

# Estudio del efecto de la dirección de medición y contenido de humedad en la velocidad de ultrasonido en madera de *Pinus radiata* D. Don a través de análisis de varianza

## Analysing variance for determining humidity content and measuring directional effect on ultrasound speed in *Pinus radiata* D. Don wood samples

Rodrigo Ortiz Mansilla<sup>1</sup>, Erik Baradit A.<sup>2</sup>, José Navarrete A.<sup>3</sup>

### RESUMEN

Para analizar la técnica de ultrasonido como una alternativa en la evaluación del estado estructural de diferentes edificaciones construidas en madera, se estudió el efecto e importancia relativa de la dirección de medición y el contenido de humedad, sobre la velocidad de transmisión en este material. Para esto, se aplicaron pulsos longitudinales ultrasónicos de 1 Mhz sobre probetas de madera de *Pinus radiata* D. Don, bajo un procedimiento experimental que consideró la utilización de un diseño factorial  $2^2$  completamente aleatorizado. Como resultado del análisis de varianza, se determinó que dentro de los rangos de contenido de humedad y dirección de medición estudiados, este último se presenta como factor significativo, explicando el 95% de la variabilidad total observada. De hecho, la variación del contenido de humedad entre 0 y 15%, conlleva a valores de velocidad de propagación promedio de 1.644 m/s y 2.130 m/s para las direcciones tangencial y radial, respectivamente. Los resultados de este trabajo permiten concluir que al momento de realizar una evaluación mediante ultrasonido en estructuras en servicio, principalmente se debe considerar la dirección de medición como un factor determinante en el estudio; sin embargo, la efectividad de aplicación de esta técnica requiere de otros trabajos complementarios que consideren la propagación en planos mixtos de la madera. Este estudio se llevará a cabo próximamente.

**Palabras clave:** *Pinus Radiata*, ultrasonido, diseño factorial.

### ABSTRACT

This study was carried out in order to analyse the ultrasound technique as an alternative form of assessing the structural state of different wooden buildings. This work studies the effect and relative importance of measurement direction and moisture content on ultrasound speed in wood. Radiata pine wood samples were subjected to 1 MHz longitudinal ultrasound pulses. A  $2^2$  factorial design was run in a completely random experiment. Measurement direction was the significant factor, as shown by the analysis of variance, explaining 95% of total ultrasound velocity variability. Average tangential and radial propagation speeds were between 0% and 15% moisture content, 1644 m/s and 2130 m/s, respectively. The results of this study showed that wave propagation direction is the most important factor during wood structure ultrasound evaluation. Future studies with combined planes are underway.

**Keywords:** *Pinus radiata*, ultrasound, factorial design.

**Recibido:** agosto 27 de 2008

**Aceptado:** julio 16 de 2009

### Introducción

La inspección de elementos de madera es hecha con el objetivo de proporcionar información valiosa para el análisis de la seguridad de estructuras construidas con este material (Machado *et al.*, 2009). Sotomayor y Cruz de León (2003) agregan que la evaluación del estado estructural de las edificaciones es un aspecto importante para mantener la estabilidad del edificio, garantizar la seguridad de los usuarios, y en el caso de edificaciones históricas, conservar su valor cultural.

Es así como las técnicas no destructivas han llegado a desempeñar un importante papel en la evaluación de propiedades físicas y mecánicas, como también, en la detección y evaluación de defectos en una pieza de material o estructura sin alterar sus capacidades (Tanasoïu *et al.*, 2002). Así mismo, estas técnicas son usadas para evaluar en la madera, ya sea como material sólido o reconstituido, los daños inducidos en su interacción con el medio ambiente (Ross y Pellerin, 1994), la detección de sus defectos y la evaluación de sus propiedades mecánicas (Emerson *et al.*, 1998).

<sup>1</sup> Ingeniero constructor, Universidad de Valparaíso, Chile. M.Sc., en Ciencias y Tecnología de la Madera, Universidad del Bío Bío, Chile. Candidato a Ph.D., en Ciencias e Industrias de la Madera, Universidad del Bío Bío, Chile. Profesor Auxiliar, Escuela de Construcción Civil, Facultad de Arquitectura, Universidad de Valparaíso, Chile. rodrigo.ortiz@uv.cl

<sup>2</sup> M.Sc., Ciencias Físicas y Matemáticas, Moscow University of Friendship. Ph.D., en Ciencias Tecnológicas, Moscow Institute of Telecommunications. Profesor Asociado, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad del Bío Bío, Chile. ebaradit@ubiobio.cl

<sup>3</sup> Ingeniero civil químico, Universidad de Concepción, Chile. M.Sc. y Ph.D., en Ciencias de la madera, Universidad de Minnesota, Estados Unidos. Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería en Maderas, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío Bío, Chile. jnavarre@ubiobio.cl

De acuerdo a lo señalado por Tomppo *et al.* (2009), la propagación de ondas mecánicas de ultrasonido han sido utilizadas ampliamente para la evaluación no destructiva de la madera. En la generación de estas ondas los transductores incorporan un elemento piezoeléctrico que convierte las señales eléctricas en señales mecánicas (Bucur, 1995), las que se propagan en los medios sólidos a través de ondas longitudinales o transversales (Vásquez, 1982; Bucur, 1995). La propagación de una onda de ultrasonido en la madera es un proceso dinámico que está relacionado con sus propiedades físicas y mecánicas (Wang *et al.*, 2004). De manera general, una onda viaja más rápidamente debido a la mejor o peor transmisión mecánica de la perturbación en una madera sana y de alta calidad que en una madera deteriorada y de baja calidad. Los tiempos de transmisión en madera están influenciados por algunos factores, entre los cuales se encuentran la dirección de medición y el contenido de humedad (CH). Para la dirección de medición los menores tiempos de transmisión se presentan en el sentido longitudinal al grano, en tanto que los mayores tiempos se encuentran en el sentido tangencial. De acuerdo a lo señalado por Bravo (1996), los valores promedios de velocidad en madera de *Pinus Radiata* D. Don con un 12% de contenido de humedad son de 5.249 (m/s) en el sentido longitudinal, 2.027 (m/s) en el sentido radial y 1.487 (m/s) en el sentido tangencial. Por otro lado, es necesario considerar el efecto del contenido de humedad en las mediciones de ultrasonido, debido a que se produce un aumento en los tiempos de transmisión desde el estado seco hasta el punto de saturación de las fibras (Ross y Hunt, 2000; De Oliveira *et al.*, 2005).

En el presente trabajo se analiza, mediante un diseño factorial, el impacto relativo de los factores dirección de medición en el plano radial-tangencial (RT) y contenido de humedad (CH) sobre la velocidad de propagación de ondas de ultrasonido en madera de *Pinus radiata* D. Don. Esto, con el objetivo de estudiar la factibilidad de aplicación de esta técnica para la evaluación *in situ* de estructuras en servicio. En particular, las humedades de equilibrio de una gran cantidad de las edificaciones construidas en madera y que abarcan, desde Arica hasta Chillán en Chile, se encuentran dentro de los rangos de CH estudiados.

## Desarrollo experimental

La planificación del trabajo experimental consideró la aplicación de un diseño factorial 2<sup>2</sup> completamente aleatorio (Tabla 1). Los factores estudiados y sus niveles fueron la dirección de medición (radial y tangencial) y CH (0 y 15%). La variable respuesta fue la velocidad de ultrasonido.

Para el diseño y análisis estadístico se utilizó el software Design Expert versión 7.0 (StatEase Inc.).

### Madera

Las muestras para este ensayo fueron preparadas a partir de tablas de 50 x 100 x 3.200 mm de madera de *Pinus radiata* D. Don. Para el ensayo se utilizaron probetas de 20 mm de espesor, 60 mm de ancho y 100 mm de largo, orientadas en ambos planos de evaluación. Toda la madera utilizada estaba libre de defectos como nudos, bolsas de resina, manchas y evidencia de ataque de microorganismos. Cada muestra tenía igual cantidad de anillos de crecimiento. Para cada tratamiento se realizaron 50 repeticiones.

### Acondicionamiento CH

El acondicionamiento del CH se llevó a cabo en dos grupos. En el primero, las probetas fueron dejadas a temperatura ambiente has-

ta alcanzar un CH de 15%. El segundo grupo de probetas se acondicionó mediante secado en estufa a 105 °C durante 24 horas, hasta alcanzar un CH de 0%. Estas últimas probetas, para mantener el CH, fueron almacenadas en un desecador y sólo retiradas al momento de la medición por ultrasonido.

### Medición de ultrasonido

Las mediciones fueron realizadas con la frecuencia de 1 Mhz de polaridad longitudinal, utilizando un equipo ultrasónico Panametrics 5800 P, observándose la señal por medio de su transmisión a través de la medición en un osciloscopio Kenwood CS-4025. Todas las mediciones fueron hechas de acuerdo a los niveles de los factores de cada tratamiento establecido por el diseño factorial (Tabla 1).

Tabla 1. Diseño factorial 2<sup>2</sup>

Tratamiento	A: Dirección de Medición	B: CH
1	Tangencial	0
2	Radial	15
3	Tangencial	15
4	Radial	0

## Resultados y discusión

El análisis de la mitad de la gráfica de probabilidad normal de los efectos muestra que las interacciones y los efectos que no son significativos siguen una distribución normal y tienden a localizarse en una línea recta. Por otro lado, aquellos que sí son significativos se ubican lejos de la línea con valores distintos de cero (Montgomery, 2005). Así, el factor individual dirección de medición (A) aparece como el único efecto significativo del modelo (Figura 1).

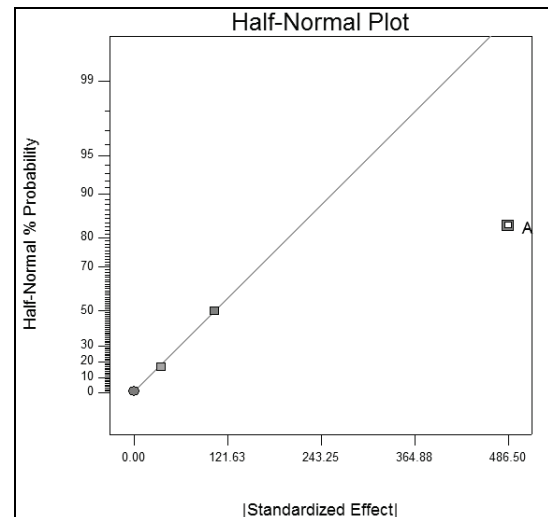


Figura 1. Probabilidad normal de los efectos.

Los estadísticos F asociados al ANOVA de este experimento se muestran en la tabla 2, en la que se aprecia que tanto el modelo como el factor A (dirección de medición) son significativos, explicando este último el 95% de la variabilidad total observada. Complementariamente, el análisis de los residuales y la constancia de la varianza permiten concluir la idoneidad del modelo.

En la figura 2 se señala el efecto de la dirección de medición, en ella se nota que la velocidad en el sentido radial es de aproximadamente 2.100 (m/s), mientras que en el sentido tangencial la velocidad baja a 1.670 (m/s) aproximadamente.

Tabla 2. Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo	Valor P
Modelo	2.367E+005	1	2.367E+005	38.86	<0.0001
A: Dirección Medición	2.367E+005	1	2.367E+005	38.86	<0.0001
Residual	12180.50	2	6090.25		
Total	2.489E+005	3			

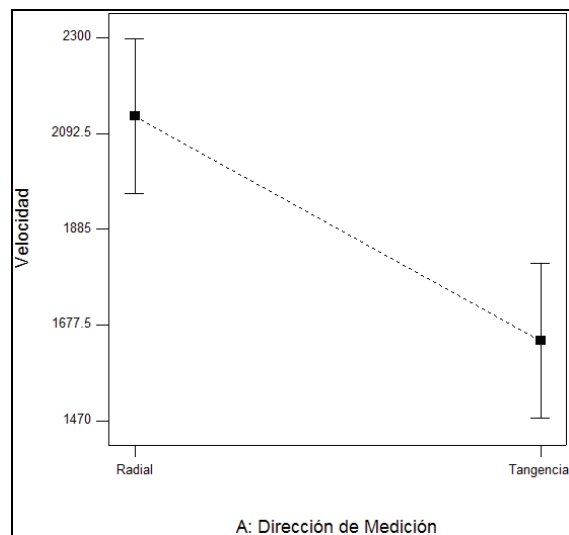


Figura 2. Efecto de la dirección de medición

Debido a la naturaleza orgánica de la madera, la velocidad de propagación de ultrasonido varía dependiendo de la orientación de los componentes anatómicos que la constituyen, siendo los tiempos de transmisión más cortos en el sentido longitudinal y más largos en el perpendicular (Ross y Hunt, 2000; Wang *et al.*, 2004).

De acuerdo a lo señalado por Ross y Hunt (2000), varios trabajos han examinado el efecto del contenido de humedad en los tiempos de transmisión de ultrasonido en maderas. Según estos autores, los tiempos de transmisión en el sentido perpendicular al grano, a partir del punto de saturación de las fibras (PSF) disminuyen a medida que el CH decrece, en tanto que sobre el PSF, los tiempos de transmisión permanecen sin variaciones significativas.

Los valores obtenidos para la velocidad tangencial varían de 1.678 a 1.609 m/s en promedio al aumentar desde 0 a 15 % de contenido de humedad. Por su parte, los valores promedios de velocidad radial varían de 2.200 a 2.060 m/s al aumentar el contenido de humedad en igual cantidad. Como se puede observar, las velocidades no sufren cambios importantes como efecto de la variación de los niveles de humedad en ambos planos de medición, siendo cercanos a los obtenidas por Bravo (1996) y concordantes con lo señalado por Bucur (1995), Ross y Hunt (2000) y Wang *et al.* (2004).

## Conclusiones

Los resultados denotan que la variabilidad inducida por el factor de dirección de medición, de acuerdo al análisis de varianza, resultó ser estadísticamente significativa, mientras que por el contrario, en el contenido de humedad en el rango estudiado de la medición no lo fue. Por lo tanto, esta última variable no es un elemento relevante en el momento de una evaluación mediante ultrasonido.

Sin embargo, cabe señalar que las estructuras construidas en madera no presentan planos radiales y tangenciales perfectos en servicio, sino que pueden exhibir planos mixtos, por lo cual es necesario determinar los tiempos de transmisión bajo estas condiciones en particular. Esta investigación debe ser llevada complementariamente en conjunto con un estudio que considere la ampliación del rango superior del contenido de humedad, con el fin de abarcar la totalidad de las humedades de equilibrio presentes en Chile.

## Bibliografía

- Bravo, I., Evaluación preliminar de la anisotropía y determinación del módulo de elasticidad de la madera de *Pinus radiata* D. Don por ultrasonido., Memoria Ingeniero Civil en Industrias Forestales, Departamento de Ingeniería en Maderas, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile, 1996. pp. 70.
- Bucur, V., Acoustics of Wood., CRC Press. Boca Raton, U.S.A., 1995.
- De Oliveira, F., Candian, M., Lucchette, F., Moisture Content Effect on Ultrasonic Velocity in *Goupia Glabra.*, Materials Research, Vol. 8, No. 1, May., 2005, pp. 11-14.
- Emerson, R., Pollock, D., Kainz, J., Fridley, K., McLean, D., Ross, R., Nondestructive evaluation techniques for timber bridges., V World conference on timber engineering. Montreux, Switzerland., August, 1998., Vol. 1, pp. 670-677.
- Machado, J., Palma, P., Simoes, S. Ultrasonic indirect method for evaluating clear wood strength and stiffness., NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering., Nantes, France., June 30th – July 3rd, 2009.
- Montgomery, D.C., Diseño y análisis de experimentos., Segunda Edición. Limusa (ed), Mexico, 2005, pp. 686.
- Ross, R., Pellerin, R., Non-destructive testing for assessing wood members in structures: A review., Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70 (Rev.). Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory., May., 1994, pp. 40.
- Ross, R., Hunt, M., Stress wave timing nondestructive evaluation tools for inspecting historic structures., A guide for use and interpretation. General Technical Report FPL-GTR -119. Department of Agriculture Forest Service, April, 2000, pp.15.
- Sotomayor, J., Cruz de León, J., Ancient wood structures evaluation methodology., Coordinación de la Investigación Científica. FITECMA. UMSNH, 2003, pp. 18.
- Tanasoiu, V., Miclea, C., Tanasoiu, C., Nondestructive testing techniques and piezoelectric ultrasonics transducers for wood and built in wooden structures., Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 4 No. 4, December., 2002, pp 949-957.
- Tomppo, L., Tiitta, M., Lappalainen, R., Ultrasound evaluation of lathe check depth in birch veneer., Holz als Roh- und Werkstoff, Vol. 64 No. 1, February, 2009, pp 27-35.
- Vásquez, M., Análisis de aspectos sobre ensayos no destructivos para maderas., Memoria Ingeniero en Maderas, Departamento de Ingeniería en Maderas, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile, 1982, pp.85.
- Wang, X., Divos, F., Pilon, C., Brashaw, B., Ross, R., Pellerin, R., Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools: a guide for use and interpretation Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-147. Madison, WI: U.S., Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, March., 2004, pp. 12.