendo a 4 criterios diferentes. En primer lugar se utilizó la clasificación visual, UNE 56.544:2003, en segundo lugar los grupos se crearon utilizando el valor del módulo de rotura (MOR) determinado para cada pieza en la máquina de ensayo. La tercera clasificación se realizó atendiendo al módulo de elasticidad (MOE) y, por último, la cuarta clasificación se realizó atendiendo conjuntamente al MOR y al MOE de la pieza.

En esta clasificación de doble exigencia, mucho más rigurosa, realizada por MOR y por MOE se estableció el criterio de asignar “calidad 1” a aquella pieza que cumpliera simultáneamente esa misma condición en ambos casos, la “calidad 2” fue asignada

siempre que no se cumpliera la condición anterior y la pieza no presentase una calidad menor de 2 en cualquiera de las dos clasificaciones, MOR o MOE; finalmente, la “calidad 3 (rechazo)” se asignó a aquellas piezas que en su clasificación por MOR y/o MOE tuvieran esa calidad.

La norma EN 1912 asigna como clases resistentes para el *P. pinaster* la C24, si la calidad asignada es ME1, y la C18, si es ME2, por lo que se han utilizado los valores de resistencia y elasticidad que esa norma establece para clasificar tanto por MOR como por MOE.

Se ha prescindido de incluir la densidad como variable clasificadora ya que los resultados que de ella se han obtenido están muy por encima de los mínimos que para cada una de las calidades exige la norma.

Tabla 7.- Valores característicos del *P. pinaster* con clases resistentes C24 y C18

Calidad visual UNE 56.544	Clase resistente En 338:2004	Valor característico	
		MOR (MPa)	MOE (MPa)
ME1	C24	24	11
ME2	C18	18	9

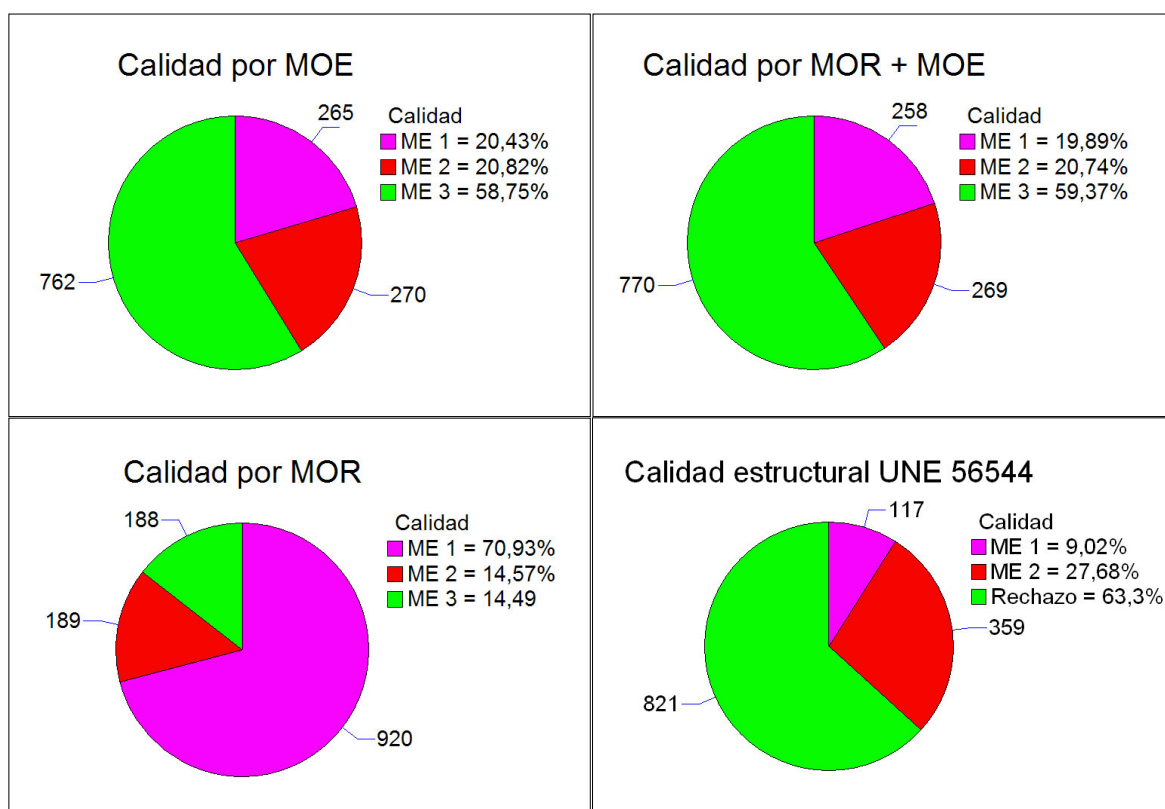


Figura 9.- Número de piezas y porcentaje resultante de las clasificación visual y de la clasificación real en máquina de ensayo

Todas las velocidades longitudinales determinadas con el equipo de ultrasonidos Sylvatest® fueron modificadas con las ecuaciones experimentales anteriormente expuestas, tabla 6. Para ello, se optó por seleccionar la velocidad correspondiente a una “pieza de referencia” de longitud ideal de 0 cm, que denominaremos V_0 , y que servirá para corregir el valor de lectura inicialmente obtenido.

Utilizando la clasificación más exigente, MOR + MOE, que se identifica con la clasificación real atendiendo al hecho de que la densidad no limita a la población, se analizaron los valores de la velocidad de ultrasonidos de los 3 grupos que con ella se forman, correspondientes a las clases C24

(ME1), C18 (ME2) y rechazo, de la EN 338, decidiéndose simplificar la clasificación a dos grupos, uno estructural, ME1 + ME2 y otro de rechazo. La razón es la conocida superposición poblacional, que hace inútiles en la mayoría de los casos el poder discernir y tomar decisiones precisas entre poblaciones. Para fijar el valor de corte de la velocidad V_0 que permita asignar a cada pieza al grupo estructural o al grupo rechazado, se estudiaron las distribuciones de las poblaciones y se realizaron distintas aproximaciones, medias, medias móviles ponderadas, optimal ranking, etc., optando por utilizar para madera estructural el valor $V_0 = 5150$ m/s, coincidente con el valor medio de la población C24.

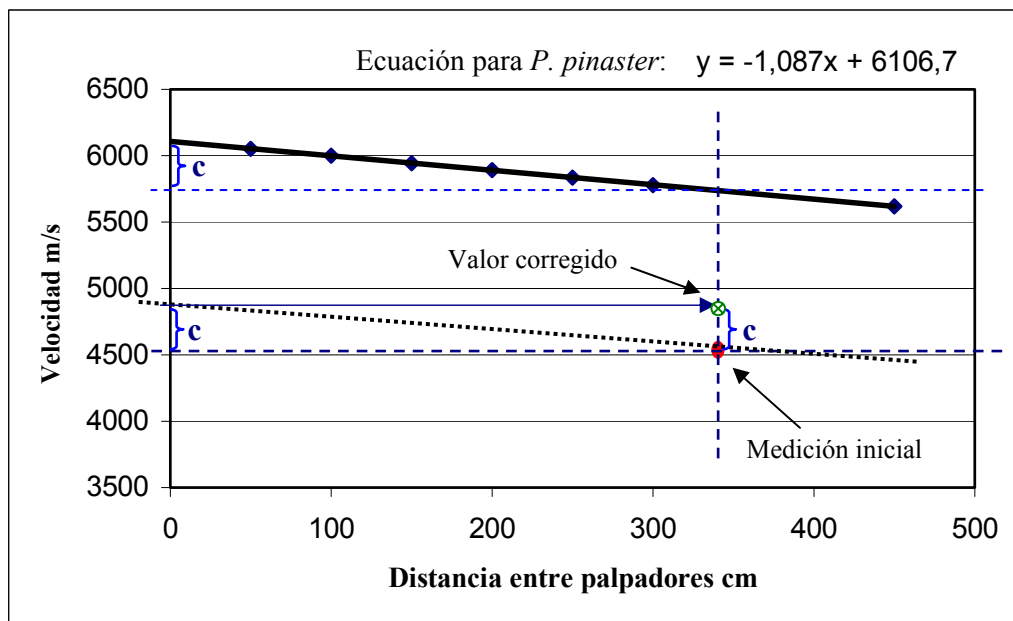


Figura 10.- Recta para la corrección de la velocidad longitudinal de ultrasonidos para *P. pinaster*.

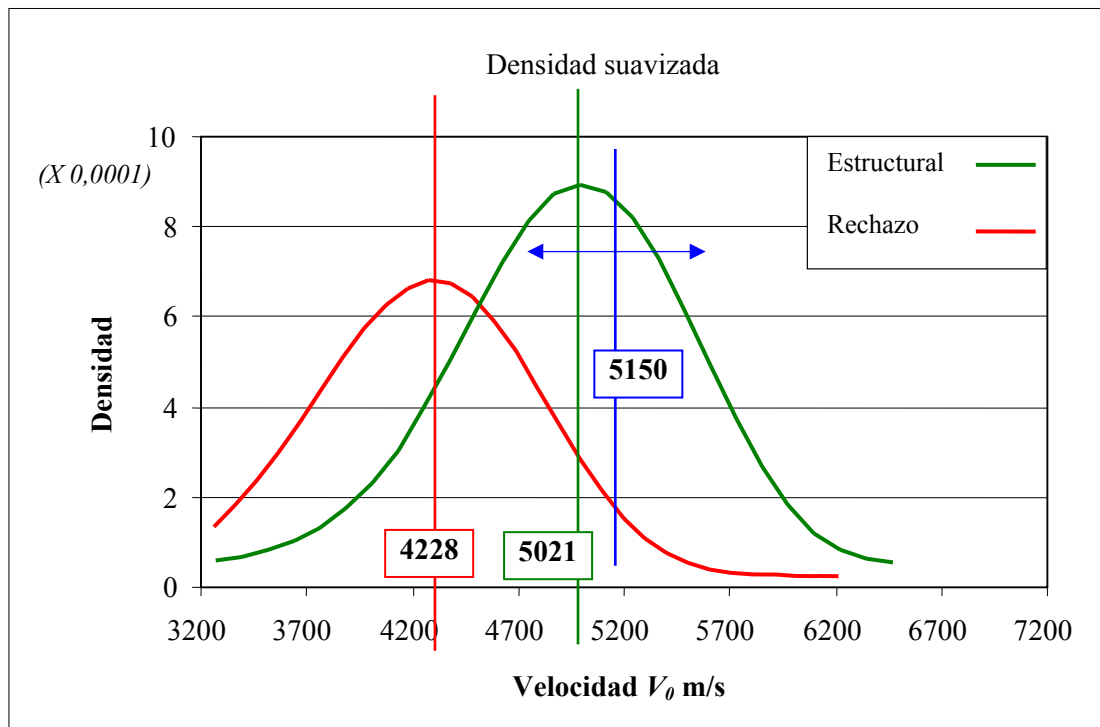


Figura 11.- Distribución de las poblaciones de calidades reales.

En la tabla 8 se presentan los valores característicos de la población total obtenidas tras el ensayo destructivo (EN 408), así como los de las subpoblaciones que han sido asignadas como “estructurales” siguiendo los criterios del método visual y del método de ultrasonidos, comprobándose que los grupos formados cumplieran las exigencias de clases resistentes que para *P. pinaster* establece la EN 338.

Del total de las piezas que habían sido asignadas a la clase estructural tanto por el criterio visual, como por el de ultrasonidos, no todas cumplen la exigencia resistente de la norma, es decir, no son estructurales, quedando recogidos en la tabla 9 los grupos

que de cada una de ellas se tienen, así como sus características mecánicas.

Para comprobar el riesgo de utilización de ambos métodos no destructivos, se comparan, en la población de madera que ha sido rechazada por los ensayos de elastomecánicos, las piezas que se han considerado estructurales por ambos criterios (sobreestimas de los métodos no destructivos), tabla 10, y las características de estas poblaciones.

En la tabla 11 se presentan conjuntamente los aciertos y fallos de las clasificaciones visual y por ultrasonidos para las dos agrupaciones, estructural y rechazo, que se establecen con los valores reales de la máquina de ensayo.

Tabla 8.- Características de la población total y asignaciones estructurales según la clasificación visual y por ultrasonidos

	<i>Total</i>	<i>Visual</i> <i>ME1 + ME2</i>	<i>Ultrasonidos</i> <i>V₀ > 5150 m/s</i>
Nº	1297	476	430
MOR característico (MPa)	12,6	14,6	23,3
MOE medio (MPa)	8509	8676	10898
Clase según EN 338	< C14	C14	C22

Tabla 9.- Descripción de la población estructural real y de las asignaciones ciertas por clasificación visual y por ultrasonidos

<i>Madera estructural</i>	<i>Máquina de ensayo</i>	<i>Visual</i>	<i>Ultrasonidos</i>
Nº	656	261	360
MOR característico (MPa)	22,4	23,5	25,3
MOE medio (MPa)	10843	10791	11591
Clase según EN 338	C22	C22	C24

Tabla 10.- Piezas de rechazo. Sobreestimas por clasificación visual y ultrasonidos

	<i>Rechazo</i>	<i>Sobreestima</i> <i>Visual</i>	<i>Sobreestima</i> <i>Ultrasonidos</i>
Nº	641	215 (16,6 %)	70
MOR característico (MPa)	10,4	16,1	18,36
MOE medio (MPa)	6120	7204	7036
Clase según EN 338	< C14	C14	C14

Tabla 11.- Aciertos y fallos de las clasificaciones visual y por ultrasonidos

		<i>Clasificación</i> <i>Visual</i>	<i>Ultrasonidos</i> <i>V₀ > 5150 m/s</i>
Aciertos	Estructurales	261 (20,1 %)	360 (27,8 %)
	Rechazos	427 (32,9 %)	573 (44,2 %)
Fallos	Sobreestimas	215 (16,6 %)	70 (5,4 %)
	Subestimas	394 (30,4 %)	296 (22,8 %)

Discusión

Los diferentes valores obtenidos para la velocidad de propagación de la onda ultrasónica dependiendo del ángulo que forma la dirección en que se toma la medida respecto a la dirección longitudinal de las fibras es un hecho conocido y la respuesta de todas las especies ha sido muy semejante. La relación entre velocidad y ángulo, como la de otras muchas propiedades elastomecánicas, se viene expresando a través de la fórmula de Hankinson (3)

$$N = \frac{P * Q}{P * \text{sen}^n \alpha + Q \text{cos}^n \alpha} \quad (3)$$

en la que P es la velocidad longitudinal, Q la velocidad transversal, N es la propiedad estudiada en cuestión y n una constante que toma diferentes valores para cada una de ellas. La aplicación de esta fórmula general a cada una de las especies analizadas ofrece unos resultados adecuados (R^2 ajustado $\approx 0,9$) siempre y cuando se utilicen diferentes valores de n para cada especie.

En este trabajo se ha preferido establecer una relación de 2º orden, mucho más sencilla que el modelo anterior, y que ofrece unos resultados más que aceptables, tabla 5. La aplicabilidad del uso de estas relaciones es inmediata, esencialmente para madera en uso en la que se hace imposible realizar mediciones directas entre testas y hay que utilizar métodos de medición indirecta, en los que la medida realizada está inclinada respecto a la dirección longitudinal.

De todos los ensayos realizados con ultrasonidos en dirección longitudinal se

puede apreciar una clara disminución en las lecturas de la velocidad de propagación de la onda que ofrece el equipo, según aumenta la distancia de separación entre los transductores. Este hecho parece que pueda venir explicado atendiendo a la naturaleza del equipo generador-receptor de ultrasonidos.

Éste emite un tren de ondas que llegan al receptor, siendo registradas a partir de un “umbral de detección” predefinido en el instrumento. La atenuación que se produce en el tren de ondas con el paso de la distancia recorrida a través de la madera tiene como efecto principal la pérdida de los componentes de alta frecuencia de la señal, lo que lleva acompañado el aparente retardo que sufre la señal al ser detectada, figura 12.

Esta situación no resultará importante en los ensayos realizados sobre piezas de pequeñas dimensiones, como es el caso de la mayoría de los trabajos en el campo de la madera, pero obliga a realizar una corrección de la velocidad registrada, que variará dependiendo del equipo empleado y de la especie ensayada, y utilizar una velocidad a una distancia común de referencia, que se propone sea V_0 , y que sirva de valor de patrón de comparación. El valor de V_0 determinado en madera sana y libre de defectos para *Pinus pinaster* Ait. resultó ser 6106,7 m/s.

Los valores de las constantes elásticas de *P. pinaster* y *P. radiata* como material ideal, asumiendo que es homogéneo e isótropo, determinadas con los valores corregidos de la velocidad se recogen en la tabla 12

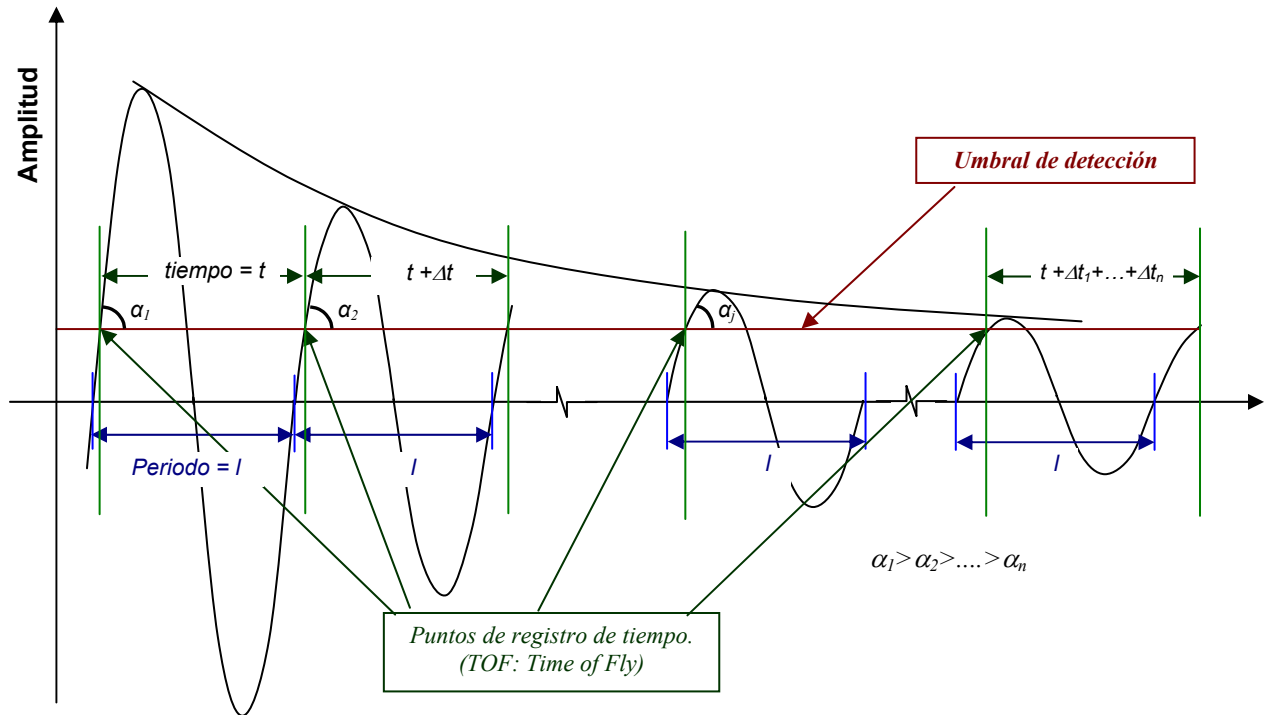


Figura 12.- Atenuación de la onda ultrasónica y umbral de detección

Tabla 12.- Constantes elásticas de *P. pinaster* y *P. radiata*.

	Módulo de elasticidad (GPa)	Módulo de cizallamiento (GPa)	Coefficiente de Poisson
	$E = \frac{V_T^2 * \rho * (2V_L^2 - 4V_T^2)}{(V_L^2 - V_T^2)}$	$G = V_T^2 * \rho$	$\mu = \frac{(V_L^2 - 2V_T^2)}{2(V_L^2 - V_T^2)}$
<i>P. pinaster</i>	30,39	1,03	0,47
<i>P. radiata</i>	31,57	1,08	0,46

En cuanto a la agrupación de la madera por calidades atendiendo a las diferentes clasificaciones propuestas (visual, por MOR, por MOE, por MOR+MOE) y a su relación existente con la velocidad

longitudinal de ultrasonidos, se realizó un análisis de varianza para determinar la existencia de diferencias significativas entre los valores medios de la velocidad entre los grupos, figura 13.

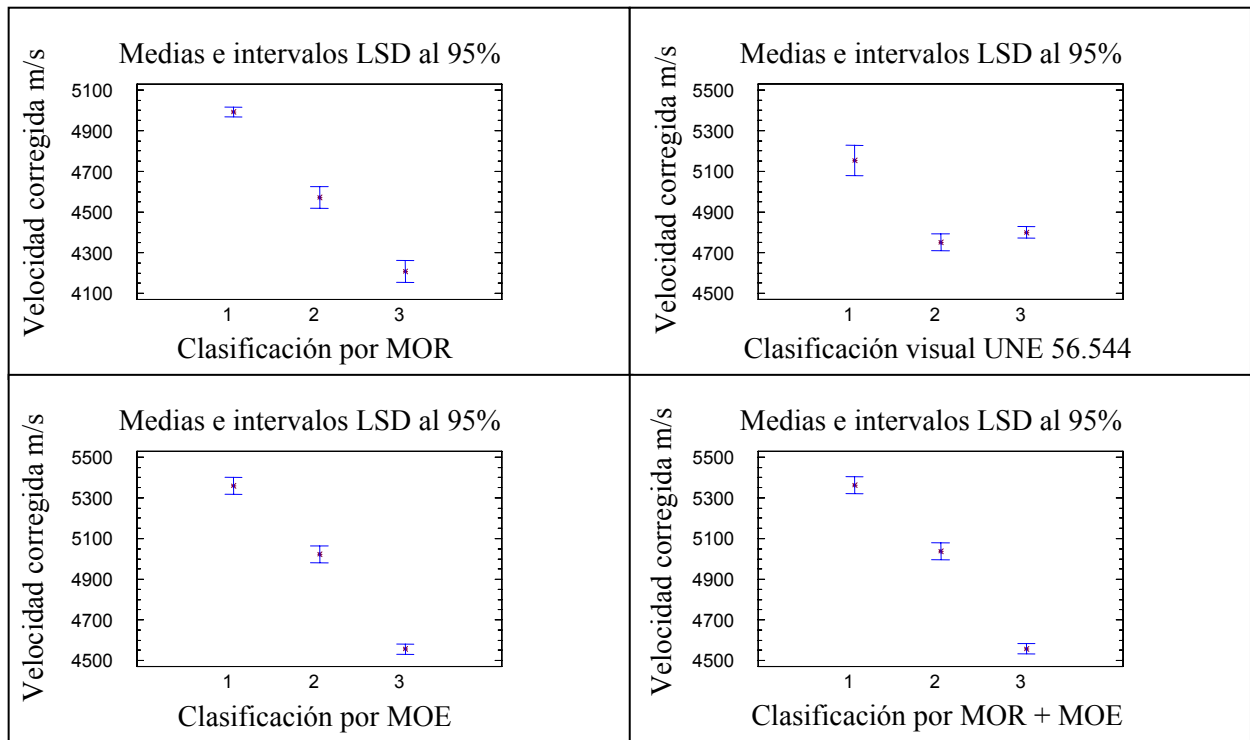


Figura 13.- Medias y grupos homogéneos para las distintas clasificaciones

Se puede apreciar que, a excepción de la clasificación visual, en el resto de clasificaciones se cumple que las medias de las velocidades de ultrasonidos son significativamente distintas entre los tres grupos de calidad, siendo significativamente más alta la velocidad de la clase 1, seguida de la 2 y, por último, la clase rechazada.

Si bien, en cierta medida, este sería un resultado de esperar por la influencia (retardo en la señal) que los diferentes defectos tienen sobre la velocidad de propagación de la onda ultrasónica, es destacable lo que sucede en la clasificación visual. En ella no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de los grupos ME2 y rechazo.

En lo referente a la asignación de calidad por ultrasonidos, al igual que ocurre en la clasificación visual, tabla 8, se observa que

son métodos deseablemente conservadores, aunque la clasificación por ultrasonidos toma una ventaja inicial al presentar un porcentaje de aciertos, tabla 9, superior al de la clasificación visual.

Otra de las ventajas observadas es que los valores característicos del grupo estructural de ultrasonidos corresponde a una clase resistente C24, mientras que en la clasificación visual esa clase solo alcanzaría la C22. Este hecho podría llevar a pensar en reducir el valor de paso V_0 , sin embargo al hacerlo aparecen inmediatamente aumentos importantes en las sobreestimaciones que harían perder efectividad al método.

En cuanto a los riesgos (sobreestimaciones) de los dos métodos de clasificación se observa que con la velocidad de paso $V_0 = 5150$ m/s se está dentro de los márgenes de seguridad establecidos en la normativa, tabla 10, superando ampliamente los valores que con la clasificación visual resultan;

lamentablemente, en la población en estudio, ésta ha superado los límites de seguridad con una sobreestima del 16,5% respecto al total de la población, siendo solamente del 5,4 % en la clasificación por ultrasonidos. En cualquier caso, las sobreestimas por ambos métodos han incluido madera de clase C14 dentro de la madera estructural.

El porcentaje de aciertos y errores que resulta de esta clasificación, presentados en la tabla 11, hace que en una partida de *P. pinaster* clasificada visualmente, aproximadamente el 53% lo estén de forma correcta, un 16,6% estén peligrosamente sobrevaloradas y un 30% estén subvaloradas.. Entre tanto, la clasificación realizada utilizando las velocidades de corte V_0 antes determinada, proporciona una clasificación mucho más ajustada a la realidad que la anterior y, si bien aún está

lejos de la ideal, la ventaja que proporciona en todos los aspectos es destacable.

Haciendo énfasis en ello, cabe destacar tres aspectos importantes en esta comparación. En primer lugar el mayor porcentaje de aciertos, un 72 %, a favor de la clasificación mediante la velocidad V_0 , lo que supone una primera ventaja innegable del método; en segundo lugar algo tremendamente importante como es el menor porcentaje de piezas sobrevaloradas, que en realidad serían aquellas que podrían suponer un serio inconveniente para el consumidor, ya que las características que presentan estarán por debajo de las exigencias técnicas que de ellas se esperan. Por último, el que obtenga, aproximadamente, un 8 % menos de piezas subvaloradas, significa que están incluidas en la clase estructural, y por tanto, se han añadido a la cadena comercial.

Referencias bibliográficas

- Acuña, L.; Llorente, A.; Herrera, C.; Casado, M. 2001. Clasificación de la madera de *Pinus sylvestris* L., mediante ensayos no destructivos. III Congreso forestal Español. Granada.
- Beall, F.C.; Lemaster, R.L.; Lewis, V. 1991. Using acoustic emission to detect wood destroying insects. Fourth World Meeting on Acoustic Emission, Boston, September 1991
- Beall, F.C.; Biernacki, J.M.; Lemaster, R.L. 1994. The use of acousto-ultrasonics to detect biodeterioration in utility poles. *J Acoustic Emission* 12:55–64.
- Beall, F.C.; Tiitta, M.; Biernacki, J.M. 1998. The use of acousto-ultrasonics to detect biodeterioration in structural wooden members. *Proceedings, Nondestructive Testing and Evaluation of Infrastructure, Vol 2* (H. Dos Reis and B. B Djordjevic, eds.), Topics on Nondestructive Evaluation Series. American Society for Nondestructive Testing, Columbus, OH. pp181–206.
- Beall, F.C. 2002. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology* 36, pp. 197–212.
- Böstrom, L. 1994. Machine strength grading: comparison of four different systems. Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology SP Report 49, 57 pp.
- Bucur, V. 1984 a . Ondes Ultrasonores dans le Bois. Caracterisation mécanique et qualité de certaines essences de bois. 188p. Thèse (Doctorat en Génie Mécanique) – Institut Supérieur des Matériaux et de la Construction Mécanique, Saint-Ouen, France.
- Bucur, V. 1984 b. Relationship between grain angle of wood specimens and ultrasonic velocity, *Catgut Acoustical Society Inc.* 41, pp. 30-35.
- Bucur, V. 1995. *Acoustic of wood*. New York: CRC Press Inc.
- Fujii, Y.; 1990. Using acoustic emission monitoring to detect termite activity in wood. *Forest Products Journal*, Vol.40, No.1, pp. 34-36.
- Gerhards, C.C. 1982. Longitudinal stress waves for lumber stress grading: factors affecting applications: state of art. *For Prod J* 32:20–25
- Hernández, R; Koubaa, A; Beaudoin, M.; Fortin, Y. 1997. Selected mechanical properties of fast-growing poplar hybrid clones. *Wood and Fiber Science*, vol 30, n 2. 1998.
- Herzig, L. 1992. Evaluation du module d'Young de bois d'épinette par méthode ultrasonore sur carottes de sondage. 290p., M.Sc. Thesis (Génie Forestière), Faculté de Foresterie et de Géomatique, Département des Sciences du Bois et de la Forêt, Université Laval, Québec, Canada.
- Kabir, M.F. 2001. Prediction of ultrasonic properties from grain angle, *Journal of the Institute of Wood Science*. Vol. 15, No.5 (89), pp. 235-246.
- Karsulovic, J.T.; León, L.A.; Gaete, L. 2000. Ultrasonic detection of knots and annual ring orientation in *pinus radiata* lumber, *Wood and Fiber Science*, Vol.32, No 3, pp. 278-286.
- Hermoso, E. 2003. Caracterización mecánica de la Madera estructural de *Pinus sylvestris* L. Tesis doctoral E.T.S. Ingenieros de Montes. U.P.M.
- Koubaa, A; Hernández, R; Beaudoin, M.; Fortin, Y.; Poliquin J. 1997. Nondestructive evaluation of physical, mechanical and anatomical properties of fast growing poplar

- hybrid clones. Proceedings CTIA/IUFRO International wood quality workshop "Timber management toward wood quality and end-product value". Québec, p.47-53.
- Pellerin RF, DeGroot RC, Esenther GR 1985. Nondestructive stress wave measurements of decay and termite attack in experimental wood units. Proceedings, Fifth NDT of Wood Symp., Pullman WA, pp. 319–352
- Rajeshwar, B.; Bender, D. A.; Bray, D. E.; McDonald. K. A. 1997. An ultrasonic technique for predicting tensile strength of southern pine lumber; American Society of Agricultural Engineers 0001-2351; VOL. 40(4):1153-1159.
- Rodríguez Liñán, C; Rubio de Hita, P; 2000. Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos. Sevilla. Universidad de Sevilla. 165 pp. ISBN: 84-472-0657-2
- Sandoz, J. L. 1989. Grading of Construction timber by ultrasound. Wood Science and Technology, 23(2), 95-108.
- Sandoz J.L. 1993. Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. Wood Science and Technology. 27(1):373-380
- Simpson, W.T.; Wang, X. 2001. Relationship between longitudinal stress wave transit time and moisture content of lumber during kiln-drying. Forest Products Journal. 51(10):51-54
- Waubke, N. V. 1981. Grundsätzliche Untersuchungen zur Eignung der Ultraschall – Impulslaufzeitmessungen als vereinfachte und genauere Methode zur Klassifikation von Bauhölzern. 56p. Institut für Baustoffkunde und Bauphysik der Hochschule der Bundeswehr München, Deutschland.
- Wilcox, W.W. 1988. Detection of early stages of wood decay with ultrasonic pulse velocity. Forest Products Journal 38:68–73.