

CODE 1.7.08**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA DIRECCIÓN DE LA FIBRA EN LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS (FAKOPP) EN MADERA ESTRUCTURAL DE “PINUS SYLVESTRIS L.” Y “PINUS RADIATA D. DON.”****Balmori, Jose-Antonio¹ *; Acuña, Luis¹; Basterra, Luis-Alfonso¹**1: Grupo de Investigación Reconocido en Estructuras y Tecnología de la Madera.
Universidad de Valladolid (Spain).e-mail: *joseantonio.balmori@alumnos.uva.es web: <http://www3.uva.es/maderas/>**PALABRAS CLAVE:** Estructuras de madera, ensayo no destructivo, END, ultrasonidos, *Pinus radiata* D. Don, *Pinus sylvestris* L.**RESUMEN**

El objetivo principal de este trabajo es el perfeccionamiento del ensayo no destructivo de velocidad de propagación de ondas ultrasónicas sobre madera aserrada de coníferas de gran escuadría y uso estructural (MEG), y la interpretación de los resultados obtenidos. Para ello se han escogido dos especies de madera ampliamente utilizadas (*Pinus sylvestris* L. y *Pinus radiata* D. Don) y un aparato de ondas sónicas Fakopp Microsecondtimer©, por sus cualidades para emplearlo sobre estructuras construidas con acceso limitado.

Por medio de la realización de ensayos en laboratorio sobre un abanico de ángulos conocidos, se ha estudiado la influencia que tiene el ángulo entre la dirección de la fibra y la de las ondas ultrasónicas al realizar ensayos indirectos; en la práctica los únicos posibles en la mayoría de estructuras en servicio. Se ha optimizado el postproceso analítico de resultados para la generación de un modelo de ajuste (ecuación general) en función del ángulo, obtenido por la regresión de datos reales medidos en laboratorio para las especies y el equipo empleado. Se determinan también los ángulos de aplicación más homogéneos y fiables para la realización de este tipo de ensayo indirecto en obra.

1. INTRODUCCIÓN

La estimación de las propiedades resistentes de la madera puede realizarse mediante diferentes técnicas [1], aunque sobre estructuras en servicio en la práctica sólo existen dos caminos para determinarlas sin alterar la estructura: la clasificación visual, amparada por distintas normativas internacionales (España: UNE 56544, Alemania: DIN 4074, Países Nórdicos: INSTA 142, Francia: NF B 52001, Italia: UNI 11.119, Reino Unido: BS 4978,...), y la aplicación de ensayos no destructivos (END), pseudo destructivos y parcialmente destructivos (obtención de muestras), de momento no amparados normativamente y catalogados como ensayos experimentales pero, por su amplia utilización y desarrollo, plenamente fiables [2].

Por otro lado, tal y como se recoge en la mayoría de cartas y convenios internacionales (ICOMOS 1999, ISCARASH 2001,...), es fundamental completar el análisis previo de las estructuras de madera en servicio, tanto la catalogando sus posibles lesiones y degradaciones, en extensión y profundidad, como estimando sus características resistentes. Para ello es habitual la utilización de ensayos basados en técnicas no destructivas o pseudo destructivas, como método de determinar con rigor y confianza el estado de una estructura construida.

Son numerosos los investigadores que apoyan la idea utilizar este tipo de ensayos (END) [3] al enfrentarse a estructuras en servicio [4], debido a que en las piezas estructurales antiguas la suciedad y la biodegradación superficiales limitan las posibilidades de la clasificación visual, y apuntan a este

tipo de técnicas como una de las mejores vías para conocer su situación real. De entre todos ellos, el ensayo de medición de la velocidad de ultrasonidos se presenta como un método sencillo de realizar y eficaz [5]; permitiendo conocer, por un lado, el estado general de integridad o degradación de la pieza ensayada y, por otro, si se acompaña de una medida de la densidad, alguna de sus más importantes características mecánicas como es el Módulo de Elasticidad Dinámico – MOE_d –. El método es susceptible incluso de mejorar si se combina con otras observaciones organolépticas de las piezas ensayadas [6].

El ensayo de ultrasonidos se basa en hacer pasar una onda ultrasónica a través de la madera. Aquella recorrerá el camino más directo entre el punto de emisión y el punto de recepción y su velocidad de propagación dependerá inicialmente de las características elásticas del material atravesado. Sin embargo, multitud de investigadores han atestado que la velocidad va a depender también de los defectos internos del material y su grado de deterioro [7].

Adicionalmente, en un material heterogéneo, anisótropo e higroscópico como la madera tal reducción en la velocidad puede ser también debida a un mayor número de factores, como la humedad y la temperatura [8], la microestructura particular de la madera ensayada [9], o el ángulo formado entre la dirección de ensayo y la dirección principal de las fibras [10][15]. A este respecto, la medición más repetida en la literatura se realiza de testa a testa, y se denomina ‘directa’, pero en madera puesta en obra las testas suelen resultar inaccesibles, por encontrarse muchas veces empotradas en muros, y ello obliga a realizar el ensayo de forma ‘indirecta’, de cara a cara o de cara a canto de la pieza. En este caso la dirección de la fibra y la teórica dirección de la onda ultrasónica no son paralelas.

Este trabajo pretende afrontar el estudio de la influencia del ángulo formado entre la dirección de la fibra y la de las ondas ultrasónicas sobre su velocidad de propagación. Así, con un fin eminentemente práctico se plantean dos objetivos principales: 1) determinar que ángulos son los más indicados para la realización de ensayos indirectos y qué ángulos deben evitarse; y, 2) generar una ecuación que permita transformar los valores de velocidades de propagación obtenidos por ensayos indirectos en valores de velocidades longitudinales equivalentes. Con ello se conseguirían dos apreciables mejoras en la realización del ensayo y la calidad de los resultados obtenidos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se han utilizado 12 piezas de madera sana de tamaño estructural y calidad visual MEG (UNE 56544:2011) de dos especies de coníferas utilizadas ampliamente en estructuras: *Pinus sylvestris* L. y *Pinus radiata* D. Don. (Figura 1). De todas ellas fueron determinadas sus dimensiones exactas, temperatura y humedad relativa (Tabla 1).

Tabla 1. Dimensiones, temperatura y contenido de humedad de las vigas ensayadas.

Especie	Viga	Dimensiones (mm)	Humedad (%)	Temperatura (°C)
<i>Pinus sylvestris</i> L.	1S	6237 / 200 / 209	8,5	23
	2S	6182 / 202 / 197	8,5	23
	3S	6052 / 194 / 198	8,7	23
	4S	6096 / 200 / 202	8,7	23
	5S	6115 / 201 / 202	8,7	23
	6S	6074 / 202 / 201	8,5	23
<i>Pinus radiata</i> D. Don.	1R	6153 / 195 / 200	8,5	23
	2R	6134 / 197 / 203	9,0	23
	3R	6152 / 209 / 198	9,0	23
	4R	6273 / 198 / 204	8,5	23
	5R	6175 / 198 / 199	8,7	23
	6R	6108 / 204 / 195	8,3	23

Las piezas procedían de Soria (*P. sylvestris*) y Guipúzcoa (*P. radiata*), y habían sido acopiadas previamente en el Laboratorio de Maderas de la E.T.S. de Ingenierías Agrarias (Palencia), bajo condiciones de temperatura y humedad controlada con el fin de estabilizar sus niveles de humedad.

Esta fue determinada, después de los ensayos, por el método normalizado de secado en estufa (UNE-EN 13183-1:2002).

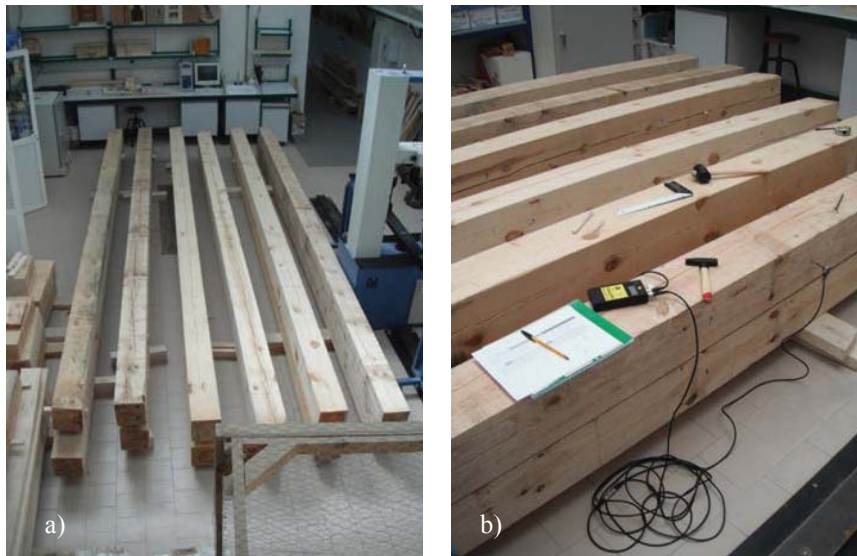


Figura 1. Vigas ensayadas: a) *Pinus sylvestris* L.; b) *Pinus radiata* D. Don.

Para la medición de la velocidad de las ondas ultrasónicas se utilizó un equipo *FAKOPP Microsecond Timer*®, diseñado específicamente para mediciones en madera por la empresa húngara *Fakopp Enterprise*. El aparato mide el tiempo (μs) transcurrido desde la emisión de la onda ultrasónica (23 kHz) generada sobre el palpador emisor, con un golpe de martillo no instrumentado (200 gr), hasta la recepción por el palpador receptor, medida con una precisión de $\pm 1 \mu\text{s}$ [11] y reflejada en una pantalla digital (Figura 2). Conocida la distancia entre ambos palpadores, la velocidad se obtiene aritméticamente.

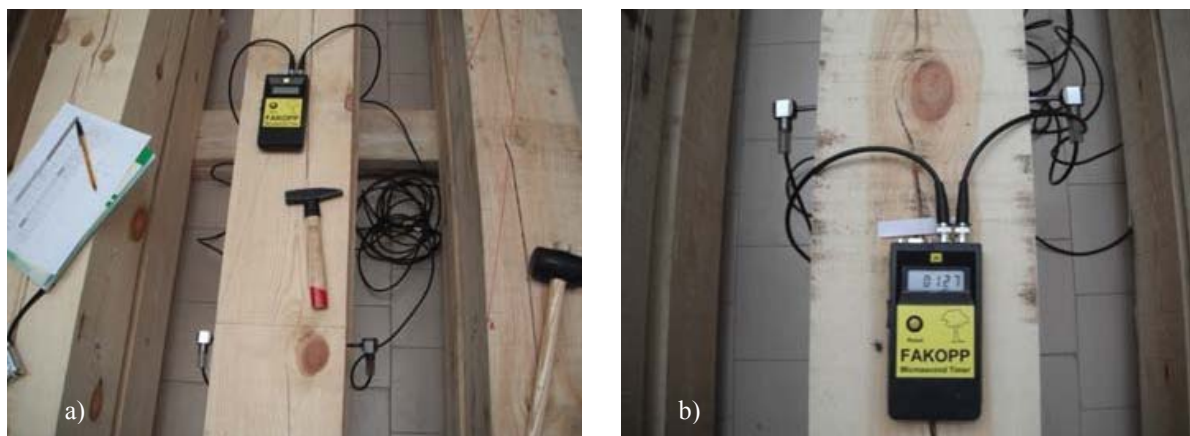


Figura 2. Realización de las mediciones con el equipo Fakopp.

Aunque existen en el mercado otros equipos de medida [12][13], en nuestro caso se elige el Fakopp por su portabilidad, facilidad de uso y precisión a largas distancias [14].

Para obtener un modelo completo (Figura 3.d) se establecieron tres tipos de medidas:

- a) Medidas directas o testa a testa (0° = máxima velocidad) (Figura 3.a),
- b) Medidas indirectas transversales (90° = mínima velocidad) (Figura 3.b), y
- c) Medidas indirectas angulares, con ángulos de aplicación del ensayo variables (aprox. 3° , 6° , 11° , $22'5^\circ$, 45° , 63° y 75°) (Figura 3.c).

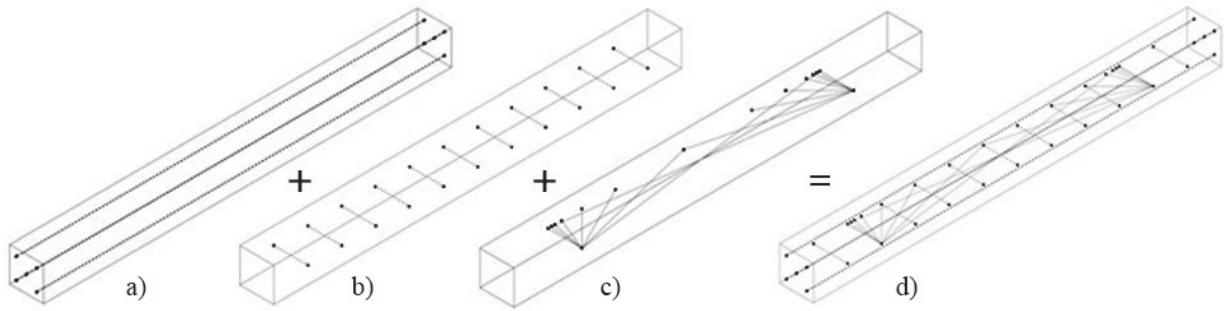


Figura 3. Medidas realizadas sobre las piezas ensayadas.

Para establecer los ángulos de ensayo se utilizó una metodología utilizada con anterioridad por el Grupo de Investigación sobre Estructuras y Tecnología de la Madera de la Universidad de Valladolid [16]. Se basa en el trazado de dos “abanicos” de ángulos opuestos por viga, como se refleja en la Figura 4.

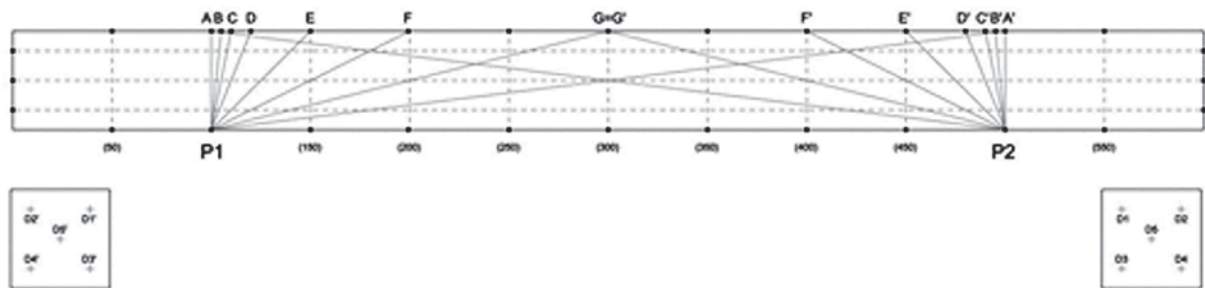


Figura 4. Medición completa (d). Puntos de medida, con su nomenclatura.

Dibujados los correspondientes abanicos sobre las vigas, se pueden obtener por trigonometría los ángulos concretos de medida para cada lectura (Figura 5).



Figura 5. Reproducción de los abanicos de ángulos durante los ensayos.

En total se han obtenido 384 valores medios de velocidad, de los que 60 mediciones fueron directas testa a testa, 132 mediciones transversales y 192 mediciones indirectas con distintos ángulos. Cada medida de velocidad se obtiene como promedio de 5 lecturas consecutivas, lo que representa un total de 1920 lecturas de velocidad registradas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Comportamiento de la transmisión respecto a la dirección de la fibra

Con todos los datos de los ensayos se realizaron las gráficas del modelo ajustado que relacionan velocidad y ángulo, resultado de la influencia de la anisotropía de la madera (Figura 6, Figura 7). En principio, y como cabría esperar, en las gráficas de ambas especies (*Pinus sylvestris* L. y *Pinus radiata* D. Don.) se aprecia una curva descendente de la velocidad a medida que va aumentando el ángulo que forman los palpadores con la dirección longitudinal de la fibra.

Una mayor compacidad en el agrupamiento de un determinado ángulo significa mayor homogeneidad y precisión en las lecturas realizadas para ese ángulo. Y, por consiguiente, este comportamiento permite discernir los ángulos más regulares e idóneos para realizar ensayos indirectos, con agrupamientos compactos, de los ángulos irregulares y menos fiables, con agrupamientos dispersos. Por otra parte, el agrupamiento de datos en forma de nubes de puntos permite poder rechazar aquellas lecturas que se alejan de un modo estadísticamente anómalo del rango de valores tipo del grupo.

Al generar y representar la curva que define matemáticamente el comportamiento de la onda ultrasónica dentro de la madera, puede extraerse la ecuación de la pendiente de la curva, de modo que se puede relacionar velocidades angulares con ángulos de ensayo: Ecu.(1) y Ecu.(2).

A_ *Pinus sylvestris* L.

Se han eliminado del modelo los puntos anómalos (representados en rojo) y atendiendo a la respuesta del paso de onda con respecto al ángulo, se ha seleccionado como modelo de predicción el expresado con la ecuación $y = a + b \cdot x^{1/2}$:

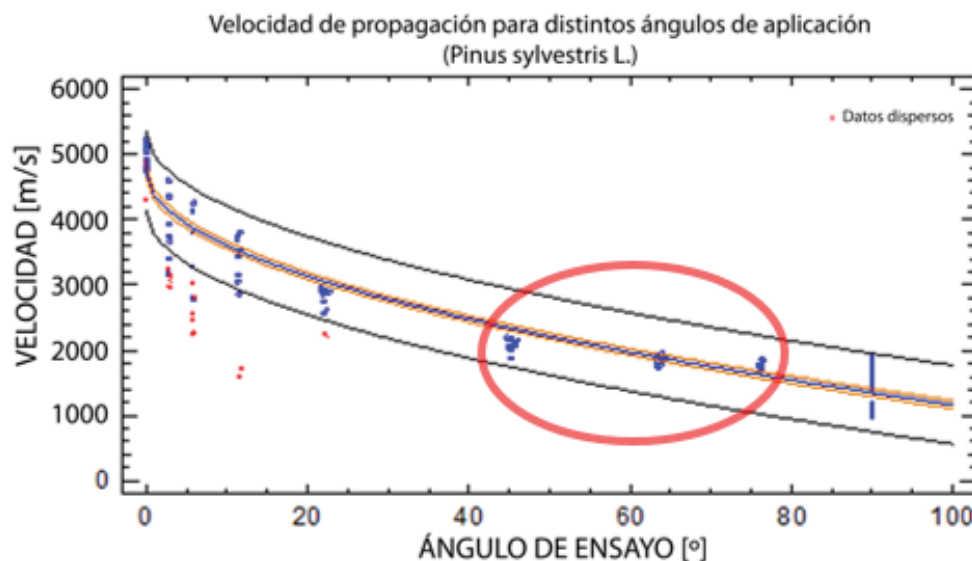


Figura 6. Gráfico velocidad-ángulo de aplicación para el *Pinus sylvestris* L.

La ecuación obtenida a partir de la pendiente de la gráfica (Figura 6) para el pino silvestre en este modelo ajustado es la siguiente:

$$V_{\text{silvestre}} = 4739,46 - 356,87 \cdot \alpha^{1/2} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

Donde α es el ángulo ($^{\circ}$) que forman el eje longitudinal de la pieza con la dirección teórica de paso de la onda acústica.

B_ *Pinus radiata* D. Don

El tipo de respuesta obtenido en pino radiata es semejante al de pino silvestre, por lo que el modelo utilizado es similar al referido anteriormente:

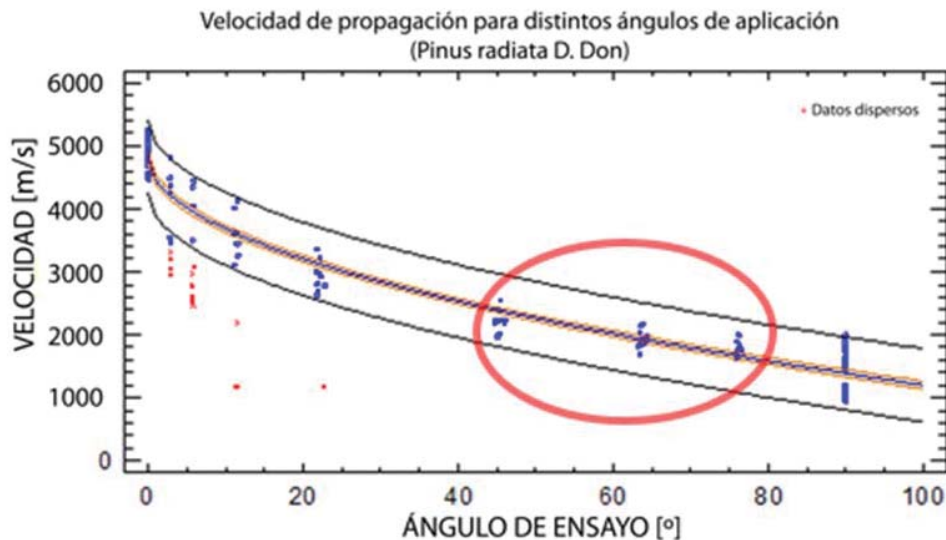


Figura 7. Gráfico velocidad-ángulo de aplicación para el *Pinus radiata* D. Don.

La ecuación obtenida para el pino radiata en este modelo ajustado (Figura 7) es la siguiente:

$$V_{\text{radiata}} = 4831,42 - 363,416 \cdot \alpha^{1/2} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

Donde α es el ángulo ($^{\circ}$) que forman el eje longitudinal de la pieza con la dirección teórica de paso de la onda acústica.

De las gráficas representadas en la Figura 6 y Figura 7 anteriores puede observarse como en ambas **los mejores agrupamientos de datos de velocidad se producen entre los ángulos 45° y 75°** (marcados con una elipse sobre las gráficas), mientras que para los ángulos pequeños (0° , 3° , 6° , 11° , $22'5^{\circ}$) se produce una mayor dispersión; bastantes puntos se alejan fuera de la amplitud media de la curva.

Este resultado, unos ángulos con buenos agrupamientos y otros con gran dispersión, no puede deberse a singularidades en la madera tales como nudos, gemas, bolsas de resina, puesto que los datos analizados se han obtenido de varias muestras. Además, en caso de singularidades de importancia en alguna de las vigas, estas variaciones en las lecturas se reflejarían en todos los ángulos medidos, y no únicamente en los ángulos más bajos.

Por otro lado, se limitarían a piezas individuales, no pudiendo afectar de modo tan similar sobre las gráficas de dos especies distintas. Por todo ello el resultado de esta dispersión en los ángulos más bajos solo pueden responder a la disminución de la velocidad de propagación de las ondas por la influencia de la dirección de la fibra sobre la medida.

La dispersión de velocidades en estos ángulos bajos podría deberse a que la dirección de la fibra no es completamente regular a lo largo de todo el tronco, por las características propias de crecimiento del árbol. Esto hace que, al realizar medidas sobre distintos puntos, en unos casos la onda recorra una dirección muy favorable, mientras que en otros ha de atravesar fibras con peores ángulos.

Sin embargo, al aumentar el ángulo esta cuestión no influye tanto pues las ondas cruzan las fibras en ángulos semejantes, traduciéndose en unas lecturas más homogéneas.

3.2. Comparación entre modelos

Una vez se han obtenido las gráficas del modelo ajustado (Figura 6 y Figura 7) con la ecuación de sus correspondientes curvas para las dos especies de madera ensayadas (Ec.(1) y Ec.(2)), se procede a comparar ambos modelos. Para realizar la comparación entre modelos se emplean las rectas de regresión obtenidas en ambos, transformando la variable "ángulo" por el valor de su raíz cuadrada, con el fin de linealizar ambos modelos (Figura 8).

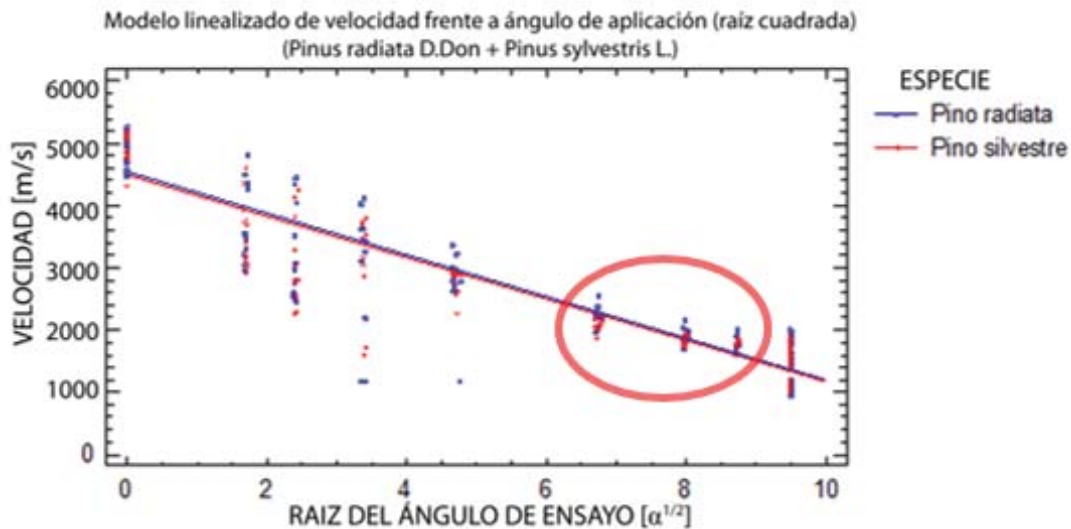


Figura 8. Gráfico velocidad- $\sqrt{\text{ángulo}}$. Comparación entre *Pinus sylvestris* L. y *Pinus radiata* D. Don.

En la gráfica obtenida en esta comparación (Figura 8) puede observarse como las dos rectas tienen una pendiente muy similar, estando además ambas prácticamente superpuestas. Consiguientemente, puede afirmarse que son dos modelos muy similares. La influencia que puede tener la especie en el modelo viene reflejada en el análisis estadístico de la Tabla 2, en la que se aprecia que los p-valores (mayores que 0,05) del factor ESP (especie) y de la interacción ANG x ESP no tienen influencia significativa en el modelo.

Tabla 2. Análisis estadístico de la influencia de la especie.

Parámetro	Estimado [m/s]	Error Estándar [%]	Estadístico T [-]	p-valor [-]
Constante	4542,14	64,5019	70,4187	0,0000
Raíz Ángulo (ANG)	-335,174	9,12853	-36,7172	0,0000
Especie (ESP)	-43,7407	91,2059	-0,479582	0,6318
Raíz Ángulo (ANG)*Especie (ESP)	2,63931	12,8538	0,205334	0,8374

Siendo así, sería correcto utilizar un único modelo general para ambas especies, que quedaría representado por el siguiente gráfico (Figura 9):

La Figura 9 representa un modelo ajustado en el cual se toman como datos las medidas obtenidas en los ensayos de ambas especies (*Pinus sylvestris* L. y *Pinus radiata* D. Don.), resultando para ambas maderas la siguiente ecuación:

$$V_{\alpha} = 4677 - 348,938 \cdot \alpha^{1/2} \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

Donde α es el ángulo ($^{\circ}$) que forman el eje longitudinal de la pieza con la dirección teórica de paso de la onda acústica.

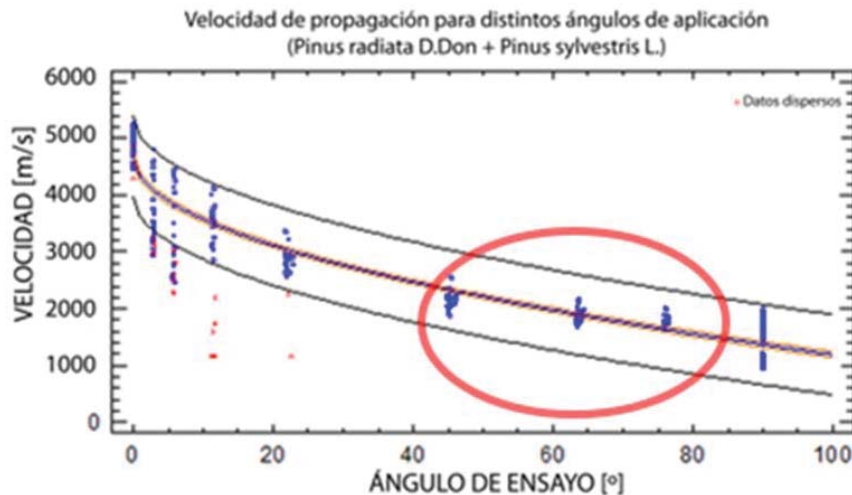


Figura 9. Gráfico velocidad-ángulo de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus radiata* D. Don.

3.3. Ecuación general de ajuste en función del ángulo

Para conocer y comparar otras propiedades mecánicas de la madera partiendo del dato de la velocidad de propagación de la onda [17] sería muy útil poder definir una ecuación de paso que permita convertir velocidades angulares V_α , las más normalmente medibles en obra, a velocidades longitudinales equivalentes $V_{0,eq}$, más fiables como predictoras de las propiedades mecánicas.

Así, si partimos de la Ec.(3), para una medida directa donde $\alpha = 0^\circ$ la velocidad longitudinal sería $V_0 = 4677$ m/s, con lo cual se puede escribir la ecuación de paso de la forma siguiente:

$$V_{0,eq} = 348,938 \cdot \alpha^{1/2} + V_\alpha \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

Donde α es el ángulo ($^\circ$) que forman el eje longitudinal de la pieza con la dirección teórica de paso de la onda acústica.

Expresión que serviría para estimar la velocidad longitudinal equivalente a partir del ángulo en que se ha tomado una determinada velocidad.

Ha de advertirse que tal ecuación se ha obtenido a partir para el abanico de ángulos comprendidos entre 45° y 75° , y basándose en 384 medidas realizado sobre 12 vigas (6 de pino radiata y 6 de pino silvestre) de gran escuadría con un contenido medio del 8,5% de humedad.

3.4. Corrección de la velocidad a una humedad 12%

La Ec.(4) se ha obtenido a partir datos de ensayo en madera con una humedad aproximada del 8,5% (ver Tabla 1), por lo que debe corregirse a un valor de referencia normalizado del 12%. Según la bibliografía [17], el valor de la velocidad se reduce aproximadamente un 0,8% por cada incremento de humedad del 1% (Ec.(5)):

$$V_{12} = V \cdot (1 - 0,008 \cdot (12 - H)) \quad [\text{m/s}] \quad (5)$$

Por lo que, en nuestro caso, para madera al 8,5% la corrección a aplicar sería:

$$V_{12} = V_{8,5} \cdot (0,972) \quad [\text{m/s}]$$

Con lo que la ecuación de paso Ec.(4) corregida a una humedad de referencia normalizada al 12% es:

$$V_{0,eq} = 339,17 \cdot \alpha^{1/2} + V_{\alpha 12} \quad [\text{m/s}] \quad (6)$$

Donde α es el ángulo ($^{\circ}$) que forman el eje longitudinal de la pieza con la dirección teórica de paso de la onda acústica.

4. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados de los ensayos realizados, la primera de las conclusiones obtenidas es que el comportamiento frente a la propagación de las ondas ultrasónicas es semejante en las dos especies de conífera: *Pinus sylvestris* L. y *Pinus radiata* D. Don., y pueden representarse como un único grupo de estudio. Al menos bajo el modelo generado con el espectro limitado de muestras (6 vigas pino silvestre y 6 vigas pino radiata) ensayado y el número de medidas (384 medidas totales y 1920 lecturas de ensayo registradas) realizadas.

Otra conclusión relevante es que para la realización de ensayos indirectos de ultrasonidos los ángulos que arrojan mediciones más precisas y fiables, a la luz de los agrupamientos de datos obtenidos, son los comprendidos entre 45° y 75° . Destacando el ensayo indirecto de 63° con respecto a la dirección de la fibra como el más preciso y fiable. Este ángulo concreto tiene además la ventaja de ser fácilmente reproducible en obra, según el esquema de la Figura 10:

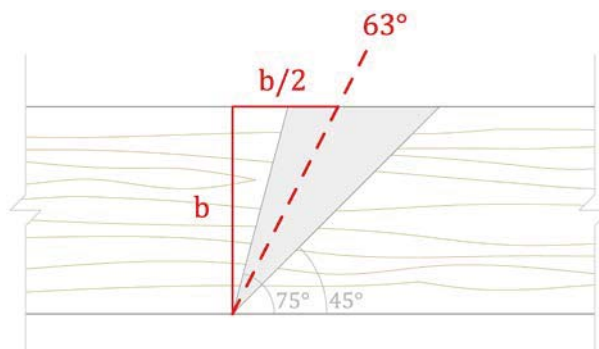


Figura 10. Esquema de aplicación in situ del ángulo de medida propuesto.

Por último, introduciendo en la ecuación (6) los valores de velocidad V_{α} y ángulo α tomados en un ensayo indirecto puede obtenerse una velocidad longitudinal equivalente $V_{0,eq}$, permitiendo comparar los datos obtenidos con otros datos o estudios y utilizarla, en combinación con la densidad de la madera ensayada, para la estimación de su Módulo de Elasticidad.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hermoso Prieto, E. *Caracterización mecánica de la madera estructural de Pinus sylvestris*. E.T.S. Ingenieros de Montes - UPM, 2001. Tesis Doctoral [inédita].
- [2] Iñiguez González, G. *Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural*. E.T.S. Ingenieros de Montes - UPM, 2007. Tesis Doctoral [inédita].
- [3] Kasal, B., Ronald, W.A. Advances in *in situ* evaluation of timber structures. *Prog. Struct. Engng. Mater.* N°6 Pp. 94-103 (2004).
- [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, 516, Pp. 21-36. Oct.-dic. (2009).
- [5] Bucur, V. Ondes ultrasonores dans le bois. Caractérisation mécanique et qualité de certaines essences de bois. *These de Doc. Ing. ISMCM*. (1984).
- [6] Conde García, M., Fernández-Golfin, J.I., Hermoso Prieto, E. Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual. *Materiales de Construcción* Vol. 57, 288, Pp 49-59. Octubre-diciembre, (2007).

- [7] Pellerin, R., De Groot, R.C., Esenther, G.R. Nondestructive stress wave measurements of decay and termite attack in experimental wood units. *Proceedings of the 5th Nondestructive Testing of Wood Symposium*. Pp.319-352. Pullman WA, 1985.
- [8] Sandoz, J.L. Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood Science and Technology*, 27:373-380 (1993).
- [9] Rodríguez Liñán, C., Rubios de Hita, P. *Evaluación del estado de la madera en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos*. Universidad de Sevilla. Textos de doctorado. Sevilla, 2000.
- [10] Kabir, M. F. Prediction of ultrasonic properties from grain angle. *Journal of the Institute of Wood Science*, vol. 15, nº 5 (89), pp. 235-246 (2001).
- [11] AA.VV. *FAKOPP Microsecond Timer*. Fakopp Enterprise. Hungary, 2002.
- [12] Hermoso Prieto, E., Fernández-Golfín, J.I., Comparación de la evaluación y clasificación mecánica del *Pinus pinaster* Ait. con dos equipos de ultrasonidos. *Actas del 5º Congreso Forestal Español*. Ávila, 2009.
- [13] Brashaw, B., Vatalaro, R., Wacker, J., Ross, R. Evaluation of several stress-wave tools. *Condition assessment of timber bridges*. U.S. Department of Agriculture. Madison, 2005.
- [14] Acuña, L., Díez, M.R., Casado, M. Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a *Pinus Pinaster* Ait. *Boletín del CIDEU*. Nº 2, Pp. 7-26 (2006).
- [15] Divos, F., Dániel, I., Bejo, L. Defect Detection in Timber by Stress Wave Time and Amplitude. *e-Journal of Nondestructive Testing Issue* Vol. 6 No. 3 (2001).
- [16] Acuña, L., Díez, R., Casado, M., Llorente, A., Lázaro, M.T., Martín, L., Basterra, L.A., Relea, E., Ramón-Cueto, G. La técnica de transmisión ultrasónica aplicada a la madera estructural. *11º Congreso Español de END*. Gijón, 4, 5 y 6 de Julio 2007.
- [17] Sandoz, J.L. Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Science and Technology*, 23:95-108 (1989).