

INFLUENCIA DE LA LONGITUD Y POSICIÓN DE TERMINALES EN LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACION DEL SONIDO EN VIGAS DE MADERA DE ALAMO Y PINO PARANÁ

Jacinto Diab ⁽¹⁾, Roberto D. Manavella ⁽²⁾, Alfredo A. Guillaumet ⁽³⁾, María C. Filippetti ⁽⁴⁾

(1) Phd, Ing. Mecánico, Profesor Titular, GIDEC, Universidad Tecnológica Nacional. V. Tuerto. Argentina

(2) Ing. Civil, Profesor Titular, GIDEC, Universidad Tecnológica Nacional. V. Tuerto. Argentina

(3) Ing. en Construcciones., Prof. Titular, GIDEC, Universidad Tecnológica Nacional. V. Tuerto. Argentina

(4) Ing. en Construcciones, Prof. Adjunto, GIDEC, Universidad Tecnológica Nacional. V. Tuerto. Argentina

Laprida 651, (2600) Venado Tuerto. Argentina. aaguillaumet@rec.utn.edu.ar.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es evaluar las variaciones en la medición de la velocidad de propagación de una onda en piezas de madera, en función de la posición de los terminales y la distancia entre ellos, utilizando un equipo Fakopp.

Para tal fin se consideraron diez vigas de madera de álamo (*Populus deltoides Australiano 129/60*), con una sección aproximada de 2" x 4" y pino Paraná (*Araucaria angustifolia*), con una sección aproximada de 2" x 6", variando las longitudes entre 500 y 2800 mm.

Los terminales fueron dispuestos según tres posiciones a saber: a) sobre una misma cara e inclinados a 45°, b) sobre caras opuestas e inclinados a 45° y c) en caras transversales opuestas.

Se realizaron tres mediciones, que fueron promediadas, para cada posición antes descripta de los terminales en las vigas enteras y en las que fueron resultando luego de cortes sucesivos de 100 mm desde uno de sus extremos.

Los resultados obtenidos fueron tabulados y se obtuvieron curvas que nos dan la influencia de la posición de los terminales y de la longitud de la pieza en la medición de la velocidad de propagación de una onda en dicho medio. Se determinó que la velocidad disminuye levemente a medida que la viga se acorta y que la medición es afectada por la posición de los terminales. Las curvas de corrección permiten disminuir el error al calcular el módulo de elasticidad de cada pieza.

Palabras claves: Ensayo no destructivo, madera, Módulo de elasticidad, Fakopp, ultrasonido.

ABSTRACT

The aim of the present work is to evaluate the fluctuations in the record of the speed of propagation of a wave in wooden pieces, in function of the position of the terminals and the distance among them, using equipment Fakopp.

For such a purpose ten wooden beams of poplar (*Populus deltoides* Australiano 129/60) (with an approximate section of 2" x 4") and pine Paraná (*Araucaria angustifolia*) (with an approximate section of 2" x 6") were taken, varying the longitudes between 500 and 2800 mm.

The terminals were displayed according to three positions: a) On the same face and slanted at 45°, b) On opposed faces and slanted to 45° and c) On opposed transversal faces

Three readings were performed, that were averaged, for each position of the terminals mentioned above in the whole beams and in those that were resulting after successive cuts of 100 mm from one of their ends.

The results were tabulated and curves were obtained that give us the influence of the position of the terminals and of the longitude of the piece in the readings of the speed of propagation of a wave in this environment. It was determined that the speed slightly decreases as the beam shortens and that the readings are affected by the position of the terminals. the correction curves allow reducing the error when calculating the module of elasticity of the beam.

Keywords: Nondestructive test, wood, Module of elasticity, Fakopp, ultrasonic

INTRODUCCIÓN

Los métodos no destructivos permiten inspeccionar algunas características y singularidades de un material sin alterar sus propiedades, ni impedir la posibilidad de su futura utilización. Con estos métodos pueden ser evaluados defectos del material (tamaño y composición) y determinar propiedades como densidad, módulo de elasticidad, etc.

Dentro de estos métodos, y en especial en aquellos aplicados al estudio de la madera se puede hacer referencia a los que se basan en la utilización de ultrasonidos (Beall, F.C. 2002; Hermoso E. 2003), habiéndose comprobado ampliamente la eficacia de estos métodos para predecir algunas de las constantes elásticas de la madera de uso estructural. En particular esta técnica se puede utilizar con garantías en diversas especies de pino para establecer una clasificación en clases resistentes, aportando un rendimiento mayor que la clasificación visual. (Acuña L, et al.)

El método se basa en la utilización de un emisor y un receptor que son vinculados a ambos extremos de un trozo de madera del cual se quiere determinar alguna propiedad y medir la velocidad de propagación de la onda a través de él.

Las frecuencias utilizadas para estas mediciones, en general son bajas entre los 20 y los 200 KHz. para que no se vean perturbadas por la falta de homogeneidad del material.

El ángulo que forma la dirección de alineamiento de los terminales con la dirección longitudinal de las fibras influye sobre la velocidad de propagación de la onda, obteniéndose una tendencia descendente de la velocidad con el aumento del ángulo.

Asimismo la distancia entre emisor y receptor también influye en el valor de la velocidad longitudinal de propagación de la onda (Acuña L. et al. 2006).

Al provocarse una onda en el emisor, esta viajará hacia el receptor siguiendo el camino más corto, siendo su velocidad dependiente de las características de la pared celular a través de la cual viaja, y sus retardos, debidos a:

- la especie de madera estudiada, que tendrá una densidad y microestructura característica (Rodríguez Liñán C. y Rubio de Hita, P. 2000)

- la inclinación de las fibras respecto a la dirección estudiada (Bucur, V. 1984; Kabir, M.F. 2001)

- la humedad (Bucur V. 1995)

- las singularidades o defectos que pueda presentar (Sandoz, J.L. 1989; Karsulovic, J.T. 2000)

- 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).

Si se conoce la especie y su humedad, se puede inferir su calidad estructural mediante el uso de ultrasonido (Acuña, L. 2001).

El objetivo del presente trabajo es determinar la magnitud de la influencia de la posición de los terminales y de la distancia entre ellos en dos especies de maderas de uso corriente en Argentina, y proponer una curva de calibración para el equipo.

MATERIALES Y MÉTODO

Para la realización de este trabajo se tomaron 5 vigas de madera de Álamo (*Populus deltoides Australiano 129/60*) y 5 vigas de Pino Paraná (*Araucaria Angustifolia*) de largos y escuadrías varias. Se realizaron tres mediciones que fueron promediadas para cada posición de los terminales, a saber:

- terminales dispuestos en ambos extremos

- terminales inclinados a 45° sobre una misma cara
- terminales inclinados a 45° en caras opuestas.

La determinación de la velocidad de propagación de la onda ultrasónica se realiza mediante un equipo Fakopp, de uso muy difundido y de fácil manejo, ampliamente utilizado para la determinación del módulo de elasticidad de vigas de madera. (Figura 1).



Fig. 1: Equipo Fakopp utilizado

El mismo utiliza dos terminales, debidamente identificados con colores distintos, que se clavan en ambos extremos de la madera y golpeando con un martillo uno de ellos (emisor), se produce una onda que es recogida por el otro terminal (receptor), observándose en el visor del aparato el tiempo “t” que demora la onda en viajar de un extremo a otro, medido en microsegundos.

Conociendo la distancia “L” entre terminales, la cual puede ser medida con una cinta métrica con una precisión de un milímetro (error admisible para este tipo de elementos) y medido el tiempo “t” se puede determinar la velocidad de la onda a través de la pieza de madera mediante la fórmula:

$$V = \frac{L}{t}$$

Siendo:

V: velocidad de la onda en ese medio (m/seg)

L: distancia entre terminales (m)

t: tiempo medido en el aparato (seg)

De acuerdo a la relación existente entre la velocidad de propagación de la onda en un material y la densidad se puede escribir que:

$$E_1 = \rho \cdot V^2$$

Donde:

ρ : densidad de la madera.

E_1 : módulo de elasticidad longitudinal.

Generalmente los terminales son clavados en ambos extremos de la pieza a medir (como se muestra en Fig. 1), pero esto a veces es imposible, ya que en vigas en servicio, muchas veces no se puede acceder a las testas de las mismas, obligando al operador a clavar los terminales sobre una misma cara con un ángulo determinado, y en otras ocasiones en caras distintas, también con un ángulo determinado.

Se realizaron tres mediciones para cada caso y para el largo original de las vigas y para las piezas que fueron resultando de cortes transversales sucesivos de trozos de 100 mm cada uno, hasta que la viga original quedó reducida a una longitud de 500 mm. Más allá de esa medida no se sigue con el ensayo ya que en trozos menores de 500 mm el error del aparato comienza a ser importante.

Las disposiciones se muestran en las figuras 2, 3 y 4:



Fig. 2: Terminales dispuestos a 90° en caras opuestas y enfrentados (90-90)

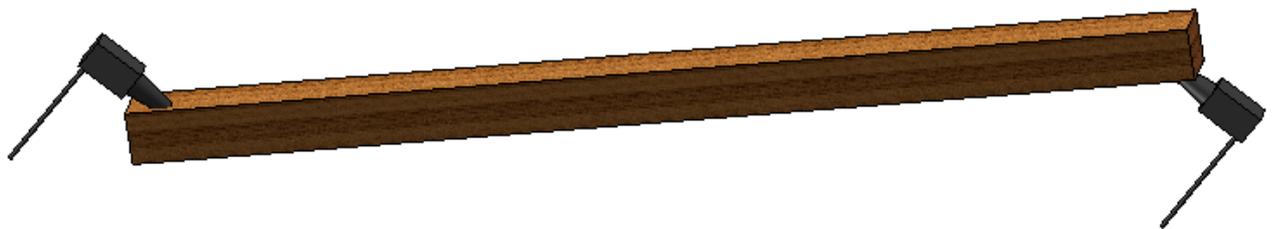


Fig. 3 : Terminales dispuestos a 45° en caras opuestas (45-45 C)

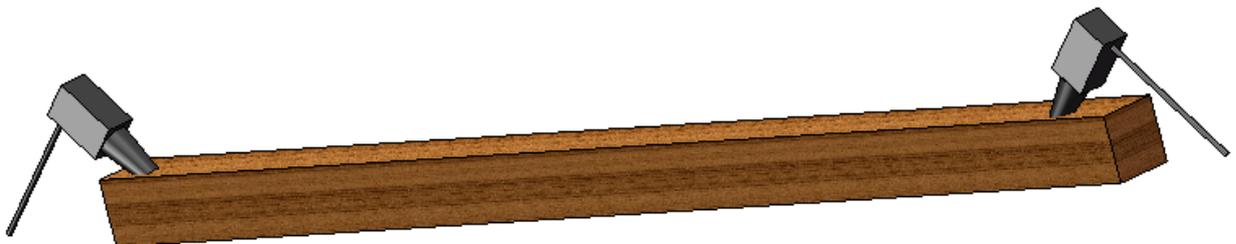


Fig. 4 : Terminales dispuestos a 45° en la misma cara (45-45 MC)

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para las vigas de álamo, los valores promediados, para las tres posiciones, son los que se indican en el Anexo, Tabla 1. Los gráficos y líneas de tendencia obtenidos para las vigas de Álamo se muestran en las figuras 5, 6 y 7.

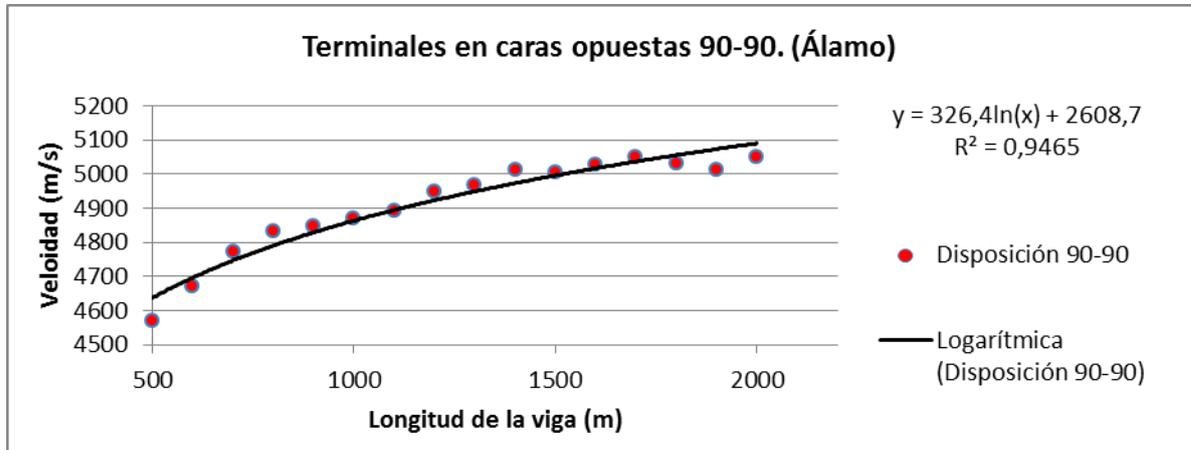


Fig. 5 : Gráfico Velocidad-Longitud de viga para disposición 90-90 en Álamo

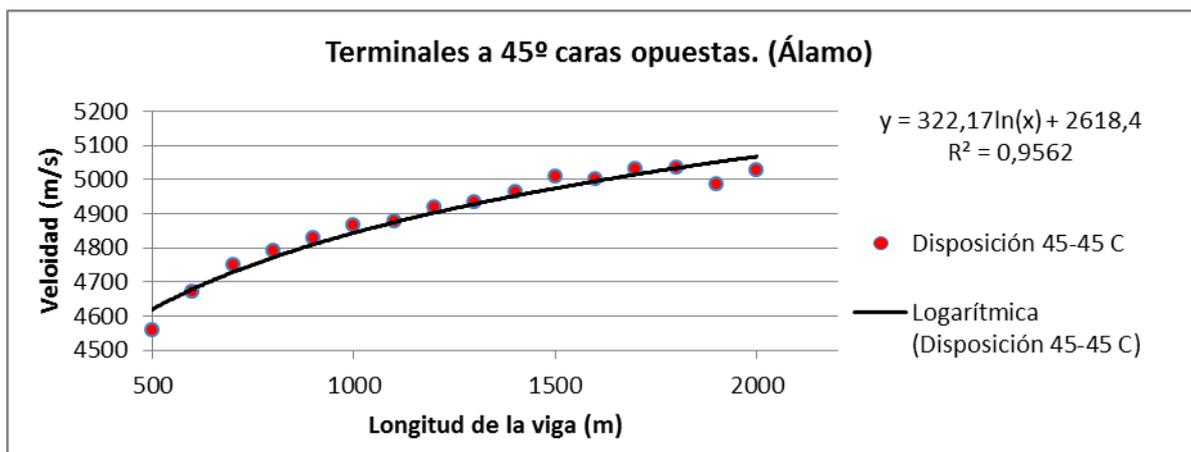


Fig. 6 : Gráfico Velocidad-Longitud de viga para disposición 45-45 C en Álamo

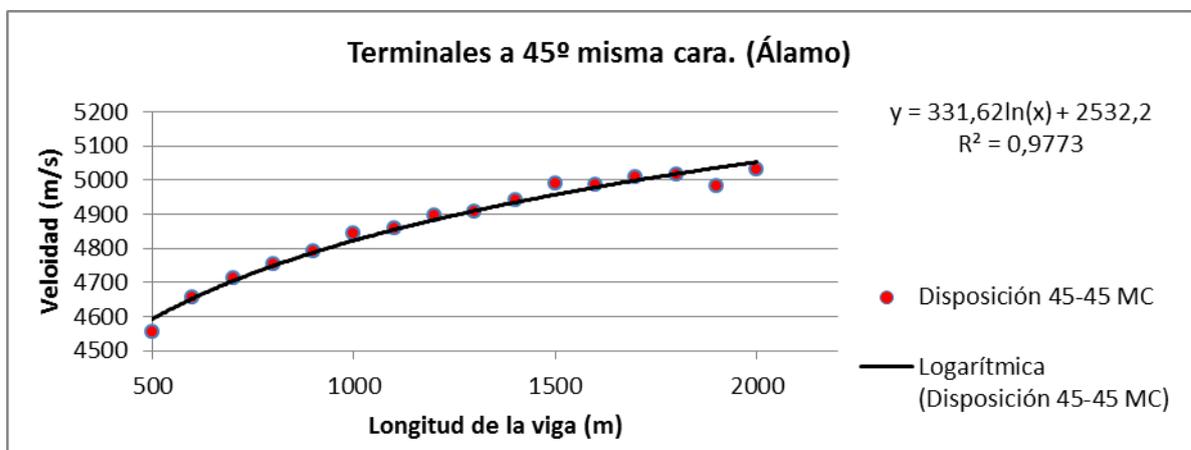


Fig. 7 : Gráfico Velocidad-Longitud de viga para disposición 45-45 MC en Álamo

Los resultados promediados del Pino Paraná se indican en el Anexo, Tabla 2. Los gráficos obtenidos con su correspondiente línea de tendencia se muestran en las figuras 8, 9 y 10.

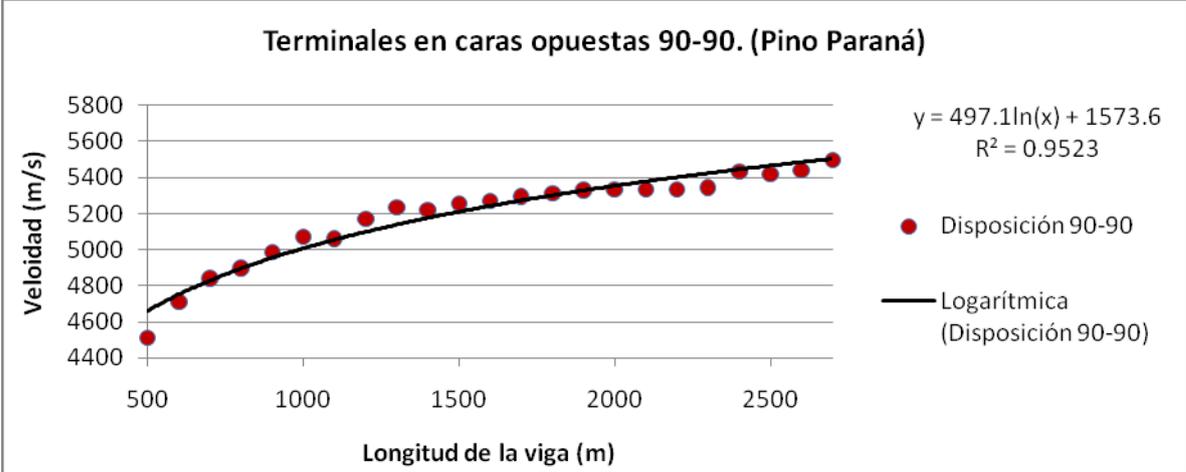


Fig. 8: Gráfico Velocidad-Longitud de viga para disposición 90-90 en Pino Paraná.

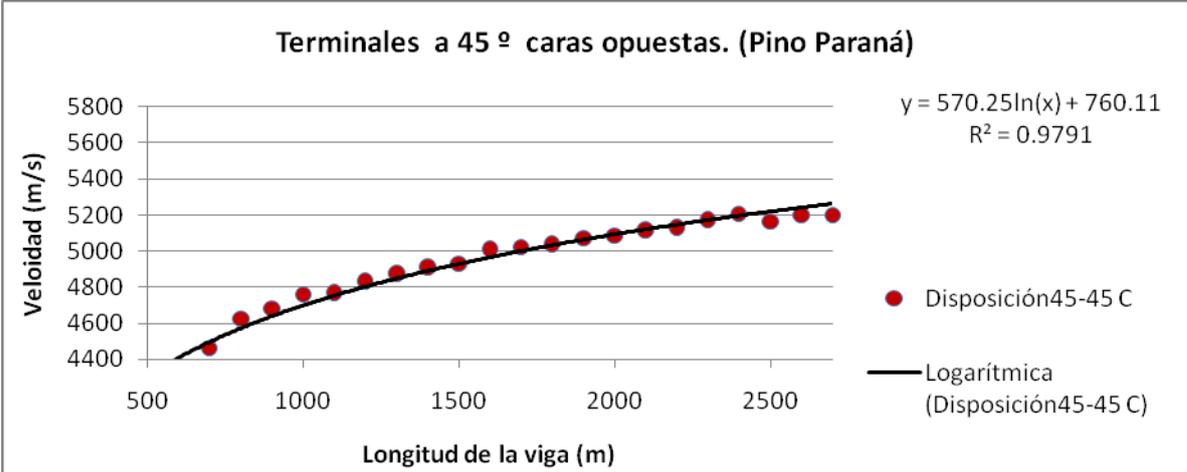


Fig. 9: Gráfico Velocidad-Longitud de viga para disposición 45-45 C en Pino Paraná.

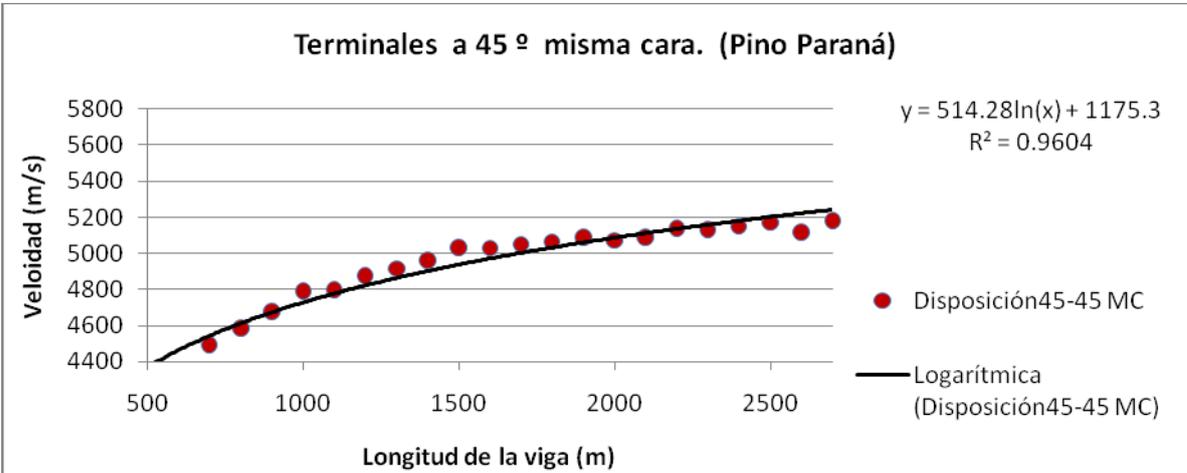


Fig. 10: Gráfico Velocidad-Longitud de viga para disposición 45-45 MC en Pino Paraná.

Se pueden apreciar que para largos de viga entre 500 y 2000 mm la variación de la velocidad de propagación de la onda es del orden del 10 % para el Álamo y del 18 % para el Pino Paraná.

Estas variaciones en la velocidad de propagación de la onda influyen notablemente en la determinación del módulo de Elasticidad dinámico, ya que dicho módulo varía con el cuadrado de la velocidad, lo que daría variaciones del 20 % para el Álamo y de hasta el 40 % en el caso del Pino Paraná.

A los efectos de corregir los valores de velocidad medidos ajustándolos a una longitud de referencia se pueden utilizar las ecuaciones indicadas en cada gráfico.

Conclusiones

- La velocidad de la onda medida aumenta con el largo de la viga, es decir que a largos mayores, se miden velocidades mayores, con un impacto importante en la determinación del módulo de elasticidad.
- Se debería aumentar el número de ensayos efectuando comparaciones entre los valores de módulo de elasticidad obtenido por este método y los valores obtenidos a partir de ensayos de flexión. Esto posibilitará optimizar la curva de corrección y establecer que largo de referencia debe tomarse como base para que los valores del módulo de elasticidad obtenidos a partir de mediciones por ultrasonido se correspondan con los valores obtenidos por ensayos a flexión.
- Si se colocan los terminales inclinados a 45° , los valores medidos de la velocidad de la onda son menores que si se disponen los terminales en las testas de las vigas. Se observan variaciones de hasta 1,5 % para el Álamo y de hasta 8,5 % para el Pino Paraná.
- No se aprecian diferencias significativas en las mediciones de la velocidad de propagación de la onda entre los terminales inclinados dispuestos en la misma cara o en caras opuestas.
- Al ir aumentando la longitud de la viga, la velocidad de la onda tiende a alcanzar un valor máximo según se aprecia en los gráficos precedentes.
- De las dos especies ensayadas, se observa que la velocidad de propagación de la onda es mayor en la especie de mayor densidad.

Bibliografía:

- Acuña L.; Diez MR; Casado M; 2006. "Los Ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a Pinus Pinaster Ait.". Boletín del CIDEU 2:7-26(2006) ISSN 1885-5237
- Acuña L.; Diez Barra R; Casado Sanz M; Llorente Fernández A; Lázaro Sanchez T; Martín Blazquez L; Basterra Otero A; Relea Ganga E; Gemma Cueto R. "La transmisión de ultrasonidos aplicada a la madera estructural" – 2007 – Univ. de Valladolid, documentos.
- Beall FC; 2002, "Overview of the use of ultrasonic Technologies in research on wood properties. Wood Science and Technology 36, pp 197-212
- Beall FC (2002a) Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. Wood Sci Technol 36:197–212
- Beall FC (2002b) Acoustic emission and acousto-ultrasonics. In: Pellerin RF, Ross RJ (eds) Nondestructive evaluation of wood. Publ 7250. Forest Products Society, Madison, Wisconsin, pp 37–48
- Beall FC, Biernacki JM, Lemaster RL (1994) The use of acousto-ultrasonics to detect biodeterioration in utility poles. J Acoust Emission 12:55–64
- Bucur V; 1984 – Relationship between grain angle of wood specimens and ultrasonic velocity, Catgut Acoustical Society Inc. 41 pp.30-35
- Bucur, V. 1984. Ondes Ultrasonores dans le Bois. Caractérisation 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. Acoustics of wood. New York: CRC Press Inc; 1995.
- Fujii Y, Noguchi M, Imamura Y, Tokoro M (1990) Using acoustic emission monitoring to detect termite activity in wood. Forest Prod J 40(1):34–36
- Gerhards CC (1982b) Longitudinal stress waves for lumber stress grading. Factors affecting applications: state of the art. Forest Prod J 32(2):20–25
- Hermoso E; 2003 " Caracterización mecánica de la Madera estructural de Pinus Sylvestris L" – Tesis doctoral E.T.S. Ingeniero de Montes U.P.M.
- 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.
- Karsulovic, J.T.; León, L.A. y Gaete, L. Ultrasonic detection of knots and annual ring orientation in Pinus radiata lumber, Wood and Fiber Science, Vol. 32, Nº 3, 2000, pp. 278-286.
- 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 R, DeGroot RC, Esenther GE (1985) Nondestructive stress wave measurements of decay and termite attack in experimental wood units. Proc 5th Symp on Nondestructive Testing of Wood, Washington State University, Pullman, pp 319–352

- Rajeshwar B; Bender D; Bray D; Mc Donald K – 1997 – An ultrasonic technique for predicting tensile strength of southern pine lumber; American Society of Agricultural Engineers 0001-2351; Vol 40(4);1153-1159

- Rodriguez Liñan 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, pp. 95-108

- Wilcox WW (1988) Detection of early stages of wood decay with ultrasonic pulse velocity. Forest Prod J 38(5):68–73

ANEXO: TABLAS DE VALORES.

LARGO	PROMEDIO VELOCIDAD (m/s)		
	mm	90-90	45-45 C
2000	5050,69	5028	5033
1900	5014	4988	4982
1800	5031	5036	5015
1700	5051	5031	5010
1600	5029	5001	4988
1500	5005	5009	4989
1400	5013	4963	4941
1300	4968	4932	4909
1200	4949	4918	4898
1100	4894	4877	4858
1000	4871	4865	4846
900	4848	4830	4791
800	4831	4792	4755
700	4771	4750	4711
600	4673	4671	4655
500	4570	4559	4554

LARGO	PROMEDIO VELOCIDAD (m/s)		
	mm	90-90	45-45 C
2700	5498	5202	5180
2600	5443	5204	5116
2500	5422	5168	5167
2400	5436	5207	5148
2300	5349	5178	5130
2200	5336	5133	5135
2100	5338	5120	5085
2000	5336	5088	5067
1900	5334	5073	5088
1800	5314	5043	5061
1700	5296	5024	5047
1600	5272	5013	5026
1500	5260	4934	5031
1400	5225	4916	4957
1300	5236	4879	4911
1200	5174	4837	4875
1100	5063	4771	4794
1000	5072	4761	4788
900	4987	4685	4677
800	4898	4627	4582
700	4844	4466	4490
600	4710	4334	4382
500	4514	4220	4334

Tabla 1 : Valores promediados para las vigas de *Populus Deltoides* 129/60.

Tabla 2 : Valores promediados para las vigas de *Araucaria angustifolia*.