

# Velocidad de onda y módulos de elasticidad por ultrasonido y ondas de esfuerzo de vigas de madera de *Pinus* spp. mexicana

## Wave speed and modulus of elasticity by ultrasound and stress waves of *Pinus* spp. Mexican wood beams

Javier Sotomayor<sup>1</sup>\*, Mariana Ramírez\*

\* Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. MÉXICO

Fecha de Recepción: 28/09/2014

Fecha de Aceptación: 30/11/2014

PAG 69-79

### Resumen

La industria de edificación con madera requiere datos de resistencia mecánica de madera con dimensiones y clasificación apropiadas para su uso como elementos estructurales. La presente investigación propone una estrategia experimental para la caracterización mecánica de vigas de madera y su aplicación como material de Ingeniería. El objetivo de la investigación fue: determinar las velocidades de onda y los módulos de elasticidad de vigas de *Pinus* spp., empleando ultrasonido y ondas de esfuerzo estudiando 70 vigas de *Pinus* spp. con dimensiones de 0.10 m x 0.15 m de sección transversal, 35 vigas de 5 m y 35 de 6 m de longitud. Las velocidades de transmisión presentaron coeficientes de variación coherentes a la heterogeneidad estructural de la madera. Los valores de estos coeficientes se incrementaron cuando se calcularon características de segundo nivel, como es el caso de los módulos de elasticidad. La velocidad y el módulo de elasticidad mostraron un carácter de anisotropía importante para el cálculo de la resistencia mecánica de las vigas. Igualmente, los parámetros calculados con el método de ondas de esfuerzo resultaron mayores a los determinados con ultrasonido. Los resultados permiten concluir que las técnicas de ultrasonido y ondas de esfuerzo pueden determinar la velocidad de onda y los módulos de elasticidad de vigas de madera de *Pinus* spp.

**Palabras claves:** Caracterización mecánica, densidad, contenido de humedad, estructuras de madera, cálculo estructural

### Abstract

The wood construction industry requires data of the mechanical strength of wood with dimensions and classification suitable to be used as structural elements. This research proposes an experimental strategy for the mechanical characterization of wood beams and their application as an engineering material. The objective of the research was to determine the wave speeds and moduli of elasticity of *Pinus* spp. beams using ultrasound and stress waves, studying 70 *Pinus* spp. beams with dimensions of 0.10 m x 0.15 m in the transverse direction, 35 beams of 5 m and 35 of 6 m length. The speeds of transmission showed coefficients of variation consistent with the structural heterogeneity of wood. The values of these coefficients increased when the second-level characteristics were calculated, as in the case of the moduli of elasticity. The speed and the modulus of elasticity showed an important anisotropy character for the calculus of the mechanical strength of the beams. Likewise, the parameters calculated with the stress wave method were higher than those determined by ultrasound. The results allow concluding that the ultrasound and stress wave techniques can determine the speed wave and the modulus of elasticity of *Pinus* spp. wood beams.

**Keywords:** Mechanical characterization, density, moisture content, wood structures, structural assesment

## 1. Introducción

Las vigas de madera aserrada se utilizan principalmente para sustituir vigas en servicio y deterioradas, en trabajos de restauración de edificios con valor cultural. Esta práctica es consecuente con el hecho de que la valoración de la madera durante las tareas de restauración de edificios antiguos, se limita a dar una apreciación subjetiva sobre el estado material de la madera, orientada a sugerir al restaurador la sustitución de la estructura o su demolición.

Otro destino constructivo de vigas que se encuentran en el mercado de madera es su utilización como elementos estructurales en la industria de la construcción. Por ejemplo, las vigas de madera son comúnmente instaladas como elementos resistentes y muchas veces como decoración en techos de arquitectura de carácter rústico o colonial. Un empleo particular de vigas y viguetas de madera es para cimbra en las estructuras provisionales durante el proceso constructivo.

## 1. Introduction

Sawn lumber beams are mainly used to replace deteriorated beams in service for restoring buildings of cultural value. This practice remains consistent with the fact that the value of wood during restoration works of ancient buildings only offers a subjective appreciation regarding the material state of the wood, aimed to suggest the restorer the replacement or demolition of the structure.

Another constructive destiny for market wood beams is their use as structural elements in the construction industry. For example, wood beams are commonly placed as resistant elements and many times as decoration in rustic or colonial style architectural ceilings. Wood beams and joists have a special use in centering of temporary structures during the constructive process.

<sup>1</sup> Autor de correspondencia / Corresponding author:

Profesor Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera Morelia, México  
E-mail: [madera999@yahoo.com](mailto:madera999@yahoo.com)



Información sobre cálculo de vigas se puede consultar en manuales y guías de diseño de estructuras de madera en: American Society of Civil Engineers (1975), Ozelton y Baird (1976), Hoyle (1978), Faherty y Williamson (1989), Bodig (1992), American Institute of Timber Construction (1994), Morlier (1994), Smulski (1997) y Breyer et al. (2003).

La industria de edificación con madera requiere datos de resistencia mecánica de la madera con dimensiones y clasificación apropiadas para su uso como elementos estructurales. Entre las características más importantes de la madera, el módulo de elasticidad es el parámetro necesario para las comprobaciones de estado límite de servicio y estado límite último en régimen lineal (Orbe et al., 2010), para el modelado probabilístico de estructuras de madera (Köhler et al., 2007) y para el diseño estructural y la evaluación de estructuras en servicio (International Organization for Standardization, 2003).

Los métodos de ensayo no destructivos son técnicas que permiten inspeccionar los materiales o sus componentes sin que se vean afectadas sus propiedades, su integridad y su utilidad final. Estos métodos 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. (Acuña et al., 2006) mas otros

Para determinar las características mecánicas de la madera estructural, se pueden emplear pruebas no destructivas, como lo son el ultrasonido y las ondas de esfuerzo, entre otras. Estas pruebas están basadas en el fenómeno de que la capacidad de un cuerpo sólido para transferir una onda mecánica depende de sus propiedades, principalmente de su densidad y de su módulo de elasticidad (Ilic, 2003; Acuña et al., 2006; Conde-García et al., 2007; Maderebner et al., 2012; Wang, 2013).

La caracterización estructural de vigas de madera está orientada hacia la determinación de los valores necesarios para la asignación de una clase resistente con pruebas de flexión estática (UNE-EN 384:2010, UNE-EN 338:2010, Fernandez-Golfin et al., 2003). Por otra parte, se han desarrollado validaciones numéricas de los métodos estandarizados (Baño et al., 2012).

Sobre el uso de vigas en estructuras de madera, se puede encontrar información entre otros en: Meyer y Kellogg (1982), Sandoz (1989), Ross y Pellerin (1994), Boström y Holmqvist (1999), American Society for Testing and Materials (2000), Forest Products Laboratory (2000), Sandoz (2000a y 2002b), Kawamoto y Williams (2002), Pellerin y Ross (2002) y Grabianowski et al. (2006). Con todo, son escasos los valores experimentales del módulo de elasticidad para vigas empleadas en la industria de la construcción, particularmente evaluadas con ultrasonido y ondas de esfuerzo.

Para contribuir a la utilización correcta de la madera en la industria de la construcción, es aconsejable desarrollar métodos simples de caracterización de las propiedades mecánicas de vigas de madera. Por ejemplo, el módulo de elasticidad de la madera de una viga es necesario para el cálculo de su rigidez estructural, independientemente de la especie y de las características tecnológicas de la madera de la viga que puedan modificar su respuesta estructural, tales como el contenido de humedad y su distribución, así como la presencia y localización de nudos y de fisuras en el plano leñoso.

*Information about beams calculation can be found in handbooks and guides on design of wooden structures such as: American Society of Civil Engineers (1975), Ozelton and Baird (1976), Hoyle (1978), Faherty and Williamson (1989), Bodig (1992), American Institute of Timber Construction (1994), Morlier (1994), Smulski (1997) and Breyer et al. (2003).*

*The wood construction industry requires data of the mechanical strength of wood with dimensions and classifications suitable to be used as structural elements. Among the most important characteristics of wood, the modulus of elasticity is the parameter used to verify the serviceability limit state and the ultimate limit in lineal regimen (Orbe et al., 2010), for the probabilistic modeling of wood structures (Köhler et al., 2007) and the structural design and evaluation of structures in service (International Organization for Standardization, 2003).*

*Non-destructive test methods are technics that allow inspecting materials and their components without affecting their properties, integrity and final use. These methods can be used to detect, locate, measure and evaluate defects, to determine the materials' properties, as well as their composition, or to warrant their appropriate behavior when they are in use (Acuña et al., 2006), among others.*

*For determining mechanical characteristics of structural wood, non-destructive tests can be used, such as ultrasound and stress waves. These tests are based on the phenomenon of the capacity of a solid body being able to transfer a mechanical wave depends on its properties, mainly on density and modulus of elasticity (Ilic, 2003; Acuña et al., 2006; Conde-García et al., 2007; Maderebner et al., 2012; Wang, 2013).*

*The structural characterization of wood beams is geared towards the determination of the values that are necessary to assign a resistant class with static-type flexure tests (UNE-EN 384:2010, UNE-EN 338:2010, Fernandez-Golfin et al., 2003). Furthermore, numerical validations of standardized methods have been developed (Baño et al., 2012).*

*Information about the use of beams in wood structures can be found, among others, in: Meyer and Kellogg (1982), Sandoz (1989), Ross and Pellerin (1994), Boström and Holmqvist (1999), American Society for Testing and Materials (2000), Forest Products Laboratory (2000), Sandoz (2000a and 2002b), Kawamoto and Williams (2002), Pellerin and Ross (2002) and Grabianowski et al. (2006). Nevertheless, the experimental values of the modulus of elasticity are scarce for beams used in the construction industry; especially those evaluated using ultrasound and stress waves.*

*To contribute in order to the correct use of timber in the construction industry, it is advisable to develop simple methods to characterize the mechanical properties of wood beams. For example, the elasticity modulus of a wood beam is necessary to compute its structural rigidity, independently from the type and technological characteristics of the wood beam that may modify its structural response, such as its moisture content and distribution, as well as the presence and location of knots and cracking in the woody plane.*



Una opción para la determinación del módulo de elasticidad de elementos estructurales es la aplicación de métodos de evaluación no destructivos. La utilización de la velocidad del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo en la madera para determinar su módulo de elasticidad son técnicas que han probado su eficiencia al respecto (Pellerin y Ross, 2002).

La investigación sugiere como hipótesis de trabajo, que la aplicación de las técnicas de ultrasonido y de ondas de esfuerzo permite caracterizar de manera no destructiva, vigas de madera. Además, la investigación propone una estrategia experimental para la caracterización mecánica de vigas de madera y su aplicación como material de Ingeniería. El objetivo de la investigación fue determinar las velocidades de onda y los módulos de elasticidad de vigas de *Pinus* spp. empleando ultrasonido y ondas de esfuerzo.

## 2. Materiales y métodos

Se probaron 70 vigas de *Pinus* spp. recolectadas en aserraderos del Estado de Michoacán, México de 0.10 m x 0.15 m de sección transversal, 35 de 5 m y 35 de 6 m de longitud, con un contenido de humedad (H) promedio de 20 %. El género y especie de las maderas fueron establecidos en el lugar de acopio y su identificación botánica se realizó en los Laboratorios de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera.

Las vigas se pesaron y sus dimensiones se midieron. De esta forma, se calculó su densidad ( $\rho_H$ ). Posteriormente, se midió la velocidad del ultrasonido ( $v_{us}$ ) en la dirección longitudinal (L) con el aparato *Sylvatest*®. La velocidad de las ondas de esfuerzo ( $v_{oe}$ ) se midió con el aparato *Fakopp*® en la dirección longitudinal (L) (Figura 1a) y en la transversal (T) (Figura 1b). Ambas velocidades se calcularon con el cociente de la distancia entre los puntos de emisión de la onda y el de la recepción, y el tiempo de transmisión de la onda registrada por los aparatos (Pellerin y Ross, 2002). El contenido de humedad se midió con un higrómetro de resistencia eléctrica *Dostmann*® en tres posiciones equidistantes a lo largo de cada viga. El promedio de las tres mediciones se calculó como el contenido de humedad de la madera al momento del ensayo.

Una vez determinadas la densidad y la velocidad de onda, se procedió a calcular el módulo de elasticidad para el contenido de humedad correspondiente al momento de los ensayos (20 %).

*One option for determining the modulus of elasticity of structural elements is applying non-destructive evaluation methods. The use of the ultrasound velocity and stress waves' methods in wood to determine its elastic modulus are technics that have proven their efficiency on the matter (Pellerin and Ross, 2002).*

*Researches suggest as work hypothesis, that the application of the ultrasound and stress waves' technics allows characterizing wood beams in a non-destructive way. Moreover, this research proposes an experimental strategy for the mechanical characterization of wood beams and their application as an engineering material. The objective of the research was to determine the wave speeds and moduli of elasticity of *Pinus* spp. beams using ultrasound and stress waves.*

## 2. Materials and methods

70 *Pinus* spp. beams were collected from sawmills in the Mexican state of Michoacán, whose dimensions were 0.10 m x 0.15 m in the transverse direction, 35 beams of 5 m and 35 of 6 m length, with average moisture content (H) of 20%. The gender and type of timber were determined in the point of collection and the botanical identification was done in the laboratories of the Faculty of Engineering in Wood Technology.

Wood beams were weighed and their dimensions were measured; in this way, their density ( $\rho_H$ ) was computed. Lately, the ultrasound was measured ( $v_{us}$ ) in the longitudinal direction (L) with the *Sylvatest*® device. The speed of the stress waves ( $v_{oe}$ ) was measured with the *Fakopp*® device in the longitudinal (L) (Figure 1a) and the transverse direction (T) (Figure 1b) directions. Both speeds were calculated using the quotient between the distance among the wave's emission points and the reception point, and the wave's transmission time registered by the devices (Pellerin and Ross, 2002). The moisture content was measured with a *Dostmann*® hygrometer of electric resistance in three equidistant positions along each beam. The average of the three measurements was computed as the wood moisture content at the time of the tests.

Once the density and the wave speed were determined, the modulus of elasticity was calculated for the moisture content at the time of the tests (20%).



**Figura 1.** Medición del tiempo de transmisión de las ondas de esfuerzo en las vigas. a) Dirección longitudinal, b) Dirección transversal  
**Figure 1.** Measurement of the transmission time of the stress waves in beams. a) Longitudinal direction, b) Cross-section direction

Posteriormente, se realizó un segundo cálculo para ajustar la densidad a un contenido de humedad del 12 % con la fórmula (Unterwieser y Schickhofer, 2010):

Afterwards, a second calculation was done to adjust density to a moisture content of 12% using the formula (Unterwieser and Schickhofer, 2010):

$$\rho_{12} = \frac{\rho_H}{1 + 0.0042 * (H - 12)} \quad (1)$$

Donde:

$\rho_{12}$  = Densidad de la madera con un contenido de humedad de 12 % (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_H$  = Densidad de la madera con un contenido de humedad de H (kg/m<sup>3</sup>)  
 H = Contenido de humedad de la madera de 12 %

Where:

$\rho_{12}$  = Wood density with a moisture content of 12% (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_H$  = Wood density with a moisture content of H (kg/m<sup>3</sup>)  
 H = Wood moisture content of 12%

Igualmente, se ajustó la velocidad de onda para un contenido de humedad del 20 % al 12 % con la fórmula (Unterwieser y Schickhofer, 2010):

Likewise, the wave speed was adjusted for moisture content varying from 20% to 12% using the formula (Unterwieser and Schickhofer, 2010):

$$v_{12} = \frac{v_H}{1 - 0.0060 * (H - 12)} \quad (2)$$

Donde:

$v_{12}$  = Velocidad de onda en la madera con un contenido de humedad de 12 % (kg/m<sup>3</sup>)  
 $v_H$  = Velocidad de onda en la madera con un contenido de humedad de H (kg/m<sup>3</sup>)  
 H = Contenido de humedad de la madera de 12 %

Where:

$v_{12}$  = Wave speed in wood with 12% moisture content (kg/m<sup>3</sup>)  
 $v_H$  = Wave speed in wood with H moisture content (kg/m<sup>3</sup>)  
 H = Wood moisture content of 12%

Los módulos de elasticidad por ultrasonido se determinaron con la fórmula (Pellerin y Ross, 2002):

$$E_{us} = v_{us}^2 \rho_H \quad (3)$$

Donde:

$E_{us}$  = Módulo de elasticidad por ultrasonido (Pa)  
 $v_{us}$  = Velocidad del ultrasonido (m/s)  
 $\rho_H$  = Densidad de la madera con un contenido de humedad de H (kg/m<sup>3</sup>)

Where:

$E_{us}$  = Modulus of elasticity by ultrasound (Pa)  
 $v_{us}$  = Ultrasound speed (m/s)  
 $\rho_H$  = Wood density with H moisture content (kg/m<sup>3</sup>)

Los módulos de elasticidad por ondas de esfuerzo se determinaron con la fórmula (Pellerin y Ross, 2002):

The moduli of elasticity by stress waves were determined using the formula (Pellerin and Ross, 2002):

$$E_{oe} = v_{oe}^2 \rho_H \quad (4)$$

Donde:

$E_{oe}$  = Módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo (Pa)  
 $v_{oe}$  = Velocidad de las ondas de esfuerzo (m/s)  
 $\rho_H$  = Densidad de la madera con un contenido de humedad de H (kg/m<sup>3</sup>)

Where:

$E_{oe}$  = Modulus of elasticity by stress waves (Pa)  
 $v_{oe}$  = Speed of the stress waves (m/s)  
 $\rho_H$  = Wood density with H moisture content (kg/m<sup>3</sup>)





### 2.1 Diseño experimental

Se diseñó un experimento siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez-Pulido y de la Vara-Salazar (2012), que consistió en la comparación de medias de los parámetros módulo de elasticidad por ultrasonido ( $E_{us}$ ) y módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo ( $E_{oe}$ ); las variables de respuesta evaluadas fueron en la dirección de observación longitudinal (L). Se efectuaron 210 réplicas.

Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa *Statgraphics*®. Suponiendo una distribución normal con media cero ( $\bar{x} = 0$ ) y varianza constante ( $\sigma^2$ ) e independientes entre sí, se verificó la hipótesis nula  $H_0: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$ , y se contrastó con la hipótesis alterna  $H_A: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0$ . El método empleado para discriminar entre las medias fue el procedimiento de Fisher con una diferencia mínima significativa de 95 %.

## 3. Resultados y discusión

La Tabla 1 presenta la media aritmética ( $\bar{x}$ ), la desviación estándar ( $\sigma$ ) y el coeficiente de variación (CV) de las densidades ( $\rho_H$ ), velocidades ( $v_{us}$  y  $v_{oe}$ ) y módulos de elasticidad ( $E_{us}$  y  $E_{oe}$ ) de las 70 vigas de *Pinus* spp. para dos contenidos de humedad: el experimental igual a 20 % y el ajustado correspondiente a 12 % y para las direcciones longitudinal (L) y transversal (T).

### 2.1 Experimental design

The experience was designed following the recommendations of Gutiérrez-Pulido and de la Vara-Salazar (2012), which consisted in comparing the means of the parameters: modulus of elasticity using ultrasound ( $E_{us}$ ) and modulus of elasticity using stress waves ( $E_{oe}$ ). The response variables evaluated geared towards the longitudinal direction of observation (L). Two hundred and ten (210) reproductions were done.

Statistical calculation was done using the *Statgraphics*® software. Assuming a normal distribution with a mean equal to zero ( $\bar{x} = 0$ ) and constant variance ( $\sigma^2$ ), and independent between them; the null hypothesis  $H_0: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$  was verified and compared with the alternate hypothesis  $H_A: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0$ . The method used to discriminate among the means was Fisher's procedure with a minimum significant difference of 95%.

## 3. Results and discussion

Table 1 presents the arithmetical mean ( $\bar{x}$ ), standard deviation ( $\sigma$ ) and coefficient of variation (CV) of the densities ( $\rho_H$ ), velocities ( $v_{us}$  and  $v_{oe}$ ) and moduli of elasticity ( $E_{us}$  and  $E_{oe}$ ) of the 70 *Pinus* spp. beams for two moisture contents: the experimental one at 20% and the adjusted one at 12%, and in the longitudinal (L) and cross-section (T) directions.

**Tabla 1.** Densidades, velocidades y módulos de elasticidad de vigas de *Pinus* spp  
**Table 1.** Densities, velocities and moduli of elasticity of *Pinus* spp. beams

H = 20 %	$\rho_H$ (kg/m <sup>3</sup> )	$v_{us}$ L (m/s)	$E_{us}$ L (MPa)	$v_{oe}$ L (m/s)	$E_{oe}$ L (MPa)	$v_{oe}$ T (m/s)	$E_{oe}$ T (MPa)
$\bar{x}$	647	4,326	12,089	4,516	13,181	1,289	1,084
$\sigma$	90	363	2,019	333	2,099	135	267
CV	0.14	0.08	0.17	0.07	0.16	0.10	0.25
H = 12 %	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$v_{us}$ L (m/s)	$E_{us}$ L (MPa)	$v_{oe}$ L (m/s)	$E_{oe}$ L (MPa)	$v_{oe}$ T (m/s)	$E_{oe}$ T (MPa)
$\bar{x}$	626	4,544	12,905	4,744	14,071	1,354	1,158
$\sigma$	87	381	2,156	350	2240	142	285
CV	0.14	0.08	0.17	0.07	0.16	0.10	0.25

H = Contenido de humedad,  $\rho_H$  = Densidad al 20 % de contenido de humedad,  $\rho_{12}$  = Densidad al 12 % de contenido de humedad, v = Velocidad de onda, us = Ultrasonido, oe = Ondas de esfuerzo, L = Dirección longitudinal, T = Dirección transversal,  $\bar{x}$  = Media aritmética,  $\sigma$  = Desviación estándar, CV = Coeficiente de variación.  
H = Moisture content,  $\rho_H$  = Density at 20% moisture content,  $\rho_{12}$  = Density at 12% moisture content, v = Wave velocities, us = Ultrasound, oe = Stress waves, L = Longitudinal direction, T = Cross-section direction,  $\bar{x}$  = Arithmetical mean,  $\sigma$  = Standard deviation, CV = Coefficient of variation.



Los valores de las velocidades del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo concuerdan con resultados propuestos por Pellerin y Ross (2002) para madera de género y de densidad similares. Tanto la velocidad de onda como el módulo de elasticidad mostraron una diferencia importante según la dirección de medición. Los valores determinados en la dirección longitudinal de las vigas fueron siempre mayores que los correspondientes a la dirección transversal.

Las vigas presentaron un carácter anisotrópico en sus propiedades mecánicas. Los valores del módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal fueron 11.16 veces mayores a los correspondientes en la dirección transversal. Esta anisotropía coincide con los resultados sugeridos por Meyer y Kellogg (1982) y Breyer et al. (2003) para madera con dimensiones de empleo en la industria de la construcción. De tal forma, que para fines de diseño de una viga de madera, es necesario considerar la diferencia entre las magnitudes del módulo de elasticidad según las direcciones longitudinal y transversal.

Los valores del  $E_{us}$  y  $E_{oe}$  para la dirección longitudinal para madera con un contenido de humedad de 12 % fueron 6.75 % mayores que los correspondientes a un contenido de humedad de 20 %. Este resultado sugiere un factor de ajuste a la baja cuando el contenido de humedad de las vigas de madera aumente, fenómeno ocasionado por la combinación de una alta humedad relativa del aire y una baja en la temperatura ambiente, donde las vigas están instaladas.

Las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera (Gobierno del Distrito Federal, México, 2004), especifican para las clases A y B de madera estructural de coníferas, un módulo de elasticidad con valores de 9,810 MPa y 7,848 MPa, correspondientes respectivamente a las clases A y B. Los resultados para un contenido de humedad de 12 %, mostrados en la Tabla 1, posicionan a las vigas estudiadas en la clase A de madera estructural. Esta clasificación se refiere a la normativa en la Ciudad de México y puede ser tomada como referencia. Sin embargo, es recomendable realizar los ajustes necesarios de acuerdo a las condiciones de servicio reales en otra ciudad o región.

Es importante destacar, que el módulo de elasticidad determinado aquí, se refiere a una sollicitación dinámica, lo cual implica una magnitud mayor en comparación a valores determinados con sollicitaciones en condición estática, de acuerdo a los resultados propuestos por Bodig y Jayne (1982) y Pellerin y Ross (2002). Los valores presentados, ejemplifican parámetros para piezas de madera con dimensiones que se emplean habitualmente en la industria de la edificación en México.

La densidad aparente de la madera medida con un contenido de humedad del 20 % en el momento de las pruebas, es menor si se ajusta el contenido de humedad a 12 %. La Figura 2a esquematiza la distribución de los valores de la densidad para contenidos de humedad de 20 % y 12 %. Dado que existen valores iguales o similares, aparentemente en el gráfico no se muestran todos los valores y/o puntos experimentales. Este efecto de escala aplica de igual forma para la Figura 2b. Las líneas rectas que limitan la distribución de los valores experimentales, representan las tendencias de los modelos de ajuste de la Fórmula (1) cuando se hace variar el contenido de humedad de la madera con una densidad calculada máxima (recta superior) y mínima (recta inferior), para contenidos de humedad correspondientes a 20 % y 12 %.

*The values of ultrasound velocity and stress waves are consistent with the results proposed by Pellerin and Ross (2002) for wood of similar gender and density. Both the wave speed and the modulus of elasticity showed a significant difference depending on the measurement direction. The values determined in the beams' longitudinal direction were always higher than those in the cross-section direction.*

*Beams presented an anisotropy character in their mechanical properties. The values for the modulus of elasticity using stress waves in the longitudinal direction were 11.16 times higher than those in the cross-section direction. This anisotropy is consistent with the results suggested by Meyer and Kellogg (1982) and Breyer et al. (2003) for wood with construction-industry dimensions. Therefore, for wood beam design purposes, the difference between the magnitudes of the modulus of elasticity according to the longitudinal and cross-section directions should be considered.*

*The values of  $E_{us}$  and  $E_{oe}$  in the longitudinal direction for wood with moisture content of 12% were 6.75% higher than those corresponding to the 20% moisture content. This result suggests a downward adjustment factor when the moisture content of wood beams increases, a phenomenon caused by the combination of high relative humidity of air and the room temperature reduction, in the place where beams are installed.*

*Complementary technical standards for design and construction of wood structures (Government of the Federal District, Mexico, 2004) specify for class A and B structural pine wood a modulus of elasticity of 9,810 MPa and 7,848 MPa, corresponding to class A and B respectively. The results for 12% moisture content shown in Table 1 classify the studied beams in the category of class A structural wood. This classification refers to the standards of Mexico City and can be taken as a reference. However, it is recommendable to make the necessary adjustments according to the real service conditions in another city or region.*

*It is important to highlight that the modulus of elasticity determined here refers to dynamic loading, which implies a greater magnitude compared with values determined with static loading condition, in accordance with the results proposed by Bodig and Jayne (1982) and Pellerin and Ross (2002). The values illustrate parameters for wood pieces with dimensions usually employed in the Mexican construction industry.*

*The apparent density of wood measured with a moisture content of 20% at the time of the tests, is lower if the moisture content is adjusted to 12%. Figure 2a schematizes the distribution of the density values for moisture contents of 20% and 12%. Since there are equal or similar values, apparently the graph does not show all the values and/or experimental points. This scale effect equally applies to Figure 2b. The straight lines that limit the distribution of the experimental values represent the trends of the adjustment models of Equation (1) when the wood's moisture content is modified with a maximum calculated density (upper straight line) and minimum one (lower straight line), for moisture contents of 20% and 12%.*

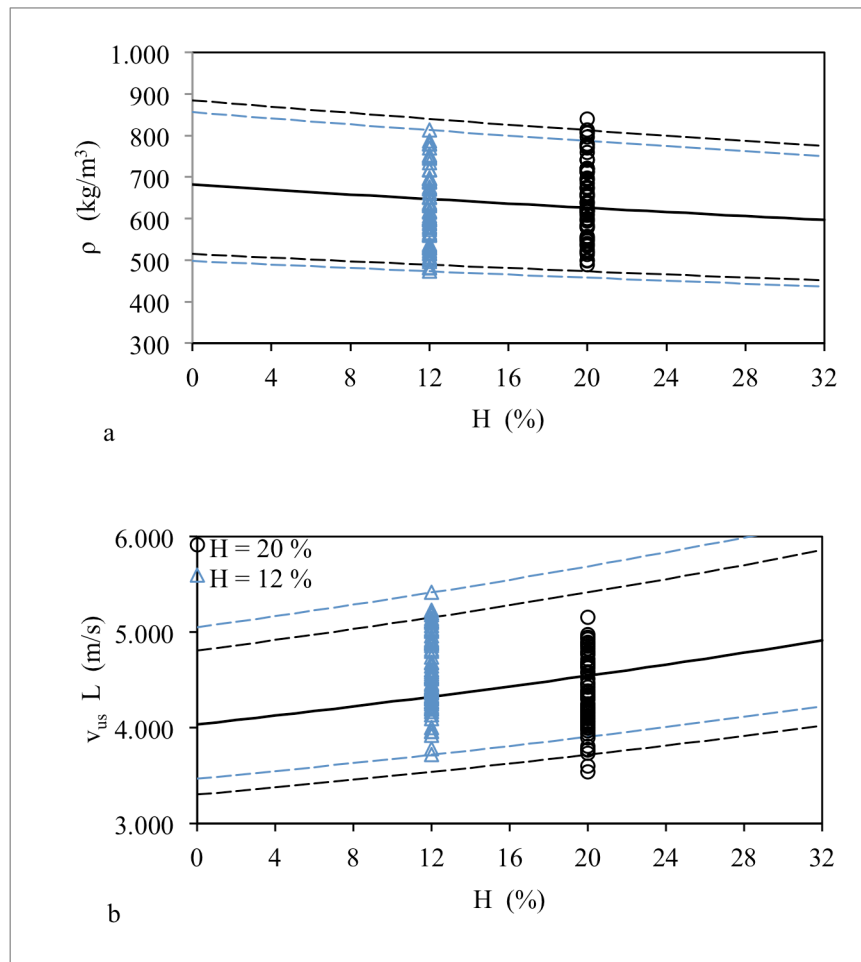


En contraste, la velocidad de onda aumenta si se ajusta el contenido de humedad. La Figura 2b, muestra el aumento de la velocidad del ultrasonido en la dirección longitudinal si se ajustan los valores experimentales ( $H = 20\%$ ) a un contenido de humedad de  $12\%$ . Con un enfoque analítico similar al de la variación de la densidad, las líneas rectas que limitan la distribución de los valores experimentales, representan las tendencias de los modelos de ajuste de la Fórmula (2) cuando se hace variar el contenido de humedad de la madera con una velocidad de onda máxima (recta superior) y mínima (recta inferior), para contenidos de humedad de  $20\%$  y  $12\%$ .

Una vez ajustadas la densidad y la velocidad de onda, se puede determinar el módulo de elasticidad por ultrasonido y/o ondas de esfuerzo empleando las Fórmulas (3) y (4). Estos resultados se contrastan con ayuda de la Tabla 1, que presenta la comparación de los valores promedio del módulo de elasticidad  $E_{us}$  al pasar de  $20\%$  a  $12\%$  de contenido de humedad.

*In contrast, the wave velocity increases if the moisture content is adjusted. Figure 2b shows the increase of ultrasound velocity in the longitudinal direction when experimental values ( $H = 20\%$ ) are adjusted to a moisture content of  $12\%$ . With an analytical approach similar to the density variation, the straight lines that limit the distribution of the experimental values, represent the trends of the adjustment models of Equation (2) when the wood's moisture content is modified with a maximum wave speed (upper straight line) and minimum one (lower straight line), for moisture contents of  $20\%$  and  $12\%$ .*

*Once the density and wave speed are adjusted, the modulus of elasticity using ultrasound and/or stress waves can be determined with Equations (3) and (4). These results are compared with the help of Table 1, which compares the average values for modulus of elasticity  $E_{us}$  when going from a moisture content of  $20\%$  to  $12\%$ .*



**Figura 2.** Distribución de los valores de: a) Densidad ( $\rho$ ) y b) Velocidad de onda del ultrasonido ( $v_{us}$ ), en función del contenido de humedad (H)

**Figure 2.** Distribution of the values for: a) Density ( $\rho$ ) and b) Ultrasound wave speed ( $v_{us}$ ), in terms of moisture content (H)

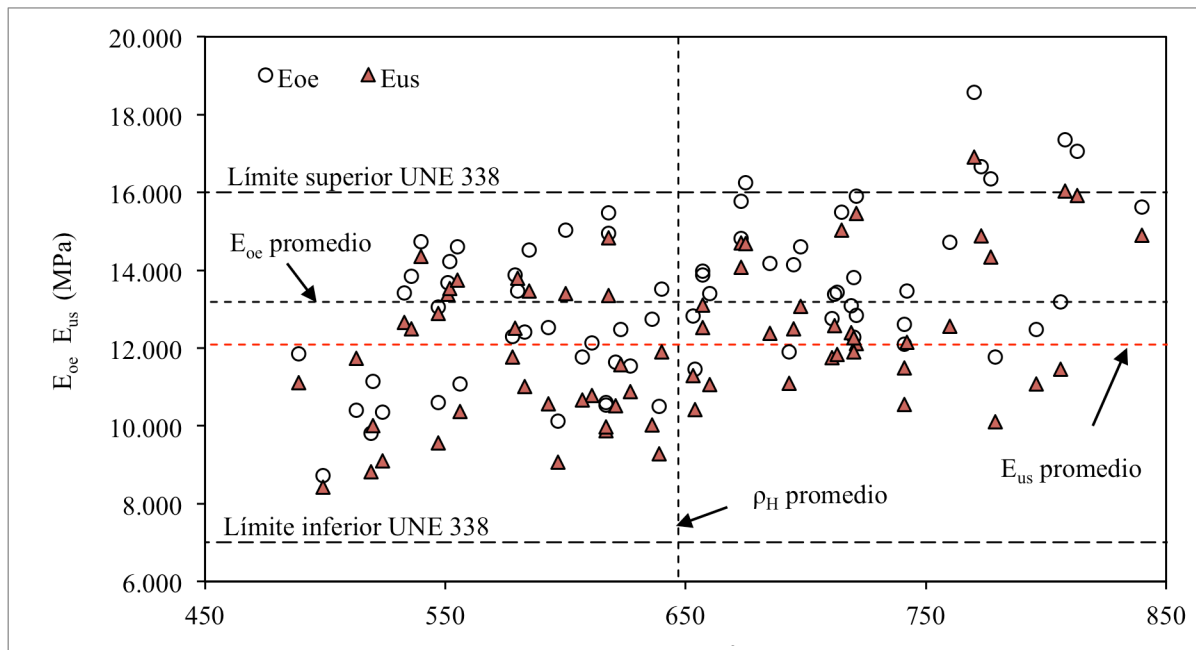


Esta comparación aritmética de valores promedio, sugiere una diferencia en la magnitud de los módulos estudiados ( $E_{oe} L / E_{us} L = 1.09$ ). Sin embargo, si se grafican los valores experimentales de los módulos de elasticidad correspondientes a cada viga, es difícil identificar esta diferencia. De tal forma, que es complicado escoger un valor experimental para emplearlo en diseño de productos o para el cálculo estructural.

La Figura 3, presenta la distribución de los valores de los módulos de elasticidad por ondas de esfuerzo ( $E_{oe}$ ) y por ultrasonido ( $E_{us}$ ) en función de la densidad ( $\rho_H$ ). Ningún valor de los módulos de elasticidad es menor al límite inferior propuesto por la norma UNE 338 (UNE-EN 384:2010) y cerca del 5 % es mayor al límite superior correspondiente. Para fines prácticos, la magnitud de los módulos de elasticidad se confunde entre las dos técnicas estudiadas.

*This arithmetical comparison of average values suggests a difference in the magnitude of the studied modules ( $E_{oe} L / E_{us} L = 1.09$ ). However, if each beam's experimental values for moduli of elasticity are illustrated in a graph, it is not easy to identify this difference. Therefore, it is complicated to choose an experimental value to use it in product design or for structural calculation.*

*Figure 3 presents the distribution of the values for moduli of elasticity using stress waves ( $E_{oe}$ ) and ultrasound ( $E_{us}$ ) in terms of density ( $\rho_H$ ). None of the moduli of elasticity values is lower than the lower limit proposed by the UNE 338 standard (UNE-EN 384:2010) and nearly 5 % is higher than the corresponding upper limit. For practical purposes, the magnitude of the moduli of elasticity between the two studied techniques is confused.*



**Figura 3.** Distribución de los valores de los módulos de elasticidad por ondas de esfuerzo ( $E_{oe}$ ) y por ultrasonido ( $E_{us}$ ) en función de la densidad ( $\rho_H$ )

**Figure 3.** Distribution of the values for moduli of elasticity using stress waves ( $E_{oe}$ ) and ultrasound ( $E_{us}$ ) in terms of density ( $\rho_H$ )

Para solventar esta ambigüedad, se realizó una prueba t-Student de comparación de medias, con la hipótesis nula  $H_0 : \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$ , para un nivel de significancia del 95 %. Esta prueba se aplicó a los valores experimentales ( $H = 20\%$ ) y a los valores ajustados ( $H = 12\%$ ). Los resultados se presentan en la Tabla 2. Un análisis análogo se practicó para los datos de las pruebas de ondas de esfuerzo, con resultados similares.

*In order to resolve this ambiguity, a Student's t-test was made for comparing two means, with the null hypothesis  $H_0 : \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$ , for a 95% significance value. The test was applied to the experimental values ( $H = 20\%$ ) and the adjusted values ( $H = 12\%$ ). Results are presented in Table 2. An analogue analysis was carried out for the tests' stress wave data, with similar results.*





**Tabla 2.** Pruebas t-Student para módulos de elasticidad  
**Table 2.** Student's t-test for moduli of elasticity

	H = 20 %	H = 12 %	$H_0 : \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$
Ultrasonido	$E_{us} L$	$E_{us} L$	-
$\bar{x}$	12.089	12.905	Se rechaza/ Rejected
Ondas de esfuerzo	$E_{oe} L$	$E_{oe} L$	-
$\bar{x}$	13.181	14.071	Se rechaza/ Rejected

H = Contenido de humedad, E = Módulo de elasticidad, us = Ultrasonido, oe = Ondas de esfuerzo, L = Dirección longitudinal,  $H_0$  = Hipótesis nula,  $\bar{x}$  = Media aritmética.  
H = Moisture content, E = Modulus of elasticity, us = Ultrasound, oe = Stress waves, L = Longitudinal direction,  $H_0$  = Null Hypothesis,  $\bar{x}$  = Arithmetical mean

El rechazo de la hipótesis nula entre las medias, confirma que para fines prácticos, es necesario tomar en consideración el contenido de humedad de la madera: los valores del módulo de elasticidad son mayores cuando disminuye el contenido de humedad.

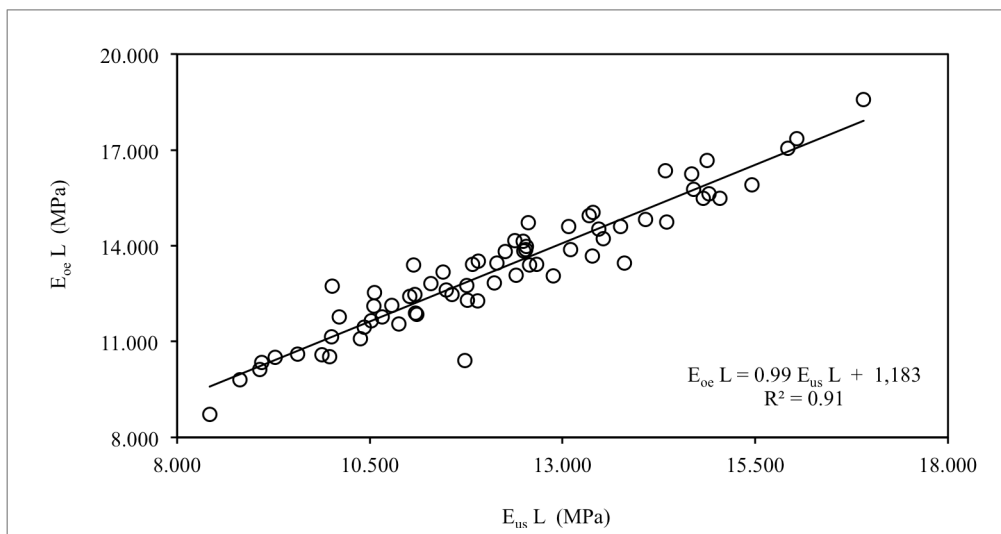
Sin embargo, el módulo de elasticidad es una característica unívoca de un material, independientemente del método empleado para su determinación. En este caso de estudio, queda la duda de la causa de las diferencias entre las magnitudes obtenidas según la técnica empleada: la dirección de la sollicitación fue la misma, es decir, en la dirección longitudinal; el modelo teórico, representado por las ecuaciones empleadas, fue similar y las mediciones se efectuaron sobre el mismo material, es decir, en las mismas vigas, con un contenido de humedad y características estructurales iguales.

La Figura 4 presenta la correlación lineal entre el módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo, en función del módulo de elasticidad por ultrasonido, ambos en la dirección longitudinal. Este resultado con un alto coeficiente de determinación ( $R^2$ ), sugiere que la técnica de ultrasonido es buen predictor del módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo.

*The rejection of the null hypothesis between the means confirms that, for practical purposes, wood's moisture content should be considered: the values of the modulus of elasticity are higher when the moisture content decreases.*

*However, the modulus of elasticity is a material's univocal characteristic, regardless of the method employed for its determination. In this case study, the reason that explains the differences between the magnitudes obtained through the selected technique remains ambiguous: the loading direction was the same, that is, in the longitudinal direction; the theoretical model was similar, represented by the equations used, and measurements were made on the same material, that is, on the same beams, with the same moisture content and structural characteristics.*

*Figure 4 presents the linear correlation between the modulus of elasticity using stress waves, in terms of the modulus of elasticity using ultrasound, both in the longitudinal direction. This result with a high coefficient of determination ( $R^2$ ) suggests that the ultrasound technique is a good predictor of the modulus of elasticity using stress waves.*



**Figura 4.** Módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo ( $E_{oe}$ ) en función del módulo de elasticidad por ultrasonido ( $E_{us}$ ). Ambos en la dirección longitudinal (L).  $R^2$  = Coeficiente de determinación

**Figure 4.** Modulus of elasticity using stress waves ( $E_{oe}$ ) in terms of the modulus of elasticity using ultrasound ( $E_{us}$ ). Both in the longitudinal direction (L).  $R^2$  = Coefficient of determination



## 4. Conclusiones

Las técnicas de ultrasonido y de ondas de esfuerzo permitieron determinar la velocidad de onda y los módulos de elasticidad de setenta vigas de madera de *Pinus* spp.

Las velocidades de transmisión presentaron coeficientes de variación coherentes a la heterogeneidad material de la madera. Los valores de estos coeficientes se incrementaron cuando se calcularon características de segundo nivel, como es el caso de los módulos de elasticidad.

La velocidad y el módulo de elasticidad mostraron un carácter de anisotropía importante para el cálculo de la resistencia mecánica de las vigas. Los valores determinados en la dirección longitudinal de las vigas fueron siempre mayores que los correspondientes a la dirección transversal.

Las mediciones de los módulos de elasticidad determinados en vigas con contenidos de humedad mayores al 12 %, deben ajustarse a un contenido de humedad recomendado por la normativa vigente y/o a las condiciones de servicio de las vigas.

Los valores de los módulos de elasticidad en la dirección longitudinal presentan una diferencia numérica y significativamente estadística según la técnica empleada para su determinación. Los parámetros calculados con el método de ondas de esfuerzo resultaron mayores a los determinados con ultrasonido.

## 4. Conclusions

*The ultrasound and stress wave techniques allowed determining the wave speed and the moduli of elasticity of seventy Pinus spp. wood beams.*

*The transmission speeds presented coefficients of variation consistent with the material heterogeneity of wood. The values of these coefficients increased when the second-level characteristics were calculated, such as the modulus of elasticity.*

*Speed and the modulus of elasticity showed a significant anisotropy character for the mechanical strength calculation of the beams. Values determined in the longitudinal direction of the beams were always higher than those of the cross-section direction.*

*The measurements of the modulus of elasticity determined on beams with moisture contents higher than 12% should be adjusted to a moisture content recommended by the standard in force and/or to the service conditions of the beams.*

*The values of the modulus of elasticity in the longitudinal direction present a statistically significant numerical difference according to the techniques used for its determination. Parameters calculated with the stress wave method were higher than those determined with ultrasound.*

## 5. Referencias/References

- Acuña L., Díez M. R., Casado M. (2006)**, Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a *Pinus pinaster* ait. Boletín Informativo CIDEU, 2, 7-26.
- American Society for Testing and Materials (2000)**, ASTM D-198. Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes, Annual Book of ASTM Standards, Section Four; Construction, Volume 04.10, Wood, USA.
- American Society of Civil Engineers (1975)**, Wood Structures: A Design Guide and Commentary, American Society of Civil Engineers, USA.
- Baño V., Arguelles-Bustillo R., Regueira R., Guaita M. (2012)**, Determinación de la curva tensión-deformación en madera de '*Pinus sylvestris*' L. para la simulación numérica de vigas de madera libre de defectos, *Materiales de Construcción*, 62, 306, 269-284.
- Bodig J., Jayne B.A. (1982)**, *Mechanics of Wood Composites*, Van Nostrand Reinhold, USA.
- Bodig J. (1992)**, Editor, *Reliability-Based Design of Engineered Wood Structures*, Series E: Applied Sciences, Vol. 215, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Boström L., Holmqvist C. (1999)**, State of the art on machine strength grading, in: First RILEM symposium on timber engineering, Stockholm, Sweden. Swedish National Testing and Research Institute, Rilem Publications, pp: 513-522.
- Breyer D. E., Fridley K. J., Pollock D. G., Cobeen K. E. (2003)**, Fifth edition, *Design of Wood Structures ASD*, McGraw-Hill, USA.
- Conde García M., Fernández-Golfín Seco J. I., Hermoso Prieto E. (2007)**, 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*, 57, 288, 49-59.
- Faherty K. F., Williamson T. G. (1989)**, Editors, Third edition, *Wood Engineering and Construction Handbook*, McGraw-Hill, USA.
- Fernández-Golfín J. I., Díez M. R., Hermoso E. (2003)**, Relationships between grade determining properties of Spanish Scots and Laricio Pine structural timber, *Materiales de Construcción*, 53, 270, 44-45.
- Forest Products Laboratory (2000)**, Stress wave timing nondestructive evaluation tools for inspecting historic structures, A guide for use and interpretation, Gen. Tech. Rep. FPL-119. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, USA.
- Gobierno del Distrito Federal (2004)**, Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera, I: 103-BIS, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.
- Grabianowski M., Manley B., Walker J. C. F. (2006)**, Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber, *Wood Science and Technology*, 40, 205-216.
- Gutiérrez Pulido H., de la Vara Salazar R. (2012)**, 3ª Edición, *Análisis y diseño de experimentos*, Mc Graw Hill, México.
- Hoyle R. J. Jr. (1978)**, *Wood technology in the Design of Structures*, Fourth edition, Mountain Press Publishing, USA.
- Ilic J. (2003)**, Dynamic MOE of 55 species using small wood beams, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61, 167-172.
- International Organization for Standardization (2003)**, International Standard ISO 13822, Bases for design of structures - Assessment of existing structures, Belgium.
- Kawamoto S., Williams R. S. (2002)**, Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood-based composites, A review, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-134, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, USA.
- Köhler J., Sørensen J. D., Faber M. H. (2007)**, Probabilistic modeling of timber structures, *Structural Safety*, 29, 255-267.



- Maderebner R., Anton Kraler A., Beikircher W. K., Flach M. (2012)**, Influence on measuring results by knottiness of ultrasound measurements of bending stress-section spruce wood beams, In: World Conference on Timber Engineering, Pierre Quenneville (ed.), pp: 83-91, Auckland, New Zealand.
- Meyer R. W., Kellogg R. M. (1982)**, Editors, Structural Use of Wood in Adverse Environments, Society of Wood Science and Technology, Van Nostrand Reinhold, USA.
- Morlier P. (1994)**, Editor, Creep in Timber Structures, Report of RILEM Technical Committee 112-TSC, Chapman & Hall, England.
- Orbe A., Cuadrado J., Rojí E., Maturana A. (2010)**, Arquitectura y Madera, Guía de diseño de elementos estructurales adaptada al CTE, Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, España.
- Ozelton E. C., Baird J. A. (1976)**, Timber Designer's Manual, England.
- Pellerin R. F., Ross R. J. (2002)**, Nondestructive Evaluation of Wood, Forest Products Society, USA.
- Ross R. J., Pellerin R. F. (1994)**, Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70 (Rev.), Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, USA.
- Sandoz J. L. (1989)**, Grading of construction timber by ultrasonic, Wood Science and Technology, 23, 95-108.
- Sandoz J. L. (2000a)**, Wood Testing Using Acousto-Ultrasonic, Publication IBOIS 00:23, Institut de Statique et Structures IBOIS, Construction en Bois, in: Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2000), Whistler Resort, British Columbia, Canada.
- Sandoz J. L. (2002b)**, High Performance Timber by Ultrasonic Grading, Publication IBOIS 00:20, Institut de Statique et Structures IBOIS, Construction en Bois, in: Proceedings of the 7th World Conference on Timber Engineering (WCTE 2002), MARA University of Technology, Malaysia.
- Smulski S. (1997)**, Editor, Engineered Wood Products, A Guide for Specifiers, Designers and Users, PFS Research Foundation, USA.
- UNE-EN 384:2010. (2010)**, Madera Estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.
- UNE-EN 338:2010. (2010)**, Madera Estructural. Clases resistentes, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.
- Unterswieser H., Schickhofer G. (2010)**, Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency and ultrasonic runtime measurement, European Journal of Forest Products, 69(2), 171-181.
- Wang X. (2013)**, Stress Wave E-Rating of Structural Timber-Size and Moisture Content Effects. In: Proceedings: 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, Ross, R.J., Wang, X. (eds.) General Technical Report FPL-GTR-226, pp: 38-46, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, USA.

