Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos

Javier Ramón Sotomayor Castellanos

Morelia, Michoacán, México. 2014.

ISBN: 978-607-00-8079-1

Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos

Javier Ramón Sotomayor Castellanos

Ingeniero en Tecnología de la Madera Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Morelia, Michoacán, México. 2014.

Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos/ Javier Ramón Sotomayor Castellanos

Primera Edición 2014 Morelia, Michoacán, México Derechos Reservados conforme a la ley

Responsable de la edición: Javier Ramón Sotomayor Castellanos.

Diseño y formación: Laboratorio de Mecánica de la Madera de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.

Edición digital 795 KB Incluye bibliografía e Índice

ISBN: 978-607-00-8079-1

Derechos reservados.

© Javier Ramón Sotomayor Castellanos Calle Llano Grande 295 Fraccionamiento Valle de Los Sauces C.P. 58190 Morelia, Michoacán, México

© Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Edificio "TR", Ciudad Universidad Avenidad Francisco J. Mújica s/n., C.P. 58030 Teléfono: 01 443 322 3500, Morelia Michoacán

El Contenido de esta obra es propiedad del autor y de las instituciones patrocinadoras de la publicación, queda prohibida conforme a la ley su reproducción total o parcial.

Editado digitalmente en México / Electronically edited in Mexico

Sotomayor Castellanos, J.R. 2014. *Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 339 p.

CONTENIDO

PF	RESENTACIÓN	6
1.	Comportamiento a la ruptura de probetas modificadas de madera de <i>Prosopis sp.</i>	7
2.	Behavior of non-destructive modulus of elasticity of <i>Prosopis</i> sp. wood in relation to variation of its mass	13
3.	Moisture content, frequency and modulus of elasticity of <i>Pinus douglasiana</i> studied using transversal vibration	27
4.	Módulos de elasticidad evaluados por métodos no destructivos y ruptura de la madera de <i>Pinus douglasiana</i> . Vibraciones transversales, ultrasonido, ondas de esfuerzo y flexión estática	38
5.	Comportamiento viscoelástico de la madera de Prosopis sp	52
6.	Velocidad del ultrasonido en la madera de Picea sp. y de Acer sp	65
7.	Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos	76
8.	Frecuencia de vibración de árboles y sus relaciones con algunas características físicas y mecánicas de la madera de <i>Cryptomeria japonica</i> D. Don.	106
9.	Caracterización dinámica de la madera de <i>Abies</i> sp. por métodos no destructivos	138
10.	Higroscopía y anisotropía de la madera de Pinus michoacana, <i>Pinus douglasiana y Pinus pringlei</i> . Higrocontracción, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad dinámico.	151
11.	Tratamiento higro-térmico y pruebas de ultrasonido en la madera de <i>Pinus douglasiana</i> y de Quercus spp	183
12.	Módulos de elasticidad dinámicos e indicadores de calidad de cinco maderas mexicanas estudiadas por métodos no destructivos	193

13.	Características dinámicas e indicadores de calidad de la madera de <i>Lysiloma</i> spp. (Tzalam) del Estado de Quintana Roo. Estudio por métodos no destructivos	2
14.	Módulos de elasticidad e indicadores de calidad de la madera de <i>Quercus</i> spp. (Encino) del Estado de Michoacán. Determinados por ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones	3
15.	Módulo de elasticidad de la madera de <i>Pinus douglasiana</i> expuesta a condiciones extremas de temperatura y de contenido de humedad239	9
16.	Dispositivo de usos múltiples para pruebas no destructivas en madera y materiales compuestos de madera. Ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones transversales	8
17.	Caracterización mecánica por ondas de esfuerzo de madera plastificada de <i>Quercus scytophylla</i>	0
18.	Evaluación mecánica por métodos no destructivos de vigas de madera de <i>Picea abies</i>	2
19.	Caracterización no destructiva de vigas de madera de <i>Pinus</i> spp. utilizando ultrasonido y ondas de esfuerzo29	3
20.	NDE methods applied to the study of a wood beam's discontinuity	3
21.	Velocidad de onda y módulos de elasticidad por ultrasonido y ondas de esfuerzo de vigas de madera de <i>Pinus</i> spp	6

PRESENTACIÓN

El libro *Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos* es una selección de trabajos de investigación desarrollados en el Laboratorio de Mecánica de la Madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, Michoacán, México.

El periodo durante el cual fueron realizadas las investigaciones fue de diez años a partir de 2003.

El libro esta formado por 21 artículos divulgados en la revista *Investigación e Ingeniería de la Madera*, publicación del Laboratorio y de la cual el autor es el Editor. Alumnos y profesores de la Facultad que participaron en los trabajos, así como los colaboradores de otras instituciones, son citados como coautores en los textos originales y en el comité editorial de la revista. Las instituciones que favorecieron las investigaciones son igualmente refereridas en los artículos publicados.

Las funciones del autor fueron principalmente establecer las preguntas de investigación, las hipótesis, dirigir los procedimientos experimentales y realizar el análisis de resultados. Finalmente, la preparación y la edición de los manuscritos originales estuvieron a su cargo.

Cada artículo forma un capítulo y esta integrado por titulo, resumen, palabras clave, introducción, objetivos, materiales y métodos, resultados, analisis, conclusiones y referencias. Cuando es pertinente, se presentan anexos.

El objetivo de este libro es facilitar a los alumnos y a los Ingenieros en Tecnología de la Madera el acceso a los resultados de investigación generados en el Laboratorio de la Facultad.

Información sobre los trabajos del Laboratorio de Mecánica de la Madera, puede ser consultada en las páginas de la red:

www.fitecma.umich.mx www.cic.umich.mx www.academia.edu www.researchgate.net http://laboratoriodemecanicadelamadera.weebly.com/

1. COMPORTAMIENTO A LA RUPTURA DE PROBETAS MODIFICADAS DE MADERA DE *PROSOPIS SP.*

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es determinar los Módulos de Elasticidad y de Ruptura en flexión de probetas de madera de *Prosopis sp.* e identificar su modo de ruptura. Para lograrlo, se realizaron ensayos estáticos no destructivos de flexión transversal en probetas con orificios de 2.38 mm de diámetro.

Los principales resultados fueron: El Módulo de Elasticidad y el Módulo de Ruptura fueron similares a los valores de maderas del mismo género encontrados en la bibliografía. El Módulo de Ruptura presentó una correlación importante con respecto al Módulo de Elasticidad. Las probetas presentaron ruptura del tipo tensión transversal a la dirección de la fibra en un 89% y por otra parte, las probetas cuyo modo de ruptura fue en tensión simple representaron un 11%, denotando valores del MOE mayores con respecto al valor promedio del conjunto de las probetas.

Palabras clave: Módulo de Ruptura, Módulo de Elasticidad, Deterioro artificial.

INTRODUCCIÓN

La madera es un material biodegradable según Nicholas y Loos (1973a y 1973b) y Wilcox (1978) el ataque de hongos, bacterias e insectos es un tipo de deterioro. De acuerdo con los estudios de Meyer y Kellogg (1982), entre los principales efectos de la acción de organismos xilófagos en la madera, están la destrucción del tejido leñoso y la aparición de perforaciones en la madera, que trae como resultado la disminución de su masa y resistencia mecánica. Debido a esto, la morfología de las estructuras de madera en edificaciones antiguas, sufre deterioro al paso del tiempo. Con el objeto de asegurar su confiabilidad estructural y valor patrimonial es recomendable su evaluación mecánica periódica.

En la práctica cotidiana de evaluación del estado tecnológico de la madera en estructuras, es difícil coincidir con la oportunidad de acceder a material experimental que ha estado en servicio durante mucho tiempo. La solución práctica propuesta para solucionar esta problemática, es experimentar con madera artificialmente deteriorada y utilizar modelos analógicos para contrastar resultados de laboratorio con los datos de campo. Por ejemplo, las galerías naturales producidas por los insectos pueden ser substituidas por orificios y ranuras confeccionados sistemáticamente en probetas de ensayo, y para el caso de ataque de bacterias y hongos, la pérdida de masa originada por estos agentes puede ser simulada por la extracción de materia leñosa del interior de probetas de ensayo. Así, los resultados experimentales de esta equivalencia estructural pueden ser útiles para fines de comparación con madera deteriorada en condiciones reales de funcionamiento en edificaciones antiguas Villaseñor (2005).

La madera del género *Prosopis* no ha sido estudiada en México en condiciones de ruptura en flexión estática. Sin embargo, Tortorelli (1956) y Berni y col. (1979) presentan datos sobre

el Módulo de Elasticidad (MOE) en un rango entre 6 y 7 GPa. Así mismo, estos autores presentan resultados para el Módulo de Ruptura (MOR) entre 44 y 144 MPa para maderas del mismo género con un contenido de humedad de 12% y para densidades con valores entre 800 y 1270 kg/cm³. Sotomayor (2002) presenta valores del Módulo de Ruptura de *Prosopis juliflora* de 94 MPa para una densidad de 700 kg/m³.

Por otra parte, es también notoria la ausencia de estudios sobre la resistencia a la ruptura de probetas modificadas artificialmente, circunstancia que motivó la Tesis de Villaseñor (2005), trabajo sobre el cual está basado el presente reporte.

El objetivo de la presente investigación es determinar los Módulos de Elasticidad y de Ruptura en flexión de probetas de madera de *Prosopis sp.* y determinar su modo de ruptura.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material experimental se obtuvo de una troza de *Prosopis sp.* (Mezquite), a partir del cual se elaboraron 18 probetas normalizadas, con dimensiones de 20 x 20 x 320 mm de acuerdo a la norma ISO 3349-1975, a las cuales se les realizaron ensayos estáticos no destructivos de flexión transversal de acuerdo a Villaseñor (2005).

Para simular el deterioro natural de la madera, se elaboraron orificios de 2.38 mm de diámetro en nueve probetas en la dirección tangencial y en nueve probetas en la dirección radial, tal como se ilustra en la figura 1. Estas probetas modificadas sirvieron para las pruebas a la ruptura según la norma ISO 3133-1975.



Figura 1. Probetas normalizadas y modificadas esquematizando los orificios artificiales.

El Módulo de Elasticidad estático se calculó con la fórmula (1), donde: MOE = Módulo de Elasticidad estático de la madera (Pa); ΔP = Intervalo de carga, ensayos no destructivos (N); Δy = Intervalo de deformación (m); l = Claro entre apoyos de la probeta (m); I = Momento de Inercia de la sección transversal de la probeta (m⁴).

$$MOE = \frac{\Delta P}{\Delta y} \frac{l^3}{48 I}$$
(1)

El Módulo de Ruptura, se calculó con la fórmula (2), donde: $MOR = Módulo de Ruptura de la madera (Pa); P_{rup} = Carga a la ruptura de la probeta (N); l = Portada de ensayo (m); b = Base de la probeta (m); h = Altura de la probeta (m).$

MOR =
$$\frac{3}{2} \frac{P_{rup} l}{b h^2}$$
 (2)

RESULTADOS Y ANALISIS

Módulos de Elasticidad y de Ruptura.

La prueba *t* de *Student* de comparación de medias para muestras independientes entre los valores tangenciales y radiales para los Módulos de Elasticidad (MOE) y los Módulos de Ruptura (MOR) para un nivel de confiabilidad del 95 % dió como resultado intervalos y valores calculados de probabilidad *p* que no permiten rechazar la hipótesis nula (H₀: $\mu_1 = \mu_2$ para las muestras radial y tangencial). Estos resultados sugieren que estadísticamente no existe una diferencia significativa entre las orientaciones radial y tangencial de las probetas y permite agrupar los resultados en un sólo grupo experimental de 18 probetas, tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Estadígrafos del Módulo de Elasticidad y del Módulo de Ruptura.

MOE	MOR
(MPa)	(MPa)
5450	50
219	3
-0.029	0.435
-0.235	0.434
18	18
	MOE (MPa) 5450 219 -0.029 -0.235 18

Los valores de la media muestral para el Módulo de Elasticidad y para el Módulo de Ruptura determinados sobre 18 probetas modificadas, con una disminución de masa en promedio de 9% cada una, están conformes a los valores encontrados en la bibliografía para resultados con probetas normalizadas. Por otra parte, los valores estimados de asimetría y de curtosis permiten considerar que la distribución de los resultados es semejante a una distribución normal, para un nivel de confiabilidad del 95 %, tal como se detalla en la tabla 1.

El Módulo de Ruptura presentó una correlación importante con respecto al Módulo de Elasticidad, como se observa en la figura 2, confirmando de esta manera que el MOE es un buen predictor de los valores de resistencia mecánica en flexión, resultado que coincide con las conclusiones de Illic (2001), entre otros autores.





Modo de ruptura.

Las probetas presentaron ruptura del tipo tensión transversal a la dirección de la fibra en un 89%, de acuerdo con la clasificación de Bodig y Jayne (1982), tal como se muestra en la tabla 2. Del examen de las probetas se observó que las fisuras principales siguieron los orificios inferiores y medios respecto al plano paralelo a la carga en el ensayo. Además, no se observó una diferencia importante entre la distribución de las fisuras de los dos grupos de probetas según su orientación radial o transversal en el ensayo. Por otra parte, las probetas cuyo modo de ruptura fue en tensión simple representaron un 11% y denotaron mayores valores del MOE con respecto al valor promedio del conjunto de las probetas.

	Modo de ruptura				
Probetas	Tensión transversal a la dirección de la fibra		Tensión simple		
	Número	%	Número	%	
Dirección tangencial	8	89	1	11	
Dirección radial	8	89	1	11	
Total	16	89	2	11	

Tabla 2. Modos de ruptura.

CONCLUSIONES

La respuesta en flexión transversal de las probetas modificadas artificialmente fue similar al comportamiento de probetas normalizadas. Por otra parte, la posición relativa de las probetas en los ensayos no mostró una influencia significativa en los resultados. Además, el Módulo de Elasticidad es útil para la predicción del Módulo de Ruptura de probetas modificadas artificialmente. Finalmente, la distribución de los orificios en las probetas provocó un modo de ruptura en tensión transversal a la dirección de la fibra de la madera.

No obstante que la masa de las probetas fue disminuida hasta un 9%, los valores de MOE son proporcionales con los valores de MOR. Esta conclusión explica que en condiciones reales de servicio los elementos estructurales en los que su masa se modifica por efecto del biodeterioro, siguen funcionando de manera similar a los elementos en condiciones ideales de uso.

REFERENCIAS

Berni, C.A.; Bolza, E.; Christensen, F.J. 1979. South American timbers. The characteristics, properties and uses of 190 species. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Division of Building Research. Australia.

Bodig, J.; Jayne, B.A. 1993. Mechanics of Wood Composites. Reprinted edition. Kreiger Publishing Company. USA. 712 p.

Ilic, J. 2001. Relations among the dynamic and static elastic properties of air-dry *Eucalyptus delegatensis* R. Baker. *Holz als Roh- und Werkstoff.* (59): 169-175.

International Organization for Standardization ISO 3349-1975 (E). 1975a. Wood - Determination of modulus of elasticity in static bending. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO). Disponible en: www.iso.ch/iso/en/ISOOnline.openerpage.

International Organization for Standardization ISO 3133-1975 (E). 1975b. Wood - Determination of ultimate strength in static bending. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO). Disponible en: www.iso.ch/iso/en/ISOOnline.openerpage.

Meyer, R.W.; Kellogg, R.M. Editors. 1982. Structural Use of Wood in Adverse Environments. Society of Wood Science and Technology. Van Nostrand Reinhold Company. USA. 505 p.

Nicholas, D.D.; Loos, W.E. Editors. 1973a. Wood Deterioration and Its Prevention by Preservative Treatments. Volume I: Degradation and Protection of Wood. Syracuse University Press. USA. 380 p.

Nicholas, D.D.; Loos, W.E. Editors. 1973b. Wood Deterioration and Its Prevention by Preservative Treatments. Volume II: Preservatives and Preservative Systems. Syracuse University Press. USA. 402 p.

Sotomayor C., J.R. 2002. TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Coordinación de la Investigación Científica. UMSNH. México. Formato: 60 x 90 cm. 1 p.

Tortorelli, L.A. 1956. Maderas y bosques argentinos. Editorial Acme. SACI. Argentina. 910 p.

Villaseñor A., J.M. 2005. Comportamiento mecánico de la madera de *Prosopis sp.* en relación con la variación de su masa. Tesis Profesional. UMSNH. 69 pp.

Wilcox, W.W. 1978. Review of Literature on the Effects of Early Stages of Decay on Wood Strength. *Wood and Fiber*. 9(4): 252-257.

2. BEHAVIOR OF NON-DESTRUCTIVE MODULUS OF ELASTICITY OF *PROSOPIS SP.* WOOD IN RELATION TO VARIATION OF ITS MASS.

ABSTRACT

This paper presents the results of a study of the reduction of the static and dynamic modulus of elasticity of wood when artificial diminution of the specimen's mass was made in a discrete and uniform mode. The objective of the research is to show experimentally the behavior of the values of the modulus of a wood specimen when its mass is reduced. Applying a non-destructive methodology, bending tests in static and dynamic conditions were realized with standard wood specimens of *Prosopis sp.* The research showed that the mechanical strength of wood decreases linearly if its mass is reduced. The relationships of the dynamic and static modulus of elasticity in regard to the diminution of the wood mass was similar and independent of the tests applied. As well, the tendencies of the static and dynamic unity modulus of elasticity were calculated as: $MOE^U = -0.03 \text{ m} + 1.02$ and $Ed^U = -0.03 \text{ m} + 1.03$. These results show that the dynamic and static tests applied are equivalent and interchangeable for practical purposes. The results also allowed the conclusion that the dynamic tests were reliable and in comparison with the static test, they are faster and the parameters measured are more repetitive.

Keywords: Dynamic modulus of elasticity, static modulus of elasticity, wood decay.

INTRODUCTION

Wood is a biodegradable material and decay is caused by fungi, bacteria and insect attacks, according to Nichols and Loss (1973a and 1973b) and Wilcox (1978). Chemical modification of cellulose and lignin molecules and fibrils and cell wall disintegration are among the principal effects of xylophage organisms in wood, according to Rowell and Barbour (1990) and Zabel and Morrell (1992). This damage causes the destruction of the wooden tissue and the appearance of perforations in the wood, bringing as a consequence the reduction of its mass and its mechanical strength, according to Meyer and Kellogg (1982).

Generally, wood structure evaluation is limited to a subjective appreciation of the material state of the wood. Sometimes these works of restoration suggest to the restaurateur the need for replacement or demolition of the structure. Moreover, in the daily practice of valuation of the technological state of wood in structures, it is difficult to access to experimental material that has been in service a long time. As well, the tasks of inspection are usually realized empirically and *in-situ*. According to Ross and Pellerin (1994) and Bodig (2001), structural evaluation requires methods of non-destructive evaluation, for example, the inspection of structures using stress waves, vibration and ultrasound to correlate mechanic strength with the grade of decomposition of a structural element of wood.

In this context it is convenient to study the mechanical state of wood structures aided by models of alteration in artificial conditions and in that way to contrast data from *in-situ* measurements with information obtained in the laboratory. For example, the internal galleries

in wood produced by insects can be substituted with artificially produced orifices or holes systematically configured in test specimens. In this particular case, the loss in mass originated by the insects can be simulated by the extraction of wood material from the interior of test specimens. In that way, the experimental results from this structural equivalence can be useful for comparison with data from wood altered in actual conditions in ancient wooden edifices.

This article is based in the thesis from the second author (Villaseñor, 2005).

BACKGROUND

The characterization of the mechanical behavior of wood applying dynamic laboratory methods has a non-destructive approach, using the fundamental hypothesis of wood mechanics proposed by Jayne in 1959: the wood and the materials elaborated with wood can store and disperse energy. For example, the wood property of storing energy is manifested by the speed of a mechanical wave traveling through the wood. In contrast, the ability of wood to diminish a vibration wave indicates its capacity to dissipate energy. In this way, Jayne proposed the hypothesis that the qualities of wood and wood products to dissipate and store energy are controlled by the same mechanisms that determine its mechanical behavior in static conditions. In other words, the molecular and anatomical structure of this material is the base of the mechanical behavior of wood products. As a consequence, it is possible to statistically relate these properties using methods of numerical analysis. This theoretical proposition has been experimentally verified by the works of Jayne (1959); Pellerin (1965); Kaiserlik and Pellerin (1977); Ross and Pellerin (1988); Ross et al. (1977); and recently by Sandoz (2000, 2002).

The idea of artificially elaborating a material discontinuity in the wood to study its mechanical behavior has been realized before by Niemz and Kucera (1998), among others researchers, who studied the possibility of detecting defects in wood products applying ultrasonic techniques. Also, Tanaka et al. (1998), evaluated the residual strength of wood in bending using a stress wave technique. Moreover, with a different approach, Yang et al. (2002) applied the modal analysis in non-destructive testing to localize structural defaults in wood. However, the initiative of simulating the lost of mass and idealizing the galleries in wood provoked by disintegration agents by drilling artificial holes and presenting this as an analogy of this discontinuity is an innovative contribution of the present research.

Concerning the relationship between the lost of mass of wood and the reduction of its strength, Macheck et al. (2001b) studied the dynamic and static modulus of elasticity of wood and found correlations of 0.96 for *Fagus silvatica* and of 0.97 for *Picea abies*, among other values for other species. Wilcox (1978) presents results showing that with a 6% loss of mass caused by brown rot, the diminution in mechanical strength can be up to 66%. Winandy et al. (2000) also used the diminution of the mass of wood as a predictor of the reduction of strength. These authors used an *in-vitro* method to study *Pinus spp*. Table 1 shows the values for the reduction of mass related to the reduction of modulus of elasticity in bending found by many authors.

	Static b						
Specie	Reduction of mass	Reduction of MOE	References				
	(%)	(%)					
	Decay agent:	<i>Peniofhora gigantes</i> (w	vhite rot)				
Pinus taeda	8	8	Richards and Chidester (1940)*				
Pinus elliottii	7	7	Richards and Chidester (1940)				
Hardwoods	10	14	Wilcox (1978)				
	Decay agent: Lenzites Sapiaria (brown rot)						
Pinus taeda	6	14	Richards and Chidester (1940)				
Pinus elliottii	7	33	Richards and Chidester (1940)				
Softwoods	6	66	Wilcox (1978)				
Pinus sp.	10	15	Winandy et al. (2000)				
* Cited in: American Society of Civil Engineers (1982).							

Table 1. Reduction of wood mass and its module of elasticity in bending caused by decay agents (Villaseñor, 2005).

From the analysis of these authors, the following research question is raised: If the mass of wood is reduced artificially, will its mechanical strength be reduced in a similar pattern to that in conditions of natural decay?

HYPOTHESIS

This paper presents the results of a study of the reduction of wood strength when the artificial diminution of the wood mass was done using discrete and uniform methods. This research is limited to volumes of small specimens of wood of *Prosopis sp.* with constant moisture content which is uniformly distributed.

The hypothesis of the research is: If the mass by unity of volume of wood is reduced, its mechanical strength decreases.

In this research, the mechanical strength of wood was studied using the dynamic and static modulus of elasticity. These characteristics were seen as a full expression of the elastic strength of the specimens of wood tested.

OBJECTIVE

The objective of the research is to show experimentally the relationship between the variation of the mechanic strength of a wood specimen and the diminution of its mass, applying dynamic and static non-destructive methods for the evaluation of the modulus of elasticity.

METHODOLOGY

A log of *Prosopis sp.* wood (mesquite) of 200 mm diameter and of 400 mm length was divided into six sectors of 400 mm x 72 mm x 22 mm as showed in Figure 1, adapting ISO 3129-1975 (International Organization for Standardization, 1975a). Boards were conditioned at 20 °C and 65% relative humidity until the wood moisture content was 12%. Then, 18 specimens of 320 mm x 20 mm x 20 mm were prepared for testing according to the ISO 3349-1975 (International Organization for Standardization, 1975b). The temperature of the wood specimens during the tests was 20 °C.



Figure 1. Sampling strategy. a) Log; b) Sector; c) Board; d) Complete specimen; e) Bending test specimen; f) Density and moisture content tests specimen (Villaseñor, 2005).

Bending tests in static and dynamic conditions were realized with two groups of specimens: the first one a reference group of standard specimens according to the recommendations of the International Organization for Standardization, and a second experimental group consisting of the same specimens, which were modified by drilling holes in them.

In the dynamic test the natural frequency was measured, and in static conditions the relationship between load and deformation $(\Delta P/\Delta y)$ was measured in the elastic domain.

Standard specimens

The 18 sample wood specimens, called standard specimens, were divided into two experimental groups of nine specimens according to the radial and tangential orientation of the parallel plan to the load direction in transversal bending, adapting the standard ISO 3349-1975 (International Organization for Standardization, 1975b), as show in Figures 2 and 3. Length (L), thickness (b), height (h) and mass (m) were measured in all specimens and volume (V), density (ρ), moisture content (M.C.) and inertia momentum (I) of its transversal section were calculated.

To both groups of radial (R) and tangential (T) standard specimens, dynamic and static transversal bending tests were done. Each specimen was loaded 21 times in a static condition and 21 times in a dynamic condition. All charges were non-destructive.

Modified specimens

After testing the standard specimens' sample, a series of holes of 2.38 mm of diameter were drilled into each specimen to reduce the mass by 1.5% in every series, as shown in Figure 3. Six discrete points of reduction of the initial mass of the specimens were obtained. The reduction of the wood specimen's value of the inertial momentum (I) of its transversal section was not taken in account.

Non-destructive dynamic tests

The dynamic tests followed the methodology proposed by the Operating Instructions for the Grindosonic MK5 "Industrial" Instrument (Lemmens, n/d). In the study, the wood specimens were idealized as rectangular and continuum beams, with uniform geometry and with homogeneous structure and loaded in transversal vibration on simple supports, which represented a system with a degree of liberty, considering wood as an elastic material, according to Bodig and Jayne (1993).

Three tests were realized for each specimen and the mean was computed. The formula used to calculate the dynamic modulus of elasticity (Perstorper, 1992 and 1993, and Machek et al. 2001a and 2001b) was:

$$Ed = \frac{4 \pi^2 L^4 f^2 \rho}{m^4 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{L^2} K \right)$$
(1)

Where:

Ed = Dynamic modulus of elasticity of wood (Pa).

- L = Length of specimen (m).
- f = Natural frequency of specimen (Hz).
- ρ = Density of specimen (kg/m³).
- m, K = Geometric constants.
- r = Ratio of gyration of the transversal section of specimen (m²).

Non-destructive static tests

The process of load-deformation in the static tests was restrained to an interval of 18% to 35% of the elastic proportional limit for standard specimens and of 24% to 50% for modified specimens. The 100% of the elastic proportional limit value was determined in a preliminary series of static tests using a complementary set of wood samples of the same log of *Prosopis sp.* This strategy allowed the non-destructive characteristics of the tests, adapting ISO 3129-1975 (International Organization for Standardization, 1975a).

Three tests were realized for each specimen and the mean was computed. The formula employed for computing the static modulus of elasticity (Bodig and Jayne, 1993) was:

$$Ed = \frac{48}{\Delta y} \quad \frac{l^2}{48 I} \tag{2}$$

Where:

- ΔP = Interval of load, non-destructive test (N).
- Δy = Interval of deformation, non-destructive test (m).
- 1 = Span (m).
- I = Inertial moment of the transversal section of the specimen (m^4) .



Figure 2. Research strategy for the non-destructive tests (Villaseñor, 2005).



Figure 3. Orientation and configuration of wood specimens in the tests (Villaseñor, 2005).

RESULTS AND ANALYSIS

Behavior of standard specimens

Statistical *t Student* tests were realized to R and T experimental groups of specimens for the seven treatments. Results showed intervals and values of probability p with no significant difference at the 95% confidence level. This outcome allowed the combination of both experimental groups in only one group for posterior analysis, as shown in Table 2.

Table 2. Statistics for density (ρ), dynamical	nic modulus (of elasticity (Ed) and static	modulus of
elasticity (MOE) (Villaseñor, 2005).				

Statistics	ρ	Ed	MOE
Statistics	(kg/m^3)	(GPa)	(GPa)
Mean	730	8.62	7.04
Standard error	4.764	0.282	0.237
Skewness	0.565	0.372	0.319
Kurtosis	-0.090	-1.550	-1.252
Sample size	18	18	18

The statistics for dynamic modulus of elasticity (Ed) and for static modulus of elasticity (MOE) for the 18 standard specimens grouped are shown in Table 2. The kurtosis and skewness values allowed the consideration of the Ed and MOE statistics from a normal distribution at the 95% confidence level.

The mean value of the dynamic modulus of elasticity for *Prosopis sp.* wood is shown in Table 2. To date, there is no information about this parameter for this genus of wood. The dynamic modulus of elasticity value is also inferior to the hardwood data found in the bibliography for woods with similar density values. The ration Ed/MOE is 1.22. This difference could be explained by the visco-elastic proprieties of wood, according to Bodig and Jayne (1993). The Standard error for Ed shows an inaccuracy of 3.27% in the measurements and for MOE, the standard error denotes 3.36% of imprecision.

Modulus of elasticity related to the decrease of the mass of wood

Figure 4 shows the variation of values of the dynamic and static modulus of elasticity related to the reduction of the mass for the set of 18 specimens. From the observation demonstrated in Figure 4, it is clear that the phenomenon studied follows the same pattern in regard to the velocity of the load applied in the dynamic and static bending tests. These results show as well that the mechanical strength of the wood expressed by its modulus of elasticity decreases if its mass drops off for the interval studied.

The equations of regression also predict that the behavior of both dynamic and static modulus of elasticity in function of the decrease of mass is similar, but not of magnitude: the prediction for the dynamic modulus of elasticity is greater in 19% of the static modulus of elasticity computations. The slope of the dynamic modulus of elasticity, which is -0.28, compared to the equivalent slope of the static modulus of elasticity, which is -0.23, a result that indicates that

the Ed decreases 22% faster that the MOE. This result, obtained in controlled conditions in the laboratory, coincides with the observations of Richards and Chidester (1940), Wilcox (1978) and Winandy et al. (2000), among other authors cited in the references.



Figure 4. Variation of the values of the Ed and MOE of elasticity related to the decrease of the mass (m) of wood.

Unity modulus of elasticity related to the decrease of the mass of wood

The absolute values of the dynamic modulus of elasticity can be transformed into unity values with the formula (Villaseñor, 2005):

$$\boldsymbol{E}\boldsymbol{d}^{\boldsymbol{U}} = \frac{\operatorname{Ed}^{n}}{\boldsymbol{E}\boldsymbol{d}^{0}}$$
(3)

Where:

 $\begin{array}{ll} Ed^{U} &= Dynamic unity modulus of elasticity of wood. \\ Ed^{n} &= Dynamic modulus of elasticity of wood of the series "n" (Pa). \\ Ed^{0} &= Dynamic modulus of elasticity of wood of standard specimen (Pa). \\ n &= Series 0 to 6. \end{array}$

And the static unity modulus of elasticity is defined by (Villaseñor, 2005):

$$MOE^{U} = \frac{MOE^{n}}{MOE^{0}}$$
(4)

Where:

 MOE^{U} = Static unity modulus of elasticity of wood. MOE^{n} = Static modulus of elasticity of the series "n" (Pa). MOE^{0} = Static modulus of elasticity of standard specimen (Pa). n = Series 0 to 6. The results from Figure 4 are presented in Figure 5, transformed to unity modulus of elasticity. In Figure 5 the regression equations for Ed and MOE as functions of the diminution of density ρ can be considered equal. It follows as well that the phenomena of reduction of mechanical strength decreases proportionally to the diminution of the mass, a result that confirms the independence of the phenomena studied and the kind of test applied.

Each point in Figure 5 represents the mean value of the 54 data from non-destructive tests realized in each one of the 18 specimens. The predictions of the correlations are valid for the interval studied with respect to this research. However, the laboratory results of the methodology can be useful for comparing data obtained in *in-situ* evaluations of structures.



Figure 5. Variation of the values of the Ed^u and MOE^u of elasticity related to the decrease of the mass (m) of wood.

CONCLUSIONS

The research showed that the mechanical strength of wood decreases linearly if its mass to volume unity is reduced artificially in a similar pattern to that in conditions of natural decay.

The dynamic tests were reliable and in comparison with the static test, they are faster and the parameters measured are more repetitive.

The artificial decrease of the mass of wood to simulate the effect of such agents as insects is recommendable as a laboratory technique to compare data from *in-situ* measurements.

The tendency found for the dynamic and static modulus of elasticity in regard to the diminution of the wood mass was similar and independent of the tests applied. These results show that the dynamic and static tests applied are equivalent and interchangeable for practical purposes.

REFERENCES

American Institute of Timber Construction. 1994. Fourth Edition. Timber Construction Manual. John Wiley & Sons, Inc. USA.

American Society of Civil Engineers. 1982. Evaluation, Maintenance and Upgrading of Wood Structures: A Guide and Commentary. USA.

Beall, F.C. 1999. Future of Nondestructive Evaluation of Wood and Wood-Based Materials. *The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*. 4 (11). http://www.ndt.net.

Bodig, J. 2001. The Process of NDE Research for Wood and Wood Composites. *The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*. 6 (3). http://www.ndt.net.

Bodig, J.; Jayne, B.A. 1993. Mechanics of Wood Composites. Reprinted edition. Kreiger Publishing Company. USA.

Görlacher, R. 1984. Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des E-modulus von Holz. *Holz als Roh-und Werkstoff.* (42):212-222.

International Organization for Standardization ISO 3129-1975 (E). 1975a. Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO).

International Organization for Standardization ISO 3349-1975 (E). 1975b. Wood - Determination of modulus of elasticity in static bending. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO). Jayne, B.A. 1959. Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*. 9(11): 413–416.

Kaiserlik, J.H.; Pellerin, R.F. 1977. Stress wave attenuation as an indicator of lumber strength. *Forest Products Journal*. 27(6):39–43.

Lemmens, J.W. (n/d). Operating Instructions for the GrindoSonic MK5 "Industrial" Instrument. J.W. Lemmens, Inc. USA.

Machek, L.; Militz, H.; Sierra-Alvarez, R. 2001a. The influence of wood moisture content on dynamic modulus of elasticity measurements in durability testing. *Forschung verwertung*. 5(2001):97-100.

Machek, L.; Militz, H.; Sierra-Alvarez, R. 2001b. The use of an acoustic technique to assess wood decay in laboratory soil-bed tests. *Wood Science and Technology* 34(6):467-472.

Meyer, R.W.; Kellogg, R.M. Editors. 1982. Structural Use of Wood in Adverse Environments. Society of Wood Science and Technology. Van Nostrand Reinhold Company. USA.

Nicholas, D.D.; Loos, W.E. Editors. 1973a. Wood Deterioration and Its Prevention by Preservative Treatments. Volume I: Degradation and Protection of Wood. Syracuse University Press. USA.

Nicholas, D.D.; Loos, W.E. Editors. 1973b. Wood Deterioration and Its Prevention by Preservative Treatments. Volume II: Preservatives and Preservative Systems. Syracuse University Press. USA.

Niemz, P.; Kucera L.J. 1998. Possibility of defect detection in wood with ultrasound. In: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Forest Products Laboratory. USA. pp:27-32.

Pellerin, R.F. 1965. A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. *Forest Products Journal*. 15(3):93–101.

Perstorper, M. 1992. Predicting the stiffness of structural timber using dynamic modal tests. In: Proceedings of IUFRO S5.02 Timber Engineering 1992 Conference. France. pp:305-324.

Perstorper, M. 1993. Dynamic modal tests of timber evaluation according to the Euler and Timoshenko theories. In: Proceedings of the 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Washington State University. USA. pp: 45-54.

Richards, C.A.; Chidester, M.S. 1940. The effect of *Peniophora gigantea* and *Schizophyllum commune* on strength of southern yellow-pine sap-wood. Proceedings AWPA. (36):24-32.

Ross, R.J. et al. 1977. Relationship between log and lumber modulus of elasticity. *Forest Products Journal*. 47(2):89-92.

Ross, R.J.; Pellerin, R.F. 1988. NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves. *Forest Products Journal*. 38(5):39-45.

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.

Rowell, R.M.; Barbour, R.J. Editors. 1990. Archeological Wood Properties, Chemistry, and Preservation. Advances in Chemistry Series 225. American Chemical Society. USA. 472 p.

Sandoz, J.L. 2000. 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. 2002. 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, Selangor, Malaysia.

Tanaka, T.; Divos, F.; Faczan, T. 1998. Nondestructive evaluation of residual bending strength of wood with artificial defects by stress wave. In: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Forest Products Laboratory. USA. pp:83-91.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2005. Comportamiento mecánico de la madera de *Prosopis sp.* en relación con la variación de su masa. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Wilcox, W.W. 1978. Review of Literature on the Effects of Early Stages of Decay on Wood Strength. *Wood and Fiber*. 9(4):252-257.

Winandy, J.E.; Clausen, C.A.; Curling S.F. 2000. Predicting the Effects of Decay Wood Properties and Modeling Residual Service-Life: In: Proceedings of the 2nd Annual Conference on Durability and Disaster Mitigation in Wood-Frame Housing. Forest Products Society. USA. pp:261-263.

Yang, X. et al. 2002. Application of modal analysis by transfer function to nondestructive testing of wood. I: determination of localize defects in wood by the shape of the flexural vibration wave. *Journal of Wood Science*. (48):283-288.

Zabel, R.A.; Morrell, J.J. 1992. Wood Microbiology, Decay and Its Prevention. Academic Press, Inc. USA.

3. MOISTURE CONTENT, FREQUENCY AND MODULUS OF ELASTICITY OF *PINUS DOUGLASIANA* STUDIED USING TRANSVERSAL VIBRATION.

ABSTRACT

Bending transversal vibration tests were carried out on 32 wood standard samples of *Pinus douglasiana*. The apparent density, natural frequency and dynamic modulus of elasticity, calculated using transversal vibration, were studied as dependent variables in function of the variation of the moisture content of wood (H). The observed range of moisture content was from the natural state of wood (H = 154%) to the anhydride state of wood (H = 0%).

As for the water saturated dominium of wood (H > fiber saturation point), natural frequency rate diminished proportionally to the reduction of moisture content, but modulus of elasticity demonstrated a different behavior.

In the moisture content of non-saturated dominium of wood (0% < H < 32%), natural frequency and modulus of elasticity values in bending transversal vibration increased proportionally as moisture content decreased. Above the fiber saturation point (H < 32%), the frequency of wood decreased but its modulus of elasticity varied in a hyperbolic manner.

Apparent densities for *Pinus douglasiana* for H = 0%, 12% and 32% were: 495 kg/m³, 521 kg/m³, and 567 kg/m³ respectively. Natural frequencies were: 1069 Hz; 1035 Hz and 959 Hz. Modules of elasticity in transversal vibration were: 15.75 GPa, 14.43 GPa, and 12.32 GPa. In addition, the coefficient of hygroelasticity in transversal vibration for *Pinus douglasiana* was calculated as η_{vt} = - 0.15 GPa/%H for an hygroscopic range of: 8% < H < 24%.

Transversal vibration bending testing proved to be a useful non-destructive testing technique for evaluating the frequency and modulus of elasticity of a standard sample of wood in relation to the reduction of moisture content.

Key words: Moisture content, apparent density, natural frequency, modulus of elasticity, *Pinus douglasiana* wood, transversal bending vibration.

INTRODUCTION

As wood moisture content adapts to the temperature and relative humidity of the environment when the wood is in service, one of the most interesting issues in wooden structure conception and in design of products using wood composites is the variation of their elastic properties.

Non-destructive techniques have shown their usefulness in the study of the physical properties of the wood and wood composites (Pellerin and Ross, 2002; Bucur, 2003). This is particularly seen in when the principle stated by Jayne (1959) concerning the capacity of wood to dissipate and to store energy and its relationship with its structural and thermodynamical properties has been applied in the study of acoustic, stress waves and vibrational approaches to characterize the mechanical behavior of wood and wood

composites (Beall, 2002; Niemz and Kucera, 1998; Ross and Pellerin, 1994; Sandoz, 2000; Sobue, 1993).

Many authors have studied the theoretical principles of dynamics and vibration applied to wood and wood composites. Among others researchers, Jayne (1959), James (1962), Hearmon (1966), James (1968), Görlacher (1884), Chui and Smith (1990), Liot at al. (1994), Perstorper (1993) and Brancheriau and Bailleres (2002) have published their research results. One of the most important issues from their research is that the results from laboratory fit reasonably well with the prediction of simplified models and formulas used to calculate, in practice, the parameter issues from dynamic tests.

Concerning the study of timber and wood of structural sizes, Burdzik and Nkwera (2002) realized transverse vibration tests for prediction of stiffness and strength properties of full size *Eucalyptus grandis*; Piter et al. (2004) investigated the effectiveness of fundamental resonant frequency for determining the elastic properties of Argentinean *Eucalyptus grandis* in structural sizes: Marra et al. (1966) applied vibration methods to determinate the wood strength and elasticity of *Douglas fir* beams; Seeling (1999) studied the natural frequency of wood as a reliable parameter for grading timber of all qualities; Nakai et al. (1991) measured lateral vibration frequency to evaluate the bending properties of flat square sawn timber of *Cryptomeria japonica*.

Recently, Byeon et al. (2005) evaluated the strength performance for finger-jointed wood using flexural vibration techniques; Hu et al. (2005) studied the vibrational properties of wood plastic plywood; Kubojima et al. (2005) studied the vibrational properties of green wood in high-temperature water vapour; Ouis (2004) estimated the influence of a transversal crack in a wood beam through a study of its natural vibration modes.

Transversal vibration has also been used to evaluate small size wood specimens: Illic (2001) studied the relationship among the dynamic and static elastic properties of air-dry *Eucalyptus delegatensis*, and Illic (2003) cited the Baker's further determination of the dynamic modulus of elasticity of 55 species using small wood beams. Macheck et al. (2001a) used transversal vibration to assess wood decay in laboratory soil-bed tests. Haines et al. (1996) determined the Young's modulus for *Picea excelsa, Abies amabilis* and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. Passialis and Adamopoulos (2003) realized a comparison of three non-destructive methods for determining the modulus of elasticity in flexure of *Abies cephalonica* and *Populus hybridogenous* using small wood specimens with no natural defects.

Concerning the effect of the variation of the moisture content of wood in its modulus of elasticity assessed by transversal vibration behavior, Macheck et al. (2001b) reported that in transversal vibration test of wood specimens of *Fagus sylvatica* and *Pinus sylvestris* the natural frequency assessed decreased with increasing wood moisture content. Moreover, the researchers found that the dynamic modulus of elasticity above the fibre saturation point the dynamic modulus was much less dependent on further moisture uptake, and the hygroscopic range the dynamic modulus of elasticity was found to be highly dependent on the moisture content of the wood. But if the dimensional changes due to the shrinkage during the dry

process are not corrected in the computation, it seams that the values of this modulus remain constant for different moisture contents.

From this literature review, it could be concluded that the transversal vibration method has shown to be a good non-destructive test method useful in determining the modulus of elasticity of wood and wood composites. However, at the present time there is no known methodology for determining the modulus of elasticity using a flexural dynamic test during a wood drying process.

The aim of this paper is to report the laboratory method and the results of transversal vibration tests applied to a sample of *Pinus douglasiana* during a drying process. The parameters determined in the research were the moisture content, the apparent density, the natural frequency, and the modulus of elasticity of wood.

This paper is based in the Master's Degree thesis of the second author, Jose Maria Villaseñor Aguilar (Villaseñor, 2007). The research was carried out at the University of the State of Michoacan, Mexico.

METHODOLOGY

The wood used in the research was obtained from a tree of *Pinus douglasiana* cut in the forestland of the "Comunidad indigena de San Juan Nuevo", in the State of Michoacan, Mexico. From the tree, one log of 1 m of length and 0.50 m of diameter was taken out, and from the log, 32 wood specimens of 0.020 m by 0.020 m by 0.32 m were cut. The wood specimens were dried in a conditioning chamber for 86 days. The relative humidity (HR) and the temperature (T) of the chamber were varied in a sequential mode so that when the weight of wood specimens was constant, 48 states of moisture content were determined, as shown in Figure 1.



Figure 1. Drying process: relative humidity and temperature of the conditioning chamber and moisture content of wood related to the time of drying (Villaseñor, 2007).

For each of the moisture contents of the settled wood, the specimen's weight and dimensions were measured and the apparent density and the moment of inertia of the transversal section of the wood specimen were then calculated. The natural frequency was thereafter measured using the *Grindosonic*[©] technology (Lemmens, undated) following the experimental protocol proposed by Villaseñor Aguilar (2005 and 2007). A design of the device and diagram of the wood specimen are shown in the Figure 2.



Figure 2. Transversal vibration test and wood specimen diagram (Villaseñor, 2007).

Three elastic impulses were applied to the wood, and the modulus of elasticity using transversal vibration was calculated from the average of these data for each of the 48 states of humidity observed. Each point shown in the Figures in this report represents the average of three values for each humidity condition for each of the 32 wood specimens evaluated. From the free body diagram of the wood specimen showed in Figure 2, the movement equation of the beam proposed by Timoshenko et al. (1994) and Goens (1931) is:

$$EI\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_l \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \left(m_l r^2 + \frac{EIm_l}{K'AG}\right)\frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{m_l^2 r^2}{K'AG}\frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0$$
(1)

With:

- E = Modulus of elasticity of the wood (Pa).
- I = Moment of inertia of the transversal section of the specimen (m^4) .
- m_1 = Mass by unit of length of the specimen (kg/m).
- A = Area of the transversal section of the specimen (m^2) .
- G = Modulus of rigidity of wood (Pa).
- y = Displacement in the transversal direction of the specimen (m).
- x = Distance in the longitudinal direction of the specimen (m).
- t = Time (s).
- K' = Shape factor in shear. (0.833 for prismatic specimens).
- r = Radio of gyro of the transversal section of the specimen (m²). With: r = $\sqrt{\frac{I}{A}}$

Using equation (1), the modulus of elasticity by transversal vibration (E_{vt}) was calculated with the formula (2), used by Hearmon (1966), Görlacher (1984), Chui and Smith (1990), Perstorper (1992; 1993) and Machek et al. (2001a; 2001b):

$$E_{vt} = \frac{4 \pi^2 L_{vt}^4 f_{vt}^2 \rho_H}{m^4 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{L_{vt}^2} K \right)$$
(2)

With:

 E_{vt} = Modulus of elasticity of wood in transversal vibration (Pa).

 L_{vt} = Length of the specimen (m).

 f_{vt} = Natural frequency of the specimen (Hz).

 $\rho_{\rm H}$ = Apparent density of the specimen (kg/m³).

m, K = Constants.

r = Radio of gyro of the transversal section of the specimen (m²).

After a statistical correlation analysis of the results, the coefficient of higroelasticity of the wood of *Pinus douglasiana* was calculated from the slope obtained in a quasi perfect (lineal) correlation equation in the non-higrosaturated domain (8% < H > 24%) of the drying process used in this research (see Figure 5). This parameter is defined as the quotient of the variation of the modulus of elasticity of the wood and the variation of the moisture content.

The coefficient of hygroelasticty of the wood of *Pinus douglasiana* can be defined by the formula (3) proposed by Villaseñor Aguilar (2007):

$$\eta_{\rm vt} = \frac{\Delta E_{\rm vt}}{\Delta H}$$
(3)

With:

 η_{vt} = Coefficient of hygroelasticty in transversal vibration of the wood (Pa / %)

 ΔE_{vt} = Interval of the modulus of elasticity in transversal vibration of the wood (Pa)

 ΔH = Interval of the moisture content of the wood (%)

RESULTS AND ANALYSIS

After a statistical analysis of the data of the sample observed in each of the moisture content phases of the drying process, the results of the kurtosis and the skew distribution were considered belonging to a sample with a normal distribution with a 95% of probability. The results are presented as points in the Figures that represent the average of the data from the 32 specimens studied in each humidity state of the wood (Figure 1).

Density

Apparent wood density of specimens was computed by the mass of the wooden material and the mass of the water related to the apparent volume of each specimen. Consequentially, during the drying process, the wood presents a particular density for each one of the moisture contents observed, as shown in Figure 3. The apparent wood density decreased

proportionality to the decrease in moisture content. As reference, some values of the apparent density for many moisture contents of *Pinus douglasiana* are presented in Table 1.

Table1. Natural frequencies, apparent wood densities and modulus of elasticity of wood in transversal vibration for *Pinus Douglasiana* (Villaseñor, 2007).

	H = 0%		H = 12%		H = 32%		
f _{vt} (Hz)	o 405	1069	2	1035		959	
Evt (GPa)	$p_{\rm H} = 493$	15.75	$\rho_{\rm H} = 321$	14.43	$p_{\rm H} = 307$	12.32	
Note: Apparent wood density (ρ_H) is in kg/m ³ .							



Figure 3. Apparent wood density of specimens related to the moisture content (Villaseñor, 2007).

Figure 3 shows an inflexion point corresponding to H = 32%. This moisture content coincides with the value where the tendency of the frequency and the modulus of elasticity of wood change (see Figures 4 and 5). In agreement with Stamm (1964), Kollmann and Coté (1968) and Bodig and Jayne (1982), the value at which the physical properties of wood fluctuate could by assumed to be the fiber saturation point (psf) of the wood.



Figure 4. Natural frequency of the wood specimens related to the moisture content (Villaseñor, 2007).

Natural frequency

Figure 4 shows the variation of the natural frequency of the wood specimens of *Pinus douglasiana* during the drying process. If the moisture contents decreases, the frequency diminishes. For H = 32%, the slope of the tendency of the frequency shows a point of inflexion. This point coincides with the inflexion point observed in the density and the apparent modulus of elasticity tendencies (see Figures 3 and 5) and could be confirmed to be the fiber saturation point of the wood.

For values of the moisture content below the fiber saturation point (0 < H < 32%) the slope increases in comparison to the slope for higher moisture contents at the fiber saturation point (32% < H < 154%). This result seems to show that the mass of water linked to the cell wall reduces the inertia of the specimen, and in consequence, the frequency increases.

The apparent wood density plays an important role in the determination of the natural frequency of the wood specimens. The frequency is related to the mass in vibration of the specimen. For moisture contents higher that the fiber saturation point, the mass of the free water present in the cells lumens of the wood will move as a different body, and in this manner the frequency measurements will be altered. For moisture contents lower than the fiber saturation point, the mass of the linked water content inside the cell wall will move together with the mass of the wood specimen and the measurements of the natural frequency will be regular. As reference, some values of f_{vt} are presented in Table 1.

Modulus of elasticity in transversal vibration

Figure 5 shows the tendencies of the values of the modulus of elasticity referent to the decrease of the moisture content of wood. For the hygrosaturaded domain above the fiber saturation point (32% < H < 154%), the E_{vt} follows a hyperbolic shape with a maximum value close to H = 100%. This interval can be defined as the hygrosaturated zone (HS) as is described by the correlation $E_{vt} = -0.0002H^2 + 0.04H + 11.3$ with a R² = 0.99.



Figure 5. Modulus of elasticity in transversal vibration of the wood specimens related to their moisture content (Villaseñor, 2007).

Relating this domain to the non-hygrosaturated domain (0 < H < 32%), there is a zone within the interval 24% < H < 32%. This is a non-linear zone defined by the correlation: $E_{vt} = 0.005H^2 - 0.31H + 17.3$ with a $R^2 = 0.97$. This zone could be identified to as the transition zone (TR).

In accordance with the transition zone, the values of the modulus of elasticity begin to rise if the moisture contents decrease. In this zone the values of E_{vt} increase and present a linear tendency $E_{vt} = -0.15H + 16.4$ with a $R^2 = 0.99$. This zone could be referred to as the hygroelastic zone (HE) of *Pinus douglasiana*. This zone includes moisture contents in the 8% < H < 24% interval, a range that is useful in production and in conception of wood composites and wood products. As reference, some values of the modulus of elasticity for many moisture contents are presented in Table 1.

Finally, Figure 5 shows a region with a linear behavior of $E_{vt} = -0.08H + 15.8$ with a $R^2 = 0.98$. In this zone the slope is less that the slope of the hygroelastic zone. This zone could be referred to as the zone of low humidity (BH), and corresponds to values of moisture contents in the interval 0% < H < 8%.

Coefficient of higroelasticity

From the slope presented in Figure 5, corresponding to the hygroelastic zone (8% < H < 24%) of the correlation between the values of the E_{vt} and H, a parameter can be defined that expresses the unitary variation of the modulus of elasticity of the wood for each percent of reduction of its moisture content: the coefficient of higroelasticity of the wood of the *Pinus douglasiana*. From the correlation of the data shown in Figure 5, the coefficient of higroelasticity of *Pinus douglasiana* is assessed to be η_{vt} = - 0,15 (GPa / %).

CONCLUSIONS

During a drying process using a transversal bending vibration test, the variation of density, natural frequency and modulus of elasticity were estimated for the wood of *Pinus douglasiana*.

The behavior of the parameters observed can be divided between two hygroscopic domains: the domain hygrosaturated: 32% < H < 154%, and the non-hygrosaturaded domain: 0% < H < 32%. Furthermore, the point of inflexion of these two domains, H = 32%, is identified as the fiber saturation point of the wood.

In the hygrosaturated domain the values of the modulus of elasticity of the wood decrease in a parabolic shape as the moisture content is reduced. In the non-hygrosaturated domain the values of the modulus of elasticity increase proportionally to the reduction of the moisture content.

REFERENCES

Beall, F.C. 2002. "Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties". *Wood Science and Technology*. (36):197-212.

Bodig, J., B.A. Jayne. 1982. *Mechanics of Wood Composites*. Van Nostrand Rehinhold Company. USA.

Brancheriau, L., H. Bailleres. 2002. "Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review". *Wood Science and Technology*. (36):347-365.

Bucur, V. 2003. *Nondestructive Characterization and Imaging of Wood*. Springer-Verlag. Germany.

Burdzik, W.M.G., P.D. Nkwera. 2002. "Transverse Vibration Test for Prediction of Stiffness and Structural Properties of Full Size *Eucalyptus grandis*". *Forest products Journal*. 52(6):63-67.

Byon, H.S., H.M. Park, C.H. Kim, F. Lam. 2005. "Nondestructive evaluation of strength performance for finger-jointed wood using flexural vibration techniques". *Forest products Journal*. 55(10):37-42.

Chui, Y.H., I. Smith. 1990. "Influence of rotatory inertia, shear deformation and support condition on natural frequencies of wooden beams". *Wood Science and Technology*. (24):233-245.

Goens, E. 1931: "Determination of Young's modulus from flexural vibrations". *Annalen der Physik*. 11(6):649-678.

Görlacher, R. 1984. "Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des E-modulus von Holz". *Holz als Roh-und Werkstoff.* (42):212-222.

Haines, D.W., J.M. Leban, C. Herbé. 1996. "Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods". *Wood Science and Technology*. (30):253-263.

Hearmon, R.F.S. 1966. "Theory of the Vibration Testing of Wood". *Forest products Journal*. 16(8):29-40.

Hu, Y. et al. 2005. "Vibrational properties of wood plastic plywood". *Journal of Wood Science*. 51:13-17.

Illic, J. 2001. "Relation among the dynamic ans static elastic properties of air-dry *Eucalyptus delegatensis* R. Baker". *Holz als Roh-und Werkstoff*. 59:169-175.

Illic, J. 2003. "Dynamic MOE of 55 species using small wood beams". *Holz als Roh-und Werkstoff*. 61:167-172.

James, W.L. 1962. "Dynamic Strength and Elastic Properties of Wood". *Forest Products Journal*. 12(6):253-260.

James, W.L. 1968. "Static and Dynamic Strength and Elastic Properties of Ponderosa and Loblolly Pine". *Wood Science*. 1(1):15-22.

Jayne, B.A. 1959. "Indices of Quality: Vibrational Properties of Wood". *Forest Products Journal*. 9(11):413-416.

Kollmann, F.P., W.A. Côté. 1968. *Principles of Wood Science and Technology. Volume I: Solid Wood*. Springer-Verlag. Germany.

Kubojima, Y., Y. Suzuki, M. Tonosaki. 2005. "Vibrational properties of green wood in high-temperature water vapor". *Holzforschung*. 59:446-450.

Lemmens, J.W. (undated). *Operating Instructions for the GrindoSonic MK5 "Industrial" Instrument*. J.W. Lemmens, Inc. USA.

Liot, F., P. Guitard, P. Morlier. 1994. "Nondestructive Evaluation of Wooden Elements in Bending: Beams, poles or Logs". In: Proceedings of the First European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood. pp:294-302.

Machek, L., H. Militz, R. Sierra-Alvarez. 2001a. "The use of an acoustic technique to assess wood decay in laboratory soil-bed tests". *Wood Science and Technology* 34(6):467-472.

Machek, L., H. Militz, R. Sierra-Alvarez. 2001b. "The influence of wood moisture content on dynamic modulus of elasticity measurements in durability testing". *Forschung verwertung*. 5(2001):97-100.

Marra, G.G., R.F. Pellerin, W.L. Galligan. 1966. "Nondestructive Determination of Wood Strength and Elasticity by Vibration". *Holz als Roh-und Werkstoff*. 24(10):460-466.

Nakai, T., T. Tanaka, H. Nagao. 1991. "Nondestructive Evaluation of Bending Properties of Flat square Sawn Timber". In: Proceedings of the 1991 International Timber Engineering Conference. pp:2.236-2.241.

Niemz, P., L.J. Kucera. 1998. "Possibility of defect detection in wood with ultrasound". In: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Forest Products Laboratory. USA. pp:27-32.

Ouis, D. 2004. "Assessment of severity and localization of a transversal crack in a wood beam through a study of its natural modes of vibration". *Holz Roh Werkst*. 62:17-22.

Pellerin, R.F., R.J. Ross. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA.
Perstorper, M. 1992. "Predicting the stiffness of structural timber using dynamic modal tests". In: Proceedings of IUFRO S5.02 Timber Engineering 1992 Conference. France. pp:305-324.

Perstorper, M. 1993. "Dynamic modal tests of timber evaluation according to the Euler and Timoshenko theories". In: Proceedings of the 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Washington State University. USA. pp:45-54.

Piter, J.C., R.I. Zerbino, H.J. Blaß. 2004. "Effectiveness of fundamental resonant frequency for determining the elastic properties of Argentinean *Eucalyptus grandis* in structural sizes". *Holz Roh Werkst.* 62:88-92.

Ross, R.J., R.F. Pellerin. 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.

Stamm, A.J. 1964. Wood and Cellulose Science. Ronald Press. USA.

Sandoz, J.L. 2000. "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.

Seeling, U. 1999. "Natural frequency of wood – a reliable parameter for grading timber of all qualities?" In: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. pp:75-82.

Sobue, N. 1993. Nondestructive characterization of Wood. *Mokuzai Gakkaishi*. (39):973-979.

Timoshenko, S., D.H. Young, W. Weaver. (1994). Reprinted Edition. Vibration problems in Engineering. New York: John Wiley. USA.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2005. Comportamiento mecánico de la madera de *Prosopis sp.* en relación con la variación de su masa. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus duoglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

4. MODULOS DE ELASTICIDAD EVALUADOS POR MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS Y MODULO DE RUPTURA DE LA MADERA DE *PINUS DOUGLASIANA*. Vibraciones transversales, flexión estática, ultrasonido y ondas de esfuerzo.

RESUMEN

Los módulos de elasticidad de la madera de *Pinus douglasiana* fueron evaluados con métodos no destructivos: Vibraciones transversales, ultrasonido, ondas de esfuerzo y flexión estática. Además, a partir de pruebas adicionales de flexión a la ruptura, se determinaron la resistencia en el límite elástico y el modulo de ruptura.

Los valores calculados para la madera con una densidad promedio: $\rho = 495$ (kg/m3) y con un contenido de humedad de las probetas: H = 0%, se analizaron estadísticamente. Los principales resultados son: el módulo de ruptura y la resistencia en el límite elástico pueden ser estimados a partir de los valores de los módulos de elasticidad determinados con métodos no destructivos.

Palabras clave: Vibraciones transversales, flexión estática, ultrasonido, ondas de esfuerzo.

INTRODUCCIÓN

Los métodos de evaluación no destructivos que emplean la capacidad de la madera para almacenar y disipar energía como fenomenología para caracterizar su comportamiento mecánico, han confirmado su utilidad para predecir, entre otros parámetros mecánicos del material, su frecuencia natural de vibración y la velocidad de transmisión de una onda mecánica.

Por su naturaleza, estas técnicas no permiten observar el comportamiento de la madera durante un ensayo que provoque la ruptura de las probetas en estudio. En consecuencia, la resistencia en el límite elástico y el módulo de ruptura de la madera, dos parámetros necesarios en el diseño de estructuras y productos compuestos de madera, no pueden ser calculados a partir de ensayos no destructivos.

Vibraciones transversales

Respecto a la utilización de tecnologías de carácter no destructivo y de su aplicación en el estudio de la madera Görlacher (1984), Nakai y col. (1991), Haines y col. (1996) e Ilic (2001) realizaron pruebas de flexión en vibraciones transversales y de flexión estática sobre probetas normalizadas. Sin embargo, la información relativa del módulo de ruptura de la madera y de su resistencia en el límite elástico relacionados con parámetros medidos con vibraciones transversales, por ejemplo la frecuencia y el módulo de elasticidad dinámico, es escasa (Sotomayor y Villaseñor, 2005). Más información sobre la aplicación de métodos no destructivos en la caracterización mecánica de la madera se encuentra en Pellerin y Ross (2002) y Bucur (1995). *Ultrasonido*

La técnica de ultrasonido y la caracterización mecánica de la madera ha sido estudiada por varios investigadores, entre otros por: Gerhards (1975), James (1961), James y col. (1982), Bucur (1995), Beall (2002), Kawamoto y Williams (2002) y Pellerin y Ross (2002). Estos investigadores concluyen que las ondas ultrasónicas y acústicas pueden viajar a través de la madera y a partir del cálculo de su velocidad el material puede ser caracterizado respecto a su anisotropía y a sus propiedades mecánicas. Además, los autores recomiendan el uso de pruebas por ultrasonido para determinar el módulo de elasticidad de la madera.

Arriaga y col. (2006) investigan en varias especies de madera estructural la variación de su rigidez elástica en función del contenido de humedad, sus resultados utilizando la tecnología *Sylvatestduo*® con ultrasonido, demuestran que esta técnica es aplicable para estimar el módulo de elasticidad de la madera.

Kabir y col. (2006) investigan la presencia de zonas húmedas en la madera de especies angiospermas y concluyen que la transmisión de una onda de ultrasonido se ve afectada entre otros factores, por la cantidad de humedad presente en la madera. De sus resultados, los autores proponen que el tiempo de transmisión del impulso es mayor en madera húmeda en comparación con el de la madera seca.

Ondas de esfuerzo

Varios investigadores han observado que la velocidad de las ondas de esfuerzo varía según la especie en estudio, su anisotropía y con el contenido de humedad de la madera. Entre otros autores se puede citar a: Gerhards (1975 y 1982), Sakai y col. (1990), Ross y Pellerin (1991), Smulski (1991), Sandoz (1993) y Booker y col. (1996).

Entre sus principales conclusiones, estos autores documentan que existen fuertes correlaciones entre el módulo de elasticidad dinámico obtenido a partir de la velocidad de una onda de esfuerzo y el módulo estático resultante de ensayos de flexión. Además, encuentran que la velocidad de las ondas de esfuerzo se incrementa proporcionalmente al valor del módulo de elasticidad en flexión estática, independientemente de la especie a la cual pertenece la madera estudiada.

Por su parte Han y col. (2006) estudian el efecto de la humedad en la velocidad de las ondas de esfuerzo en tableros de madera y madera sólida de *Pinus palustres* usando la tecnología *Metriguard*®. Entre sus conclusiones los autores encuentran para compósitos de madera que la velocidad de las ondas de esfuerzo decrece cuando aumenta el contenido de humedad en la madera y proponen que un análisis de regresiones entre la velocidad y el módulo de elasticidad de los materiales puede ser útil para predecir sus propiedades de resistencia.

Ruptura

El fenómeno de la ruptura en la madera ha sido estudiado por Kollmann y Côté (1968), Bodig y Jayne (1993) y recientemente por Smith y col. (2003). Por otra parte, información sobre valores del módulo de ruptura de la madera se puede encontrar en el Manual de la Madera,

editado por el Laboratorio de Productos Forestales de los Estados Unidos (Forest Products Laboratory, 1999) y en Sotomayor (2005).

La variación del módulo de ruptura en probetas de pequeñas dimensiones de madera de *Pinus spp.* (Southern pine) ocasionada por sustancias retardantes de fuego a sido estudiada por LeVan y col. (1990). Por su parte, Winandy y Morrell (1998) investigaron el efecto del método de preservación en la rigidez y la resistencia mecánica de especies de gimnospermas.

Respecto a particularidades de crecimiento relacionadas con el módulo de ruptura, Evans y col. (2000) estudiaron la influencia de la presencia de madera juvenil sobre los módulos de elasticidad y de ruptura de la madera de latifoliadas.

Por otra parte, Winandy y Rowell (2005), estudiaron la composición química relacionada con la resistencia a la ruptura de la madera, Green y col. (1988) examinaron el efecto del contenido de humedad sobre el módulo de ruptura en madera estructural de *Pseudotsuga menziesii*. Green y col. (2003) complementaron su estudio previo sobre Douglas-fir y estudiaron el efecto de la temperatura sobre el módulo de ruptura en madera de dimensiones de empleo de *Pseudotsuga menziesii*.

La información proveniente de los ensayos no destructivos de vibraciones transversales, de flexión, de ultrasonido y de ondas de esfuerzo fue tomada de la Tesis de Maestría del segundo autor (Villaseñor, 2007) y los resultados de los ensayos destructivos de ruptura fueron pruebas adicionales realizadas con el mismo material de investigación de la Tesis.

El objetivo de la investigación es analizar las relaciones entre las siguientes características de una muestra de madera de *Pinus douglasiana*:

- Módulo de ruptura
- Resistencia en el límite elástico
- Módulo de elasticidad en flexión estática
- Módulo de elasticidad en vibraciones transversales
- Módulo de elasticidad por ultrasonido
- Módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo

MATERIALES Y MÉTODOS

El material experimental se obtuvo de un árbol de *Pinus douglasiana* recolectado en el área forestal de la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Del ejemplar seleccionado, se cortó una troza de 500 mm de diámetro y 1 m de largo a una altura de 3 m sobre el nivel del suelo. De la troza se recortaron al azar 16 segmentos de 120 mm x 70 mm de sección transversal y de 500 mm de largo y de cada uno de estos segmentos se recortaron 2 probetas totalizando una muestra de 32 probetas normalizadas (International Organization for Standardization, 1975). Las dimensiones de las probetas con un contenido de humedad superior al punto de saturación de la fibra fueron de 20 mm x 20 mm x 320 mm orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal con respecto al plano leñoso. La madera estuvo libre de anomalías de crecimiento y de madera de duramen (Villaseñor, 2007).

Con el propósito de disminuir el contenido de humedad en la madera, las probetas se colocaron en una cámara climática durante 87 días. La humedad relativa dentro de la cámara varió de 98% a 0%. La temperatura varió entre 15°C y 103°C. El contenido de humedad de la madera varió entre 154%, que corresponde a su estado de humedad natural y 0% correspondiente a su estado anhidro (Villaseñor, 2007).

Vibraciones transversales

El ensayo de vibraciones transversales consistió en aplicar un impacto elástico en la dirección tangencial de la probeta en el centro geométrico de su portada siguiendo los protocolos de Villaseñor (2005 y 2007). La probeta estuvo apoyada en soportes simples, tal como se muestra en la figura 1. De esta forma, la probeta fue solicitada en flexión transversal. Durante la prueba se calculó el momento de inercia de la sección transversal de la probeta y la densidad y el contenido de humedad de la madera, correspondientes al momento del ensayo.



Figura 1. Ensayo de vibraciones transversales y diagrama de la probeta (Villaseñor, 2007).



Figura 2. Ensayo de flexión estática y diagrama de la probeta (Villaseñor, 2007).

Para el registro de la vibración de la probeta se utilizó un sensor de movimiento de tipo piezoeléctrico. El sensor fue colocado a la mitad de la altura de la probeta y sobre un punto nodal (ver figura 1) y conectado al aparato *Grindosonic*® MK5 (Lemmens, sin fecha), con

el cual fue medida la frecuencia natural de la vibración. El módulo de elasticidad por vibraciones transversales se calculó con la fórmula (Görlacher, 1984):

$$E_{vt} = \frac{4\pi^2 L_{vt}^4 f_{vt}^2 \rho_H}{m^4 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{L_{vt}^2} K \right)$$
(1)

Donde:

- E_{vt} = Módulo de elasticidad de la madera en vibraciones transversales (Pa).
- L_{vt} = Largo de la probeta (m).
- f_{vt} = Frecuencia natural de vibración de la probeta (Hz).
- $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera al contenido de humedad del ensayo (kg/m³).

m, K = Constantes.

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m^2) .

Flexión estática

La prueba de flexión estática consistió en solicitar la probeta sobre el centro de su portada de ensayo con una carga estática aplicada en la dirección tangencial siguiendo el protocolo de Villaseñor (2007). Para tal fin se utilizó una máquina universal de pruebas mecánicas *Tinius Olsen*® (Tinius Olsen, sin fecha). La figura 2 ilustra la geometría del ensayo de flexión estática y el diagrama de la probeta.

Durante las pruebas estáticas se calcularon el momento de inercia de la sección transversal de la probeta y la densidad y el contenido de humedad de la madera, parametros correspondientes al momento del ensayo.

La fórmula simplificada que se aplicó para el cálculo del módulo de elasticidad estático fue (Bodig y Jayne, 1993):

$$MOE = \frac{P l_{k}^{3}}{48 \,\mathrm{y} \,\mathrm{I}} \tag{2}$$

Donde:

MOE = Módulo de elasticidad en flexión estática de la madera (Pa).

P = Carga (N).

y = Deformación de la probeta en $l_{fe}/2$ (m).

- l_{fe} = Portada del ensayo (m).
- I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m^4) .

La resistencia en el límite elástico fue calculada utilizando la fórmula (Bodig y Jayne, 1993):

RLE =
$$\frac{3}{2} \frac{P_{le} l_{fe}}{b h^2}$$
 (3)

Donde:

RLE = Resistencia en el límite elástico de la madera (Pa).

Ple = Carga al límite elástico de la probeta (N).

lfe = Portada del ensayo (m).

b = Base de la probeta (m).

h = Altura de la probeta (m).

Y el módulo de ruptura se calculó con la ayuda de la fórmula (Bodig y Jayne, 1993):

$$MOR = \frac{3}{2} \frac{P_{rup} l_{fe}}{b h^2}$$
(4)

Donde:

MOR = Módulo de Ruptura de la madera (Pa).

 P_{rup} = Carga a la ruptura de la probeta (N).

 l_{fe} = Portada de ensayo (m).

b = Base de la probeta (m).

h = Altura de la probeta (m).

Ultrasonido

En cada prueba de ultrasonido se midieron las dimensiones y el peso de cada probeta. De esta forma se calculó el volumen de la probeta, la densidad y el contenido de humedad de la madera, correspondientes al momento del ensayo. Posteriormente, se midió el tiempo de transmisión de la onda de ultrasonido para lo cual se utilizó la tecnología *Sylvatestduo*® (Conceptsboisstructure, 2004), se calculó la velocidad y se determinó el módulo de elasticidad en ultrasonido (ver figura 3). El módulo de elasticidad en ultrasonido se calculó con la fórmula (Bucur, 1995):

$$E_{us} = v_{us}^2 \rho_H \tag{5}$$

Donde:

 E_{us} = Módulo de elasticidad de la madera en ultrasonido (GPa)

 V_{us} = Velocidad del ultrasonido (m/s)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera al contenido de humedad del ensayo (kg/m³).



Figura 3. Ensayo en ultrasonido y diagrama de la probeta (Villaseñor, 2007).

Ondas de esfuerzo

La prueba de ondas de esfuerzo consistió en medir el tiempo de transmisión de una onda a través de la probeta. Para tal efecto se utilizó la tecnología *Metriguard*® (Metriguard, 1998). Al mismo tiempo se midieron las dimensiones y el peso de cada probeta, de esta forma se calculó el volumen de la probeta, la densidad y el contenido de humedad de la madera, correspondientes al momento del ensayo.

En el ensayo por ondas de esfuerzo se aplicó sistemáticamente un impacto elástico con la ayuda de una esfera de acero colocada en un péndulo. La esfera impacta en un mecanismo de transmisión que induce una onda de esfuerzo en la probeta, la cual se desplaza en la dirección longitudinal de la madera. La emisión de la onda se registró utilizando un acelerómetro colocado en un punto de apoyo de la probeta. La recepción de la onda se registró con otro acelerómetro colocado en el otro punto de apoyo al lado opuesto de la probeta, tal como se ilustra en la figura 4. El aparato registró el tiempo de transmisión correspondiente a la distancia entre los puntos de apoyo a partir del cual se calculó la velocidad de transmisión de la onda en la madera. Los puntos de apoyo se localizaron a 10 mm de los extremos de las probetas.

El módulo de elasticidad de la madera por ondas de esfuerzo se calculó con la fórmula (Ross y Pellerin, 2002):

$$E_{oe} = v_{oe}^2 \rho_{\rm H} \tag{6}$$

Donde:

- E_{oe} = Módulo de elasticidad de la madera en ondas de esfuerzo (GPa)
- V_{oe} = Velocidad de las ondas de esfuerzo (m/s)
- $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera al contenido de humedad del ensayo (kg/m³).



Figura 4. Ensayo de ondas de esfuerzo y diagrama de la probeta (Villaseñor, 2007).

RESULTADOS

Los valores de curtosis y de los coeficientes de asimetría para las variables presentadas en la tabla 1 permiten considerar que estos resultados provienen de una distribución normal para un nivel de confiabilidad del 95%. El rango de los valores de los coeficientes de variación calculados es compatible con la variación de los valores correspondientes a las propiedades mecánicas de maderas de coníferas (Forest Products Laboratory, 1999). Estos resultados permiten comparar los valores de las medias aritméticas de los parámetros medidos en los dos ensayos realizados.

	Caracteristicas							
Estadísticas	ρ	MOR	RLE	E _{fe}	Evt	Eus	E _{oe}	
Estadísticas	(Kg/m^3)	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	
Media aritmética	495	145.03	111.02	15.56	15.75	24,17	15,37	
Coeficiente de variación (%)	11.0	15.4	13.7	13.2	13.1	12,51	12,43	
Curtosis	-1.386	-1.343	-0.972	-1.09	-1.30	-0,506	-1,122	
Coeficiente de asimetría	-0.239	-0.108	-0.38	-0.08	-0.16	-0,017	-0,130	

Tabla 1. Módulo de ruptura, resistencia al límite elástico y nódulos de elasticidad.

ANÁLISIS

De acuerdo con la TABLA FITECMA (Sotomayor, 2002), la densidad de la madera de *Pinus douglasiana* se clasifica como media. Ajustando estos valores en estado anhidro a los de un contenido de humedad superior al punto de saturación de la fibra (32%), de acuerdo con Villaseñor (2007), la densidad de la madera en estado saturado fue de 567 (Kg/m³), magnitud mayor en 33%, en comparación con los valores propuestos por Sotomayor (2005) para un contenido de humedad superior a 32%.

De acuerdo con la clasificación de Bodig y Jayne (1999) los tipos de ruptura que presentaron las probetas fueron: en tensión simple 80% y en tensión con astillado 20%. Este resultado ilustra la homogeneidad de la madera de las probetas, su correcta orientación respecto al plano leñoso y la simetría de los esfuerzos inducidos durante los ensayos de ruptura.

Los valores promedio del módulo de elasticidad (MOE), del módulo de ruptura (MOR) y de la resistencia en el límite elástico (RLE) fueron mayores a los tabulados en la TABLA FITECMA. Los valores mostrados en la tabla 1 se refieren a madera en estado anhidro y los valores de referencia en la TABLA FITECMA lo son para madera en estado saturado. De acuerdo con Bodig y Jayne (1993) la resistencia mecánica de la madera aumenta a medida que su contenido de humedad disminuye. La diferencia en el contenido de humedad entre la muestra de madera estudiada y los valores tabulados permite explicar la variación en los resultados.

Los resultados del módulo de ruptura (MOR) y de la resistencia en el límite elástico (RLE) correlacionaron con la densidad de la madera (ρ), particularmente la RLE (ver figura 4). Estos resultados confirman, para el caso de estudio de una muestra de madera de *Pinus douglasiana*, el módulo de ruptura y la resistencia en el límite elástico están relacionados estadísticamente con la densidad de la madera con fuertes coeficientes de correlación MOR

= f (ρ): R² = 0.72 y RLE = f (ρ): R² = 0.91, conclusión que concuerda con las de Ilic (2001) y Villaseñor (2007).

Igualmente, la correlación entre el MOR y la RLE fue alta $R^2 = 0.81$ (ver figura 5), resultado que permite considerar a la resistencia en el límite elástico de la madera como un buen predictor del módulo de ruptura.

En el mismo contexto, el módulo de ruptura y la resistencia en el límite elástico correlacionaron para MOR = f (MOE): $R^2 = 0.91$ y RLE = f (MOE): $R^2 = 0.79$ en función del módulo de elasticidad en flexión estática (ver figura 5). De estos resultados se deduce que el MOR y la RLE pueden ser estimadas a partir de los valores del MOE.

Respecto a las relaciones entre los resultados de las pruebas dinámicas y estáticas, el MOR y la RLE correlacionaron con Evt de la siguiente manera: MOR = f (Evt): $R^2 = 0.93$ y RLE = f (Evt): $R^2 = 0.81$ (ver figura 6). Además, el MOE presentó un correlación con el Evt de: MOE = f (Evt): $R^2 = 0.98$ (ver figura 5). Estos resultados coinciden con las conclusiones de Tanaka y col. (1991), quienes proponen que los valores mecánicos determinados en vibraciones transversales pueden predecir valores calculados estáticamente.



Figura 5. Módulo de ruptura y resistencia en el límite elástico en función de los módulos de elasticidad Evt, MOE, Eus y Eoe.

El análisis estadístico de comparación de medias entre dos muestras para un nivel de confiabilidad del 95%, de las variables módulo de elasticidad en vibraciones transversales (Evt) y módulo de elasticidad en flexión estática (MOE), propone que no existen diferencias

significativas entre medias. Los valores de *p* calculados fueron mayores a 0.05, resultado que permite aceptar la hipótesis nula: H₀: $x_1 = x_2$, confirmando al mismo tiempo una igualdad entre las medias de estos parámetros. El cociente Evt/ MOE fue igual a 1.012, para madera con un contenido de humedad de 0%. Esta diferencia es menor que la encontrada por Görlacher (1984), Haines y col. (1996) e Ilic (2001), quienes experimentaron con probetas con un contenido de humedad del 12%.

Esta tendencia sugiere un efecto de superposición de los efectos hidroelástico y viscoelástico durante un ensayo mecánico, cuando se combinan la velocidad de solicitación y el estado higroscópico de la madera.

Los módulos de elasticidad en ultrasonido (Eus) y en ondas de esfuerzo (Eoe) correlacionaron bien con la densidad (ρ) de la madera: Eus = f (ρ): R² = 0.77; Eoe = f (ρ): R² = 0.84 (ver figura 5). Resultado que es congruente con investigaciones anteriores (Bucur, 1995; Pellerin y Ross, 2002).

Si los valores de las velocidades Vus y Voe se asocian con las densidades respectivas de las probetas utilizando las ecuaciones (5) y (6), se pueden obtener los valores correspondientes a los módulos de elasticidad Eus y Eoe.

Después de esta transformación, el módulo de ruptura (MOR) y la resistencia en el límite elástico (RLE) correlacionan bien con los módulos Eus y Eoe: MOR = f (Eus): $R^2 = 0.86$; RLE = f (Eus): $R^2 = 0.82$; MOR = f (Eoe=: $R^2 = 0.93$; RLE = f (Eoe): $R^2 = 0.87$ (ver figura 5). En el mismo contexto, los datos del módulo de elasticidad en flexión estática (MOE) correlacionan bien con los datos correspondientes a los módulos Eus y Eoe: MOE = f(Eoe): $R^2 = 0.95$; MOE = f (Eus): $R^2 = 0.93$ (ver figura 5).

El análisis estadístico de comparación de medias entre dos muestras para un nivel de confiabilidad del 95%, de las variables módulo de elasticidad en ondas de esfuerzo (Eoe) y módulo de elasticidad en flexión estática (MOE), propone que no existen diferencias significativas entre medias

Desde otro punto de vista, el cociente Eoe/MOE es igual a 0.988 para madera de *Pinus douglasiana* con un contenido de humedad de 0%. De acuerdo con Görlacher (1984), Haines y col. (1996) e Ilic (2001), quienes experimentaron con probetas con un contenido de humedad del 12%, para una misma muestra de madera, el valor del módulo de elasticidad determinado en una prueba dinámica es mayor en comparación con el valor calculado en un ensayo estático. Estas observaciones sugieren la manifestación del carácter visco elástico de la madera cuando la velocidad de solicitación se incrementa, como es el caso de los ensayos dinámicos. Para el caso que nos ocupa, esta variación fue mínima.

De acuerdo con los resultados de Villaseñor (2007 y 2088 en revisión), a partir de un valor de referencia de contenido de humedad igual a 0%, el módulo dinámico –en relación al módulo estático,- aumenta a medida que el contenido de humedad de la madera se incrementa. Es decir, si en un ensayo de flexión transversal la velocidad de carga aumenta, el valor del módulo de elasticidad aparente de la madera se incrementa. Pero si el contenido de humedad de la madera se incrementa.

No obstante que las pruebas fueron realizadas en una muestra común de madera, el valor promedio de Eus fue 55% más grande que el valor correspondiente al MOE, y de 57% en comparación con el Eoe. El módulo de elasticidad en ultrasonido es determinado a partir del tiempo de transmisión del ultrasonido en la madera y de esta manera calcular el cuadrado de la velocidad de la onda a través de la probeta. Aún considerando el efecto viscoelástico de la madera en la variación del valor de los módulos dinámicos, las diferencias encontradas entre el módulo Eus y los módulos MOE y Eoe son muy grandes. Estos resultados sugieren ajustar el aparato *Sylvatestduo*® a las condiciones de cada ensayo en particular, especialmente para estudios de maderas de coníferas mexicanas.

CONCLUSIONES

Dado que el módulo de ruptura y la resistencia al límite elástico no se pueden calcular directamente con ensayos de vibraciones, ultrasonido y ondas de esfuerzo, la investigación señala que los valores del módulo de elasticidad de la madera determinado por métodos no destructivos pueden ser de utilidad para la predicción del módulo de ruptura y de la resistencia al límite elástico de la madera de *Pinus douglasiana*.

REFERENCIAS

Arriaga, F.; Iñiguez, G.; Esteban, M.; Fernández-Golfín, J.I. 2006. Structural Tali timber (*Erythrophieum ivorense* A. Chef., *Erythrophleum suaveolens* Brenan.): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods. *Holz als Rho- und Werkstoff.* 64(5):357-362.

Beall, F.C. 2002. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood propierties. *Wood Science and Technology*. 36:197-212.

Bodig, J.; Jayne, B.A. 1993. Mechanics of Wood Composites. Reprinted edition. Kreiger Publishing Company. USA.

Booker, R.E.; Froneberg, J.; Collins, F. 1996. Variation of sound velocity and dynamic Young's modulus with moisture content in the three principal directions. In: Proceedings of 10th International Symposium on Non-Destructive Testing of Wood. Switzerland. pp:279-295.

Bucur, V. 1995. Acoustics of wood. CRC Press.

Conceptsboisstructure. 2004. Sylvatestduo user manual. France.

Evans, J.W.; Senft, J.F.; Green, D.W. 2000. Juvenile wood effect in Red alder: Analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. *Forest Products Journal*. 50(7/8):75-87.

Forest Products Laboratory. 1999. Wood Handbook. Wood as an Engineering Material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA.

Gerhards, C.C. 1975. Stress wave speed and MOE of sweetgum ranking from 150 to 15 percent moisture content. *Forest Products Journal*. 25(4):51-57.

Görlacher, R. 1984. Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des E-modulus von Holz. *Holz als Roh-und Werkstoff.* 42:212-222.

Green, D.W. *et al.* 1988. Predicting the effect of moisture content on the flexural properties of Douglas-Fir dimension lumber. *Wood and Fiber Science*. 20(1):107-131.

Green, D.W.; Evans, J.W.; Craig, B.A. 2003. Durability of structural lumber products at high temperatures. Part 1. 66°C at 75% RH and 82°C at 30%RH. *Wood and Fiber Science*. 35(4):499-523

Haines, D.W.; Leban, J.M.; Herbé, C. 1996. Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood Science and Technology*. 30:253-263.

Han, G.; Wu, Q.; Wang, X. 2006. Stress – wave velocity of wood – based panels: Effect of moisture, product type, and material direction. Forest Products Journal. 56(1):28-33.

Ilic, J. 2001. Relations among the dynamic and static elastic properties of air-dry Eucalyptus delegatensis R. Baker. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 59:169-175.

International Organization for Standardization ISO 3129-1975 (E). 1975. Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO). Disponible en: http://www.iso.org/iso/home.htm.

James, W.L. 1961. Effect of temperature and moisture content on: Internal Friction and Speed of Sound in Douglas-fir. *Forest Products Journal*. 11(9):383-390.

James, W.L.; Boone, R.S.; Galligan, W.L. 1982. Using speed of sound in wood to monitor drying in a kiln. *Forest Products Journal*. 32(1):27-34.

Kabir, M.F.; Leininger, T.D.; Araman, P.A.; Winn, M.F. 2006. Detection of wetwood by ultrasonics. *Forest Products Journal*. 56(3):70-74.

Kawamoto, S.; Williams, R.S. 2002. Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood-Based Composites – A Review. Gen. Tech. Rep. FPL-GRT-134. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA.

Kollmann, F.P.; Côté, W.A. 1968. Principles of Wood Science and Technology. Volume I: Solid Wood. Springer-Verlag. Germany.

Lemmens, J.W. (sin fecha). Operating Instructions for the GrindoSonic MK5 "Industrial" Instrument. J.W. Lemmens, Inc. USA.

LeVan, S.L.; Ross, R.J.; Winandy, J.E. 1990. Effects of fire retardant chemicals on bending properties of wood at elevated temperatures. Res. Pap. FPL-RP-498. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. USA.

Metriguard Inc. 1998. Metriguard Model 239A Maintenance & Operation Manual. Metriguard Inc. USA.

Nakai, T.; Tanaka, T.; Nagao, H. 1991. Nondestructive Evaluation of Bending Properties of Flat Square Sawn Timber. In: Proceedings of the 1991 International Timber Engineering Conference. Volume 2. United Kingdom. pp: 2.236-2.241.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society.

Ross, R.J.; Pellerin, R.F. 1991. NDE of green material with stress wave: preliminary results using dimension lumber. *Forest Products Journal*. 41(6):57-59.

Sakai, H.; Minamisawa, A.; Takagi, K. 1990. Effect of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in woods. *Ultrasonics*. 28(November):382-385.

Sandoz, J.L. 1993. Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood Science and Technology*. 27:373-380.

Smith, I.; Landis, E.; Gong, M. 2003. Fracture and Fatigue in Wood. John Wiley & Sons Ltd. England.

Smulski, S.J. 1991. Relationship of stress wave – and static bending – determined properties of four Northeastern hardwoods. *Wood and Fiber Science*. 23(1):44-57.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2002. TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Coordinación de la Investigación Científica. UMSNH. México. Formato: 60 x 90 cm. 1 p.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2005. Características mexicanas y clasificación de la madera de 150 especies de maderas mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la madera*. UMSNH. 1(1):3-20. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Villaseñor Aguilar, J.M. 2005. Comportamiento a la ruptura de probetas modificadas de madera de *Prosopis sp. Investigación e Ingeniería de la Madera*. 1(2): 3-9. México.

Tanaka, T.; Nagao, H.; Nakai, T. 1991. Nondestructive Evaluation of Bending and Tensile Strength by Longitudinal and Transverse Vibrations of Lumber. In: Proceedings of the Eighth International Nondestructive Testing of Wood Symposium. Washington State University. USA. pp:57-72.

Tinius Olsen Testing Machina Co., Inc. (sin fecha). Super "L" Universal Testing Machine: Instruction Booklet number: 98-5 and 398.110. Tinius Olsen Testing Machina Co., Inc. USA.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2005. Comportamiento mecánico de la madera de *Prosopis sp.* en relación con la variación de su masa. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Winandy, J.E.; Morrell, J.J. 1998. Effects of incising on lumber strength and stiffness relationships between incision density and depth, species, and MSR grade. *Wood and Fiber Science*. 30(2):185-197.

Winandy, J.E.; Rowell, R.M. 2005. Chemistry of Wood Strength. In: Handbook of wood chemistry and wood composites. Rowell, R.M. Editor. CRC Press. USA. pp:303-347.

5. COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO DE LA MADERA DE PROSOPIS SP.

RESUMEN

Los elementos estructurales de madera sometidos a cargas permanentes sufren deformaciones denotando un carácter viscoso del material. Con el objeto de asegurar la fiabilidad de la estructura, es necesario anticipar un comportamiento conjunto que resulta de la respuesta elástica y del comportamiento diferido de la madera. El objetivo de la investigación es demostrar el carácter viscoelástico de la madera manifestado por la diferencia entre los valores del Módulo de Elasticidad estático y dinámico de una muestra de probetas normalizadas de Prosopis sp. Se realizaron pruebas no destructivas de flexión transversal con dos variantes: vibración en apoyos simples (Ensayo dinámico) y flexión en tres puntos (Ensayo estático). Los resultados demostraron que el Módulo de Elasticidad estático (MOE) es un buen predictor de Módulo de Elasticidad dinámico (Ed) y viceversa. Además, el alto coeficiente de correlación encontrado entre estos parámetros, postula que si aumenta el valor del MOE de la madera de Prosopis sp., su valor de Ed se incrementa proporcionalmente. Los ensayos dinámicos practicados resultaron ser confiables, fueron más rápidos y sus parámetros medidos fueron más repetitivos en comparación con los ensavos estáticos. La investigación fue un estudio de caso y una extensión de sus resultados es la aplicación de la metodología estudiando otras especies y dimensiones de probetas.

Palabras clave: Viscoelasticidad, Módulo de Elasticidad estático y dinámico, Prosopis.

INTRODUCCIÓN

La madera es un material ampliamente usado en Ingeniería que se comporta mecánicamente como un sólido elástico y que obedece las leyes de la Resistencia de Materiales. Sin embargo, al paso del tiempo, los elementos estructurales de madera sometidos a cargas permanentes sufren deformaciones denotando un carácter viscoso en la madera. Este comportamiento depende de la intensidad y duración de la carga y de la rigidez del miembro estructural entre otros factores. Con el objeto de asegurar la fiabilidad de la estructura, es necesario anticipar un comportamiento conjunto que resulta de la respuesta elástica y del comportamiento diferido de la madera.

El desarrollo de productos fabricados con madera, requiere además información normalizada y confiable de las propiedades de este material. Una de las características mecánicas más necesarias en Ingeniería de la madera es el Módulo de Elasticidad, el cual encuentra su utilidad como parámetro de diseño, cálculo e indicador de calidad.

De acuerdo con Ross y Pellerin (1994), usualmente el Módulo de Elasticidad dinámico (Ed) de la madera es determinado empleando métodos de evaluación de carácter no destructivo, por ejemplo: ondas de esfuerzo y ultrasonido, entre otros. Para este estudio, se utilizaron vibraciones mecánicas.

Con el objeto de caracterizar a la madera, el Módulo de Elasticidad dinámico se utiliza en la verificación de los métodos de laboratorio referentes a la calidad de resultados obtenidos en ensayos mecánicos, de acuerdo con el Manual de Construcción con Madera del Instituto Americano de Construcción con Madera (American Institute of Timber Construction, 1994),

La caracterización del comportamiento mecánico de la madera en condiciones dinámicas y los métodos de laboratorio recientemente desarrollados son de carácter no destructivo y han utilizado la hipótesis fundamental en mecánica de la madera propuesta por Jayne en 1959: la madera y los productos fabricados con ella pueden almacenar y disipar energía, por ejemplo, la propiedad de la madera de almacenar energía es manifestada por la velocidad a la cual una onda mecánica viaja a través de ella. En contraste, la capacidad de la madera para atenuar una onda de vibración denota su capacidad para disipar energía. Jayne propuso así la hipótesis de que estas propiedades de la madera para almacenar y disipar energía, están controladas por los mismos mecanismos que determinan su comportamiento mecánico en condiciones estáticas. Es decir, la estructura molecular y anatómica del material es la base del comportamiento mecánico de la madera. Como consecuencia, es posible relacionar estadísticamente estas propiedades utilizando métodos de análisis numéricos como las correlaciones estadísticas. Esta proposición ha sido verificada experimentalmente por los trabajos de Jayne (1959); Pellerin (1965); Kaiserlik y Pellerin (1977); Ross y Pellerin (1988); Ross y col. (1977); y más recientemente por: Sandoz (2000 y 2002).

Por otra parte, a partir de la teoría propuesta por Timoshenko y col. (1994), sobre la resistencia de materiales aplicada al estudio de vigas en Ingeniería, Hearmon (1966) estudió el comportamiento anisotrópico de la madera y la relación de esbeltez de las probetas en un ensayo de flexión en vibración transversal. A partir de sus resultados empíricos, el autor formuló el procedimiento experimental, utilizado posteriormente por diferentes autores en estudios sobre el comportamiento elástico de la madera. Sus valores de laboratorio del Módulo de Elasticidad para *Fraxinus excelsior* a un contenido de humedad del 12% determinado en un ensayo de flexión en vibración transversal fue de 14 GPa y para el Módulo de Elasticidad en flexión estática fue de 10 GPa, es decir una diferencia de 40%.

Con el propósito de confirmar la utilidad de la teoría de análisis de vigas, propuesta por Goens (1931) y Timoshenko y col. (1994), Perstorper (1992) comparó el Módulo de Elasticidad en vigas de dimensiones estructurales de *Picea excelsa*, aplicando ensayos de vibración transversal y de flexión estática. Sus resultados confirman que hay un 8% de diferencia entre el Módulo de Elasticidad dinámico y el Módulo de Elasticidad estático, siendo mayor el dinámico.

Los resultados encontrados por Perstorper (1992) en *Picea excelsa* a un contenido de humedad del 12% para el Módulo de Elasticidad dinámico fue de 9 GPa y para el Módulo de Elasticidad estático (MOE) fue de 8 GPa, es decir una diferencia del 12.5%. Además, el autor encontró regresiones entre los valores dinámicos y estáticos con coeficientes de correlación en promedio de 0.94, confirmando de esta manera la relación entre los dos parámetros calculados con métodos donde solo varía la velocidad de la aplicación de la carga.

Respecto a la utilización de tecnologías de carácter no destructivo y de su aplicación en el estudio de la madera, Görlacher (1984) realizó pruebas de flexión en vibración transversal

sobre probetas normalizadas, utilizando la tecnología Grindosonic[®] y la metodología desarrollada anteriormente por Kollmann y Krech (1960), y Hearmon (1966). El autor comprobó la utilidad de este método experimental para la determinación del Módulo de Elasticidad en flexión transversal por vibración en la madera. Los datos del Módulo de Elasticidad dinámico de 15 GPa fueron superiores en 7% comparados al Módulo de Elasticidad estático de 14 GPa.

Haines y col. (1996) determinaron el Módulo de Elasticidad en flexión para un contenido de humedad del 12%, en vibración transversal para la madera de *Picea excelsa* que resultó en 11 GPa y *Abies amabilis* el cual fue de 13 GPa. Sus resultados demostraron que el Módulo de Elasticidad dinámico calculado para madera estructural fue 6% superior al Módulo de Elasticidad estático y para probetas de pequeñas dimensiones la diferencia respectiva fue de 3%. Los autores hacen notar que las propiedades viscoelásticas de la madera influyen en la diferencia de valores entre los Módulos de elasticidad dinámicos y estáticos.

Por su parte, Ilic (2001) estudió la relación entre los valores dinámicos y estáticos provenientes de ensayos de flexión transversal en probetas de pequeñas dimensiones a un contenido de humedad del 12% de *Eucalyptus delegatensis* y encontró que el Módulo de Elasticidad dinámico de 16 GPa es mayor que el Módulo de Elasticidad estático de 14 GPa en 14 %.

De la revisión de autores sobre el tema en estudio se puede sintetizar que los métodos de flexión en vibración transversal y flexión estática se han utilizado con éxito para determinar el Módulo de Elasticidad de la madera, y que el valor dinámico es generalmente mayor al estático.

Conforme con Ashby (1999), el Módulo de Elasticidad es una característica intrínseca del material y su valor no debe variar según el método de ensayo utilizado para su determinación. Sin embargo, en experimentos para la determinación del Módulo de Elasticidad, la madera denota valores diferentes si la velocidad de carga varía. Esta diferencia en los resultados para una propiedad intensiva como el Módulo de Elasticidad de la madera en flexión transversal puede ser explicada por su carácter viscoelástico, criterio confirmado por Kollmann y Côté (1968), Guitard (1987), Bodig y Jayne (1993) y Panshin y De Zeeuw (1964), entre otros autores, y documentada en el Manual de la madera como material de Ingeniería del Laboratorio de Productos Forestales de los Estados Unidos de América (Forest Products Laboratory, 1999).

OBJETIVO

Demostrar el carácter viscoelástico de la madera manifestado por la diferencia entre los valores del Módulo de Elasticidad de una muestra de probetas normalizadas de *Prosopis sp.*, medidos en un ensayo de flexión transversal en condiciones de carga dinámica y estática.

La investigación se fundamenta en la teoría de la Resistencia de Materiales y en la Teoría de Vibraciones. Además, la proposición se concreta a su comportamiento en solicitaciones de flexión estática tres puntos y dinámica en vibración transversal sobre apoyos simples, en condiciones de invariabilidad térmica.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material experimental se obtuvo de una troza de un árbol de *Prosopis sp.* (Mezquite) recolectado en la región de Dolores Hidalgo, Guanajuato. Las dimensiones de la troza esquematizada en la figura 1, fueron 200 mm de diámetro por 400 mm de largo. Las pruebas se efectuaron en La Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, durante el segundo semestre del 2004.

A partir de cada uno de los seis sectores en que se dividió la troza, se recortaron segmentos en forma de paralelepípedo, adaptando la norma ISO 3129-1975 (International Organization for Standardization, 1975a) con dimensiones de 22 mm x 72 mm x 400 mm, como se muestra en la figura 1. Con el objeto de estabilizar el contenido de humedad en la madera, los segmentos se mantuvieron en una cámara de acondicionamiento en condiciones constantes, a temperatura de 20° C y humedad relativa de 65 %, durante un periodo de 65 días, hasta alcanzar un contenido de humedad (C.H) final de 12 %.



Figura 1. Selección de probetas. a) Troza; b) Sector; c) Segmento; d) Listón; e) Probeta ensayo de flexión; f) Probeta densidad y contenido de humedad.

Al término del periodo de acondicionamiento de cada segmento se prepararon tres listones orientados en las direcciones Radial (R), Tangencial (T) y Longitudinal (L), con dimensiones de 22 mm x 22 mm x 400 mm, a partir de los cuales se elaboraron las probetas normalizadas

para los ensayos de flexión dinámicos y estáticos no destructivos con dimensiones de 20 mm x 20 mm x 320 mm de acuerdo a la norma ISO 3349-1975 (International Organization for Standardization, 1975b), como se ve en la figura 1.

A cada una de las 18 probetas que constituyeron la muestra de estudio, se le midió sus dimensiones: largo (L), base (b) y altura (h), y su masa (m), y se calculó: su volumen (V), su densidad (ρ), su momento de inercia de la sección transversal (I), y su contenido de humedad (C.H.) al momento del ensayo (ver figura 2).

El total de 18 probetas se dividió en dos grupos de 9 especímenes cada uno: el grupo radial y el grupo tangencial, con el objeto de girar su posición 90 grados en el plano R-T (Ver figura 2) en los ensayos de flexión tal como se esquematiza en la figuras 3 y 4.



Figura 2. Estrategia experimental para ensayos no destructivos.

A todas las probetas, se le realizaron pruebas no destructivas de flexión transversal con dos variantes: vibración en apoyos simples (Ensayo dinámico) y flexión tres puntos (Ensayo estático) efectuando 3 ensayos dinámicos y estáticos respectivamente en cada probeta. Esta estrategia experimental se ilustra en la figura 2.

Ensayos dinámicos no destructivos

Los ensayos dinámicos no destructivos consistieron en el estudio de la probeta modelada como una viga continua, de geometría uniforme y estructuralmente homogénea, sometida a vibración transversal. La rutina de laboratorio siguió los lineamientos del manual de operación del equipo GrindoSonic[®] (Lemmens, s/f). La figura 3 muestra el montaje de laboratorio y el sensor con el cual se registró la vibración de la viga y se midió la frecuencia natural del sistema.



Figura 3. Esquema ensayo dinámico y diagrama de la probeta.

El impulso elástico inicial fue aplicado en el centro geométrico de la probeta, en la dirección transversal a la misma, apoyada sobre dos soportes rígidos de tipo simples a una distancia nodal de 0.224 L. El ensayo dinámico en cada probeta fue repetido tres veces y el promedio de valores fue considerado para su análisis posterior.

La formula utilizada para la determinación del Módulo de Elasticidad dinámico fue presentada por Goens (1931), y viene dada por:

$$Ed = \frac{4\pi^2 L^4 f^2 \rho}{m^4 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{L^2} K \right)$$
(1)

Donde:

- Ed = Módulo de Elasticidad dinámico de la madera (Pa).
- L = Largo de la probeta (m).
- f = Frecuencia natural de la probeta (Hz).
- ρ = Densidad de la probeta (kg/m³).

m, K = Constantes.

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m^2) .

Ensayos estáticos no destructivos

Las pruebas estáticas no destructivas consistieron en el estudio de la probeta sometida a una carga estática aplicada transversalmente en el centro de su portada de ensayo. Tal como se muestra en la figura 4, que presenta el diagrama de la viga sometida a una solicitación de flexión tres puntos.

El proceso de carga-deformación en los ensayos estáticos no destructivos fue restringido a un intervalo de carga que representó una fracción entre 18 % y 35 % del dominio elástico. Esta estrategia aseguro el carácter de evaluación no destructivo en los ensayos estáticos. El ensayo estático en cada probeta fue repetido tres veces y el promedio de valores fue considerado para su análisis posterior.



Figura 4. Diagrama de la probeta en el ensayo estático en tres puntos.

La fórmula simplificada que se aplicó para el cálculo del Módulo de Elasticidad estático fue (Bodig y Jayne, 1993):

$$MOE = \frac{\Delta P}{\Delta y} \frac{l^3}{48 I}$$
(2)

Donde:

MOE = Módulo de Elasticidad estático de la madera (Pa).

- ΔP = Intervalo de carga, ensayos no destructivos (N).
- Δy = Intervalo de deformación, ensayos no destructivos (m).
- l = Portada del ensayo (m).
- I = Momento de Inercia de la sección transversal de la probeta (m^4) .

RESULTADOS

La tabla 1 presenta los estadígrafos Media muestral, Error estándar, Asimetría, Curtosis y Tamaño de la muestra del Módulo de Elasticidad dinámico (Ed) y del Módulo de Elasticidad estático (MOE), para probetas normalizadas.

Tabla 1. Estadígrafos del Módulo de Elasticidad dinámico (Ed) y Módulo de Elasticidad estático (MOE).

Fatadíarafos	Ed	MOE
Estaulgratos	(GPa)	(GPa)
Media muestral	8.62	7.04
Error estándar	0.282	0.237
Asimetría	0.372	0.319
Curtosis	-1.550	-1.252
Tamaño de la muestra	18	18

La figura 5 muestra el grafico de los valores del Módulo de Elasticidad dinámico (Ed) y del Módulo de Elasticidad estático (MOE) para cada una de las 18 probetas estudiadas.



Figura 5. Gráfico de los valores de los Módulos de Elasticidad dinámico y estático.

La figura 6 muestra el diagrama de dispersión entre los Módulos de Elasticidad estático y dinámico y su línea de regresión.



Figura 6. Diagrama de dispersión entre los Módulos de Elasticidad estático y dinámico.

ANÁLISIS

El análisis del comportamiento de las probetas acorde a su rotación en el plano R-T demostró que la rotación de las probetas en relación a la dirección de la carga, no influye de manera importante en la magnitud de los valores de Ed y MOE para este estudio. La aceptación de la hipótesis nula (H₀: $\mu_1 = \mu_2$), para las muestras Ed y MOE, radial y tangencial, y las correlaciones derivadas entre los valores de los módulos, permiten por una parte, agrupar para análisis subsecuentes los resultados de los dos grupos de nueve probetas (según su orientación radial y tangencial), en un sólo conjunto de dieciocho especímenes. Además, los valores de asimetría y curtosis que se presentan en la tabla 1 permiten considerar a los estadígrafos de Ed y MOE como provenientes de una distribución normal para un nivel de confiabilidad del 95%. A partir de estos resultados, en la tabla 1 se presentan los estadígrafos para las 18 probetas agrupadas indistintamente de su orientación en el ensayo de flexión.

El valor calculado de la media muestral del Módulo de Elasticidad dinámico (Ed) para madera de *Prosopis sp.*, que se presenta en la tabla 1. es inferior a los datos bibliográficos de especies latífoliadas. Debido a que no se encontró información acerca del Módulo de Elasticidad en vibración transversal para maderas de *Prosopis spp.*, el valor de Ed no puede ser comparado con datos del mismo género.

El valor de la media muestral para el Módulo de Elasticidad estático, presentado en la tabla 1, se sitúa por abajo del intervalo de valores de MOE, para especies de madera del mismo género encontrados en la bibliografía. De acuerdo con Bodig y Goodman, (1973) y Guitard y El Amri (1987), la resistencia mecánica de la madera es función creciente de su densidad. El valor promedio de la densidad de la madera de *Prosopis* calculado de 730 (kg/m³), es también inferior a los valores de densidad encontrados para este género en la bibliografía. Lo que implica que los valores de MOE calculados son inferiores pero proporcionales a los reportados en la bibliografía.

Comportamiento viscoelástico

En un primer enfoque de análisis por grupos según el tipo de ensayo, los resultados de la tabla 1 muestran que los valores del Módulo de Elasticidad dinámico, son superiores al valor correspondiente del Modulo de Elasticidad estático. Por otra parte, si se analizan los resultados particulares para cada probeta presentados en la figura 5, se distingue que el valor de Ed calculado en cada una de ellas es mayor que el respectivo valor calculado de MOE en la misma probeta, esta diferencia entre valores fue observada en cada una de las probetas examinadas, el cálculo de la diferencia entre los valores es de 22 % en promedio. Es importante mencionar que en la figura 5, los valores respectivos para cada especímen son correspondientes, es decir que siguen el mismo patrón y son proporcionales entre si. El valor de Ed es mayor que el valor de MOE, para cada una de las probetas estudiadas, donde el único parámetro experimental que varió fue la velocidad de solicitación.

La prueba de comparación de medias entre los valores del Módulo de Elasticidad dinámico y estático, resultó en un intervalo de confianza estimado entre 0.8297 y 2.3236. Además, el valor de *p* calculado (0.00014) por la prueba *t* de *Student* para muestras independientes, es menor que 0.05, lo cual permite rechazar la hipótesis nula (H₀: $\mu_1 = \mu_2$). Para los grupos dinámico y estático, estos resultados representan una diferencia estadística significativa entre los dos grupos de ensayos para un nivel de confiabilidad del 95 %, explicando de esta manera la diferencia de los valores probeta a probeta, pero no entre muestras pares.

De acuerdo con Bodig y Jayne (1993), la diferencia entre los resultados es explicada por el carácter viscoelástico de la madera que aumenta la rigidez aparente de las probetas debido a que la velocidad de carga en los métodos dinámicos es superior a la velocidad de carga en el método estático. Las propiedades viscoelásticas de la madera y la resistencia mecánica aparente en el ensayo de vibración transversal es la superposición de la respuesta de su rigidez elástica más la respuesta de la rigidez viscosa, que se observa únicamente en ensayos donde la velocidad de solicitación es superior a la velocidad de la solicitación de un ensayo estático equivalente. El valor promedio de las frecuencias (f) medidas en los ensayos dinámicos utilizando probetas normalizadas, fue en promedio de 682 Hz, en comparación con la velocidad de carga promedio de 1 mm/min que registraron los ensayos estáticos.

El análisis del diagrama de dispersión entre los valores de MOE y Ed presentados en la figura 6, resulta en un coeficiente de correlación R^2 cercano a la unidad, resultado que confirma una correspondencia lineal de los ensayos. Este resultado es comparable al publicado anteriormente por los autores citados en la introducción, y permite confirmar el rigor de la metodología aplicada y su utilidad en investigaciones del mismo género.

De la observación de la figura 6, se desprende que el MOE puede ser un buen predictor de Ed y viceversa. Además el coeficiente de correlación de *Pearson* r de 0.97, afirma que si aumenta el valor del MOE de la madera de *Prosopis sp.*, los valores de Ed se incrementan proporcionalmente, resultados que concuerdan con las conclusiones publicadas con anterioridad por Görlacher (1984) y Machek y col. (2001), entre otros investigadores.

La aplicación práctica de este resultado es la utilización del Módulo de Elasticidad dinámico como predictor para estimar el Módulo de Elasticidad estático, que es al mismo tiempo un parámetro referente para evaluación, de acuerdo con Bodig (1994) y Beall (1999). Además el Módulo de Elasticidad dinámico es útil en la concepción de estructuras de madera donde las cargas dinámicas tales como vibraciones y sismos son críticas.

CONCLUSIONES

La estrategia experimental propuesta en esta investigación tuvo por objeto realizar ensayos exploratorios no destructivos y de manera intensiva sobre una muestra de madera de *Prosopis sp.*, lo que permitió obtener características similares de resistencia mecánica entre ensayos equivalentes, donde sólo varió la velocidad de carga. Los ensayos dinámicos practicados resultaron ser confiables, son más rápidos y sus parámetros medidos son más repetitivos en comparación con los ensayos estáticos.

La investigación fue un estudio de caso y una extensión de sus resultados es la aplicación de la metodología analizando otras especies. Además se recomienda utilizar ensayos de carácter no destructivos con probetas de diferentes dimensiones o ensayando elementos de madera con dimensiones de uso.

REFERENCIAS

American Institute of Timber Construction. 1994. Fourth Edition. Timber Construction Manual. John Wiley & Sons, Inc. USA. 904 p.

Ashby, M.F. 1999. Materials Selection in Mechanical Design. Second edition. Butterworth-Heinemann. Great Britain. 502 p.

Beall, F.C. 1999. Future of Nondestructive Evaluation of Wood and Wood-Based Materials. *The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*. 4 (11). 9 p. Disponible en: <u>http://www.ndt.net</u>.

Bodig, J. 1994. NDE of Wood in North America - Concepts and Applications. In: First European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood. University of Forestry and Wood Science. Hungary. 15 p.

Bodig, J.; Goodman, J.R. 1973. Prediction of Elastic Parameters for Wood. *Wood Science* (5) 4:249-264.

Bodig, J.; Jayne, B.A. 1993. Mechanics of Wood Composites. Reprinted edition. Kreiger Publishing Company. USA. 712 p.

Forest Products Laboratory. 1999. Wood Handbook. Wood as an Engineering Material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA. 463 p.

Goens, E. 1931: Determination of Young's modulus from flexural vibrations. *Annalen der Physik*. 11(6):649-678.

Görlacher, R. 1984. Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des E-modulus von Holz. *Holz als Roh-und Werkstoff.* (42):212-222.

Guitard, D. 1987. Mécanique du Matériau Bois et Composites. CEPADUES-EDITIONS, France. 238 p.

Guitard, D.; El Amri, F. 1987. Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. *Annales des sciences forestières*. 44(3):335-358.

Haines, D.W.; Leban, J.M.; Herbé, C. 1996. Determination of Youn's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood Science and Technology*. (30):253-263.

Hearmon, R.F.S. 1966. Theory of the Vibration Testing of Wood. *Forest Products Journal*. 16(8):29-40.

Ilic, J. 2001. Relations among the dynamic and static elastic properties of air-dry *Eucalyptus* delegatensis R. Baker. *Holz als Roh- und Werkstoff*. (59):169-175.

International Organization for Standardization ISO 3129-1975 (E). 1975a. Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO). Disponible en: www.iso.ch/iso/en/ISOOnline.openerpage.

International Organization for Standardization ISO 3349-1975 (E). 1975b. Wood - Determination of modulus of elasticity in static bending. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO). Disponible en: <u>www.iso.ch/iso/en/ISOOnline.openerpage</u>.

Jayne, B.A. 1959. Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*. 9(11):413–416.

Kaiserlik, J.H.; Pellerin, R.F. 1977. Stress wave attenuation as an indicator of lumber strength. *Forest Products Journal*. 27(6):39–43.

Kollmann, F.; Krech, H. 1960: Dynamische Messung der Elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung. *Holz Roh-Werkstoff.* (18):41-54.

Kollmann, F.P. and Côté, W.A. 1968. Principles of Wood Science and Technology. Volume I: Solid Wood. Springer-Verlag. Germany. 592 p.

Lemmens, J.W. (s/f). Operating Instructions for the GrindoSonic MK5 "Industrial" Instrument. J.W. Lemmens, Inc. USA. 25 p.

Machek, L.; Militz, H.; Sierra-Alvarez, R. 2001. The use of an acoustic technique to assess wood decay in laboratory soil-bed tests. *Wood Science and Technology* 34(6):467-472.

Panshin, A.J.; De Zeeuw, C. 1964. Textbook of Wood Technology. Volume I. McGRAW-HILL, Inc. USA. 705 p.

Pellerin, R.F. 1965. A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. *Forest Products Journal*. 15(3):93–101.

Perstorper, M. 1992. Predicting the stiffness of structural timber using dynamic modal tests. In Proceedings of IUFRO S5.02 Timber Engineering 1992 Conference. France. pp: 305-324.

Ross, R.J. y col. 1977. Relationship between log and lumber modulus of elasticity. *Forest Products Journal*, 47(2):89-92.

Ross, R.J.; Pellerin, R.F. 1988. NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves. *Forest Products Journal*, 38(5):39-45.

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. 40 p.

Sandoz, J.L. 2000. 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. 6 p.

Sandoz, J.L. 2002. 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, Selangor, Malaysia. 7 p.

Timoshenko, S.; Young, D.H.; Weaver, W. 1994. Reprinted Edition. Vibration problems in Engineering. New York: John Wiley. USA.

6. VELOCIDAD DEL ULTRASONIDO EN LA MADERA DE *PICEA* SP. Y DE *ACER* SP.

INTRODUCCIÓN

En México existen maderas con características mecánicas apropiadas para su uso en instrumentos musicales. Sin embargo, los industriales de Paracho, Michoacán, requieren maderas importadas. En esta región, los constructores de instrumentos musicales en general seleccionan las especies nacionales e importadas de acuerdo a su experiencia y al precio de las maderas accesibles en el mercado.

Los constructores no cuentan con datos o indicadores que evalúen de una manera cuantitativa las propiedades acústicas y de calidad de las maderas utilizadas. Como resultado, la calidad de las guitarras y otros instrumentos es variable y su valor comercial tiende a depreciarse.

No obstante que la tradición en la elaboración de instrumentos musicales con madera es muy antigua, en México no existe información sobre las propiedades acústicas de especies mexicanas. La tecnología de producción y la determinación de la calidad de los productos se basan principalmente en métodos empíricos.

En la literatura especializada en mecánica de la madera no existen igualmente suficientes antecedentes sobre las propiedades acústicas y la calidad de la madera para elaborar instrumentos musicales. Se han publicado resultados de investigaciones y monografías sobre la utilidad de los métodos no destructivos en la caracterización de las propiedades acústicas de la madera, pero se considera este un campo de investigación relativamente nuevo.

Las propiedades acusto-elásticas de los sólidos de medio continuo están relacionadas con su masa y con la velocidad con que permite el material el transito de una onda mecánica. Si se mide la densidad del material y la velocidad del ultrasonido a través del medio, se puede estimar, utilizando la ecuación de onda de manera simplificada, su módulo de elasticidad en condiciones dinámicas.

La velocidad de transmisión de una onda mecánica en la madera esta fundamentada en la propiedad que tiene ésta para almacenar y disipar energía. Cada especie de madera posee una densidad, una velocidad de onda y un módulo de elasticidad particulares, todos ellos relacionados con la composición química y la morfología de cada madera.

Para una correcta evaluación de la madera en aplicaciones acústicas, -por ejemplo su calidad de tono para instrumentos musicales-, son necesarios entre otros parámetros, la densidad (ρ), la velocidad del ultrasonido (V), el módulo de elasticidad (E) y el factor de calidad (F) correspondiente a las maderas con aptitudes acústicas (Spycher y col., 2008).

El factor de calidad (F) (*Radiation ratio R* en Spycher y col., 2008) es el parámetro más significativo para la determinación de la calidad de la madera para aplicaciones acústicas. Un valor alto del factor de calidad de una madera indica una buena calidad acústica comparativa,

es decir, una vocación para "madera de resonancia", de acuerdo con Müller (1986) y Ono y Norimoto (1983).

Con la finalidad de valorar especies de maderas mexicanas, con uso tradicional y potencial en la fabricación de instrumentos musicales, el objetivo de esta investigación es determinar la densidad, la velocidad del ultrasonido y su factor de calidad en las especies *Picea* sp. y *Acer* sp., maderas que son utilizadas para la elaboración de instrumentos musicales en Paracho y en Querétaro y son importadas de Canadá y de Europa. Se pretende igualmente comparar sus velocidades del ultrasonido y factores de calidad con las de 7 especies de madera mexicanas.

MATERIALES Y METODOS

Materiales

El material experimental consistió en 35 piezas de madera de *Picea* sp. y 35 piezas de *Acer* sp. Sus dimensiones promedio se esquematizan en la figura 1. El contenido de humedad de la madera se estimó en 7%. El material experimental para las pruebas complementarias consistió en 7 probetas de madera de especies mexicanas y extranjeras de dimensiones promedio de 0.025: 0.025: 0.200 m³ y con un contenido de humedad promedio de 7%. Las especies son las siguientes:

Nombre botánico	Nombre común
Thuja plicata	Cedro rojo del pacifico (USA)
Abies religiosa var. emarginata	Oyamel de Michoacán
Abies sp.	Oyamel de Puebla
Abies religiosa	Oyamel de Querétaro
Fraxinus sp.	Fresno
Peltogyne purpurea	Corazón púrpura
Dalbergia granadillo	Granadillo de Michoacán

Pruebas de ultrasonido

En cada prueba de ultrasonido se midieron las dimensiones y el peso de cada pieza. De esta forma se calculó el volumen de la probeta y la densidad de la madera correspondientes al momento del ensayo. Posteriormente, se midió el tiempo de transmisión de la onda de ultrasonido para lo cual se utilizó la tecnología *Sylvatestduo*® y se calculó la velocidad la velocidad del ultrasonido adaptando la metodología propuesta por Villaseñor Aguilar (2007). La velocidad del ultrasonido en la madera según las direcciones R,T,L, se calculó con la fómula:

$$\mathbf{v}_{i} = \frac{\mathbf{d}_{i}}{\mathbf{t}_{i}} \tag{1}$$

Donde:

 v_i = Velocidad del ultrasonido en la madera según las direcciones i: R,T,L(m/s) d_i = Distancia (m)

 $t_i = Tiempo (sec)$



Figura 1. Esquema de las piezas de madera de Picea sp. y de Acer sp.

RESULTADOS

La tabla 1 presenta los datos de la densidad y de las velocidades radial (V_R), tangencial (V_T) y longitudinal (V_L) de las pruebas preliminares realizadas con 7 especies de referencia.

Nombre botánico	Nombre común	Densidad	V _R	VT	VL
Nombre botanico	Nombre comun	(g/cm^3)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
Thuja plicata	Cedro rojo del pacifico (USA)	0.344	1190	1042	4762
Abies religiosa var. emarginata	Oyamel de Michoacán	0.384	1923	1250	6061
Abies sp.	Oyamel de Puebla	0.400	2500	962	4444
Abies religiosa	Oyamel de Querétaro	0.408	2083	1389	6061
Fraxinus sp.	Fresno	0.616	1786	1563	4762
Peltogyne purpurea	Corazón púrpura	0.832	2083	1389	5128
Dalbergia granadillo	Granadillo de Michoacán	1.200	2273	1923	3922

Tabla 1. Densidad y velocidades del ultrasonido en especies de referencia.

Cada una de las piezas de maderas de *Picea* sp. y de *Acer* sp. estudiadas, están destinadas a la fabricación de un violín en la Escuela de Laudería del Instituto Nacional de Bellas Artes y Literatura, en Querétaro. Por este motivo, en las tablas 2 y 3 se presentan los valores de cada una de las probetas ensayadas.

La tabla 2 presenta los datos de la densidad y de las velocidades radial, tangencial y longitudinal de las pruebas realizadas con madera de *Picea* sp.

La tabla 3 presenta los datos de la densidad y de las velocidades radial, tangencial y longitudinal de las pruebas realizadas con madera de *Acer* sp.

ANALISIS

Velocidad del ultrasonido

Los estadísticos presentados en las tablas 1, 2, y 3 y sus estadígrafos (ver tabla 4 y figura 2), son congruentes con los datos presentados por Bucur y col. (1988, 2000, 2006). En el análisis de resultados de cada una de las especies extranjeras (*Picea* sp. y *Acer* sp.), los valores de las velocidades V_R , V_T y V_L , no son proporcionales a la densidad de la madera. Por su parte, del análisis de los valores de las velocidades entre las diferentes especies, se observa una ligera tendencia de proporcionalidad para el caso de las velocidades V_R y V_T , y una nula proporcionalidad para la velocidad V_L . Los resultados de maderas de referencia están obtenidos con una sola probeta. Con el objeto de mejorar la representación de los valores obtenidos, es recomendable realizar estudios intensivos en especies mexicanas.

Si se asocian las diferentes especies estudiadas relativamente por sus valores de densidad (ver figura 2), se distinguen dos grupos: el intervalo de densidad de 0.344 a 0.408 gr/cm³, al cual pertenece la madera de *Picea* sp., y un segundo grupo en el intervalo entre 0.616 y 1.200 gr/cm³, al cual pertenece la madera de *Acer* sp. Si se comparan los valores de las velocidades $V_{R,T,L}$ de las maderas, su posición relativa en los grupos varia según la dirección de anisotropía observada.

Número de probeta	Densidad	V _R	VT	VL
Numero de probeta	(g/cm^3)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
1	0.320	1625	1300	5671
2	0.321	1803	1818	5554
3	0.390	1859	1212	5622
4	0.369	1983	1983 1310	
5	0.403	1424	1135	6118
6	0.336	1630	1708	5971
7	0.356	1427	1760	5986
8	0.335	2107	1783	5855
9	0.349	1889	1680	6149
10	0.330	2143	1720	5740
11	0.323	1779	1680	6074
12	0.357	1935	1640	6051
13	0.364	2034	1344	5732
14	0.370	1627	1423	5595
15	0.395	1530	1444	5817
16	0.351	1402	1333	5699
17	0.323	1967	1483	5461
18	0.358	1750	1636	5603
19	0.371	1458	1083	5761
20	0.389	1519	1520	5826
21	0.388	1603	1500	5694
22	0.389	1859	1444	6277
23	0.416	1735	1783	6242
24	0.317	1875	1810	6132
25	0.422	1966	1625	6587
26	0.410	2000	1577	6015
27	0.424	1984	1760	6134
28	0.362	1921	1615	5957
29	0.395	2069	1625	6075
30	0.358	2017	2300	6059
31	0.318	2175	1951	5986
32	0.304	2000	1895	6058
33	0.324	2083	1710	5971
34	0.343	1921	1598	6176
35	0.314	2086	1590	5928

Tabla 2. Densidad y velocidades del ultrasonido en la madera de *Picea* sp.

Número de probeta	Densidad	V _R	VT	VL
Numero de probeta	(g/cm^3)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
1	0.605	1826	1585	4897
2	0.634	2013	1754	4354
3	0.606	2017	1976	4500
4	0.593	1979	1837	4286
5	0.636	2099	1875	4419
6	0.645	2014	2039	4753
7	0.625	1564	1795	4821
8	0.689	1830	2165	5321
9	0.708	2074	1754	4543
10	0.630	2101	1974	4389
11	0.622	2014	1369	4953
12	0.644	2089	2264	5000
13	0.606	1722	1656	5096
14	0.733	1850	1746	5338
15	0.599	1912	1899	4895
16	0.587	2202	1718	4265
17	0.624	1916	2050	4581
18	0.633	1905	1751	4432
19	0.599	2043	1517	4351
20	0.595	2058	2023	4648
21	0.766	1962	2140	5272
22	0.620	2195	2077	4860
23	0.583	2050	1873	4505
24	0.558	1926	2114	4538
25	0.658	2079	1889	5494
26	0.565	2028	1589	5159
27	0.613	2012	1849	5000
28	0.683	2186	2036	4918
29	0.577	1946	2007	4354
30	0.624	2039	1717	4133
31	0.573	2036	2196	4245
32	0.637	2129	1920	4442
33	0.670	2111	1809	4941
34	0.677	2056	1801	4744
35	0.590	2121	1830	4828

Tabla 3. Densidad	y velocidades del	ultrasonido en l	la madera de <i>Acer</i> sp.
-------------------	-------------------	------------------	------------------------------

Característica	ρ (g/cm ³)	V _R (m/s)	V _T (m/s)	V _L (m/s)	ρ (gr/cm ³)	V _R (m/s)	V _T (m/s)	V _L (m/s)
Resultados experimentales	Picea sp.			Acer sp.				
Promedio	0.360	1834	1594	5921	0.629	2003	1874	4722
Desviación estándar	0.034	228	244	245	0.047	132	202	356
Coeficiente de variación	0.10	0.12	0.15	0.04	0.07	0.07	0.11	0.08
Valores de referencia (Bucur, 1988)	Picea abies			Α	cer cam	pestre		
Promedio	0.485	1580	1146	5353	0.623	2148	1878	4695

Tabla 4. Estadígrafos de las densidades y de las velocidades del ultrasonido.

Para la dirección radial, las especies Oyamel de Querétaro, Granadillo de Michoacán, Oyamel de Puebla y Corazón púrpura se posicionan mejor que la madera de *Acer* sp. Para la dirección tangencial, *Picea* sp., y *Acer* sp. se sitúan solamente a la zaga del Granadillo de Michoacán. Para la dirección longitudinal, *Acer* sp y *Picea* sp. invierten posiciones y se sitúan proporcionalmente a su densidad.

Estos resultados indican que cada especie responde diferentemente a la solicitación del ultrasonido. Debido a que los resultados de maderas mexicanas están obtenidos con una sola probeta, es conveniente realizar estudios intensivos en cada una de estas especies.

Anisotropía de la velocidad del ultrasonido

Los cocientes de anisotropía de la velocidad del ultrasonido ($AV_{RR,TR,LR}$) presentados en la tabla 5, coinciden con los datos propuestos por Bucur y Declercq (2006) y Bucur y col. (2000), para madera de *Picea abies* y de *Prunus avion*, especies cuyos valores son comúnmente utilizados como referencia en la literatura especializada. Valores de cocientes de anisotropía cercanos a la unidad, insinúan que las respuesta acústica son similares en estas dos direcciones ortotrópicas y en sus planos correspondientes, argumento que valora la calidad tecnológica de una madera, como es el caso, por ejemplo, de *Acer* sp. y el Cedro rojo del pacífico. Igualmente, no se observó ninguna correspondencia entre la anisotropía y la densidad de las maderas estudiadas.

Especie	ρ (gr/cm ³)	$AV_{RR} = \frac{V_R}{V_R}$	$AV_{TR} = \frac{V_T}{V_R}$	$AV_{LR} = \frac{V_L}{V_R}$
Thuja plicata	0.344	1	0.88	4.00
Picea sp.	0.360	1	0.87	3.23
Abies religiosa var. emarginata	0.384	1	0.65	3.15
Abies sp.	0.400	1	0.38	1.78
Abies religiosa	0.408	1	0.67	2.91
Fraxinus sp.	0.616	1	0.88	2.67
Acer sp.	0.629	1	0.94	2.36
Peltogyne purpurea	0.832	1	0.67	2.46
Dalbergia granadillo	1.200	1	0.85	1.73

Tabla 5.	Anisotropí	a de	las	velocidades	del	ultrasonido.
1 uoiu 5.	misouopi	i uc	Ius	venociadaes	uu	unusoniuo.

Factor de calidad

Los valores del Factor de calidad ($F_{R,T,L}$) de las maderas investigadas (ver tabla 6 y figura 3) son conformes y pertinentes con el parámetro de referencia densidad y con los resultados obtenidos por (Bucur, 1988).

La figura 3 indica que la madera de *Acer* sp. obtiene un factor de calidad para la dirección radial relativamente mayor a las otras especies. Sin embargo, para las direcciones tangencial y longitudinal, el mejor factor de calidad es para la madera de *Picea* sp., y para la madera de Acer sp. se sitúa en proporción a su densidad. Estos resultados indican que cuando se pondera la velocidad del ultrasonido de una especie determinada, por su densidad, es el factor de calidad un indicador de calidad más confiable.

Especie	ρ (gr/cm ³)	$F_R = \frac{V_R}{\rho}$	$F_R = \frac{V_T}{\rho}$	$F_R = \frac{V_L}{\rho}$
Resultados experimentales				
Picea sp.	0.604	5096	4430	16454
Acer sp.	0.638	3186	2981	7510
Valores de referencia (Bucur, 1988)				
Picea abies	0.485	3260	2360	11040
Acer campestre	0.623	3450	3010	7540

Tabla 6. Factores de calidad.


Figura 2. Comparación relativa de la densidad y de las velocidades del ultrasonido entre maderas extranjeras y maderas mexicanas



Figura 3. Comparación relativa de los factores de calidad entre maderas extranjeras y maderas mexicanas.

De acuerdo con Bucur (2006), las velocidades radial (V_R), tangencial (V_T) y longitudinal (V_L) pueden servir como indicadores de calidad para la selección de madera en la elaboración de instrumentos musicales. Y retomando el criterio de Spycher y col. (2008), el factor de calidad (F) es el parámetro más significativo para la determinación de la calidad de la madera para aplicaciones acústicas.

CONCLUSIONES

Las pruebas de ultrasonido permitieron determinar la velocidad del ultrasonido en las tres direcciones de anisotropía de la madera de *Picea* sp. y de *Acer* sp. Como complemento, se determinó la velocidad del ultrasonido para varias maderas mexicanas con uso y potencial para su empleo en la fabricación de instrumentos musicales.

Igualmente, los factores de calidad para las tres direcciones de anisotropía de la madera fueron determinados y se mostró que la especie *Picea* sp., presenta una vocación para su empleo en la elaboración de instrumentos musicales. Asimismo, se encontró que la especie *Acer* sp., responde favorablemente en la dirección radial.

Las madera de *Picea* sp., de *Acer* sp. y de Cedro rojo del Pacífico, exhibieron los coeficientes de anisotropía AV_{RT} más cercanos a la unidad, resultado que confirma la calidad tecnológica de estas maderas.

REFERENCIAS

Bucur, V. 1988. Wood structural anisotropy estimated by acoustics invariants. *International Association of Wood Anatomists Bulletin*. 9(1):67-74.

Bucur, V. 2006. Acoustics of Wood. Springer-Verlag. Germany.

Bucur, V.; Declercq, N.F. 2006. The anisotropy of biological composites studied with ultrasonic technique. *Ultrasonics*. 44:e829-e831. <u>www.sciencedirect.com</u>.

Bucur, V.; Garros, S.; Barlow, C.Y. 2000. The effect of hydrostatic pressure on physical properties and microstructure of spruce and cherry. *Holzforschung*. 54(1):83-92.

Müller, H.A. 1986. How violin makers choose wood and what this procedure means from a physical point of view. Paper presented at Catgut Acoustical Society International Symposium on musical Acoustics. USA.

Ono, T.; Norimoto, M. 1983. Study on Young's modulus and internal friction of wood in relation to the evaluation of wood for musical instruments. *Japan Journal of Applied Physics*. 22(4):611-614.

Spycher, M.; Schwarze, F.W.M.R.; Steiger, R. 2008. Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Science and Technology*. 42:325-342.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

7. CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE LA MADERA DE 152 ESPECIES MEXICANAS. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es estructurar una base de datos para 152 especies forestales de maderas mexicanas. Los parámetros estudiados para las tres direcciones de anisotropía de la madera son: velocidad del ultrasonido (V_R , $V_T y V_L$), módulo de elasticidad (E_R , $E_T y E_L$), índice material (I_R , $I_T e I_L$) y factor de calidad (F_R , $F_T y F_L$). Se presenta además su densidad y su clasificación de acuerdo a la tabla FITECMA.

Para tal fin, se realizaron pruebas no destructivas de ultrasonido en probetas de xiloteca de pequeñas dimensiones, libres de defectos de crecimiento, bien orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal y con un contenido de humedad promedio de 10.67%.

Los datos de la base están organizados en 6 grupos botánicos: gimnospermas pinos duros y blandos, otras gimnospermas, angiospermas encinos rojos y encinos blancos, angiospermas de clima templado y angiospermas de clima tropical.

Se presenta además un catálogo de las especies estudiadas. La información que ahí se detalla es: clasificación botánica, código numerado, nombre científico, nombre común, familia y división.

Para cada grupo estudiado, se presentan adicionalmente los siguientes estadígrafos: media aritmética, desviación estándar, coeficiente de variación, valor mínimo y valor máximo.

Los valores de densidad, de la velocidad del ultrasonido y del módulo de elasticidad confirmaron el carácter anisotrópico de las maderas y conjuntamente con los valores del índice material y del factor de calidad correspondientes, las maderas evidenciaron una gran variabilidad. Esta última propiedad puede ser atribuida principalmente a la variación natural de la madera y también a la estrategia experimental de la investigación.

Palabras clave: densidad, velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material, factor de calidad, maderas mexicanas.

INTRODUCCIÓN

El empleo de la madera en la manufactura de instrumentos musicales de cuerda, viento y percusión es una de las más altas valoraciones de utilización del material. Particularmente las especies de maderas con óptimas propiedades acústicas, calificadas como "madera de resonancia" (Bucur, 1995). Las propiedades de la madera relacionadas con su caracterización acústica son importantes también para su valoración como materia prima para la elaboración de muebles para amplificadores de sonido y cajas de resonancia musicales.

Para una correcta evaluación de la madera en aplicaciones acústicas, -por ejemplo su calidad de tono para instrumentos musicales-, son necesarios entre otros parámetros, la densidad (ρ), la velocidad del ultrasonido (V), el módulo de elasticidad (E) y el factor de calidad (F) correspondiente a las maderas con aptitudes acústicas (Spycher y col., 2008).

El factor de calidad (F) (*Radiation ratio R* en Spycher y col., 2008) es el parámetro más significativo para la determinación de la calidad de la madera para aplicaciones acústicas. Un valor alto del factor de calidad de una madera indica una buena calidad acústica comparativa, es decir, una vocación para "madera de resonancia", de acuerdo con Müller (1986) y Ono y Norimoto (1983).

Por otra parte, un buen diseño de estructuras de madera puede contribuir a mejorar el ambiente sonoro en construcciones, gracias a las propiedades acústicas del material (Kollmann y Côté, 1968). Entre otros indicadores de calidad de los materiales de construcción, el índice material (I) que relaciona su módulo de elasticidad con su densidad es un indicador de la calidad de la madera para usos específicos.

Para clasificar y comparar las cualidades de aislamiento acústico de la madera de una especie en particular, es igualmente importante su índice material (Ashby, 1999). Un significativo índice I de una madera propone una mejor resistencia en relación a su densidad y una buena apreciación como material de ingeniería.

Asimismo, la madera es un componente constructivo que compite con otros materiales y tecnologías propias de la industria de la construcción. Con el objeto de mejorar la productividad industrial, es prudente el conocimiento fundamental de los atributos relativos a su aptitud para construir con este material (Sotomayor Castellanos, 2002). En el asunto que nos ocupa, es recomendable contar con información técnica de materiales para su incorporación en el proceso constructivo, como es el caso de la madera, la cual se caracteriza por ser resistente pero a la vez ligera.

A manera de ilustración de los postulados anteriores, la tabla 1 (Cremer y col. 1973; Ashby, 1999) presenta la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo de Young de materiales de construcción, así como su índice material y factor de calidad. En el mismo contexto, la figura 1 muestra un cuadro comparativo de los índices materiales y de los factores de calidad para estos materiales. Estos ejemplos explican la magnitud de los valores de los indicadores en cuestión, así como el posicionamiento de la madera comparada con otros materiales con los cuales compite técnicamente.

Material	Densidad	Velocidad del	Módulo de Young	Índice material*	Factor de
Wateriai	ρ: gr/cm ³	V: m/s	E: MPa	$I = E/\rho \ge 10^3$	$F = V/\rho \ge 10^3$
Asfalto	1.950	1900	7700	3.95	0.97
Ladrillo	2.050	3000	16000	7.80	1.46
Concreto denso	2.300	3400	26000	11.30	1.48
Concreto ligero	1.300	1700	3800	2.92	1.31
Concreto poroso	0.600	1700	2000	3.33	2.83
Vidrio	2.500	4900	6000	2.40	1.96
Tablero de yeso	1.200	2400	7000	5.83	2.00
Tablero de madera ¹	0.600	3000	5400	9.00	5.00
Madera sólida ²	0.850	3500	8000	9.41	4.12
1) Tablero contrachapado o	le pino. 2) Encino	(valores dirección	n tangencial).		
*Ashby (1999).					

Tabla 1. Características físicas, acústicas, mecánicas, índices materiales y factores de calidad de varios materiales (Cremer y col. 1973; Ashby, 1999).





Del análisis de la tabla 1 y de la figura 1, se deduce que la madera en comparación con otros materiales de construcción, esta técnicamente bien posicionada como material de Ingeniería. Sin embargo, su utilización en la industria nacional de la edificación es mínima, en comparación con materiales incorporados en la construcción tradicional en mampostería, cemento y acero.

La información expuesta en la tabla 1 y en la figura 1, es necesaria para el cálculo y diseño de componentes constructivos con características de aislamiento acústico. Igualmente, el conocimiento de las características acústicas y de sus indicadores de calidad propios a cada especie es útil en la fabricación de instrumentos musicales con madera.

La caracterización mecánica-acústica de la madera ha sido posible gracias a la aplicación de métodos de evaluación de carácter no destructivo en el estudio de especies con vocación acústica y constructiva (Bucur, 1995; Pellerin y Ross, 2002). Particularmente, la técnica que utiliza ondas mecánicas para determinar la velocidad del ultrasonido en la madera y así estimar su módulo de elasticidad, está documentada recientemente, entre otros, por Sandoz y col. (2000) y por Villaseñor Aguilar (2007).

La tabla 2 (Bucur, 1988) presenta valores de las velocidades del ultrasonido y factores de calidad $(F = V/\rho)$ en las 3 direcciones de anisotropía (R, T, L) de varias maderas. Los datos se presentan agrupados en dos conjuntos según la agrupación de las especies: maderas angiospermas y maderas gimnospermas.

La diferencia en las magnitudes de los parámetros denota el carácter anisotrópico de las características mecánicas de la madera. La anisotropía de la velocidad del ultrasonido para las especies presentadas en la tabla 2, es del orden siguiente: Para maderas de gimnospermas V_R : V_T : $V_L = 1.00$: 0.73: 2.57. Para maderas de angiospermas: V_R : V_T : $V_L = 1.00$: 0.72: 2.20. Estas correspondencias explican que la velocidad del ultrasonido es mínima en la dirección tangencial y máxima en la dirección longitudinal de la madera.

Igualmente, el factor F_L para la dirección longitudinal ($F_L = V_L/\rho$) es alrededor de 2.8 veces mayor en comparación con los valores promedio para los factores correspondientes a las direcciones transversales ($F_R = V_R/\rho$ y $F_T = V_T/\rho$) del plano leñoso. Esta lectura propone que la dirección longitudinal es una dirección privilegiada para la transmisión de ondas acústicas en la madera.

Los coeficientes de variación de las velocidades presentadas en la tabla 2 son del mismo orden encontrado para otras características mecánicas de la madera. Sin embargo, cuando se calculan los factores de calidad F, los cuales dependen de la densidad, sus indicadores de variación correspondientes aumentan. Este resultado sugiere que la variación de la densidad influye en la estimación de este parámetro de segundo orden.

En México existen publicaciones que proponen maderas mexicanas para su estudio y promoción en aplicaciones acústicas. Entre otros autores se pueden citar: Guridi Gómez y García López (1977); Barajas Morales y León Gómez (1984); Gutiérrez Carvajal y Dorantes López (2007); Tamarit Urias y López Torres (2007).

	ρ	VR	VT	VL	F _R *	F _T *	F _L *
	(gr/cm^3)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	$(x \ 10^3)$	$(x \ 10^3)$	(x 10 ³)
Gimnospermas							
Pinus spp.	580	2100	1200	5000	3.62	2.07	8.62
Picea abies (L.) Endl.	485	1580	1146	5353	3.26	2.36	11.04
Picea sitchensis Carr.	450	2200	1500	5200	4.89	3.33	11.56
Picea rubens Sarg.	485	2150	1600	6000	4.43	3.30	12.37
Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco.	440	2330	1990	5500	5.30	4.52	12.50
Picea sitchensis (Bong) Carr.	430	2300	1500	5530	5.35	3.49	12.86
Picea abies (L.) Karst.	400	2000	1600	5600	5.00	4.00	14.00
Picea engelmannii Parry.	352	2225	1850	5500	6.32	5.26	15.63
Promedio	453	2111	1548	5460	4.77	3.54	12.32
Desviación estándar	67	288	239	295	0.99	1.05	2.07
Coeficiente de variación (%)	15	19	11	05	21	30	17
Angiospermas							
Caesalpinia brasiliensis S.	932	2435	2034	4935	2.61	2.18	5.30
Acer pseudoplatanus L	700	2590	1914	4350	3.70	2.73	6.21
Fagus sylvatica L.	674	2200	1560	5074	3.26	2.31	7.53
Acer campestre L.	623	2148	1878	4695	3.45	3.01	7.54
Platanus acerifolia	620	2178	1646	5060	3.51	2.65	8.16
Quercus petraea Liebl.	600	2148	1538	5071	3.58	2.56	8.45
Aesculus hippocastanum L.	510	2311	1382	4782	4.53	2.71	9.38
Liriodendron tulipifera L.	574	2047	1511	5625	3.57	2.63	9.80
Populus spp.	326	2200	1210	5074	6.75	3.71	15.56
Promedio	618	2251	1630	4963	3.88	2.72	8.66
Desviación estándar	161	267	168	347	1.18	0.44	2.95
Coeficiente de variación (%)	26	16	07	07	30	16	34
* Valor calculado; R: dirección radial; T: d	irección tan	gencial;	L: direcc	ión longi	tudinal.	•	•

Tahla 2	Características	acústicas	de maderas	s v factores o	de calidad ((Bucur 1988)	
1 a01a 2.	Caracteristicas	acusticas	uc maucras	y raciones (ac canuau	(Ducui, 1700).	

Para recomendar el uso y/ó la promoción de ciertas especies mexicanas, los trabajos citados parten del análisis de la estructura anatómica de las maderas. Como complemento, los autores retoman la opinión de fabricantes de instrumentos musicales.

Sin embargo, la revisión de la bibliografía del país sobre el tema de características acústicas e indicadores relacionados con la calidad de la madera, evidenció una ausencia de información al respecto.

Por otra parte, en México existe información sobre maderas mexicanas y su aplicación en la industria de la construcción. Entre otros autores se puede citar a: Robles y Echenique-Manrique (1983); Sotomayor Castellanos (1987 y 2005). No obstante, en estas referencias no se encontró información acerca de los índices materiales y los factores de calidad de especies forestales que crecen en México.

El objetivo de este trabajo es estructurar una base de datos para 152 especies forestales de maderas mexicanas. Los parámetros a estudiar son: la velocidad del ultrasonido y el módulo de elasticidad determinado por ultrasonido, y sus indicadores derivados: el índice material y el factor de calidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los trabajos de investigación se realizaron en los Laboratorios de Anatomía de la Madera del programa de Licenciatura y el Laboratorio de Mecánica de la Madera de la División de Estudios de Posgrado, ambos laboratorios pertenecen a la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Materiales

Las pruebas no destructivas de ultrasonido se aplicaron en tabletas de la colección de la xiloteca de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. El material esta almacenado en el laboratorio de Anatomía de la Madera de la misma Facultad en ambiente controlado.

La lista de las especies estudiadas se presenta en el anexo. La información que ahí se detalla es:

- División taxonómica
- Código numerado
- Nombre científico
- Nombre común
- Familia botánica
- Grupo botánico

Para medir el tiempo de transmisión del ultrasonido en cada especie estudiada, se utilizó una tablilla recortada y orientada siguiendo las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L) del plano leñoso. Sus dimensiones fueron en promedio 70 x 11 x 150 mm³ en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente. Para cada dirección de anisotropía se hicieron tres mediciones paralelas a las direcciones de simetría R, T y L, tal como se ilustra en la figura 2.

La biodiversidad forestal en México propone una enorme variedad de especies de maderas mexicanas. Para fines de estudio, es recomendable agrupar a las especies de madera en grupos botánicos. El criterio de ordenamiento de las especies fue a partir de dos divisiones taxonómicas (ver tabla 3): gimnospermas y angiospermas, subdivididas las primeras en: pinos duros, pinos blandos y otras angiospermas, y las segundas en encinos blancos, encinos rojos, latifoliadas de clima templado y de clima tropical.

Para la presentación de los resultados (Tabla 4) y para fines de análisis (Tablas 5, 6 y 7), las 152 maderas estudiadas se organizaron en dos grupos según su orden botánico y en 6 grupos botánicos con los nombres y códigos presentados en la tabla 3.

Métodos

El contenido de humedad (H) de la madera se determinó por el método de diferencia de pesos, con un grupo complementario de probetas de 5 especies: *Prunus hintonii* (C.K. Allen) Kosterm., *Daphnopsis bonplandiana* (Kunth) Standl., *Thouinia villosa* DC., *Heliocarpus terebinthinaceus* (DC.) Hochr. y *Trichilia americana* (Sessé et Moc.) Pennington. El contenido de humedad de esta muestra se situó en el intervalo entre 10 % y 12 %, con un promedio de 10.63 %.



Figura 2. Probeta, orientación y localización de los puntos de contacto del medidor de tiempo de recorrido del ultrasonido.

	Divisiones taxonómicas												
	Gimnosperm	nas				Angiospermas							
Grupo botánico	Nombre común	Número	Código		Grupo botánico	Nombre común	Número	Código					
Gimnospermas pinos duros	Coníferas	16	- GPI -		Angiospermas encinos rojos	Latifoliadas encinos rojos	16	AER					
Gimnospermas pinos blandos	Coníferas	2			Angiospermas encinos blancos	Latifoliadas encinos blancos	9	AEB					
Otras gimnospermas	Coníferas	10	OGI		Angiospermas clima templado	Latifoliadas de clima templado	27	ATE					
					Angiospermas clima tropical	Latifoliadas de clima tropical	72	ATR					
Total 28					To	otal	124						

Tabla 3	Agrunación	de las	especies	estudiadas
Tabla J.	Agrupación	ue las	copecies	estudiadas.

Para determinar la velocidad del ultrasonido (V) y calcular el módulo de elasticidad (E) correspondiente a cada una de las probetas, se siguió la metodología utilizada por Villaseñor Aguilar (2007): En cada prueba de ultrasonido se midieron las dimensiones radial, tangencial y longitudinal (R, T y L) y el peso de cada probeta. De esta forma se calculó el volumen de la probeta y la densidad de la madera correspondiente al momento del ensayo (ρ_H).

Posteriormente, se midió el tiempo de transmisión de la onda de ultrasonido, para lo cual se utilizó la tecnología *Sylvatestduo*® (Conceptsboisstructure, 2004), y de esta manera se calculó la velocidad y se determinó el módulo de elasticidad por ultrasonido. Dado el carácter no destructivo de las pruebas de ultrasonido, no se modificó la estructura física de la madera.

El ensayo por ultrasonido consistió en suministrar un impulso ultrasónico en transmisión directa y en cada una de las direcciones de isotropía de la madera. El impulso fue aplicado en tres puntos de contacto (A, B y C, figura 2) en cada uno de los planos de la probeta. el efecto de la onda resultante se registró en tres posiciones de registro (posiciones A', B' y C', figura 2) localizados en el centro geométrico de la sección transversal opuesta. El aparato computó el tiempo de transmisión del pulso ultrasónico entre dos puntos de contacto (por ejemplo las posiciones A y A', en la figura 2).

Los nombres científicos y botánicos, así como las familias a las que pertenecen las especies estudiadas, se corroboraron en las siguientes referencias: Barajas Morales y León Gómez (1984); Lincoln (1986); Niembro Rocas (1990); Guizar Nolazco y Sanchez Velez (1991); Pennington y Sarukhán (1998); Soler (2001); Cheers (2006); Gutiérrez Carvajal y Dorantes López (2007); Tamarit Urias y López Torres (2007).

Cálculos

La densidad aparente (ρ_H) de la madera se calculó directamente de las mediciones del peso (w_H) y del volumen (v_H) con un contenido de humedad promedio de la probeta de H=10.63%:

$$\rho_{\rm H} = \frac{W_{\rm H}}{V_{\rm H}} \tag{1}$$

Donde: ρ_H = Densidad aparente de la madera w_H = Peso de la probeta v_H = Volumen de la probeta

La densidad correspondiente al estado anhidro de la madera (ρ_0) se ajustó para su peso seco con el factor $K_{H=0} = 0$. 8937, valor proporcional al peso correspondiente de la madera en estado anhidro, y se estimó de la manera siguiente:

$$\rho_0 = \mathbf{K}_{\mathrm{H=0}} \mathbf{x} \ \rho_{\mathrm{H}} \tag{2}$$

Donde:

 ρ_0 = Densidad correspondiente al estado anhidro de la madera

 $K = factor K_{H=0}$

 ρ_H = Densidad aparente de la madera

Para cada una de las direcciones de anisotropía de la madera (R, T y L), se calcularon los siguientes parámetros:

La velocidad del ultrasonido se calculó directamente de la medición de la distancia (d) y del tiempo (t) de transmisión del ultrasonido:

$$V = \frac{d}{t}$$
(3)

Donde:

V = Velocidad del ultrasonido

d = Distancia entre apotos de la probeta

t = Tiempo de transmisión del sonido

El módulo de elasticidad (E) se calculó de acuerdo con Bucur (1995):

$$\mathbf{E} = \mathbf{V}^2 \,\boldsymbol{\rho}_{\mathrm{H}} \tag{4}$$

Donde:

 $E = M \dot{o} du lo de elasticidad$ V = Velocidad del ultrasonido $\rho_H = Densidad de la madera$

Posteriormente, el índice material (I) se calculó de acuerdo con Ashby (1999):

$$I = \frac{E}{\rho_{\rm H}}$$
(5)

Donde:

I = Indice materialE = Módulo de elasticidad $<math>\rho_H = Densidad de la madera$

Y finalmente, el factor de calidad (F) se calculó de acuerdo con Spycher y col. (2008)

$$F = \frac{V}{\rho_{\rm H}} \tag{6}$$

Donde:

$$\label{eq:F} \begin{split} F &= Factor \ de \ calidad \\ V &= Velocidad \ del \ ultrasonido \\ \rho_H &= Densidad \ de \ la \ madera \end{split}$$

RESULTADOS

Los resultados de las características acústicas de la madera de especies mexicanas angiospermas y gimnospermas se presentan en la base de datos enlistada en la tabla 4.

Los estadísticos que se detallan en la tabla 4 para cada especie son:

- División taxonómica
- Código
- Nombre científico
- Densidad (ρ_0)
- Clasificación de la densidad de acuerdo a la Tabla FITECMA (C.T.F.):

MB: Muy baja (< 0.200 gr/cm³); BA: Baja (0.201-0.400 gr/cm³); ME: Media (0.401-0.600 gr/cm³); AL: Alta (0.601-0.800 gr/cm³); MA: Muy alta (> 0.800 gr/cm³).

Y para las 3 direcciones de isotropía de la madera: radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L) se presentan también los indicadores siguientes:

- Velocidad del ultrasonido (V_R, V_T y V_L)
- Módulo de elasticidad (E_R, E_T y E_L)
- Índice material (I_R, I_T e I_L)
- Factor de calidad (F_R , F_T y F_L)

		ρ ₀		V_R	VT	V_{L}	ER	ET	EL	IR	I_{T}	I_L	F _R	FT	F_L
Código	Nombre Científico	or/cm ³	C.T.F.	m/s	m/s	m/s	MPa	MPa	MPa	E_R/ρ	E_T / ρ	E_L/ρ	V_{R}/ρ	V_T / ρ	$V_L\!/\rho$
		gi/ciii		111/ 5	111/5	111/5	wii a	wii a	Ivii a	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³
			Gimnos	permas	pinos d	uros y ł	olandos								
GPI01	Pinus arizonica var. stormiae Martínez.	0.461	ME	3713	1594	6020	7107	1309	18682	13.79	2.54	36.25	7.20	3.09	11.68
GPI02	Pinus ayacahuite var. veitchii Shaw.*	0.398	BA	2206	1370	5986	2169	836	15974	4.87	1.88	35.83	4.95	3.07	13.43
GPI03	Pinus cembroides Zucc.	0.525	ME	3690	1108	3321	7994	721	6475	13.62	1.23	11.03	6.29	1.89	5.66
GPI04	Pinus coulteri D. Don.	0.419	ME	2108	984	6023	2082	453	16997	4.44	0.97	36.27	4.50	2.10	12.85
GPI05	Pinus douglasiana Martínez.	0.405	ME	1845	1283	5993	1543	747	16280	3.40	1.65	35.91	4.07	2.83	13.22
GPI06	Pinus durangensis f. quinquefoliata Martínez.	0.390	BA	3423	1581	6547	5112	1091	18695	11.72	2.50	42.86	7.85	3.63	15.01
GPI07	Pinus lawsonii Roezl.	0.586	ME	2798	1751	4503	5127	2009	13283	7.83	3.07	20.27	4.27	2.67	6.87
GPI08	Pinus martinezii Larsen.	0.539	ME	1418	1259	6222	1213	957	23353	2.01	1.59	38.71	2.35	2.09	10.31
GPI09	Pinus maximinoi Moore.	0.432	ME	2328	1581	6145	2618	1207	18238	5.42	2.50	37.76	4.82	3.27	12.72
GPI10	Pinus michoacana var. cornuta Martínez.	0.463	ME	3663	1080	6518	6949	604	21999	13.42	1.17	42.48	7.07	2.09	12.59
GPI11	Pinus montezumae Lamb.	0.497	ME	1883	1851	6307	1974	1906	22133	3.55	3.43	39.77	3.38	3.33	11.33
GPI12	Pinus oocarpa Schiede.	0.548	ME	2200	1360	5338	2966	1134	17462	4.84	1.85	28.49	3.59	2.22	8.71
GPI13	Pinus patula Schl. et Cham.	0.496	ME	3673	1204	7187	7482	804	28637	13.49	1.45	51.65	6.63	2.17	12.96
GPI14	Pinus ponderosa Dougl.	0.490	ME	3563	1583	5532	6964	1374	16787	12.70	2.51	30.61	6.50	2.89	10.09
GPI15	Pinus pringlei Shaw.	0.580	ME	2579	1868	6390	4315	2265	26495	6.65	3.49	40.83	3.97	2.88	9.85
GPI16	Pinus pseudostrobus Lindl.	0.436	ME	3403	959	6514	5654	449	20711	11.58	0.92	42.43	6.97	1.96	13.35
GPI17	Pinus quadrifolia Sudw.*	0.678	AL	2260	1369	3857	3872	1421	11281	5.11	1.87	14.88	2.98	1.81	5.09
GPI18	Pinus teocote Schl. et Cham.	0.638	AL	2881	1636	6075	5925	1910	26334	8.30	2.68	36.90	4.04	2.29	8.51
				Otras g	gimnosp	ermas									
OGI01	Abies durangensis Martínez.	0.392	BA	3210	1428	6886	4522	895	20812	10.30	2.04	47.42	7.31	3.25	15.69
OGI02	Abies religiosa var. emarginata Martínez.	0.484	ME	2738	1377	7130	4061	1028	27552	7.49	1.90	50.84	5.05	2.54	13.16
OGI03	Cupressus lindleyi Klotzsch.	0.419	ME	5120	1628	4554	12289	1242	9723	26.21	2.65	20.74	10.92	3.47	9.72
OGI04	Juniperus flaccida Schl.	0.557	ME	3920	1301	3580	9583	1056	7991	15.37	1.69	12.81	6.29	2.09	5.74
OGI05	Picea abies (L.) Karst.	0.366	BA	1376	717	6487	775	210	17232	1.89	0.51	42.08	3.36	1.75	15.84
OGI06	Picea chihuahuana Martínez.	0.429	ME	1866	1026	6557	1670	505	20623	3.48	1.05	42.99	3.89	2.14	13.67
OGI07	Podocarpus matudae Lundell.	0.451	ME	3830	1672	6016	7409	1412	18280	14.67	2.80	36.19	7.58	3.31	11.91
OGI08	Pseudotsuga macrolepis Flous.	0.522	ME	3237	1167	5821	6119	795	19791	10.48	1.36	33.89	5.54	2.00	9.97
OGI09	Taxodium nucronatum Ten.	0.476	ME	2653	1028	4681	3748	563	11673	7.04	1.06	21.91	4.98	1.93	8.79
OGI10	<i>Thuja plicata</i> D. Don.	0.295	BA	1158	915	5969	442	276	11756	1.34	0.84	35.63	3.51	2.77	18.09
* Pinos	blandos.		•						ľ						
C.T.F.:	Clasificación densidad Tabla FITECMA (Sot	tomayor C	Castellan	os, 2008	8):										
MB: Mu	uy baja (< 0.200 gr/cm ³); BA: Baja (0.201-0.4	400 gr/cm	³); ME:	Media (0.401-0).600 gr	$/cm^{3}$; A	L: Alta	a (0.601-0).800 gr/	/cm ³); I	MA: Mu	y alta (>	• 0.800 I	kg/m^3).

Tabla 4 (1/6). Características acústicas, elásticas, índices y factores de calidad de maderas de especies gimnospermas mexicanas.

		ρ_0		VR	VT	V_L	ER	ET	E_L	I_R	IT	I_L	F_R	FT	F_L
Código	Nombre Científico	~~/~~ ³	C.T.F.	m /a	m /a	mla	MDa	MDa	MDa	E_R/ρ	E_T / ρ	E_L/ρ	V_R/ρ	V_T / ρ	V_L/ρ
		gr/cm-		III/S	III/S	III/S	MPa	MPa	MPa	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³
				Ang	giosperr	nas enc	inos roj	os							
AER01	Quercus acutifolia Née.	0.770	AL	2244	1786	5826	4338	2749	29240	5.04	3.19	33.94	2.61	2.07	6.76
AER02	Quercus candicans Née.	0.694	AL	2868	1882	4424	6389	2753	15211	8.22	3.54	19.58	3.69	2.42	5.69
AER03	Quercus castanea Née.	0.829	MA	5795	1712	5561	31166	2721	28705	33.58	2.93	30.93	6.24	1.85	5.99
AER04	Quercus conspersa Benth.	0.770	AL	5425	1506	6298	25354	1955	34174	29.43	2.27	39.67	6.30	1.75	7.31
AER05	Quercus crassifolia Humb. et Bonpl.	0.694	AL	4920	1377	6020	18810	1474	28157	24.21	1.90	36.24	6.33	1.77	7.75
AER06	Quercus crispipilis Trel.	0.801	MA	3670	1480	6227	12070	1964	34750	13.47	2.19	38.78	4.10	1.65	6.95
AER07	Quercus deserticola Trel.	1.014	MA	2091	1984	3260	4962	4466	12057	4.37	3.94	10.62	1.84	1.75	2.87
AER08	Quercus durifolia Seem.	0.760	AL	5605	1630	5371	26727	2262	24546	31.42	2.66	28.85	6.59	1.92	6.31
AER09	Quercus elliptica Née.	0.710	AL	3170	1711	5260	7986	2327	21986	10.05	2.93	27.66	3.99	2.15	6.62
AER10	Quercus laurina Humb. Et Bonpl.	0.744	AL	3603	1468	4719	10814	1795	18548	12.98	2.15	22.27	4.33	1.76	5.67
AER11	Quercus planipocula Trel.	0.876	MA	3102	1945	5136	9428	3708	25843	9.62	3.78	26.38	3.17	1.99	5.24
AER12	Quercus scytophylla Liebm.	0.813	MA	4620	2206	5526	19411	4425	27770	21.34	4.87	30.54	5.08	2.43	6.08
AER13	Quercus sideroxyla Humb. et Bonpl.	0.740	AL	2136	1623	4851	3778	2181	19484	4.56	2.63	23.53	2.58	1.96	5.86
AER14	Quercus skinneri Benth.	0.628	AL	3580	1468	5788	9004	1514	23533	12.82	2.15	33.50	5.10	2.09	8.24
AER15	Quercus tuberculata Liebm.	0.981	MA	5070	1817	4693	28218	3624	24172	25.70	3.30	22.02	4.62	1.66	4.27
AER16	Quercus uxoris McVaugh.	0.751	AL	3520	1819	5551	10418	2783	25905	12.39	3.31	30.81	4.19	2.16	6.60
				Angi	osperm	as enci	nos blan	cos							
AEB01	Quercus excelsa Liebm.	0.870	MA	3767	1804	5586	13809	3167	30365	14.19	3.25	31.20	3.87	1.85	5.74
AEB02	Quercus glabrescens L.	0.826	MA	3623	1593	5234	12132	2345	25319	13.22	2.62	27.52	3.91	1.74	5.66
AEB03	Quercus glaucoides Mart. et Gal.	0.873	MA	2506	1612	3602	6131	2536	12671	6.28	2.60	12.98	2.57	1.65	3.69
AEB04	Quercus laeta Liebm.	0.832	MA	2539	1604	5184	6001	2395	25026	6.44	2.57	26.88	2.73	1.72	5.57
AEB05	Quercus magnoliifolia Née.	0.771	AL	4523	1685	5173	17655	2450	23089	20.46	2.84	26.76	5.24	1.95	5.99
AEB06	Quercus obtusata Humb. et Bonpl.	0.828	MA	4650	1762	4922	20033	2877	22441	22.26	3.12	24.23	4.99	1.95	5.39
AEB07	Quercus peduncularis Née.	0.796	AL	3513	1639	6044	10990	2391	32525	12.34	2.69	36.53	3.95	1.84	6.79
AEB08	Quercus resinosa Liebm.	0.993	MA	5093	1916	4379	28807	4079	21300	25.94	3.72	19.18	4.59	1.72	3.94
AEB09	Quercus rugosa Née.	0.933	MA	2229	1856	5275	5189	3597	29060	4.97	3.44	27.83	2.14	1.78	5.05
C.T.F.: 0	Clasificación densidad Tabla FITECMA (Sot	omayor C	Castellan	os, 2008	3):										
MB: Mu	vy baja (< 0.200 gr/cm ³); BA: Baja (0.201-0.4	00 gr/cm	³); ME:	Media (0.401-0).600 gi	$/cm^{3}$; A	AL: Alta	ı (0.601-0	0.800 gr/	/cm ³); 1	MA: Mu	y alta (:	> 0.800	gr/m^3).

Tabla 4 (2/6). Características acústicas, elásticas, índices y factores de calidad de maderas de especies angiospermas mexicanas.

		ρ ₀		VR	V_{T}	V_L	ER	ET	E_L	I_R	I_{T}	I_{L}	F_R	FT	F_L
Código	Nombre Científico	ar/am ³	C.T.F.	m/s	m/a	m/a	MDa	MDa	MDa	E_R/ρ	E_T / ρ	E_L/ρ	V_R/ρ	V_T / ρ	V_L/ρ
		gr/cm-		III/S	III/S	III/S	MPa	MPa	MPa	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³
				Angio	sperma	s de cli	ma temp	olado							
ATE01	Acer negundo var. mexicanum (DC.) Steyerm.	0.546	ME	3767	1804	5586	13809	3167	30365	14.19	3.25	31.20	3.87	1.85	5.74
ATE02	Alnus acuminata arguta (Schlecht.) Furlow.	0.496	ME	3623	1593	5234	12132	2345	25319	13.22	2.62	27.52	3.91	1.74	5.66
ATE03	Aralia pubescens DC.	0.497	ME	2506	1612	3602	6131	2536	12671	6.28	2.60	12.98	2.57	1.65	3.69
ATE04	Arbutus xalapensis H.B.K.	0.825	MA	2539	1604	5184	6001	2395	25026	6.44	2.57	26.88	2.73	1.72	5.57
ATE05	Carpinus coroliniana Walt.	0.664	AL	4523	1685	5173	17655	2450	23089	20.46	2.84	26.76	5.24	1.95	5.99
ATE06	Celastrus pringlei Rose.	0.453	ME	4650	1762	4922	20033	2877	22441	22.26	3.12	24.23	4.99	1.95	5.39
ATE01	Celtis caudata Planch.	0.699	AL	3513	1639	6044	10990	2391	32525	12.34	2.69	36.53	3.95	1.84	6.79
ATE08	Clethra mexicana DC.	0.480	ME	5093	1916	4379	28807	4079	21300	25.94	3.72	19.18	4.59	1.72	3.94
ATE09	Cornus disciflora Moc et Sessé ex DC.	0.686	AL	2229	1856	5275	5189	3597	29060	4.97	3.44	27.83	2.14	1.78	5.05
ATE10	Crataegus mexicana Moc. et Sessé ex DC.	0.687	AL	3767	1804	5586	13809	3167	30365	14.19	3.25	31.20	3.87	1.85	5.74
ATE11	Ficus benjamina L.	0.372	BA	3623	1593	5234	12132	2345	25319	13.22	2.62	27.52	3.91	1.74	5.66
ATE12	Fraxinus uhdei (Wenzing) Ling.	0.664	AL	2506	1612	3602	6131	2536	12671	6.28	2.60	12.98	2.57	1.65	3.69
ATE13	Garrya laurifolia Hartw.	0.711	AL	2539	1604	5184	6001	2395	25026	6.44	2.57	26.88	2.73	1.72	5.57
ATE14	Ilex brandegeana Loesener.	0.707	AL	4523	1685	5173	17655	2450	23089	20.46	2.84	26.76	5.24	1.95	5.99
ATE15	Juglans pyriformis Liebm.	0.850	MA	4650	1762	4922	20033	2877	22441	22.26	3.12	24.23	4.99	1.95	5.39
ATE16	Lyquidambar styraciflua L.	0.645	AL	3513	1639	6044	10990	2391	32525	12.34	2.69	36.53	3.95	1.84	6.79
ATE17	Macadamia ternifolia	0.756	AL	5093	1916	4379	28807	4079	21300	25.94	3.72	19.18	4.59	1.72	3.94
ATE18	Meliosma dentata (Liebm.) Urban.	0.576	ME	2229	1856	5275	5189	3597	29060	4.97	3.44	27.83	2.14	1.78	5.05
ATE19	Morus celtidifolia H.B.K.	0.806	MA	3767	1804	5586	13809	3167	30365	14.19	3.25	31.20	3.87	1.85	5.74
ATE20	Platanus mexicana Moric.	0.644	AL	3623	1593	5234	12132	2345	25319	13.22	2.62	27.52	3.91	1.74	5.66
ATE21	Populus deltoides Bartr.	0.543	ME	2506	1612	3602	6131	2536	12671	6.28	2.60	12.98	2.57	1.65	3.69
ATE22	Populus tremuloides Michx.	0.476	ME	2539	1604	5184	6001	2395	25026	6.44	2.57	26.88	2.73	1.72	5.57
ATE23	Prunus capuli Cav.	0.676	AL	4523	1685	5173	17655	2450	23089	20.46	2.84	26.76	5.24	1.95	5.99
ATE24	Styrax ramirezii Greenm.	0.499	ME	4650	1762	4922	20033	2877	22441	22.26	3.12	24.23	4.99	1.95	5.39
ATE25	Tilia mexicana Schlecht.	0.469	ME	3513	1639	6044	10990	2391	32525	12.34	2.69	36.53	3.95	1.84	6.79
ATE26	Zinowiewia aff. concinna Lund.	0.557	ME	5093	1916	4379	28807	4079	21300	25.94	3.72	19.18	4.59	1.72	3.94
ATE27	Zinowiewia concinna Lund.	0.521	ME	2229	1856	5275	5189	3597	29060	4.97	3.44	27.83	2.14	1.78	5.05
C.T.F.:	Clasificación densidad Tabla FITECMA (Sot	omayor C	Castellan	os, 2008	3):										
MB: Mu	uy baja (< 0.200 gr/cm ³); BA: Baja (0.201-0.4	100 gr/cm	³); ME:	Media (0.401-0).600 gr	$(cm^3); A$	AL: Alta	ı (0.601-0).800 gr/	/cm ³); 1	MA: Mu	y alta (:	> 0.800	gr/m^3).

T 11 4 /	010	a	· .•	1/	/ 11	C ·	1 1		1 1	1	•	•		•
Tabla /L (3/61	('aractaristicas	activet1000	Alacticae	indicas v	thetores.	പപറവ	1dod d	a madarac	do o	CDOCIOC	2001001	normog	mavicanac
1 a 0 a + 1	J/UL	. Caracieristicas	acusticas.	Clasticas.	munces v		ue cai	liuau u	ie maueras	ucc	SUCCIES	angios	Dermas	IIICAICAIIAS.
	/										~ ~ ~ ~ ~ ~ ~			

		ρ_0		VR	VT	$V_{\rm L}$	ER	ET	E_L	I_R	I_{T}	I_{L}	F_R	F_{T}	F_{L}
Código	Nombre Científico	gr/cm ³	C.T.F.	m/s	m/s	m/s	MPa	MPa	MPa	E_{R}/ρ	$E_T\!/\rho$	E_L/ρ	$V_{\text{R}}\!/\!\rho$	V_T / ρ	V_L/ρ
		gi/ciii		111/5	111/5	111/5	wii a	wii a	Ivii a	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³
				Angi	osperma	as de cl	ima trop	oical							
ATR01	Acacia melanoxylon R. Br.	0.553	ME	1678	1633	4790	1744	1651	14207	2.82	2.67	22.94	2.71	2.64	7.73
ATR02	Andira inermis (W. Wrigth) DC.	0.760	AL	6405	2168	5051	34910	4000	21708	41.02	4.70	25.51	7.53	2.55	5.94
ATR03	Aspidosperma megalocarpon Muell. Arg.	0.653	AL	2760	2066	4545	5566	3119	15096	7.62	4.27	20.66	3.78	2.83	6.22
ATR04	Astronium graveolens Jacq.	0.774	AL	1020	962	3193	901	801	8832	1.04	0.92	10.20	1.18	1.11	3.69
ATR05	Blepharidium mexicanum Standl.	0.571	ME	3680	1382	4882	8657	1222	15236	13.54	1.91	23.83	5.76	2.16	7.64
ATR06	Brosimum alicastrum Sw.	0.885	MA	5400	1792	4550	28887	3182	20509	29.16	3.21	20.70	5.45	1.81	4.59
ATR07	Bucida buceras L.	0.871	MA	5040	1580	5590	24760	2433	30462	25.40	2.50	31.25	5.17	1.62	5.74
ATR08	Bursera simaruba (L.) Sarg.	0.326	BA	3657	993	6018	4875	359	13202	13.37	0.99	36.21	10.03	2.72	16.51
ATR09	Calophyllum brasiliense Cambess.	0.608	AL	2630	1493	5197	4706	1518	18372	6.92	2.23	27.00	3.87	2.20	7.64
ATR10	Cassia fistula L.	0.608	AL	2022	1636	3983	2782	1820	10792	4.09	2.68	15.86	2.97	2.40	5.85
ATR11	Cedrela mexicana Roem.	0.374	BA	1760	1529	5189	1298	979	11279	3.10	2.34	26.92	4.20	3.65	12.38
ATR12	Chiranthodendron pentadactylon Larreategui.	0.456	ME	3920	1153	6260	7840	678	19990	15.37	1.33	39.18	7.68	2.26	12.27
ATR13	Chloroleucon mangense (Jacq.) Britton & Rose.	0.652	AL	3723	1906	4868	10108	2650	17277	13.86	3.63	23.70	5.11	2.61	6.68
ATR14	Cojoba arborea (L.) Britton & Rose.	0.553	ME	2159	1394	4580	2883	1202	12978	4.66	1.94	20.98	3.49	2.25	7.40
ATR15	Cordia dodecandra A. DC.	0.796	AL	3940	2186	4264	13818	4254	16184	15.52	4.78	18.18	4.43	2.46	4.79
ATR16	Cordia megalantha S.F. Blake.	0.405	ME	5620	1269	5520	14301	729	13794	31.58	1.61	30.47	12.41	2.80	12.19
ATR17	Dialium guianense Stand.	0.869	MA	5540	1667	5170	29838	2703	25986	30.69	2.78	26.73	5.70	1.72	5.32
ATR18	Dalbergia paloescrito Rzedowski et Guridi.	0.525	ME	1955	1814	4623	2243	1932	12546	3.82	3.29	21.38	3.33	3.09	7.88
ATR19	Ebanopsis ebano (Berl.) Britton & Rose.	1.060	MA	4553	1783	4429	24599	3771	23278	20.73	3.18	19.62	3.84	1.50	3.73
ATR20	Garrya longifolia Rose.	0.787	AL	4845	2276	4553	20682	4565	18265	23.47	5.18	20.73	5.50	2.58	5.17
ATR21	Gilibertia arborea (L.) Marchal.	0.384	BA	1616	929	6323	1122	371	17172	2.61	0.86	39.98	3.76	2.16	14.72
ATR22	Gliricidia sepium (Jacq.) Steud.	0.921	MA	2720	1717	4097	7621	3037	17291	7.40	2.95	16.78	2.64	1.67	3.98
ATR23	Gmelina arborea L.	0.502	ME	1710	1629	5153	1642	1490	14908	2.92	2.65	26.55	3.05	2.90	9.18
ATR24	Guarea excelsa H. B. K.	0.656	AL	3667	1527	5615	9874	1711	23153	13.44	2.33	31.53	4.99	2.08	7.65
ATR25	Guazuma ulmifolia Lamb.	0.628	AL	5150	1500	5025	18650	1583	17758	26.52	2.25	25.25	7.32	2.13	7.15
ATR26	Guettarda seleriana Standl.	0.640	AL	3190	1378	5193	7284	1359	19307	10.18	1.90	26.97	4.46	1.92	7.26
ATR27	Inga hintonii Sandw.	0.685	AL	1876	1627	5188	2696	2028	20613	3.52	2.65	26.91	2.45	2.12	6.77
ATR28	Inga spuria Humb. et Bonpl. ex Willd.	0.510	ME	3627	1565	4651	7500	1397	12335	13.15	2.45	21.63	6.36	2.75	8.16
ATR29	Jacaranda mimosaefolia D. Don .	0.408	ME	2336	1603	5207	2492	1174	12377	5.46	2.57	27.11	5.12	3.51	11.40
ATR30	Licaria campechiana (Standl.) Kosterm.	0.780	AL	5400	2108	5014	25466	3881	21955	29.16	4.44	25.14	6.18	2.41	5.74
C.T.F.: 0	Clasificación densidad Tabla FITECMA (Sote	omayor C	Castellan	os, 2008	8):										
MB: Mu	ıy baja (< 0.200 gr/cm ³); BA: Baja (0.201-0.4	00 gr/cm	³); ME: 1	Media (0.401-0).600 gi	$(/cm^3); A$	AL: Alta	(0.601-0	0.800 gr/	/cm ³); l	MA: Mu	y alta (>	> 0.800	gr/m ³).

Tabla 4 (4/6). Características acústicas, elásticas, índices y factores de calidad de maderas de especies angiospermas mexicanas.

		ρ_0		VR	VT	V_{L}	ER	ET	E_L	IR	IT	I_L	F_R	F_{T}	F_L
Código	Nombre Científico	gr/cm ³	C.T.F.	m/s	m/s	m/s	MPa	MPa	MPa	E_{R}/ρ	$E_T\!/\rho$	$E_L\!/\rho$	V_{R}/ρ	$V_T\!/\rho$	V_L/ ho
		81,0111		111/0	111/0	111/5	inii u	ivii u	ivii u	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³
				Angi	osperma	is de cl	ima trop	oical							
ATR31	Licaria excelsa Kosterm.	0.499	ME	2309	1477	5043	2976	1218	14196	5.33	2.18	25.43	4.14	2.65	9.03
ATR32	Lonchocarpus castilloi Standl.	0.859	MA	5460	1879	5183	28668	3395	25834	29.81	3.53	26.86	5.68	1.95	5.39
ATR33	Lucuma campechiana Kunth.	0.862	MA	5225	1739	5990	26322	2916	34594	27.30	3.02	35.88	5.42	1.80	6.21
ATR34	Luhea speciosa Willd.	0.648	AL	5355	2174	5600	20798	3427	22747	28.68	4.73	31.36	7.38	3.00	7.72
ATR35	Lysiloma acapulcensis (Kunth) Benth.	0.762	AL	6030	2169	5240	30988	4011	23400	36.36	4.71	27.46	7.08	2.55	6.15
ATR36	Lysiloma bahamensis Benth.	0.533	ME	2226	1481	5621	2954	1308	18836	4.96	2.19	31.59	3.73	2.48	9.43
ATR37	Maclura tinctoria (L.) Don ex Steud.	0.714	AL	2917	1746	4649	6801	2437	17275	8.51	3.05	21.61	3.65	2.18	5.82
ATR38	Mangifera indica L.	0.591	ME	3460	1286	4469	7917	1094	13211	11.97	1.65	19.98	5.23	1.94	6.76
ATR39	Manilkara zapota (L.) Royen.	0.937	MA	3185	1572	4627	10638	2593	22450	10.14	2.47	21.41	3.04	1.50	4.41
ATR40	Metopium brownei (Jacq.) Urban.	0.711	AL	3520	1537	4866	9862	1881	18846	12.39	2.36	23.68	4.42	1.93	6.11
ATR41	Nectandra globosa (Aubl.) Mez.	0.483	ME	3770	1374	6049	7684	1021	19782	14.21	1.89	36.59	6.97	2.54	11.19
ATR42	Nectandra tabascensis Lund.	0.574	ME	3307	1477	5548	7026	1403	19776	10.93	2.18	30.78	5.15	2.30	8.63
ATR43	Persea americana Mill.	0.474	ME	1401	1276	5780	1041	864	17716	1.96	1.63	33.41	2.64	2.41	10.90
ATR44	Phoebe effusa Meissn.	0.508	ME	2950	1157	4690	4945	760	12497	8.70	1.34	21.99	5.19	2.04	8.25
ATR45	Piscidia piscipula Sarg.	0.745	AL	5760	1481	4721	27651	1829	18577	33.18	2.19	22.29	6.91	1.78	5.66
ATR46	Pithecellobium arboreum (L.) Urban.	0.643	AL	3707	1498	4542	9891	1616	14853	13.74	2.24	20.63	5.15	2.08	6.31
ATR47	Platymiscium yucatanum Standl.	0.826	MA	5600	1807	4694	28997	3019	20371	31.36	3.26	22.03	6.06	1.95	5.08
ATR48	Pouteria aff. campechiana (Kunth) Baehni.	0.750	AL	2252	1466	5262	4257	1805	23241	5.07	2.15	27.69	2.68	1.75	6.27
ATR49	Pouteria unilocularis (Donn. Smith) Baehni.	0.841	MA	5760	1846	4529	31236	3208	19313	33.18	3.41	20.51	6.12	1.96	4.81
ATR50	Prosopis juliflora DC.	0.616	AL	5425	1654	3990	20291	1887	10975	29.43	2.74	15.92	7.87	2.40	5.79
ATR51	Protium copal (Schltdl. et Cham.) Engl.	0.592	ME	2960	1400	5589	5803	1297	20689	8.76	1.96	31.24	4.47	2.11	8.44
ATR52	Pseudobombax ellipticum (Kunth) Dugand.	0.307	BA	1733	1197	3672	1032	492	4633	3.00	1.43	13.49	5.05	3.49	10.69
ATR53	Pseudolmedia oxyphyllaria Donn. Smith.	0.823	MA	3187	1787	5992	9353	2940	33064	10.15	3.19	35.90	3.46	1.94	6.51
ATR54	Psychotria sp.	0.640	AL	3690	1555	4886	9747	1731	17091	13.62	2.42	23.87	5.15	2.17	6.83
ATR55	Schizolobium parahybum (Vell.) Blake.	0.301	BA	1391	1026	5817	651	354	11388	1.94	1.05	33.84	4.13	3.05	17.28
ATR56	Sebastiania longicuspis Standl.	0.516	ME	2708	1436	6567	4229	1190	24875	7.33	2.06	43.12	4.69	2.49	11.38
ATR57	Sickingia salvadorensis Standl.	0.672	AL	5540	2108	6007	23062	3341	27116	30.69	4.45	36.09	7.37	2.81	7.99
ATR58	Sideroxylon meyeri Standl.	0.865	MA	3713	1819	6037	13346	3203	35277	13.79	3.31	36.45	3.84	1.88	6.24
ATR59	Simaruba glauca DC.	0.656	AL	5550	1445	6001	22615	1533	26438	30.80	2.09	36.01	7.56	1.97	8.17
ATR60	Spathodea campanulata Beauv.	0.289	BA	3190	908	4018	3287	266	5215	10.18	0.82	16.15	9.88	2.81	12.44
C.T.F.: 0	Clasificación densidad Tabla FITECMA (Soto	omayor C	Castellan	os, 2008	3):										
MB: Mu	y baja (< 0.200 gr/cm ³); BA: Baja (0.201-0.4	00 gr/cm	³); ME:	Media (0.401-0	.600 gr	$c/cm^{3}); A$	AL: Alta	(0.601-0	0.800 gr/	/cm ³); l	MA: Mu	y alta (>	> 0.800	gr/m ³).

Tabla 4 (5/6). Características acústicas, elásticas, índices y factores de calidad de maderas de especies angiospermas mexicanas.

		ρ_0		V_{R}	V_{T}	$V_{\rm L}$	E _R	ET	E_L	I_R	I_{T}	$I_{\rm L}$	F_R	F_{T}	F_L
No.	Nombre Científico	or/cm ³	C.T.F.	m/s	m/s	m/s	MPa	MPa	MPa	E_R/ρ	$E_T\!/\rho$	E_L/ρ	V_R / ρ	$V_T\!/\!\rho$	V_L/ρ
		gi/ciii		111/5	111/5	111/5	Ivii a	wii a	IVII a	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³
				Angie	osperma	as de cli	ima trop	oical							
ATR61	Spondias mombin Lindl.	0.302	BA	1264	1147	6000	539	444	12147	1.60	1.31	36.00	3.75	3.40	17.78
ATR62	Swartzia cubensis Standl.	0.840	MA	5680	1810	5750	30328	3080	31076	32.26	3.28	33.06	6.04	1.93	6.12
ATR63	Sweetia panamensis Benth.	0.858	MA	3833	2168	5807	14100	4512	32361	14.69	4.70	33.72	3.99	2.26	6.05
ATR64	Swietenia macrophylla King.	0.507	ME	5475	1453	5802	17012	1199	19107	29.98	2.11	33.67	9.65	2.56	10.22
ATR65	Switenia humillis Zucc.	0.705	AL	2516	2112	4500	4991	3517	15970	6.33	4.46	20.25	3.19	2.68	5.71
ATR66	Tabebuia palmeri Rose.	0.881	MA	5077	1892	4135	25405	3529	16858	25.77	3.58	17.10	5.15	1.92	4.20
ATR67	Tabebuia penthaphylla (L.) Hemsl.	0.562	ME	5375	1603	5038	18174	1617	15968	28.89	2.57	25.38	8.54	2.55	8.01
ATR68	Tabebuia rosea (Bertol) DC.	0.623	AL	5355	1671	5174	19988	1946	18660	28.68	2.79	26.77	7.68	2.40	7.42
ATR69	Talisia olivaeformis (Kunth) Radlk.	0.992	MA	5535	1811	5192	34009	3639	29925	30.64	3.28	26.96	4.99	1.63	4.68
ATR70	Tectona grandis Linn. F.	0.656	AL	2519	1375	4870	4659	1389	17417	6.34	1.89	23.72	3.43	1.87	6.63
ATR71	Vitex gaumeri Greenm.	0.612	AL	5315	1472	5196	19348	1484	18488	28.25	2.17	26.99	7.76	2.15	7.59
ATR72	Zuelania guidonia Br. Et Met.	0.605	AL	2765	1676	6046	5171	1900	24729	7.65	2.81	36.56	4.09	2.48	8.94
C.T.F.: 0	C.T.F.: Clasificación densidad Tabla FITECMA (Sotomayor Castellanos, 2008):														
IVID: IVIU	iy baja (< 0.200 gi/ciii ^o); BA: Baja (0.201-0.4	iou gr/cm	; ME:	wiedła (0.401-0	0.000 gr	7Cm ²); F	AL: Alta	10.001-0	J.800 gr/	cm ²); 1	MA: MU	y aita (.	> 0.800	gi/m ^o).

T 11 4 /	(- 1 -)	a	· · ·	1/	/ 11	C .	1 1 1 1	1 1	1	1	•	•		•
Tabla /L (6/61	('aractaristicas	active treas	Alacticae	indicac v	1 tootoroc /	htles ab	od do	madarac	പപപ	no0100	20001001	Jarmag	mavicanac
1 a 0 a + 1	\mathbf{U}	. Caraciensiicas	acusticas.	ciasticas.	multes v	i idulutes (ue canu	au uc	THAUCIAS	uc c	SUCCIES	angiosi	JETHIAS	IIICAICAIIAS.

ANÁLISIS

La tabla 5 presenta para cada grupo botánico de maderas estudiado los siguientes estadígrafos:

- Media aritmética (Media Arit).
- Desviación estándar (Desv. Est.).
- Coeficiente de variación (Coef. Var.)
- Valor mínimo (Valor Min.).
- Valor máximo (Valor Max.).

Los valores promedio de los parámetros analizados y mostrados en la tabla 5 son similares a los valores encontrados en la literatura y presentados en la tabla 2. Es necesario puntualizar que los valores de las velocidades y densidades particulares de cada especie estudiada fueron medidos en un solo ejemplar de la xiloteca. Sin embargo, de los resultados de la investigación, se deduce que los valores mostraron tendencias que coinciden con resultados de investigaciones anteriores. Este argumento se esquematiza en la figura 3. La información presentada en este banco de datos es recomendable usarla solo como referencia para futuras investigaciones sobre las características acústicas y de calidad de las especies mexicanas.

Las probetas de la xiloteca de la FITECMA fueron preparadas a partir de muestras de madera homogénea, generalmente con hilo recto y con anillos angostos y continuos. Además, las probetas están recortadas y alineadas en las direcciones de anisotropía de la madera, a saber: radial, tangencial y longitudinal. Asimismo, el contenido de humedad promedio de la madera se estimó en 10.63%.

Independientemente de las propiedades y características propias de cada especie estudiada, estos factores favorecieron que las densidades de las probetas mostraran valores relativamente superiores a la densidad promedio de la madera normalmente utilizada en ingeniería. A manera de ejemplo, del total de las 152 especies, la densidad ρ_0 de 130 de ellas (80%) fue superior a 0.500 gr/cm³. En consecuencia, en probetas de madera tan compacta y seca, el ultrasonido viajó con una velocidad mayor a la esperada en un medio poroso y húmedo.

Coeficientes de variación

Los valores mínimos y máximos de la densidad mostraron un amplio rango de variación para las especies mexicanas. El rango de valores para la densidad de todas las especies varió entre 0.289 y 1.060 (gr/cm³).

Esta amplia diversidad en los valores estudiados resultó en coeficientes de variación para todas las características evaluadas, mayores que los encontrados en estudios con una menor diversidad de especies, como por ejemplo las tablas de características físicas y mecánicas para maderas presentadas en el Manual de la Madera, del Laboratorio de Productos Forestales de los Estados Unidos (Forest Products Laboratory, 1999). Si a este parámetro se adiciona la gran diversidad en la estructura anatómica de las especies estudiadas, los amplios coeficientes de variación son consecuentes.

	ρο	VR	VT	VL	Er	ET	EL	IR	IT	IL	F _R	FT	F_{L}
Estadígrafo	gr/cm ³	m/s	m/s	m/s	MPa	MPa	MPa	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³
	•	Gi	imnosper	mas pin	os duros (16 especi	ies) y pinc	s blandos	s (2 espe	ecias)			
Media Arit	0.499	2758	1412	5804	4504	1178	18879	8.15	2.07	34.1	5.08	2.57	10.79
Desv. Est.	0.083	762	283	986	2270	550	5536	4.20	0.80	10.27	1.66	0.57	2.87
Coef. Var.	0.17	0.28	0.20	0.17	0.50	0.47	0.29	0.51	0.39	0.30	0.33	0.22	0.27
Valor Min.	0.390	1418	959	3321	1213	449	6475	2.01	0.92	11.03	2.35	1.81	5.09
Valor Max.	0.678	3713	1868	7187	7994	2265	28637	13.79	3.49	51.65	7.85	3.63	15.01
		-	-	0	tras gimn	ospermas	s (10 espe	cies)	-				
Media Arit	0.439	2911	1226	5768	5062	798	16543	9.83	1.59	34.45	5.84	2.53	12.26
Desv. Est.	0.077	1227	311	1145	3852	403	6114	7.54	0.76	12.41	2.31	0.64	3.77
Coef. Var.	0.18	0.42	0.25	0.20	0.76	0.50	0.37	0.77	0.48	0.36	0.40	0.25	0.31
Valor Min.	0.295	1158	717	3580	442	210	7991	1.34	0.51	12.81	3.36	1.75	5.74
Valor Max.	0.557	5120	1672	7130	12289	1412	27552	26.21	2.80	50.84	10.92	3.47	18.09
				Angi	ospermas	encinos 1	ojos (16 e	species)	-			-	
Media Arit	0.786	3839	1714	5282	14305	2669	24630	16.20	2.98	28.46	4.42	1.96	6.14
Desv. Est.	0.102	1250	227	772	9255	945	6194	9.93	0.80	7.62	1.46	0.25	1.30
Coef. Var.	0.13	0.33	0.13	0.15	0.65	0.35	0.25	0.61	0.27	0.27	0.33	0.13	0.21
Valor Min.	0.628	2091	1377	3260	3778	1474	12057	4.37	1.90	10.62	1.84	1.65	2.87
Valor Max.	1.014	5795	2206	6298	31166	4466	34750	33.58	4.87	39.67	6.59	2.43	8.24
				Angio	spermas e	ncinos b	lancos (9	especies)	-			-	
Media Arit	0.858	3605	1719	5044	13416	2871	24644	14.01	2.98	25.90	3.78	1.80	5.31
Desv. Est.	0.069	1026	120	703	7763	622	5882	7.53	0.42	6.75	1.09	0.10	0.97
Coef. Var.	0.08	0.28	0.07	0.14	0.58	0.22	0.24	0.54	0.14	0.26	0.29	0.06	0.18
Valor Min.	0.771	2229	1593	3602	5189	2345	12671	4.97	2.57	12.98	2.14	1.65	3.69
Valor Max.	0.993	5093	1916	6044	28807	4079	32525	25.94	3.72	36.53	5.24	1.95	6.79
	1	1	1	Angiosp	ermas de	clima tei	mplado (2	7 especie	s)	1	1		1
Media Arit.	0.611	3605	1719	5044	9576	2034	17818	14.01	2.98	25.90	4.39	2.13	6.29
Desv. Est.	0.126	986	115	676	5487	511	6034	7.24	0.40	6.48	1.22	0.44	1.79
Coef. Var.	0.21	0.27	0.07	0.13	0.57	0.25	0.34	0.52	0.13	0.25	0.28	0.21	0.28
Valor Min.	0.372	2229	1593	3602	2898	1055	7213	4.97	2.57	12.98	2.14	1.72	3.94
Valor Max.	0.850	5093	1916	6044	21929	3105	28566	25.94	3.72	36.53	6.69	3.12	11.51
				Angios	permas de	e clima tr	opical (72	especies)				r
Media Arit	0.647	3716	1601	5110	12605	2054	18942	15.98	2.66	26.57	5.26	2.31	7.79
Desv. Est.	0.178	1483	323	686	10284	1139	6450	11.25	1.05	6.96	2.05	0.50	3.06
Coef. Var.	0.28	0.40	0.20	0.13	0.82	0.55	0.34	0.70	0.39	0.26	0.39	0.22	0.39
Valor Min.	0.289	1020	908	3193	539	266	4633	1.04	0.82	10.20	1.18	1.11	3.69
Valor Max.	1,186	6405	2276	6567	34910	4565	35277	41,02	5,18	43,12	12,41	4,20	17,78
	ρ ₀	VR	VT	VL	E _R	ET	EL	I _R	IT	IL	F _R	FT	FL
Estadigrafo	gr/cm ³	m/s	m/s	m/s	MPa	MPa	MPa	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³
				Т	odas las e	especies (152 espec	cies)					
Media Arit	0.637	3536	1594	5238	10838	1977	19513	14.21	2.63	28.08	4.95	2.26	7.85
Desv. Est.	0.174	1301	301	804	8861	1038	6542	9.71	0.94	8.32	1.85	0.51	3.23
Coef. Var.	0.27	0.37	0.19	0.15	0.82	0.53	0.34	0.68	0.36	0.30	0.37	0.23	0.41
Valor Min.	0.289	1020	717	3193	442	210	4633	1.04	0.51	10.20	1.18	1.11	2.87
Valor Max.	1.060	6405	2276	7187	34910	4565	35277	41.02	5.18	51.65	12.41	3.65	18.09

TT 1 1 7 T	1/ 1/ 0	1 1 7 0	1	•	1 1		1
Tabla > F	estadioratos	de 152	maderas	mexicanas	ordenadas	nor o	prinnos hofanicos
1 uoiu 5. L	Jourgiulos	uc 152	maacras	mexicanas	oracinadas	por g	Supos ootumeos.

Velocidad del ultrasonido

Prácticamente todas las especies estudiadas mostraron características de anisotropía en su velocidad del ultrasonido con respecto a las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. Las relaciones de anisotropía de la velocidad del ultrasonido para maderas mexicanas ordenadas por grupo botánico, se presentan en la tabla 6. Estas correspondencias están calculadas a partir de los valores procedentes de las medias aritméticas de la tabla 5.

Tabla 6. F	Relaciones	de	anisotropía	del	módulo	de	elasticidad	por	ultrasonido	para	maderas	
mexicanas	ordenadas	poi	r grupo botá	nico)							

Divisiones taxonómicas	V_R :	V_T :	V_L :
Gimnospermas pinos duros (16 especies) y pinos blandos (2 especias)	1.00	0.51	2.10
Otras gimnospermas (10 especies)	1.00	0.42	1.98
Angiospermas encinos rojos (16 especies)	1.00	0.47	1.38
Angiospermas encinos blancos (9 especies)	1.00	0.48	1.40
Angiospermas de clima templado (27 especies)	1.00	0.48	1.40
Angiospermas de clima tropical (72 especies)	1.00	0.43	1.38
Todas las especies (152 especies)	1.00	0.45	1.48

Módulo de elasticidad por ultrasonido

Los valores experimentales del módulo de elasticidad medidos en condiciones de solicitación dinámicas son usualmente mayores que los valores del módulo de elasticidad correspondientes al mismo espécimen de madera, pero ensayado en condiciones estáticas (Bodig y Jayne, 1993). La razón que explica este fenómeno es el efecto de la velocidad de solicitación, la cual en pruebas dinámicas provoca una respuesta de carácter viscoelástico de la madera, como es el caso del ultrasonido, aumentando así la resistencia elástica aparente del espécimen en estudio.

En el mismo contexto, los valores experimentales del módulo de elasticidad medidos en maderas con un alto contenido de humedad son usualmente menores que los valores del módulo de elasticidad correspondientes al mismo espécimen de madera, pero ensayado con un contenido de humedad menor (Bodig y Jayne, 1993). El contenido de humedad de la madera se estimó entre 10 y 12% en relación a su peso en estado anhidro, menor al propuesto por algunos métodos de prueba normalizados que recomiendan ensayos mecánicos con un contenido de humedad superiores al punto de saturación de la fibra (H > 30%).

Los valores de los módulos de elasticidad presentados en este banco de datos deben ser considerados únicamente como referencia para fines de comparación y considerados ligeramente superiores a los valores promedios de módulos de elasticidad determinados por métodos de prueba equivalentes, normalizados y/o en condiciones de carga estática.

Igualmente, la diferencia entre los valores de los módulos de elasticidad calculados para esta base de datos y los valores correspondientes citados en la literatura mexicana, -usualmente determinados en pruebas de flexión-, puede ser explicada por los siguientes factores:

- Diversidad en la estructura microanatómica de las especies: el tamaño, forma y acomodo de los diferentes componentes estructurales del plano leñoso varió entre especies. La onda de

ultrasonido viajó a velocidad diferente según el tipo y orientación relativa de cada elemento microanatómico de cada probeta representativa de una especie de madera.

- Heterogeneidad de la madera: las probetas fueron de pequeñas dimensiones y su estructura anatómica puede considerarse macroscópicamente homogénea. Algunas de las probetas de maderas gimnospermas estuvieron constituidas de madera de albura. En cambio, las probetas de maderas angiospermas presentaron madera de albura y duramen. Sin embargo, durante los trabajos de laboratorio, se observó en algunas probetas, particularidades de crecimiento tales como segmentos de tejidos entrecruzados y combinaciones naturales de madera de albura y duramen. Al igual que en el caso de variación de la estructura microanatómica, la onda de ultrasonido viajó a velocidad diferente según el tipo y orientación relativa de cada elemento microanatómico de cada probeta representativa de cada especie de madera. Esta situación se corrigió desplazando los puntos de contacto del medidor de tiempo de recorrido del ultrasonido durante las pruebas experimentales.

- Tipo de solicitación: la madera fue solicitada en una carga simple (en los casos de V_R, V_T y V_L de esta investigación), en comparación con los ensayos normalizados de flexión donde la deformación inducida provoca esfuerzos compuestos, (como es el caso del módulo de elasticidad en flexión encontrado frecuentemente en la literatura especializada). Para el caso de una misma probeta, la combinación de esfuerzos provoca una disminución aparente en la rigidez elástica, en comparación con la rigidez determinada con una solicitación simple.

- Orientación de la solicitación: las probetas estaban recortadas y alineadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal; direcciones privilegiadas estructuralmente donde la anisotropía de la madera juega un papel importante, como se observó en los casos de V_R, V_T y V_L, así como en E_R, E_T y E_L.

Las relaciones de anisotropía del módulo de elasticidad por ultrasonido para maderas mexicanas ordenadas por grupos botánicos, se presentan en la tabla 7. Estas proporciones están calculadas a partir de los valores correspondientes de las medias aritméticas de la tabla 5.

División taxonómica	E_R :	E_T :	EL
Gimnospermas pinos duros (16 especies) y pinos blandos (2 especias)	1.00	0.26	4.20
Otras gimnospermas (10 especies)	1.00	0.16	3.37
Angiospermas encinos rojos (16 especies)	1.00	0.19	1.72
Angiospermas encinos blancos (9 especies)	1.00	0.21	1.84
Angiospermas de clima templado (27 especies)	1.00	0.21	1.86
Angiospermas de clima tropical (72 especies)	1.00	0.16	1.50
Todas las especies (152 especies)	1.00	0.18	1.80

Tabla 7. Relaciones de anisotropía del módulo de elasticidad por ultrasonido para maderas mexicanas ordenadas por grupo botánico

Índice material

En la industria de la construcción, la madera sólida funciona como elemento estructural, con el objetivo técnico de minimizar peso y optimizar las propiedades de resistencia. El índice material de la madera interpreta su capacidad elástica ponderada por su densidad. Una de las aplicaciones

básicas de este indicador es como referencia para la selección de materiales en el proceso de diseño.

Los valores promedio de la tabla 5 indican la relación I_R : I_T : I_L de 1.00: 0.19: 1.75, para todas las maderas analizadas. Este resultado sugiere que la madera trabaja mejor estructuralmente en su dirección longitudinal, en comparación con sus direcciones radial y tangencial.

Considerando que el índice material es particular a cada especie, las especies que mostraron altos valores en este estudio preliminar, poseen un potencial de calidad para su empleo en la industria de la construcción y en aplicaciones donde las propiedades acústicas son importantes.

Para ilustrar este resultado, la figura 3a construida a partir de los resultados de la tabla 4, presenta la tendencia del índice I_T de las maderas mexicanas, relacionado con la densidad correspondiente a cada especie.



Figura 3. a) Tendencia del índice de material (I_T) y la densidad (ρ_0); b) Tendencia de los factores de calidad (F_R, F_T y F_L), de las 152 especies estudiadas.

Factor de calidad

El factor de calidad es un indicador de la capacidad de trasmisión de energía en relación a la densidad del material. Para la utilización de una especie de madera en instrumentos musicales, es recomendable un valor alto de este indicador de calidad.

La figura 3b construida a partir de los resultados de la tabla 4, presenta las tendencia de F_R , F_T y F_L de las maderas estudiadas. Los datos están ordenados en relación a los valores de densidad de las maderas correspondientes a la figura 3a: a menor densidad de la madera, el factor de calidad aumenta proporcionalmente.

No obstante que los resultados de este estudio son de carácter preliminar, algunas maderas presentan valores, comparativamente entre especies, más altos de este indicador de calidad. Este resultado propone su estudio y promoción.

CONCLUSIONES

Los valores de densidad, de la velocidad del ultrasonido y del módulo de elasticidad confirmaron el carácter anisotrópico de la madera y conjuntamente con sus valores del índice material y del factor de calidad correspondientes, las maderas evidenciaron una gran variabilidad.

Esta última propiedad de las maderas puede ser atribuida principalmente a la variación natural de la madera y por otra parte a la estrategia experimental de la investigación.

El criterio metodológico para estructurar la base de datos fue el análisis extensivo de especies de maderas mexicanas. Si bien el número de especies estudiadas es de 152, se analizó una sola probeta de cada especie.

Este enfoque proporcionó un panorama general de parámetros acústicos y de indicadores de calidad de maderas de especies mexicanas. Sin embargo, para poder promocionar y utilizar alguna especie en particular, es necesario realizar estudios intensivos con un tamaño de muestra estadísticamente representativo para una especie en particular.

En base a este estudio preliminar se proponen las siguientes especies para el estudio de sus propiedades acústicas:

Pinus durangensis f. quinquefoliata Martínez. Cupressus lindleyi Klotzsch. Podocarpus matudae Lundell. Bursera simaruba (L.) Sarg. Cordia megalantha S.F. Blake. Spathodea campanulata Beauv. Vitex gaumeri Greenm. Tabebuia rosea (Bertol) DC. Swietenia macrophylla King.

REFERENCIAS

Ashby, M.F. 1999. Materials selection in mechanical design. Second Edition. Butterworth Heinemann. England.

Barajas Morales, J.; León Gómez, C. 1984. Anatomía de maderas de México: Especies de una selva caducifolia. Instituto de Biología. Publicaciones especiales 1. Universidad Nacional Autónoma de México.

Bodig, J.; Jayne, B.A. 1993. Mechanics of Wood Composites. Reprinted edition, Kreiger Publishing Company. USA.

Bucur, V. 1988. Wood structural anisotropy estimated by acoustics invariants. *International Association of Wood Anatomists Bulletin*. 9(1):67-74.

Bucur, V. 1995. Acoustics of wood. CRC Press. USA.

Cheers, G. Editor. 2006. Edición en Español. Botánica. Guía ilustrada de plantas. KÖNEMANN. Alemania.

Cremer, L.; Heckel, M.; Ungar, E.E. 1973. Structure-bond Sound. Springer-Verlag. England.

Conceptsboisstructure. 2004. Sylvatestduo user manual. France.

Forest Products Laboratory. 1999. Wood handbook—Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. USA.

Guridi Gómez, L.I.; García López, A. 1997. Las maderas en los instrumentos musicales de cuerda de Paracho. Secretaría de Difusión cultural. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Guizar Nolazco, E.; Sanchez Velez, A. 1991. Guía para el reconocimiento de los principales árboles del Alto Balsas. Universidad Autónoma Chapingo. México.

Gutiérrez Carvajal, L.; Dorantes López, J. 2007. Especies forestales de uso tradicional del Estado de Veracruz. CONAFOR-CONACYT-UV 2003-2004. México.

Kollmann, F.P.; Côté, W.A. 1968. Principles of Wood Science and Technology. Volume I: Solid Wood. Springer-Verlag. Germany.

Lincoln, W.A. 1986. World Woods in Color. Linden Publishing. USA.

Müller, H.A. 1986. How violin makers choose wood and what this procedure means from a physical point of view. Paper presented at Catgut Acoustical Society International Symposium on musical Acoustics. USA.

Niembro Rocas, A. 1990. Árboles y arbustos útiles de México. Editorial LIMUSA. México.

Ono, T.; Norimoto, M. 1983. Study on Young's modulus and internal friction of wood in relation to the evaluation of wood for musical instruments. *Japan Journal of Applied Physics*. 22(4):611-614.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA.

Pennington, T.D.; Sarukhán, J. 1998. Segunda edición. Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. Ediciones Científicas Universitarias. UNAM. México.

Robles Fernández-Villegas, F.; Echenique-Manrique, R. 1983. Estructuras de Madera. Editorial LIMUSA. México.

Sandoz, J.L.; Benoit, Y.; Demay, L. 2000. Wood testing using Acousto-ultrasonic. In: Proceedings of the WCTE 2000 World Conference on Timber Engineering. Canada. pp:136-142.

Soler, M. 2001. Mil Maderas. Editorial UPV. España.

Sotomayor Castellanos, J.R. 1987. Calidad de la Madera para la Industria de la Construcción. Consideraciones Tecnológicas, Industriales y Comerciales. Cámara Nacional de la Industria de la Construcción. Morelia, Michoacán, México.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2002. Características Mecánicas de la Madera y su aplicación en la Industria de la Construcción. *Revista Ciencia Nicolaita*. UMSNH- (33):127-138.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2005. Características mecánicas y clasificación de 150 especies de maderas Mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. UMSNH. 1(1):3-22. México.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2008. Segunda edición. TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. FITECMA. UMSNH. Formato: 30 x 60 cm.

Spycher, M.; Schwarze, F.W.M.R.; Steiger, R. 2008. Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Science and Technology*. 42:325-342.

Tamarit Urias, J.C.; López Torres, J.L. 2007. Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México. Libro técnico No. 3. INIFAP-CIR Golfo Centro, Campo experimental San Martinito. Tlahuapan, Puebla, México.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Código	Nombre científico	Nombre común	Familia	División taxonómica
	Gir	nnospermas pinos duros y blando	is	·
GPI01	Pinus arizonica var. stormiae Martínez.	Pino	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
GPI02	Pinus ayacahuite var. veitchii Shaw.*	Pino	Pinaceae Haploxylon	Gimnospermas Pinos blandos
GPI03	Pinus cembroides Zucc.	Pino piñonero	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
GPI04	Pinus coulteri D. Don.	Pino de piña grande	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
GPI05	Pinus douglasiana Martínez.	Pino lacio amarillo	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
GPI06	Pinus durangensis f. quinquefoliata Martínez.	Pino real	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
GPI07	Pinus lawsonii Roezl.	Pino ortiguillo	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
GPI08	Pinus martinezii Larsen.	Pino coyote	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
GPI09	Pinus maximinoi Moore.	Pino	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
GPI10	Pinus michoacana var. cornuta Martínez.	Pino lacio	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
GPI11	Pinus montezumae Lamb.	Pino lacio	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
GPI12	Pinus oocarpa Schiede.	Pino trompillo	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
GPI13	Pinus patula Schl. et Cham.	Ocote colorado	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
GPI14	Pinus ponderosa Dougl.	Pino ponderosa	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
GPI15	Pinus pringlei Shaw.	Pino escobetillo	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
GPI16	Pinus pseudostrobus Lindl.	Pino michoacano	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
GPI17	Pinus quadrifolia Sudw.*	Pino piñonero	Pinaceae Haploxylon	Gimnospermas Pinos blandos
GPI18	Pinus teocote Schl. et Cham.	Pino colorado	Pinaceae Diploxylon	Gimnospermas Pinos duros
		Otras gimnospermas		
OGI01	Abies durangensis Martínez.	Oyamel	Pinaceae	Otras gimnospermas
OGI02	Abies religiosa var. emarginata Martínez.	Oyamel	Pinaceae	Otras gimnospermas
OGI03	Cupressus lindleyi Klotzsch.	Cedro blanco	Cupressaceae	Otras gimnospermas
OGI04	Juniperus flaccida Schl.	Táscate	Cupressaceae	Otras gimnospermas
OGI05	Picea abies (L.) Karst.	Picea	Pinacea	Otras gimnospermas
OGI06	Picea chihuahuana Martínez.	Pinabete	Pinaceae	Otras gimnospermas
OGI07	Podocarpus matudae Lundell.	Palmillo	Podocarpaceae	Otras gimnospermas
OGI08	Pseudotsuga macrolepis Flous.	Oyamel colorado	Pinaceae	Otras gimnospermas
OGI09	Taxodium nucronatum Ten.	Ahuehuete	Taxoidiaceae	Otras gimnospermas
OGI10	Thuja plicata D. Don.	Cedro rojo del oeste	Cupressaceae	Otras gimnospermas
* Pinos b	blandos			

	1110	C / 1'	1		1		C '1'		1 . / .	1 4	1 2 0	•	•
Anovo	(1/6)		nombro	ciontitico	nombro	comin	tom110	V ariino	hotonico	do	157 00	no0100	mavicanac
AIICAU	\mathbf{I}	. Courso.		CIEILIIICO.	поппле	comun.	Tamma	$v $ $\epsilon u $ $u $	DULAIIICU		1.72 68	いてしている	Incanas.
	(- , - , - ,	,				,		J 0					

Código	Nombre científico	Nombre común	Familia	División taxonómica
		Angiospermas encinos	rojos	
AER01	Quercus acutifolia Née.	Encino rojo	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
AER02	Quercus candicans Née.	Encino blanco	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
AER03	Quercus castanea Née.	Teposcohuite chino	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
AER04	Quercus conspersa Benth.	Encino escobillo	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
AER05	Quercus crassifolia Humb. et Bonpl.	Encino colorado	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
AER06	Quercus crispipilis Trel.	Chiquinib	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
AER07	Quercus deserticola Trel.	Encino	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
AER08	Quercus durifolia Seem.	Encino colorado	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
AER09	Quercus elliptica Née.	Encino	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
AER10	Quercus laurina Humb. Et Bonpl.	Encino	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
AER11	Quercus planipocula Trel.	Encino	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
AER12	Quercus scytophylla Liebm.	Encino Rosillo	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
AER13	Quercus sideroxyla Humb. et Bonpl.	Encino colorado	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
AER14	Quercus skinneri Benth.	Encino hojeador	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
AER15	Quercus tuberculata Liebm.	Encino prieto	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
AER16	Quercus uxoris McVaugh.	Encino capulincillo	Fagaceae Erythrobalanus	Angiospermas encinos rojos
		Angiospermas encinos l	plancos	
AEB01	Quercus excelsa Liebm.	Encino bornio	Fagaceae Leucobalanus	Angiospermas encinos blancos
AEB02	Quercus glabrescens L.	Encino roble	Fagaceae Leucobalanus	Angiospermas encinos blancos
AEB03	Quercus glaucoides Mart. et Gal.	Encino tocuz	Fagaceae Leucobalanus	Angiospermas encinos blancos
AEB04	Quercus laeta Liebm.	Encino	Fagaceae Leucobalanus	Angiospermas encinos blancos
AEB05	Quercus magnoliifolia Née.	Encino	Fagaceae Leucobalanus	Angiospermas encinos blancos
AEB06	Quercus obtusata Humb. et Bonpl.	Chilillo	Fagaceae Leucobalanus	Angiospermas encinos blancos
AEB07	Quercus peduncularis Née.	Encino sancón	Fagaceae Leucobalanus	Angiospermas encinos blancos
AEB08	Quercus resinosa Liebm.	Encino amarillo	Fagaceae Leucobalanus	Angiospermas encinos blancos
AEB09	Quercus rugosa Née.	Encino	Fagaceae Leucobalanus	Angiospermas encinos blancos

A /	$(\mathbf{n} \mid \mathbf{n})$	C / 1'	1		1		C '1'		1 . / .	1 .	1 60	•	•
Anovo (1/61		nomhro	CIANTITICO	nombro	comun	tom1110	V ornno	hotonico	d D	1577	00000100	mavicanac
AUCAUL				UIEIIIIIIUU.		CONTINUE	таннна	v yrnny	пллания		1 1/. 1		THEAR AHAS.
1110/10 (, _,	· courge	, 110111010	010111100,	110111010	<i>coman,</i>	Imillin	J Stapo	ootanieo		101	especies.	memeanas

Código	Nombre científico	Nombre común	Familia	División taxonómica
		Angiospermas de clima	templado	
ATE01	Acer negundo var. mexicanum (DC.) Steyerm.	Zarcillo	Aceraceae	Angiospermas de clima templado
ATE02	Alnus acuminata arguta (Schlecht.) Furlow.	Aile	Betulaceae	Angiospermas de clima templado
ATE03	Aralia pubescens DC.	Hormiguillo	Araliaceae	Angiospermas de clima templado
ATE04	Arbutus xalapensis H.B.K.	Madroño	Ericaceae	Angiospermas de clima templado
ATE05	Carpinus coroliniana Walt.	Mora	Betulaceae	Angiospermas de clima templado
ATE06	Celastrus pringlei Rose.	Cuero de vaca	Celastraceae	Angiospermas de clima templado
ATE07	Celtis caudata Planch.	Cuaquil	Ulmaceae	Angiospermas de clima templado
ATE08	Clethra mexicana DC.	Canelo, cucharo	Clethraceae	Angiospermas de clima templado
ATE09	Cornus disciflora Moc et Sessé ex DC.	Aceituno	Cornaceae	Angiospermas de clima templado
ATE10	Crataegus mexicana Moc. et Sessé ex DC.	Tejocote	Rosaceae	Angiospermas de clima templado
ATE11	Ficus benjamina L.	Ficus	Moraceae	Angiospermas de clima templado
ATE12	Fraxinus uhdei (Wenzing) Ling.	Fresno macho	Oleaceae	Angiospermas de clima templado
ATE13	Garrya laurifolia Hartw.	Aguacatillo	Garryaceae	Angiospermas de clima templado
ATE14	Ilex brandegeana Loesener.	Palo azul	Aquifoliaceae	Angiospermas de clima templado
ATE15	Juglans pyriformis Liebm.	Nogal cimarron	Juglandaceae	Angiospermas de clima templado
ATE16	Lyquidambar styraciflua L.	Liquidambar	Hamamelidaceae	Angiospermas de clima templado
ATE17	Macadamia ternifolia	Macadamia	Proteaceae	Angiospermas de clima templado
ATE18	Meliosma dentata (Liebm.) Urban.	Cuental	Sabiaceae	Angiospermas de clima templado
ATE19	Morus celtidifolia H.B.K.	Mora	Moraceae	Angiospermas de clima templado
ATE20	Platanus mexicana Moric.	Álamo blanco	Platanaceae	Angiospermas de clima templado
ATE21	Populus deltoides Bartr.	Alamillo	Salicaceae	Angiospermas de clima templado
ATE22	Populus tremuloides Michx.	Alamillo	Salicaceae	Angiospermas de clima templado
ATE23	Prunus capuli Cav.	Capulín	Rosaceae	Angiospermas de clima templado
ATE24	Styrax ramirezii Greenm.	Canelillo	Styracaceae	Angiospermas de clima templado
ATE25	Tilia mexicana Schlecht.	Sirimo	Tiliaceae	Angiospermas de clima templado
ATE26	Zinowiewia aff. concinna Lund.	Librillo	Celastraceae	Angiospermas de clima templado
ATE27	Zinowiewia concinna Lund.	Gloria	Celastraceae	Angiospermas de clima templado

Anexo ((3/6). Código	, nombre	científico,	nombre co	omún,	familia y	grupo	botánico	de 152	especies	mexical	nas.

Código	Nombre científico	Nombre común	Familia	División taxonómica	
Angiospermas de clima tropical					
ATR01	Acacia melanoxylon R. Br.	Acacia, mimosa	Fabaceae Mimosoideae	Angiospermas de clima tropical	
ATR02	Andira inermis (W. Wrigth) DC.	Cuilimbuca	Fabaceae Faboideae	Angiospermas de clima tropical	
ATR03	Aspidosperma megalocarpon Muell. Arg.	Pelmax	Apocinaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR04	Astronium graveolens Jacq.	Jobillo	Anacardiaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR05	Blepharidium mexicanum Standl.	Popiste	Rubiaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR06	Brosimum alicastrum Sw.	Ramón	Moraceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR07	Bucida buceras L.	Pucté	Combretaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR08	Bursera simaruba (L.) Sarg.	Copalillo, Chacáh	Burseraceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR09	Calophyllum brasiliense Cambess.	Barí	Guttiferae	Angiospermas de clima tropical	
ATR10	Cassia fistula L.	Lluvia de oro	Fabaceae Caesalpinoideae	Angiospermas de clima tropical	
ATR11	Cedrela mexicana Roem.	Cedro rojo	Meliaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR12	Chiranthodendron pentadactylon Larreategui.	Manita	Sterculiaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR13	Chloroleucon mangense (Jacq.) Britton & Rose.	Moralete	Fabaceae mimosoideae	Angiospermas de clima tropical	
ATR14	Cojoba arborea (L.) Britton & Rose.	Cuicuil	Fabaceae mimosoideae	Angiospermas de clima tropical	
ATR15	Cordia dodecandra A. DC.	Siricote	Boraginadeae	Angiospermas de clima tropical	
ATR16	Cordia megalantha S.F. Blake.	Xuchitl	Boraginaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR17	Dialium guianense Stand.	Guapaque	Fabaceae Caesalpinoideae	Angiospermas de clima tropical	
ATR18	Dalbergia paloescrito Rzedowski et Guridi.	Palo escrito	Fabaceae papilionoideae	Angiospermas de clima tropical	
ATR19	Ebanopsis ebano (Berl.) Britton & Rose.	Ebano de Nuevo León	Fabaceae mimosoideae	Angiospermas de clima tropical	
ATR20	Garrya longifolia Rose.	Palo amargo	Garryaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR21	Gilibertia arborea (L.) Marchal.	Zapotillo	Araliaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR22	Gliricidia sepium (Jacq.) Steud.	Mataratón	Fabeceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR23	Gmelina arborea L.	Melina	Berbenaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR24	Guarea excelsa H. B. K.	Chichi de perra	Meliaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR25	Guazuma ulmifolia Lamb.	Guácima	Sterculiaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR26	Guettarda seleriana Standl.	Popiste negro	Rubiaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR27	Inga hintonii Sandw.	Cuajiniquil de hoja chica	Fabaceae Mimosoideae	Angiospermas de clima tropical	
ATR28	Inga spuria Humb. et Bonpl. ex Willd.	Chacahuanté	Fabaceae Mimosoideae	Angiospermas de clima tropical	
ATR29	Jacaranda mimosaefolia D. Don.	Jacaranda	Bignoniaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR30	Licaria campechiana (Standl.) Kosterm.	Pimientillo	Lauraceae	Angiospermas de clima tropical	

Anexo (4/6). Código, nombre científico, nombre común, familia y grupo botánico de 152 especies mexicanas.

Código	Nombre científico	Nombre común	Familia	División taxonómica
Angiospermas de clima tropical				
ATR31	Licaria excelsa Kostern.	Zacocote	Lauraceae	Angiospermas de clima tropical
ATR32	Lonchocarpus castilloi Standl.	Machiche	Fabaceae Papilionoideae	Angiospermas de clima tropical
ATR33	Lucuma campechiana Kunth.	Kanisté	Sapotaceae	Angiospermas de clima tropical
ATR34	Luhea speciosa Willd.	Kascat	Tiliaceae	Angiospermas de clima tropical
ATR35	Lysiloma acapulcensis (Kunth) Benth.	Tepehuaje	Fabaceae Mimosoideae	Angiospermas de clima tropical
ATR36	Lysiloma bahamensis Benth.	Tzalám	Fabaceae ae Mimosoideae	Angiospermas de clima tropical
ATR37	Maclura tinctoria (L.) Don ex Steud.	Mora	Moraceae	Angiospermas de clima tropical
ATR38	Mangifera indica L.	Mango	Anacardiaceae	Angiospermas de clima tropical
ATR39	Manilkara zapota (L.) Royen.	Chicosapote	Sapotacea	Angiospermas de clima tropical
ATR40	Metopium brownei (Jacq.) Urban.	Chechén negro	Anacardiaceae	Angiospermas de clima tropical
ATR41	Nectandra globosa (Aubl.) Mez.	Aguacatillo negro	Lauraceae	Angiospermas de clima tropical
ATR42	Nectandra tabascensis Lund.	Laurel	Lauraceae	Angiospermas de clima tropical
ATR43	Persea americana Mill.	Aguacatillo blanco	Lauraceae	Angiospermas de clima tropical
ATR44	Phoebe effusa Meissn.	Aguacatillo	Lauraceae	Angiospermas de clima tropical
ATR45	Piscidia piscipula Sarg.	Jabín	Fabaceae Papilionoideae	Angiospermas de clima tropical
ATR46	Pithecellobium arboreum (L.) Urban.	Frijolillo	Fabaceae Mimosoideae	Angiospermas de clima tropical
ATR47	Platymiscium yucatanum Standl.	Granadillo	Fabaceae Papilionoideae	Angiospermas de clima tropical
ATR48	Pouteria aff. campechiana (Kunth) Baehni.	Mameicillo	Sapotaceae	Angiospermas de clima tropical
ATR49	Pouteria unilocularis (Donn. Smith) Baehni.	Zapotillo	Sapotaceae	Angiospermas de clima tropical
ATR50	Prosopis juliflora DC.	Mezquite	Fabaceae Mimosoideae	Angiospermas de clima tropical
ATR51	Protium copal (Schltdl. et Cham.) Engl.	Copal	Burseraceae	Angiospermas de clima tropical
ATR52	Pseudobombax ellipticum (Kunth) Dugand.	Amapola	Bombacaceae	Angiospermas de clima tropical
ATR53	Pseudolmedia oxyphyllaria Donn. Smith.	Mamba	Moraceae	Angiospermas de clima tropical
ATR54	Psychotria sp.	Popiste blanco	Rubiaceae	Angiospermas de clima tropical
ATR55	Schizolobium parahybum (Vell.) Blake.	Guanacaste	Fabaceae Caesalpinoideae	Angiospermas de clima tropical
ATR56	Sebastiania longicuspis Standl.	Chechén blanco	Euphorbiaceae	Angiospermas de clima tropical
ATR57	Sickingia salvadorensis Standl.	Chacahuanté	Rubiaceae	Angiospermas de clima tropical
ATR58	Sideroxylon meyeri Standl.	Zapotillo	Sapotaceae	Angiospermas de clima tropical
ATR59	Simaruba glauca DC.	Zapatero	Simarubaceae	Angiospermas de clima tropical
ATR60	Spathodea campanulata Beauv.	Tulipan africano	Bignoniaceae	Angiospermas de clima tropical

Anexo (5/6). Código, nombre científico, nombre común, familia y grupo botánico de 152 especies mexicanas.

Código	Nombre científico	Nombre común	Familia	División taxonómica	
	Angiospermas de clima tropical				
ATR61	Spondias mombin Lindl.	Jobo	Anacardiaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR62	Swartzia cubensis Standl.	Katalox	Leguminosae Papilionoideae	Angiospermas de clima tropical	
ATR63	Sweetia panamensis Benth.	Cencerro	Leguminosae Papilionoideae	Angiospermas de clima tropical	
ATR64	Swietenia macrophylla King.	Caoba	Meliaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR65	Switenia humillis Zucc.	Cobano	Meliaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR66	Tabebuia palmeri Rose.	Cañafistula	Bignoniaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR67	Tabebuia penthaphylla (L.) Hemsl.	Palo de rosa	Bignoniaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR68	Tabebuia rosea (Bertol) DC.	Maculís	Bignoniaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR69	Talisia olivaeformis (Kunth) Radlk.	Guaya	Sapindaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR70	Tectona grandis Linn. F.	Teca	Verbenaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR71	Vitex gaumeri Greenm.	Ya' axnik	Verbenaceae	Angiospermas de clima tropical	
ATR72	Zuelania guidonia Br. Et Met.	Trementino	Flacourtiaceae	Angiospermas de clima tropical	

$\mathbf{A} = \mathbf{A} = $			$f_{-} = \frac{1}{2} \frac{1}$. 1. 150
Anexo (h/h) Control	nombre científico	nombre comun	tamilia v grilno notania	ro de 157 especies mexicanas
$1 \operatorname{mexo}(0, 0)$. Courgo,			, iunniu y grupo ootunit	to de 152 especies mexicanas.

8. FRECUENCIA DE VIBRACIÓN DE ÁRBOLES Y SUS RELACIONES CON ALGUNAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA DE *CRYPTOMERIA JAPONICA* D. DON.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las características físicas de la madera de un árbol en pie previo a su derribo es útil para mejorar la selección de especie e individuo para su empleo industrial. Por ejemplo, la predicción del contenido de humedad de la madera en un árbol, puede optimizar el proceso de elaboración de pulpa de madera. Además, el conocimiento previo del contenido de humedad de un árbol reduce tiempo, problemas técnicos y costos en los métodos de secado de la madera.

Igualmente, la evaluación de las características de resistencia de la madera en su condición natural, puede ayudar a formular un juicio correcto sobre la calidad de un árbol, antes de su selección y transformación para un propósito industrial en específico.

Como corolario, una evaluación objetiva de la calidad de la madera de arbolado en pie es una herramienta útil para el manejo silvícola sustentable.

El estudio de la calidad del arbolado en pie implica técnicas de evaluación que protejan su integridad física, es decir, procedimientos de carácter no destructivo. El análisis del comportamiento de ondas mecánicas en un árbol, por ejemplo el ultrasonido y vibraciones mecánicas, y su relación con propiedades de la madera, han demostrado ser un enfoque de utilidad práctica en el estudio de la biomecánica del árbol.

Recientemente varios investigadores se han aplicado al estudio de las características de la madera de árboles y las relaciones estadísticas de los parámetros tecnológicos de la madera elaborada con ellos. Entre otros autores se puede citar a: Carter y col. (2005); Chuang y Wang (2001); Cown (2006); Grabianowski y col. (2006); Ikeda y col. (2000a, 2000b, 2000c, 2000d); Ishiguri y col. (2008); Kamaguchi y col. (2000, 2001); Nakada y col. (1998, 2003, 2006, 2007a, 2007b); Nanami y col. (1992a, 1992b, 1993); Pellerin y Ross (2002); Sobue (2006); Wang, S.Y. y col. (2005); Wang, X. y col. (2001, 2005, 2007).

Entre otras conclusiones referentes al tema, estos investigadores proponen que, a partir de la medición de parámetros del comportamiento de ondas mecánicas de carácter no destructivo medidos en el árbol, es posible predecir características físicas y de resistencia de la madera elaborada a partir del ejemplar estudiado. Esta proposición es la hipótesis de trabajo restringida a esta investigación.

Para verificar experimentalmente esta hipótesis, se desarrolló una estrategia de carácter no destructivo para medir la frecuencia ocasionada por un impacto lateral y elástico en un árbol. Como complemento a esta medición, se estimó el contenido de humedad de la madera en el árbol. En el mismo contexto, utilizando madera del mismo ejemplar, se elaboraron probetas

de pequeñas dimensiones y se realizaron pruebas de densidad, contenido de humedad, ultrasonido y flexión estática transversal.

Un objetivo complementario de esta investigación es encontrar valores representativos de las características estudiadas y las relaciones estadísticas entre ellas. Particularmente con árboles y madera de *Cryptomeria japonica* D. Don.

Trabajos recientes sobre el tema de investigación

Ondas de esfuerzo aplicadas en el estudio de árboles en pie

Las técnicas de ondas de esfuerzo en el estudio en árboles y su madera han sido aplicadas entre otros autores por: Nanami y col. (1992a ;1992b; 1993), Ikeda y col. (2000a, 2000b, 2000c, 2000d), Wang y col. (2001), Chuang y Wang (2001); Iki y col. (2006), Grabianowski y col. (2006) e Ishiguri y col. (2008).

Estas investigaciones hacen referencia principalmente al estudio de ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal del fuste del árbol. A partir de la velocidad de transmisión de la onda, ponderada ésta con la densidad de la madera, los estudios logran predecir características de rigidez de la madera. Las ondas de esfuerzo han sido también utilizadas para observar la influencia del manejo forestal en algunas particularidades tecnológicas de los árboles y sus productos derivados. En el mismo contexto, se han estudiado el efecto de la calidad de estación donde crece el árbol y la influencia de factores genéticos de la especie en relación a la variabilidad natural de las características tecnológicas de la madera.

Entre las principales conclusiones, se han encontrado buenas correlaciones estadísticas entre la velocidad de las ondas de esfuerzo y el módulo de elasticidad en la madera. Con el matiz de una importante variación según la posición a lo largo del tronco, donde las muestras son observadas. Los autores recomiendan para este tipo de estudios, efectuar un muestreo en diferentes posiciones del fuste del árbol.

Métodos de resonancia aplicados al estudio de árboles

Los métodos de resonancia aplicados en la estimación de propiedades físicas de la madera de individuos vivos, han mostrado fuertes correlaciones estadísticas con datos obtenidos con técnicas de ultrasonido y ondas de esfuerzo (Grabianowski y col., 2006; Lindstroöm y col., 2002). Estas técnicas han sido usadas para medir la rigidez aparente de varias especies forestales en la dirección longitudinal del arbolado.

Técnicas de ultrasonido utilizadas en el estudio de árboles

La calidad de la madera de árboles en pie ha sido estudiada con ultrasonido, entre otros autores por Carter y col. (2005) y Wang y col. (2007). Para el caso de árboles jóvenes y de crecimiento con diferentes tipos de métodos silvícolas, Lindstroöm y col. (2002) utilizaron ultrasonido para su evaluación. Una combinación de métodos dinámicos y de flexión estática fue utilizada para estimar correlaciones entre parámetros de árboles, trozas y madera serrada.

En contraste, Wang y col. (2005), han aplicado la misma estrategia pero estudiando la calidad de la madera y árboles con crecimientos naturales.

Pruebas estáticas y características de árboles

Vafai y Farshad (1979) y Lindstroöm y col. (2002) han aplicado pruebas de flexión estática en la determinación del módulo de elasticidad y otras propiedades físicas de la madera de árboles en pie. Estos investigadores estudiaron principalmente la dirección longitudinal del individuo. Por su parte, Xu y Walker (2004) estudiaron el gradiente en la rigidez aparente en árboles analizando probetas de grandes dimensiones recortadas de trozas extraídas en diferentes alturas del fuste del árbol.

Método de impacto lateral aplicado al estudio de árboles en pie

En Japón, Kamaguchi y col. (2000, 2001), Nakada y Tamura (2006) y Nakada (2007a) han desarrollado y aplicado recientemente el método de impacto lateral en un árbol, para predecir el contenido de humedad en la madera de duramen en el fuste del individuo en cuestión. Estos investigadores han estudiado principalmente árboles de *Cryptomeria japonica* D. Don. (Sugi ó cedro japonés). Sus resultados se concentran en la comparación entre el contenido de humedad del tronco del árbol y sus implicaciones en el mejoramiento genético de la especie.

Recientemente, Nakada (2007b) publicó los resultados del método de impacto lateral, relacionados con los posibles factores causales de la distribución de agua a lo largo de troncos vivientes de la especie *Cryptomeria japonica* D. Don.

En lo referente al estudio del contenido de humedad en la madera de árboles, Nakada y col. (1998), Nakada y col. (2003) y Nakada (2006) utilizando una técnica de fotografía con rayos X, publicaron la distribución de humedad en el plano leñoso de árboles de *Cryptomeria japonica* D. Don.

Métodos no destructivos y propiedades físicas

Otros resultados de investigaciones recientes sobre la utilización de métodos no destructivos de evaluación en árboles en pie han sido publicados por Leininger y col. (2001), Chaffey (2002), Wang, S.Y. y col. (2005), Wang, X. y col. (2005), Cown (2006) y Sobue (2006). Además, datos sobre las propiedades físicas y mecánicas de especies japonesas han sido publicadas por Nakai y Yamai (1982) y por la División de Utilización de la Madera, del Instituto de Investigaciones Forestales y de Productos Forestales de Japón (Forestry and Forest Products Research Institute, 1982).

Información sobre técnicas no destructivas y su aplicación al tema de estudio puede ser consultada igualmente entre otros autores en: Kawamoto y Williams (2002), Pellerin y Ross (2002), Bucur (2005) y Beall (2007).

A manera de síntesis de los trabajos revisados, se puede concluir que las técnicas de carácter no destructivo son útiles para evaluar propiedades físicas de los árboles y de su madera. La mayoría de los trabajos de investigación que han utilizando este tipo de métodos de
evaluación en el estudio de las características físico-mecánicas de árboles, se han orientado al estudio de ultrasonido y de ondas de esfuerzo.

Los objetivos de investigación han sido generalmente la búsqueda de relaciones de carácter estadístico entre velocidades de transmisión de ondas acústicas, de esfuerzo y/o de frecuencias de vibración en el árbol y sus relaciones con propiedades de rigidez y de calidad tecnológica de la madera derivada de los mismos individuos analizados.

En los trabajos contemporáneos relacionados con ultrasonido y ondas de esfuerzo en árboles en pie, los resultados han mostrado el potencial de estas técnicas para predecir con un buen grado de aproximación, algunas características de la madera, por ejemplo, el módulo de elasticidad. Para el caso de la técnica de impacto lateral, las investigaciones se han orientado principalmente a la estimación del contenido de humedad en el tronco del árbol y su aplicación para fines de selección genética.

Durante el análisis de los trabajos recientes sobre el tema de investigación, no se detectó información sobre un estudio integral que relacione la frecuencia ocasionada por un impacto lateral en el tronco de un árbol en pie y otros parámetros obtenidos por ultrasonido y pruebas normalizadas en probetas localizadas en diferentes alturas del fuste. Igualmente, parece interesante relacionar la frecuencia medida en un individuo viviente y las características físicas y mecánicas determinadas en probetas de pequeñas dimensiones del mismo árbol. Tomando en cuenta la argumentación anterior, la investigación plantea los siguientes los objetivos.

OBJETIVOS

1. Determinar la frecuencia de vibración del tronco de árboles de *Cryptomeria japonica* D. Don., realizando pruebas de impacto lateral.

2. Estimar el contenido de humedad en los árboles a partir de las pruebas de impacto lateral.

3. Determinar los perfiles de densidad y de contenido de humedad para diferentes alturas en el tronco de árboles de *Cryptomeria japonica* D. Don.

4. Relacionar estadísticamente la frecuencia de la vibración con parámetros derivados de las pruebas de impacto lateral, de densidad, contenido de humedad, ultrasonido y flexión estática. Para estos parámetros, especificar si se trata de valores para la madera de albura o de duramen.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estrategia experimental

La estrategia experimental consistió en tres etapas: pruebas de campo con árboles en pie, pruebas de laboratorio con probetas-barra y pruebas de laboratorio con probetas normalizadas. La figura 1 explica la estrategia experimental, la figura 2 esquematiza el origen de las probetas y su localización en el árbol y la figura 3 detalla las pruebas realizadas y los parámetros observados y resultantes.

La primera etapa consistió en la selección de 124 árboles de la especie *Cryptomeria japonica* D. Don. (Sugi ó cedro japonés), de una plantación en la estación experimental Chiyoda, del Instituto de Investigaciones Forestales y de Productos Forestales, cerca de la ciudad de Chiyoda, en la Prefectura de Ibaraki, Japón.

En cada uno de estos 124 árboles se realizaron pruebas preliminares de un impacto lateral. Cada prueba se aplicó a una altura de 1.2 m a partir de la base del tronco. A partir de estos resultados preliminares y con el objeto de estudiar posteriormente árboles con un amplio rango de valores en el contenido de humedad, se seleccionó una muestra final de 10 árboles para el estudio. Por su morfología y por información del personal técnico de la estación experimental, los árboles fueron seleccionados de dos clones genéticamente diferentes, información que no se pudo documentar.

Posteriormente, en cada uno de estos 10 árboles se realizaron 5 pruebas de impacto lateral en 5 diferentes alturas a partir de la base del tronco, totalizando de esta manera 50 ensayos en árboles.

Una vez concluido el estudio de los árboles seleccionados, se procedió a su derribo y al recorte de 4 segmentos y de 5 discos para la elaboración de probetas en las etapas posteriores de la investigación. En el sitio de corte y para evitar la perdida de humedad, el material se cubrió con material plástico y se transportó inmediatamente a las instalaciones del Instituto en la ciudad de Tsukuba, situada también en la Prefectura de Ibaraki. De esta forma se terminó la primera parte de la estrategia de investigación.

La segunda etapa consistió en realizar pruebas de ultrasonido en probetas-barra y pruebas de perfil de densidad y de contenido de humedad en probetas pequeñas. Estas probetas fueron diseñadas especialmente para la investigación.

Las probetas-barra fueron confeccionadas a partir de cinco discos recortados transversalmente de cuatro segmentos del tronco, de cada uno de los 10 árboles seleccionados. Sus dimensiones fueron 50 x 50 mm² en las direcciones tangencial y longitudinal. Las probetas estuvieron orientadas en la dirección radial en el plano leñoso. Cada uno de los discos fue recortado en alturas de 0.5, 1.0, 1.2, 1.5 y 2.0 m a partir de la base del tronco. En total, se realizaron 50 pruebas de ultrasonido en probetas-barra.



Figura 1. Estrategia experimental.



Figura 2. Esquemas sin escala del origen de las probetas y su localización en el árbol.



Figura 3. Pruebas, parámetros observados y resultantes.

Las pruebas de perfil de densidad y perfil de contenido de humedad se realizaron en un promedio de 15 probetas de pequeñas dimensiones de 50 x 10 x 50 mm³, en las direcciones tangencial, longitudinal y radial, recortadas siguiendo la dirección radial en cada una de las 5 probetas-barra de cada uno de los 10 árboles. En total, se realizaron aproximadamente 750 pruebas de densidad y 750 pruebas de contenido de humedad para formar los perfiles en 5 alturas de cada uno de los 10 árboles estudiados. De esta manera se concluyó la segunda parte de la estrategia experimental

La tercera etapa consistió en realizar pruebas de ultrasonido en 10 probetas normalizadas con dimensiones de 20 x 20 x 320 mm³ en las direcciones radial, tangencial y longitudinal. Las probetas fueron recortadas de cada uno de los 4 segmentos del tronco de los 10 árboles seleccionados. De cada grupo de 10 probetas normalizadas, 6 de ellas fueron elaboradas únicamente con madera de duramen y 4 con madera de albura. En total, se efectuaron 400 pruebas de ultrasonido en la dirección longitudinal de las probetas, dirección que coincidió con la dirección longitudinal del plano leñoso en el árbol.

Como complemento a esta etapa, se realizaron pruebas normalizadas de flexión estática en las mismas probetas utilizadas para las pruebas no destructivas de ultrasonido. En total se efectuaron 400 pruebas de flexión transversal.

Las probetas normalizadas fueron acondicionadas en una cámara de deshumidificación durante 60 días, con una humedad relativa de 65% y a una temperatura de 20°C. El contenido de humedad de estas probetas fue estimado de manera paralela con segmentos recortados en las extremidades de las probetas normalizadas. El contenido de humedad de las probetas utilizadas en esta etapa al momento de las pruebas fue de 15.4%. De esta manera se terminó la tercera etapa de la estrategia experimental.

Pruebas de impacto lateral

Las pruebas de impacto lateral adaptaron el protocolo utilizado por Kamaguchi y col., (2000, 2001); Nakada (2006); Nakada y Tamura (2006); y Nakada (2007a). El protocolo fue el siguiente:

En cada árbol seleccionado por su vitalidad aparente, se midió el diámetro (D) a la altura del impacto (h). Posteriormente, se aplicó un impacto elástico sobre la superficie del árbol para poner en resonancia el plano horizontal del fuste. La vibración del plano transversal se capturó con un acelerómetro posicionado en el mismo plano de impacto. La frecuencia fundamental de resonancia (F) se calculó con un analizador portátil de frecuencias que aplicó el análisis de la trasformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés), de tecnología ADTEC (ADTEC System Science Co., Ltd., 2007). En la etapa preliminar se aplicó un impacto a la altura de 1.2 m, a partir de la base del fuste del árbol. En las pruebas de impacto finales se aplicaron 5 impactos en alturas de 0.5, 1.0, 1.2, 1.5 y 2.0 m, en los 10 árboles seleccionados para pruebas posteriores.

A partir de la frecuencia de vibración ocasionada por el impacto y del diámetro del árbol correspondiente a la altura del impacto, parámetros medidos en cada prueba, el contenido de humedad fue calculado con la fórmula (Kamaguchi y col., 2000):

C.H.(i) = K
$$\frac{1}{(D \times F)^2} - 100$$
 (1)

Donde:

C.H. = Contenido de humedad K = Constante D = Constante F = Frecuencia medida

Pruebas de ultrasonido.

Las pruebas no destructivas de ultrasonido en las probetas-barra y en las probetas normalizadas adaptaron la metodología de Sotomayor Castellanos y col. (2005 y 2007). En cada una de las probetas se midió el tiempo de transmisión utilizando la tecnología PUNDIT[®] (C.N.S. Electronics, s/f). Para el caso de las probetas-barra, la velocidad se calculó en la dirección radial (V_R). En las probetas normalizadas, se calculó la velocidad en la dirección longitudinal (V_L). A partir de las velocidades y de las densidades (ρ_H) correspondientes a cada probeta, se calculó el módulo de elasticidad, el cual fue calculado con la formula:

$$E_{R,L} = V_{R,L}^2 \rho_H$$
⁽²⁾

Donde: E = Módulo de elasticidad V = Velocidad del ultrasonido $\rho_H = Densidad de la madera$

Pruebas de densidad y de contenido de humedad.

Las pruebas de densidad consistieron en calcular la densidad a partir del peso y del volumen al momento del ensayo en cada probeta recortada de las barras transversales (ver figura 10) de las pruebas de ultrasonido radial. Igualmente, se calculó el contenido de humedad de la madera (C.H.) utilizando los pesos de las probetas en condición de ensayo y en condición anhidra.

Para el caso de las probetas-barra la densidad (ρ_H) fue calculada en condiciones de humedad natural y sirvió para el cálculo del módulo de elasticidad radial (E_R).

Para el caso de las probetas de pequeñas dimensiones y normalizadas, se diferenció la madera de albura y de duramen. De esta forma se pudieron calcular posteriormente los valores para

la madera de albura y duramen combinados (a+d), así como valores para madera de albura (a) y de duramen (d).

Con los valores de las probetas de pequeñas dimensiones se describió el perfil de densidad y de contenido de humedad correspondientes. Para el caso de las probetas normalizadas, la densidad se utilizó en el cálculo del módulo de elasticidad longitudinal (E_L).

Pruebas de flexión estática

Las pruebas de flexión estática siguieron las recomendaciones de las Normas ISO 3129-1975 (E) e ISO 3349-1975 (International Organization for Standardization, 1975a y 1975b) y adaptaron el protocolo utilizado por Sotomayor Castellanos y col. (2005).

Para cada una de las probetas, se midió la pendiente en el dominio elástico de la relación carga-deformación y la máxima fuerza necesaria para la ruptura en flexión. Los ensayos se efectuaron en una máquina universal de pruebas mecánicas Instron 5560 (Instron Materials Testing Instruments, 1994).

La fórmula simplificada que se aplicó para el cálculo del módulo de elasticidad estático en el dominio elástico de la relación carga-deformación fue (Bodig y Jayne, 1982):

$$MOE = \frac{P L_{fle}^{3}}{48 \, \text{y I}} \tag{3}$$

Donde:

MOE = Módulo de elasticidad

P = Carga

L = Distancia entre apoyos

y = deflexión

I = Módulo de inecia de la sección transversal de la probeta

Y el módulo de ruptura se calculó con la ayuda de la fórmula (Bodig y Jayne, 19982):

$$MOR = \frac{3}{2} \frac{P_{rup} L_{fle}}{b_{fle} h_{fle}^2}$$
(4)

Donde:

MOR = Módulo de ruptura

P = Carga a la ruptura

L = Distancia entre apoyos

b = Base de la probeta

h = Altura de la probeta

RESULTADOS Y ANÁLISIS

La tabla 1 presenta los resultados de las pruebas de impacto lateral, ultrasonido radial y perfiles de densidad y de contenido de humedad. La tabla 2 relaciona los resultados de las pruebas de ultrasonido longitudinal y de flexión estática transversal. La tabla 3 enlista los resultados de las pruebas de perfil de densidad. La tabla 4 explica los resultados de las pruebas de perfil de

contenido de humedad. Las tablas 5 y 6 presentan los coeficientes de correlación (R^2) entre los parámetros estudiados.

Frecuencia de vibración del tronco y contenido de humedad en los árboles

Los valores de la frecuencia aumentaron proporcionalmente a la altura del árbol e inversamente al diámetro correspondiente a la altura de impacto (R^2 para F = f(D): 0.88 para 95% de confiabilidad). Para cada altura de impacto, la frecuencia evaluada correspondió en buena medida con el contenido de humedad C.H.(i) estimado con la fórmula (1) y con los valores de C.H.(a+b), C.H.(a) y C.H.(d) determinados con pequeñas probetas extraídas en las mismas alturas de impacto (ver tabla 5). Resultados que confirman las conclusiones de Kagamuchi y col. (2000).

De acuerdo a los resultados presentados en las tablas 1 y 5, el método de impacto lateral que estima el contenido de humedad en un árbol a partir de la frecuencia y del diámetro, puede predecir con cierta precisión, el contenido de humedad en la madera del mismo individuo.

Además, el valor promedio del contenido de humedad para el grupo de árboles 1 a 5 fue superior al contenido de humedad promedio del grupo 6 a 10, lo que permite diferenciar a los individuos observados para fines posteriores de estudio.

Los valores obtenidos muestran dos grupos de árboles (ver figura 4). Un primer conjunto correspondiente a los árboles numerados del 1 al 5 y un segundo grupo del 6 al 10. En efecto, durante la selección en la estación experimental de los ejemplares para pruebas posteriores, se observó que la morfología de los árboles numerados del 1 al 5 era diferente a la de los árboles numerados del 6 al 10.

Llos parámetros frecuencia y contenido de humedad determinados, permiten sugerir una diferenciación entre los árboles estudiados. Esta proposición se apoya en la sugerencia de Nakada y Tamura (2006) sobre la aplicación del método de impacto lateral para la selección genética de arbolado. Este resultado puede ser corroborado con los fuertes coeficientes de correlación estadística R² entre la frecuencia medida y los valores del contenido de humedad estimados C.H.(i) y medidos C.H.(a+d), C.H.(a) y C.H.(d) (ver tabla 5).



Figura 4. Correspondencias entre la frecuencia y: a) C.H.(i); b) C.H.(a+d).

Perfil de densidad

Los gráficos de la tabla 3, presentan los valores de la densidad calculada en probetas pequeñas y distribuidas a partir de la médula (distancia de la médula igual a cero) en la dirección radial en el plano transversal de los 5 discos recortados en diferentes alturas en los árboles. Los valores en cada uno de los extremos de la distancia de la médula representan en promedio 3 mediciones para probetas conteniendo solamente madera de albura. Los valores al interior de este intervalo en las abscisas corresponden a probetas con madera de duramen. Entre estos dos tipos de madera, se midieron valores conteniendo madera de albura y duramen y que representan una zona de transición entre estos dos tipos de tejidos (ver figura 2).

Los perfiles de densidad para las 5 alturas de impacto agruparon a los árboles en dos grupos. El grupo de árboles 1 a 5 mostró perfiles en forma de <u>V</u> inversa (ver tabla 3 (1/1). Los valores del contenido de humedad de la madera de albura cerca del exterior del tronco fueron los más bajos y fueron ascendiendo para la madera de duramen. En contraste, los árboles 6 a 10 mostraron perfiles variando de manera consistente al interior de rangos que van de 0.28 a 0.44 gr/cm^3 (ver tabla 3 (2/2). Ambas formas de perfil no permiten distinguir entre valores para la madera de albura o de duramen. Este resultado permite insinuar que el conjunto de árboles se puede separar en dos subgrupos diferenciándoles por esta característica física.

Prueba:		In	npacto late	ral	Ultra	asonido ra	adial	Per	fil de densi	dad	Perfil de contenido de humedad			
Probeta:		Árbol				Barra			Pequeña		Pequeña			
Parámetro:		D	F	C.H.(i)	$\rho_{\rm H}$	V_R	E _R	ρ₀(a+d)	ρ ₀ (a)	ρ ₀ (d)	C.H.(a+d)	C.H.(a)	C.H.(d)	
Árbol	h (m)	m	Hz	%	gr/cm ³	m/s	GPa	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%	%	
	2.0	0.216	1100	240	0.888	1796	2.87	0.282	0.260	0.304	215	246	216	
	1.5	0.229	1100	204	0.901	1724	2.68	0.293	0.273	0.314	207	223	215	
1	1.2	0.236	1150	163	0.918	1712	2.69	0.316	0.291	0.336	192	209	201	
	1.0	0.240	1100	176	0.933	1844	3.18	0.312	0.279	0.334	203	230	205	
	0.5	0.248	950	247	0.890	1669	2.48	0.289	0.268	0.304	206	230	214	
Media an	ritmética	0.234	1080	206	0.906	1749	2.86	0.298	0.274	0.318	205	228	210	
	2.0	0.191	1300	213	0.970	1932	3.62	0.306	0.313	0.309	213	218	241	
	1.5	0.199	1300	189	0.990	1921	3.65	0.308	0.275	0.348	218	234	215	
2	1.2	0.210	1250	180	0.997	2012	4.04	0.321	0.294	0.353	207	226	210	
	1.0	0.205	1250	193	0.993	2026	4.08	0.315	0.297	0.338	211	223	220	
	0.5	0.210	1150	231	0.993	1827	3.31	0.297	0.266	0.328	230	234	235	
Media aritmética		0.203	1250	201	0.989	1944	3.81	0.309	0.289	0.335	216	227	224	
	2.0	0.197	1300	193	1.003	1999	4.01	0.320	0.296	0.344	214	229	221	
	1.5	0.216	1250	164	1.015	1974	3.95	0.338	0.293	0.370	199	216	196	
3	1.2	0.216	1200	186	1.006	1967	3.89	0.339	0.308	0.363	194	220	200	
	1.0	0.216	1150	211	1.010	2048	4.24	0.339	0.328	0.343	201	214	211	
	0.5	0.226	1100	212	1.007	2015	4.09	0.320	0.294	0.341	213	239	220	
Media an	ritmética	0.214	1200	193	0.101	2001	4.04	0.331	0.304	0.352	204	224	210	
	2.0	0.224	1100	217	0.942	1592	2.39	0.285	0.270	0.301	231	264	236	
	1.5	0.232	1000	257	0.954	1627	2.53	0.284	0.259	0.311	235	263	239	
4	1.2	0.236	1000	248	0.978	1699	2.82	0.316	0.296	0.334	208	228	220	
	1.0	0.242	1000	230	0.961	1713	2.82	0.293	0.271	0.315	227	247	237	
	0.5	0.251	900	277	0.956	1688	2.72	0.291	0.266	0.306	226	263	234	
Media an	ritmética	0.237	1000	246	0.958	1664	2.66	0.294	0.272	0.313	225	253	233	
	2.0	0.220	1100	231	0.958	1791	3.07	0.284	0.265	0.302	237	261	241	
	1.5	0.236	1050	216	0.986	1747	3.01	0.311	0.272	0.349	220	256	202	
5	1.2	0.236	1050	216	0.986	1876	3.47	0.298	0.266	0.322	230	250	228	
	1.0	0.236	1000	248	0.975	1865	3.39	0.293	0.256	0.324	233	265	225	
	0.5	0.248	900	287	0.981	1825	3.27	0.286	0.261	0.309	242	251	251	
Media an	ritmética	0.235	1020	240	0.977	1821	3.24	0.294	0.264	0.321	232	257	229	

Tabla 1 (1/2). Resultados de las pruebas de impacto lateral, ultrasonido radial y perfiles de densidad y de contenido de humedad. Árbol 1 a 5.

Prueba:		Impacto lateral			Ultrasonido radial			Per	fil de densi	dad	Perfil de contenido de humedad			
Probeta:		Árbol				Barra			Pequeña		Pequeña			
Parámetro:		D	F	C.H.(i)	$\rho_{\rm H}$	V _R	E _R	ρ₀(a+d)	ρ ₀ (a)	ρ ₀ (d)	C.H.(a+d)	C.H.(a)	C.H.(d)	
Árbol	h (m)	m	Hz	%	gr/cm ³	m/s	GPa	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%	%	
	2.0	0.169	1900	88	0.710	2155	3.30	0.344	0.349	0.344	106	180	73	
	1.5	0.166	1750	130	0.579	2181	2.75	0.364	0.370	0.367	99	190	75	
6	1.2	0.183	1750	88	0.738	2227	3.66	0.366	0.339	0.382	100	157	75	
	1.0	0.188	1700	89	0.765	2125	3.46	0.379	0.373	0.384	101	167	74	
	0.5	0.191	1700	83	0.742	2249	3.75	0.365	0.348	0.372	101	202	80	
Media ar	itmética	0.179	1760	96	0.707	2187	3.38	0.364	0.356	0.370	101	179	75	
	2.0	0.181	1550	144	0.825	2063	3.51	0.347	0.328	0.360	144	179	131	
	1.5	0.186	1550	132	0.755	2031	3.12	0.348	0.331	0.358	120	195	110	
7	1.2	0.194	1500	128	0.822	2027	3.38	0.370	0.350	0.374	124	160	112	
	1.0	0.202	1500	110	0.765	2014	3.11	0.360	0.365	0.361	128	183	121	
	0.5	0.216	1450	96	0.956	2108	4.25	0.381	0.347	0.396	151	182	153	
Media ar	itmética	0.196	1510	122	0.825	2049	3.47	0.361	0.344	0.370	133	180	125	
	2.0	0.170	1700	130	0.889	2098	3.91	0.378	0.383	0.373	135	151	127	
	1.5	0.168	1700	136	0.924	1994	3.68	0.377	0.387	0.377	143	180	136	
8	1.2	0.171	1700	129	0.851	2081	3.69	0.382	0.404	0.383	123	162	110	
	1.0	0.175	1750	106	0.820	2095	3.60	0.367	0.357	0.376	122	147	109	
	0.5	0.187	1750	81	0.787	2186	3.76	0.377	0.342	0.394	110	180	89	
Media ar	itmética	0.174	1720	116	0.854	2091	3.73	0.376	0.375	0.381	127	164	114	
	2.0	0.159	1900	111	0.842	2224	4.17	0.387	0.406	0.373	119	157	108	
	1.5	0.158	1900	115	0.737	2150	3.41	0.380	0.387	0.382	94	171	77	
9	1.2	0.166	1950	85	0.746	2229	3.70	0.386	0.386	0.384	95	168	74	
	1.0	0.173	1900	78	0.757	2232	3.77	0.383	0.392	0.384	93	172	75	
	0.5	0.185	1800	75	0.792	2190	3.80	0.363	0.351	0.370	115	194	104	
Media ar	itmética	0.168	1890	93	0.775	2205	3.51	0.380	0.384	0.379	103	172	88	
	2.0	0.169	1650	149	0.737	1755	2.27	0.372	0.364	0.366	94	164	71	
	1.5	0.180	1650	119	0.721	1919	2.65	0.353	0.362	0.350	105	163	82	
10	1.2	0.185	1750	85	0.786	2236	3.93	0.381	0.380	0.384	102	162	86	
	1.0	0.185	1750	85	0.699	2486	4.32	0.335	0.336	0.335	106	157	91	
	0.5	0.194	1750	67	0.784	2367	4.40	0.366	0.376	0.366	111	183	97	
Media ar	itmética	0.183	1710	101	0.745	2153	3.77	0.361	0.364	0.360	104	166	85	

Tabla 1 (2/2). Resultados de las pruebas de impacto lateral, ultrasonido radial y perfiles de densidad y de contenido de humedad. Árbol 6 a 10.

Prueba:	Ľ	Densidad		Ultrasonido longitudinal						Flexión estática transversal						
Probeta: N		No	Normalizada		Normalizada		Norr	nalizac	la	No	Normalizada			rmalizada		
Parámetro:		$\rho_{\rm H}(a+d)$	ρ _H (a)	$\rho_{\rm H}(d)$	$V_L(a+d)$	V _L (a)	$V_L(d)$	$E_L(a+d)$	E _L (a)	E _L (d)	MOR(a+d)	MOR(a)	MOR(d)	MOE(a+d)	MOE(a)	MOE(d)
Árbol	h (m)	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	m/s	m/s	m/s	GPa	GPa	GPa	MPa	MPa	MPa	GPa	GPa	GPa
	2.0	0.347	0.335	0.366	4874	5208	4373	8.26	9.10	7.01	50.94	50.64	51.37	4.38	4.86	3.68
	1.5	0.345	0.322	0.379	5022	5351	4529	8.66	9.22	7.82	49.59	49.14	50.25	4.48	4.85	3.94
1	1.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.0	0.340	0.318	0.373	5205	5609	4598	9.15	9.99	7.89	49.18	48.26	50.56	4.65	5.15	3.90
	0.5	0.340	0.319	0.371	5307	5591	4881	9.51	9.97	8.81	48.92	48.81	49.09	4.55	4.93	3.99
Media aritm	nética	0.343	0.324	0.372	5102	5440	4595	8.90	9.57	7.88	49.66	49.21	50.32	4.52	4.95	3.88
	2.0	0.350	0.339	0.366	5365	5733	4812	10.10	11.20	8.46	50.94	53.63	46.89	5.01	5.68	4.00
	1.5	0.368	0.357	0.386	5115	5429	4645	9.67	10.57	8.33	55.04	55.07	54.98	4.71	5.30	3.83
2	1.2	-	-	-	-	-	-	-	1	I	-	-	-	-	-	-
	1.0	0.352	0.335	0.378	5061	5337	4647	9.06	9.65	8.18	53.61	52.53	55.23	4.82	5.19	4.26
	0.5	0.363	0.344	0.392	4719	5149	4075	8.09	9.14	6.51	52.34	52.26	52.46	4.44	4.91	3.73
Media aritmética		0.358	0.344	0.381	5065	5412	4545	9.23	10.14	7.87	52.98	53.37	52.39	4.75	5.27	3.96
	2.0	0.361	0.337	0.396	5177	5893	4101	9.71	11.71	6.71	53.19	52.58	54.11	4.76	5.67	3.4
	1.5	0.405	0.379	0.459	5048	5449	4246	9.23	11.25	6.21	59.04	59.59	57.92	5.05	5.63	3.87
3	1.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.0	0.396	0.375	0.427	4949	5286	4443	9.60	10.41	8.39	56.62	55.96	57.61	4.80	5.37	3.94
	0.5	0.368	0.346	0.399	4784	5032	4411	8.38	8.79	7.77	50.28	49.83	50.97	4.32	4.68	3.78
Media aritm	nética	0.383	0.359	0.420	4990	5415	4300	9.23	10.54	7.27	54.78	54.49	55.15	4.73	5.34	3.75
	2.0	0.335	0.320	0.358	5481	5850	4927	10.04	10.94	8.70	49.77	51.77	46.77	4.88	5.49	3.96
	1.5	0.328	0.319	0.343	5447	5752	5064	10.52	8.80	9.62	47.74	49.05	45.78	4.93	5.31	4.37
4	1.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.0	0.342	0.321	0.374	5312	5575	4919	9.62	9.98	9.08	51.20	49.98	53.02	5.00	5.22	4.67
	0.5	0.334	0.329	0.340	5448	5482	4897	9.23	9.92	8.18	50.08	52.15	46.96	4.83	5.22	4.23
Media aritm	nética	0.335	0.322	0.354	5422	5665	4952	9.85	9.91	8.90	49.70	50.74	48.13	4.91	5.31	4.31
	2.0	0.338	0.331	0.347	5560	5756	5266	10.42	10.94	9.64	49.96	51.91	47.04	4.99	5.30	4.51
	1.5	0.345	0.344	0.346	5291	5414	5160	9.60	9.99	9.03	49.37	53.33	43.43	4.94	5.21	4.54
5	1.2	-	-	-	-	-	-	-	1	I	-	-	-	-	-	-
	1.0	0.335	0.320	0.356	5415	5548	5215	9.74	9.78	9.69	50.63	49.23	52.74	5.00	5.04	4.94
	0.5	0.330	0.312	0.357	5130	5338	4817	8.64	8.90	8.26	47.64	46.09	49.96	4.47	4.61	4.28
Media aritm	nética	0.337	0.327	0.352	5349	5514	5115	9.60	9.90	9.16	49.40	50.14	48.29	4.85	5.04	4.57
Nota: (a+d): v	fota: (a+d): valores de 10 probetas combinadas de albura y duramen; (a): valores de 6 probetas de albura; (d): valores de 4 probetas de duramen.									de 4 probe	etas de duram					

Tabla 2 (1/2). Resultados de las pruebas de ultrasonido longitudinal y de flexión estática transversal. Árbol 1 a 5.

Prueba:	Ľ	Densidad		Ultrasonido longitudinal						Flexión estática transversal						
Probeta: Norm		rmalizac	la	Nori	nalizac	la	Norr	nalizac	la	Normalizada			No	rmalizada		
Parámetro:		$\rho_{\rm H}(a+d)$	ρ _H (a)	$\rho_{\rm H}(d)$	$V_L(a+d)$	V _L (a)	$V_L(d)$	$E_L(a+d)$	E _L (a)	E _L (d)	MOR(a+d)	MOR(a)	MOR(d)	MOE(a+d)	MOE(a)	MOE(d)
Árbol	h (m)	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	m/s	m/s	m/s	GPa	GPa	GPa	MPa	MPa	MPa	GPa	GPa	GPa
	2.0	0.427	0.423	0.434	4874	5497	3939	10.36	12.77	6.74	64.86	70.80	55.95	5.20	6.44	3.33
	1.5	0.436	0.428	0.449	4662	5326	3666	9.70	12.14	6.04	62.09	72.10	47.09	5.15	6.50	3.13
6	1.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.0	0.431	0.425	0.441	4667	5301	3717	9.60	11.94	6.09	65.32	71.06	56.71	5.04	6.39	3.01
	0.5	0.401	0.399	0.405	4324	4993	3321	7.76	9.98	4.47	56.73	61.07	50.22	4.21	5.34	2.52
Media aritm	nética	0.424	0.419	0.432	4632	5279	3661	9.36	11.71	5.84	62.25	68.76	52.49	4.90	6.17	3.00
	2.0	0.431	0.415	0.455	5191	5525	4689	11.65	12.66	10.14	64.34	63.74	65.24	5.70	6.22	4.91
	1.5	0.419	0.409	0.434	4899	5448	4076	10.19	12.16	7.25	63.12	66.77	57.65	5.29	6.32	3.76
7	1.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.0	0.429	0.415	0.450	4808	5424	3885	10.03	12.20	6.79	62.11	65.37	57.21	5.17	6.23	3.58
	0.5	0.401	0.378	0.434	4326	4788	3632	7.52	8.70	5.74	50.46	54.10	45.02	3.99	4.65	3.00
Media aritmética		0.420	0.404	0.443	4806	5296	4071	9.85	11.43	7.48	60.01	62.50	56.28	5.04	5.86	3.81
	2.0	0.454	0.467	0.435	4763	5444	3742	10.74	13.84	6.08	62.62	71.55	49.22	5.08	6.50	2.95
	1.5	0.427	0.432	0.419	4834	5434	3934	10.28	12.81	6.48	66.00	71.92	57.11	5.09	6.40	3.14
8	1.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.0	0.436	0.431	0.442	4659	5278	3730	9.68	12.02	6.17	63.11	69.78	53.11	4.80	6.05	2.93
	0.5	0.399	0.398	0.400	4279	4840	3438	7.51	9.34	4.76	57.43	62.22	50.24	4.07	5.02	2.65
Media aritm	nética	0.429	0.432	0.424	4634	5249	3711	9.55	12.00	5.87	62.29	68.87	52.42	4.76	5.99	2.92
	2.0	0.445	0.443	0.447	4973	5493	4192	11.18	13.38	7.88	60.85	65.66	53.63	5.24	6.07	3.98
	1.5	0.431	0.435	0.424	4836	5347	4069	10.30	12.48	7.03	61.12	62.59	58.91	5.23	6.24	3.71
9	1.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.0	0.431	0.419	0.448	4750	5145	4156	9.82	11.11	7.87	55.85	60.00	49.64	4.85	5.42	3.98
	0.5	0.439	0.418	0.481	4268	4773	3257	7.24	9.52	3.83	54.78	60.56	43.23	4.24	5.02	2.68
Media aritm	nética	0.437	0.429	0.450	4707	5190	3919	9.64	11.62	6.65	58.15	62.20	51.35	4.89	5.69	3.59
	2.0	0.425	0.423	0.427	4637	5132	3894	9.28	11.14	6.49	63.60	67.71	57.44	4.81	5.79	3.35
	1.5	0.419	0.422	0.414	4706	5218	3938	9.56	11.48	6.43	59.08	66.24	48.35	5.01	5.99	3.54
10	1.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.0	0.428	0.423	0.435	4478	5030	3650	8.74	10.73	5.76	54.53	60.72	45.25	4.42	5.33	3.07
	0.5	0.425	0.418	0.435	4220	4810	3334	7.77	9.74	4.81	56.08	62.98	45.73	4.01	5.01	2.51
Media aritm	nética	0.424	0.422	0.428	4510	5048	3704	8.84	10.77	5.87	58.32	64.41	49.19	4.56	5.53	3.12
Nota: (a+d): v	lota: (a+d): valores de 10 probetas combinadas de albura y duramen; (a): valores de 6 probetas de albura; (d): valores de 4 probetas de duramen.															

Tabla 2 (2/2). Resultados de las pruebas de ultrasonido longitudinal y de flexión estática transversal. Árbol 1 a 5.



Tabla 3 (1/2). Resultados de las pruebas de perfil de densidad. Árbol 1 a 5.

Perfil de contenido de humedad

De manera análoga a los resultados del perfil de densidad, el conjunto de árboles estudiados se diferenció por dos formas en su perfil de contenido de humedad. Los árboles 1 a 5 presentaron perfiles con forma de <u>W</u> con los valores mínimos correspondiente a las probetas localizadas en la zona de transición, entre la madera de albura y de duramen (ver tabla 4 (1/2). En comparación, los árboles 6 a 10 se distinguieron por un perfil en forma de <u>U</u> con los valores mínimos correspondientes a la madera de duramen y sin permitir diferenciar la zona de transición (ver tabla 4 (2/2). En contraste con los resultados del perfil de densidad, la variación en los valores y en la forma de los perfiles de contenido de humedad fue menor.



Tabla 3 (2/2). Resultados de las pruebas de perfil de densidad. Árbol 6 a 10.

De acuerdo con los resultados del perfil de contenido de humedad, se pueden proponer tres factores asociados a la variación de los valores locales de este parámetro: una diferencia notoria entre la madera de albura y de duramen, y para el grupo de árboles 1 a 5 una particularidad en la zona de transición, donde la células traqueidas de madera de albura se deshidratan del agua libre antes de rehumidificarse para trasformarse en madera de duramen (ver figura 4 (1/2), este resultado coincide con el argumento propuesto por Nakada (2007b). Esta observación no es evidente para el grupo de árboles 6 a 10 (ver figura 4 (2/2), donde se puede apreciar un perfil más continuo en su forma representada por mediciones locales a diferentes alturas de medición y en la dirección transversal del plano perpendicular a la dirección longitudinal del árbol.



Tabla 4 (1/2). Resultados de las pruebas de perfil de contenido de humedad. Árbol 1 a 5.

Los valores presentados en la tabla 1 (1/2 y 2/2) de contenido de humedad estimado con las pruebas de impacto lateral C.H.(i) y los valores promedio de contenido de humedad calculado con probetas pequeñas, correspondientes a las alturas de impacto C.H.(a+d), C.H.(a) y C.H.(d), mostraron correlaciones importantes (R^2 entre 0.76 y 0.99 para una confiabilidad del 95%) (Ver tabla 5).

Estos resultados confirman que los valores de contenido de humedad estimados con el método de impacto lateral son similares a los calculados con la técnica de secado en estufa y utilizando pequeñas probetas. Conclusión que coincide con los resultados de Kagamuchi y

col. (2001) quien aplicó esta técnica con fines de investigación de carácter genética de la especie *Cryptomeria japonica* D. Don.



Tabla 4 (2/2). Resultados de las pruebas de perfil de contenido de humedad. Árbol 6 a 10.

Prueba:		PIL	Perfil de c	ontenido o	de humedad	-	PIL	Perfil de contenido de humedad			
Probeta:		Árbol		Pequeña	ı	-	Árbol	I	Pequeña		
Parámetro: C.H.(i)		C.H.(i)	C.H.(a+d)	C.H.(a)	C.H.(d)	-	C.H.(i)	C.H.(a+d)	C.H.(a)	C.H.(d)	
F	Hz	0.87	0.90	0.81	0.89	-	-	-	-	-	
C.H.(i)	%	-	0.86	0.76	0.84	-	-	-	-	-	
C.H.(a+d)	%	-	-	0.84	0.99	-	-	-	-	-	
C.H.(a)	%	-	-	-	0.80	-	-	-	-	-	
V _R	m/s	-	-	-	-	-	0.70	0.58	0.54	0.57	
Prueba:		Ultı	rasonido rac	lial	Ultrason	ido longit	udinal	Ultrason	ido longit	udinal	
Probeta:			barra		Normalizad	1a (C.H. =	= 15.4%)	Normaliza	ıda (C.H. =	= 15.4%)	
Parámetro:		-	VR	Er	V _L (a+d)	V _L (a)	V _L (d)	E _L (a+d)	E _L (a)	E _L (d)	
F	U ₇		0.69	0.11	0.55	0.10	0.64	0.02	0.26	0.42	
Г V	ΠZ m/a	-	0.08	0.11	0.55	0.19	0.04	0.03	0.30	0.42	
V _R	GPa	-	-	0.24	0.33	0.32	0.38	0.05	0.11	0.40	
$\frac{L_R}{V_r(a+d)}$	OF a	-	-	-	0.27	0.28	0.21	0.15	0.01	0.20	
$V_{L}(a+u)$	m/s	_	-	_		0.79	0.89	0.54	0.01	0.80	
$V_{L}(d)$	m/s		_				0.50	0.50	0.11	0.50	
$F_{L}(a+d)$	GPa		_			_		0.10	0.54	0.36	
$E_L(a \mid a)$	GPa	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	
Prueba:			_		Flexión es	tática trai	nsversal	Flexión es	tática tra	nsversal	
Probeta:			-		Normaliza	da (C.H. =	= 15.4%)	Normalizada (C.H. = 15.4%)			
Parámetro:		-	-	-	MOR(a+d)	MOR(a)	MOR(d)	MOE(a+d)	MOE(a)	MOE(d)	
F	Hz	-	_	_	0.62	0.74	0.03	0.01	0.37	0.44	
MOR(a+d)	MPa	-	-	-	-	0.90	0.37	0.42	0.73	0.18	
MOR(a)	MPa	-	-	-	-	-	0.11	0.14	0.69	0.33	
MOR(d)	MPa	-	-	-	-	-	-	0.30	0.24	0.03	
MOE(a+d)	GPa	-	-	-	-	-	-	-	0.59	0.23	
MOE(a)	GPa	-	-	-	-	-	-	-		0.03	
Prueba:		Ultrasc	onido longit	udinal	Flexión es	tática tra	nsversal	Flexión es	tática tra	nsversal	
Probeta:		Normali	zada (C.H. =	= 15.4%)	Normaliza	ıda (C.H. =	= 15.4%)	Normaliza	da (C.H. =	= 15.4%)	
Parámetro:		V _L (a+d)	V _L (a)	V _L (d)	MOR(a+d)	MOR(a)	MOR(d)	MOE(a+d)	MOE(a)	MOE(d)	
V _R	m/s	0.55	0.32	0.58	0.28	0.36	0.01	0.04	0.09	0.39	
V _L (a+d)	m/s	-	0.79	0.89	0.20	0.30	0.01	0.68	0.01	0.74	
V _L (a)	m/s	-	-	0.50	0.02	0.06	0.04	0.43	0.09	0.39	
V _L (d)	m/s	-	-	-	0.35	0.48	0.01	0.11	0.08	0.86	
Nota: valore	s en ne	egritas de	notan fuerte	es correla	ciones para	un nivel o	le confiat	vilidad del 9	5 %.		

Tabla 5. Coeficientes de correlación (R^2) entre valores promedio de los parámetros estudiados.

Correlaciones para las pruebas de impacto lateral, perfiles de contenido de humedad y ultrasonido radial fueron calculadas con valores promedio.

Correlaciones para las pruebas de ultrasonido longitudinal y flexión estática transversal fueron calculadas con valores de cada probeta.

Relaciones entre los parámetros

El contenido de humedad C.H.(i) estimado con el método de impacto lateral y la velocidad del ultrasonido V_R medida en las probetas barra húmedas (C.H. > 200%, árboles 1 a 5, y C.H. > 90%, árboles 6 a 10), presentó una buena correlación (ver tabla 5). Sin embargo, una vez calculado el contenido de humedad a la altura correspondiente, con probetas pequeñas y empleando el método de peso húmedo en relación al peso anhidro, los valores de R² para un 95% de confiabilidad disminuyeron. Igualmente para el mismo tipo de pruebas, V_R no correlacionó bien con E_R ni con los parámetros promedios estimados en probetas estandarizadas, tanto para valores de madera de albura y duramen combinados (a+d) como para valores particulares de albura (a) y de duramen (d) (ver tabla 5).

Los datos indicados en la tabla 5, explican que no todos los parámetros estudiados correlacionan estadísticamente bien entre si. Estos resultados pueden ser interpretados por los argumentos siguientes:

En condiciones de campo, las 5 pruebas de impacto lateral fueron realizadas en diferentes alturas en cada uno de los 10 individuos observados. La frecuencia así medida fue estimada a partir de la vibración de la sección transversal del árbol. Este fenómeno es idealizado y para fines de análisis, el razonamiento teórico es simplificado. Conjuntamente, la fórmula empleada para la estimación del contenido de humedad (Kamaguchi y col., 2000) en la madera de la especie estudiada (*Cryptomeria japonica* D. Don), fue derivada de una correlación donde la constante que relaciona la frecuencia de vibración F y el diámetro D de la sección transversal del árbol, con el contenido de humedad de la madera, contiene todas las variables que pudieran ocasionar la variación de los resultados. Este método empírico funciona de manera aceptable en condiciones restringidas. De aquí que la frecuencia F se correlacione bien con los diferentes contenidos de humedad C.H. estimados con probetas pequeñas y con la velocidad del ultrasonido en la dirección radial V_R.

En cambio, las pruebas de laboratorio fueron realizadas utilizando madera recortada del árbol. Si bien las alturas en el fuste del árbol de donde se elaboraron las probetas normalizadas y de pequeñas dimensiones, correspondieron a cada uno de los experimentos entre si, cada una de las probetas contenía madera con particularidades de crecimiento, - madera de albura y/ó de duramen-, y con características de densidad y de contenido de humedad específicos. Además, la orientación de las probetas en el plano leñoso y la dirección de solicitación en cada prueba en particular, fueron diferentes a la dirección idealizada del plano de impacto.

Si bien se puede postular que un árbol en pie puede ser caracterizado como un individuo con características intrínsecas del material que lo conforma, -en este caso los diferentes tipos y estados de la madera-, una vez modificado el equilibrio biomecánico del individuo, es difícil que sus componentes, -es decir las probetas de madera-, respondan mecánicamente de manera congruente.

En cambio, los parámetros estudiados con probetas de madera de las diferentes secciones del fuste del árbol, es decir con probetas del mismo tipo de madera, correlacionaron bien entre ellos.

La tabla 6, presenta los coeficientes R^2 , los cuales fueron notorios, entre los valores de las velocidades longitudinales V_L calculadas en las pruebas de ultrasonido longitudinal y los módulos de elasticidad MOE en flexión estática transversal. Estos coeficientes fueron calculados analizando los valores de las 400 probetas normalizadas. Para ilustrar este resultado la figura 5 presenta la dispersión y la correlación ($R^2 = 0.88$) entre los valores de MOE(a+d) y EL(a+d), resultado que confirma la utilidad de los métodos no destructivos, en este caso el ultrasonido, en la predicción de valores del módulo de elasticidad en flexión transversal.

Tabla 6. Coeficientes de correlación (R²). Pruebas de ultrasonido longitudinal y de flexión estática transversal con probetas normalizadas.

Prueba:		Flexión estática tranversal							
Probeta:		Normalizada							
Parámetro:		E _L (a+d)	MOE(a+d)						
V _L (a+d)	m/s	0.75	0.05	0.68					
E _L (a+d)	GPa	-	0.31	0.88					
MOR(a+d)	MPa	-	-	0.40					
Nota: valores en negritas denotan fuertes correlaciones para un nivel de confiabilidad del 95 %									



Figura 5. Dispersión y correlación de los valores de MOE(a+d) y E(a+d).

La figura 6, presenta la distribución de valores del contenido de humedad C.H.(i) en las diferentes alturas de impacto h(i) de los árboles (ver tabla 1). Por el orden de las dimensiones y su distribución, los resultados se pueden agrupar en dos grupos en concordancia con los resultados precedentes. El grupo de árboles 1 a 5 (ver figura 6a) que presentaron contenidos de humedad relativamente menores a los del grupo de árboles 6 a 10 (ver figura 6b). Estos resultados confirman la utilidad de la metodología para la selección y agrupamiento de

árboles antes de su derribo, de acuerdo a sus características tecnológicas. En este caso respecto a su contenido de humedad, el cual concuerda con los valores calculados con pequeñas probetas y con el método de laboratorio de diferencia de pesos entre el estado natural y el de la condición anhidra de la madera.

La figura 7 presenta la dispersión y las correlaciones para los valores de C.H.(a+d), C.H.(a), C.H.(d) calculados en condiciones de laboratorio y la frecuencia F medida directamente en los árboles. Los coeficientes de correlación R² entre estos parámetros para una confiabilidad del 95%, fueron del orden de 0.82 a 0.90. De acuerdo a los resultados de la tabla 5 y de la figura 7, y siguiendo la metodología propuesta en esta investigación, es posible predecir con certeza, el contenido de humedad de la madera en un árbol, únicamente a partir de la medición de la frecuencia de vibración de un impacto lateral.



Figura 6. Distribución de valores del contenido de humedad estimado con el método de impacto lateral C.H.(i) en función de las alturas de impacto h(i) de: a) árboles 1 a 5; b) árboles 6 a 10.



Figura 7. Dispersión y correlaciones para los valores de C.H.(a+d), C.H.(a), C.H.(d) y la frecuencia (F).

Este corolario es una contribución a la metodología aplicada anteriormente en Japón por Kamaguchi y col. (2000, 2001), Nakada y Tamura (2006) y Nakada (2007a). Para adaptar esta tecnología de carácter no destructivo en especies mexicanas, es necesario el estudio de una muestra de árboles de la especie por estudiar, la medición de la frecuencia del plano lateral, -con un analizador de vibraciones-, y la corroboración de los resultados en laboratorio. Una vez establecida la correlación correspondiente, se puede predecir el contenido de humedad de árboles en pie para una especie en particular.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de la investigación se puede concluir que el método de impacto lateral logra predecir, con una ocurrencia estadísticamente aceptable, el contenido de humedad en una sección transversal de un árbol. Los parámetros necesarios son el diámetro del árbol a la altura de impacto y la frecuencia de vibración del plano transversal. Estas conclusiones se restringen a la especie *Cryptomeria japonica* D. Don.

Los valores de la frecuencia de vibración medidos en las secciones transversales en los árboles, correlacionaron bien con los resultados del contenido de humedad de la madera calculado éste con el método de diferencia de peso húmedo y de peso seco. Este resultado propone que la técnica de carácter no destructivo y desarrollada por los investigadores japoneses referidos en esta investigación, puede ser adaptada a las condiciones de arbolado en México.

Este acomodo se puede realizar midiendo únicamente la frecuencia de vibración, ocasionada por un impacto lateral y relacionándola estadísticamente con el contenido de humedad. Ambos parámetros fueron calculados siguiendo la metodología propuesta en esta investigación.

Para generalizar los resultados de esta investigación, es necesario experimentar con otras especies, con el objeto de ajustar las constantes derivadas del método de impacto lateral.

Los perfiles de densidad y de contenido de humedad para diferentes alturas en el tronco de árboles de *Cryptomeria japonica* D. Don., permitieron diferenciar dos grupos de árboles. Si se realizan estudios intensivos con otras especies, esta técnica puede ser conveniente con fines de investigación de carácter genética.

Las correlaciones entre los parámetros dinámicos frecuencia y velocidad del ultrasonido con los parámetros derivados de las pruebas de impacto lateral, contenido de humedad, ultrasonido y flexión estática, no presentaron un patrón que explique correspondencias estadísticas entre resultados, si se cuantifica madera de albura y duramen combinadas y los casos particulares de madera de albura y duramen.

Los datos provenientes de pruebas no destructivas con probetas normalizadas,-ultrasonido longitudinal-, y las pruebas de flexión estática transversal correlacionaron bien. Este resultado permite confirmar la utilidad de los métodos no destructivos en la caracterización de propiedades tecnológicas de la madera.

REFERENCIAS

Aoi, H.; Nakada, R.; Yamamoto, K.; Sotomayor Castellanos, J.R. 2009. Characteristics and applicability of the lateral impact vibration method. In proceedings of the 59th Annual Meeting of the Japan Wood Research Society. Japan.

ADTEC System Science Co., Ltd. 2007. Operation manual of the ASB-3000 Portable FFT Analyzer. ADTEC System Science Co., Ltd. Japan.

Beall, F.C. 2007. Industrial Applications and Opportunities for Nondestructive Evaluation of Structural Wood Members. *Maderas. Ciencia y Tecnología*. 9(2):127-134.

Bodig, J.; Jayne, B.A. 1982. Mechanics of Wood Composites. Van Nostrand Reinhold Company. USA.

Bucur, V. 2005. 2nd Edition. Acoustics of Wood. Springer-Verlag. Germany.

C.N.S. Electronics. (s/f). Pundit manual for use with the portable ultrasonic non-destructive digital indicating tester: C.N.S. Electronics. London, England.

Carter, P.; Briggs, D.; Ross, R,J.; Wang, X. 2005. Acoustic testing to enhance western forest values and meet customer wood quality needs. In: Harrington CA, Schoenholtz SH, eds. 2005 Productivity Western forest: a forest products focus. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-642. Portland, OR; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 176 p. pp. 121-129.

Chaffey, N. (2002). Why study trees? In: Wood Formation in Trees. I Introduction. ed. N. Chaffey. Taylor and Francis. London, UK pp:1-16.

Chuang, S.T.; Wang, S.Y. 2001. Evaluation of standing tree quality of Japanese cedar grown with different spacing using stress-wave and ultrasonic-wave methods. *Journal of Wood Science*. 47:245-253.

Cown, D. 2006. Efficient Utilization of Plantation Resources for Products Value in New Zealand. In: Non destructive evaluation for wood and woody materials for development new functional wood-based materials. Proceedings of JSPS Japan and Hungary Research Cooperative Program / joint seminar. Edited by K Takata & P Kitin. Institute of Wood Technology. Noshiro, Japan. pp:1-15.

Forestry and Forest Products Research Institute, Wood Technology and Wood Utilization Division. 1982. Properties of the Important Japanese Woods. Tables of the properties of woods (Research note). Bull. For. & For. Prod. Res. Inst. No. 319. pp:85-126.

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.

Iizuka, K.; Oribe, Y.; Ubukata, M. 2000. Clonal Variation of the Green Moisture Content in Grafted Plus-Trees of *Abies sachalinensis*. *Mokuzai Gakkaishi*. 46:397-405.

Ikeda, K.; Arima, T. 2000a. Quality Evaluation of Standing Trees by Stress Wave Propagation Method and Its Application II. Evaluation of sugi stands and application to production of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) structural square sawn timber. *Mokuzai Gakkaishi*. 46:189-196.

Ikeda, K.; Kanamori, F.; Arima, T. 2000b. Quality Evaluation of Standing Trees by Stress Wave Propagation Method and Its Application IV. Application to quality evaluation of hinoki (*Chamaecyparis obutusa*) forest. *Mokuzai Gakkaishi*. 46:602-608.

Ikeda, K.; Kino, N. 2000c. Quality Evaluation of Standing Trees by Stress Wave Propagation Method and Its Application I. Seasonal changes of moisture contents of sugi standing trees and evaluation with stress-wave propagation velocity. *Mokuzai Gakkaishi*. 46:181-188.

Ikeda, K.; Oomori, S.; Arima, T. 2000d. Quality Evaluation of Standing Trees by Stress Wave Propagation Method and Its Application III. Application to sugi (*Cryptomeria japonica*) standing plus trees. *Mokuzai Gakkaishi*. 46:558-565.

Iki, T.; Tamura, A.; Nishioka, N.; Abe, M. 2006. Longitudinal Change of Dynamic Modulus of Elasticity and Quality Evaluation by a Non-destructive Method in Todomatsu (*Abies sachalinensis*) Plus Tress. *Mokuzai Gakkaishi*. 52:344-351.

Instron Materials Testing Instruments. 1994. Instron Series 5560. Table-Top Load Frames.

Operator's Guide and Instron[©] BlueHill2 acquisition data system used guide. Instron Materials Testing Instruments. USA.

International Organization for Standardization ISO 3129-1975 (E). 1975a. Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO).

International Organization for Standardization ISO 3349-1975 (E). 1975b. Wood - Determination of modulus of elasticity in static bending. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO).

Ishiguri, F.; Matsui, R.; Iizuka, K.; Yokota, S.; Yoshizawa, N. 2008. Prediction of the mechanical properties of lumber by stress-wave velocity and Pilodyn penetration of 36-year-old Japanese larch trees. *Holz Rho Werkst*. 66:275-280.

Kamaguchi, A.; Nakao, T.; Kodama, Y. 2000. Non-Destructive Measurement of Heartwood Moisture Content in Sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) Standing Tree by Lateral Impact Vibration Method. *Mokuzai Gakkaishi*. 46:13-19.

Kamaguchi, A.; Nakao, T.; Nakai, T.; Tamura, A. 2001. Measurement of Heartwood Moisture Content of Sugi by Lateral Impact Vibration Method. Comparison with data obtained from moisture meter method and measurement of longitudinal distribution. *Mokuzai Gakkaishi*. 47:235-241.

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. Leininger, TD.; Schmoldt, D.L.; Tainter, F.H. 2001. Using Ultrasound to Detect Defects in Trees: Current Knowledge and Future Needs. In: Precision Forestry. Proceedings of the first international precision forestry cooperative symposium. University of Washington College of Forest Resources, University of Washington College of Engineering and USDA Forest Service. Seattle, WA, USA. pp:99-107.

Lindstroöm, H.; Harris, P.; Nakada, R. 2002. Methods for measuring stiffness in young trees. *Holz als Rho- und Werkstoff*. 60:165-174.

Nakada, R. 2006. Within-steam water distribution in living trees of some conifers. *IAWA Journal*. 27:31.

Nakada, R. 2007a. Lateral Impact Vibration Method for Detecting Wetwood. Applications to a Physiological Study of Wetwood and Genetic Improvement in sugi (*Cryptomeria japonica*). In: Non destructive evaluation for wood and woody materials for development new functional wood-based materials. Proceedings of JSPS Japan and Hungary Research Cooperative Program / joint seminar. Edited by K Takata & P Kitin. Institute of Wood

Technology. Noshiro, Japan. pp:74-85.

Nakada, R. 2007b. Variation of water distribution within living stems and its causal factors in *Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don. Bull. For. Tree. Breed. Center No. 23. 254 pp.

Nakada, R.; Fujisawa, Y.; Hirakawa, Y.; Yamashita, K. 1998. Longitudinal Change of the Green Moisture Content in the Stem of *Cryptomeria japonica* D. Don. *Mokuzai Gakkaishi*. 44:395-402.

Nakada, R.; Fujisawa, Y.; Yamashita, K.; Hirakawa, Y. 2003. Changes in water distribution in heartwood along stem axes in *Cryptomeria japonica*. *Journal of Wood Science*. 49:107-115.

Nakada, R.; Tamura, A. 2006. An Application of the Lateral Impact Vibration Method to the Genetic Improvement of Heartwood Moisture Content in *Cryptomeria japonica*. *Mokuzai Gakkaish*. 53:137-144.

Nakai, T.; Yamai, R. 1982. Properties of the Important Japanese Woods. The mechanical properties of 35 important Japanese woods. Bull. For. & For. Prod. Res. Inst. No. 319. pp:85-126.

Nanami, N.; Nakamura, N.; Arima, T.; Okuma, M. 1992a. Measuring the Properties of Standing Trees with Stress Waves I. The method of measurement and the propagation path of the waves. *Mokuzai Gakkaishi*. 38:739-746.

Nanami, N.; Nakamura, N.; Arima, T.; Okuma, M. 1992b. Measuring the Properties of Standing Trees with Stress Waves II. Application of the method to standing trees. *Mokuzai Gakkaishi*. 38:747-752.

Nanami, N.; Nakamura, N.; Arima, T.; Okuma, M. 1993. Measuring the Properties of Standing Trees with Stress Waves III. Evaluating the Properties of Standing Trees for some forest stands. *Mokuzai Gakkaishi*. 39:903-909.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society.

Sobue, N. 2006. Non-destructive test of wood qualities. In: Non destructive evaluation for wood and woody materials for development new functional wood-based materials. Proceedings of JSPS Japan and Hungary Research Cooperative Program / joint seminar. Edited by K Takata & P Kitin. Institute of Wood Technology. Noshiro, Japan. pp:30-43.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Ohashi, K.; Hatano, Y.; Shibusawa, T. 2005. Influencia del Perfil de densidad en las propiedades mecánicas y físicas de tableros de fibra de madera. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. (2)1:3-36.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Villaseñor Aguilar, J.M.; Aoi, I. 2007. Módulos de elasticidad evaluados por métodos no destructivos y ruptura de la madera de *Pinus douglasiana*: Vibraciones transversales, ultrasonido, ondas de esfuerzo y flexión estática. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 3(2):3-17.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2008. Forest Research Training Course. Forest Products. Forestry and Forest Products Research Institute and Japan International Cooperation Agency. CONACYT- JICA. Final Report. pp: 50. Japan.

Vafai, A.; Farshad, M. 1979. Modulus of Elasticity of Wood in Standing Trees. *Wood Science*. 12:93-97.

Wang, S.Y.; Lin, C.J.; Chiu, C.M. 2005. Evaluation of wood quality of Taiwania trees grown with different thinning and pruning treatments using ultrasonic-wave testing. *Wood and Fiber Science*. 37:192-200.

Wang, X.; Ross, R.J.; Carter, P. 2005. Acoustic evaluation of standing trees – Recent research development In: Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. University of Applied Sciences, Eberswalde, Germany. pp: 455-465.

Wang, X.; Ross, R.J.; Carter, P. 2007. Acoustic evaluation of wood quality in standing trees Part I. Acoustic wave behavior. *Wood and Fiber Science* 39:28-38.

Wang, X.; Ross, R.J.; McClellan, M.; Barbour, R.J.; Erickson, J.R.; Forsman, J.W.; McGinnis, G.D. 2001. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. *Wood and Fiber Science*. 33:522-533.

Xu, P.; Walker, J.F.C. 2004. Stiffness gradients in radiate pine trees. *Wood Science and Technology*. 38:1-9.

SÍMBOLOS

(a)	=	Madera de albura.
(a+d)	=	Madera de albura y duramen combinada.
(d)	=	Madera de duramen.
b _{fle}	=	Base de la probeta en pruebas de flexión (m).
C.H.	=	Contenido de humedad al momento de la prueba (%).
C.H.(i)	=	Contenido de humedad en el árbol a la altura de impacto (%).
D	=	Diámetro del árbol a la altura de impacto (m).
E _{R,L}	=	Módulo de elasticidad en la dirección radial ó longitudinal (Pa).
f	=	Función.
F	=	Frecuencia a la altura de impacto (Hz).
h	=	Altura de impacto (m).
h _{fle}	=	Altura de la probeta en pruebas de flexión (m).
Ι	=	Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m ⁴).
Κ	=	Constante experimental (Kamaguchi y col., 2000): 1.93 x 10 ⁷ .
L	=	Dirección longitudinal.
L _{fle}	=	Portada del ensayo de flexión (m).
MOE	=	Módulo de elasticidad en flexión estática (Pa).
MOR	=	Módulo de ruptura (Pa).
Р	=	Carga (N).
p	=	Probabilidad estadística (%).
PIL	=	Prueba de impacto lateral.
Prup	=	Carga a la ruptura (N).
R	=	Dirección radial.
Т	=	Dirección tangencial.
V _{R,L}	=	Velocidad del ultrasonido dirección radial ó longitudinal (m/s).
у	=	Deformación de la probeta en $L_{fle}/2$ (m).
ρ ₀	=	Densidad de la madera con C.H. = 0% (gr/cm ³).
$\rho_{\rm H}$	=	Densidad de la madera con C.H. respectivo al momento de la prueba (gr/cm ³).

9. CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LA MADERA DE *ABIES SP.* POR MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS. Vibraciones transversales, ondas de esfuerzo y ultrasonido.

INTRODUCCIÓN

En México existen maderas con características mecánicas apropiadas para su uso en instrumentos musicales. Sin embargo, las industrias y talleres de Paracho, Michoacán, adquieren maderas importadas. En esta región, los constructores de instrumentos musicales en general seleccionan las especies nacionales e importadas de acuerdo a su experiencia y al precio de las maderas accesibles en el mercado.

Los constructores no cuentan con datos o indicadores que evalúen de una manera cuantitativa las propiedades acústicas y de calidad de las maderas utilizadas. Como resultado, la calidad de las guitarras y otros instrumentos es variable y su valor comercial tiende a depreciarse.

No obstante que la tradición en la elaboración de instrumentos musicales con madera es muy antigua, en México existe escasa información sobre las propiedades acústicas de especies mexicanas. La tecnología de producción y la determinación de la calidad de los productos se basan principalmente en métodos empíricos.

En la literatura especializada en mecánica de la madera no existen igualmente muchos antecedentes sobre las propiedades acústicas y la calidad de la madera para elaborar instrumentos musicales. Se han publicado resultados de investigaciones y monografías sobre la utilidad de los métodos no destructivos en la caracterización de las propiedades acústicas de la madera, pero se considera éste un campo de investigación relativamente nuevo (Sotomayor Castellanos y col. 2005, 2009 y 2010).

Las propiedades acusto-elásticas de los sólidos de medio continuo están relacionadas con su masa y con la velocidad con que permite el material el tránsito de una onda mecánica. Si se mide la densidad del material y la velocidad del ultrasonido a través del medio, se puede estimar, utilizando la ecuación de onda de manera simplificada, su módulo de elasticidad en condiciones dinámicas.

La velocidad de transmisión de una onda mecánica en la madera está fundamentada en la propiedad que tiene ésta para almacenar y disipar energía. Cada especie de madera posee una densidad, una velocidad de onda y un módulo de elasticidad particulares, todos ellos relacionados con la composición química y la morfología de cada madera.

En el mismo contexto, la frecuencia natural de vibraciones libres de una pieza de madera, junto con su densidad, son los parámetros básicos para la determinación del módulo de elasticidad de la madera.

Análisis de bibliografía

Información tecnológica de la madera del género Abies en México

Echenique Manrique y Becerra Martínez (1972) y Romero Amaya y col. (1982), presentan las características mecánicas de la madera de *Abies religiosa* y de *Abies concolor* respectivamente. Sus estudios se desarrollaron en condiciones de ensayo estáticas de las maderas

Sotomayor Castellanos y Bocanegra Ojeda (2009), presentan información sobre la velocidad del ultrasonido en las 3 direcciones de anisotropía de la madera de *Abies religiosa* var. *emarginata, Abies* sp. y *Abies religiosa*, tres especies de nombre común Oyamel y procedentes de Michoacán, Puebla y Querétaro, respectivamente. Sus resultados están basados en una sola probeta por especie. Los autores presentan esta información como referencia en un estudio más completo sobre las características acústicas de la madera de *Picea* sp. y de *Acer* sp.

Hernández Maldonado (2010), empleando modelos de predicción a partir de la densidad de la madera, estima las características elásticas de *Abies concolor*, *Abies durangensis*, *Abies religiosa* y *Abies religiosa* var. *emarginata*. Sus datos se refieren a los módulos de elasticidad, los módulos de rigidez y los coeficientes de Poisson, estimados para condiciones de carga estática.

Sotomayor Castellanos y col. (2010), determinaron la velocidad del ultrasonido, el módulo de elasticidad, el índice material y el factor de calidad de la madera de *Abies durangensis* y *Abies religiosa* var. *emarginata*. Sus parámetros forman parte de una base de datos de características acústicas de 152 especies mexicanas. Los autores recomiendan estudios intensivos que permitan corroborar los valores de las maderas estudiadas.

Métodos no destructivos empleados en caracterización mecánica de la madera

Los métodos de evaluación no destructivos que emplean la capacidad de la madera para almacenar y disipar energía como fenomenología para caracterizar su comportamiento mecánico, han confirmado su utilidad para predecir, entre otros parámetros mecánicos del material, su frecuencia natural de vibración y la velocidad de transmisión de una onda mecánica.

Vibraciones transversales

Respecto a la utilización de tecnologías de carácter no destructivo y de su aplicación en el estudio de la madera, Görlacher (1984), Nakai y col. (1991), Haines y col. (1996) e Ilic (2001), realizaron pruebas de flexión en vibraciones transversales y de flexión estática sobre probetas normalizadas. En el país, la información relativa a parámetros medidos con vibraciones transversales, por ejemplo la frecuencia y el módulo de elasticidad dinámico, es escasa (Sotomayor Castellanos y Villaseñor Aguilar 2006 y Sotomayor Castellanos y col.,

2007a y 2007b). Más información sobre la aplicación de métodos no destructivos en la caracterización mecánica de la madera se encuentra en Pellerin y Ross (2002) y Bucur (1995).

Ondas de esfuerzo

Varios investigadores han observado que la velocidad de las ondas de esfuerzo varía según la especie en estudio, su anisotropía y con el contenido de humedad de la madera. Entre otros autores se puede citar a: Gerhards (1982), Sakai y col. (1990), Ross y Pellerin (1991), Smulski (1991), Sandoz (1993) y Booker y col. (1996).

Entre sus principales conclusiones, estos autores documentan que existen fuertes correlaciones entre el módulo de elasticidad dinámico obtenido a partir de la velocidad de una onda de esfuerzo y el módulo estático resultante de ensayos de flexión. Además, encuentran que la velocidad de las ondas de esfuerzo se incrementa proporcionalmente al valor del módulo de elasticidad en flexión estática, independientemente de la especie a la cual pertenece la madera estudiada.

Ultrasonido

La técnica de ultrasonido y la caracterización mecánica de la madera han sido estudiadas por varios investigadores, entre otros por: Gerhards (1975), James (1961), James y col. (1982), Bucur (1995), Beall (2002), Kawamoto y Williams (2002) y Pellerin y Ross (2002). Estos investigadores concluyen que las ondas ultrasónicas y acústicas pueden viajar a través de la madera y, a partir del cálculo de su velocidad, el material puede ser caracterizado respecto a su anisotropía y a sus propiedades mecánicas. Además, los autores recomiendan el uso de pruebas por ultrasonido para determinar el módulo de elasticidad de la madera.

Problemática

El empleo de la madera en la manufactura de instrumentos musicales de cuerda, viento y percusión es una de las más altas valoraciones de utilización del material, particularmente las especies de maderas con óptimas propiedades acústicas, calificadas como "madera de resonancia" (Bucur, 1995). Las propiedades de la madera relacionadas con su caracterización acústica son importantes también para su valoración como materia prima para la elaboración de muebles para amplificadores de sonido y cajas de resonancia musicales.

Para una correcta evaluación de la madera en aplicaciones acústicas, por ejemplo su calidad de tono para instrumentos musicales, son necesarios entre otros parámetros, la densidad (ρ), la velocidad del ultrasonido (V) y el módulo de elasticidad (E) correspondiente a las maderas con aptitudes acústicas (Spycher y col. 2008).

En México existen publicaciones que proponen maderas mexicanas para su estudio y promoción en aplicaciones acústicas. Entre otros autores se pueden citar: Guridi Gómez y García López (1977); Barajas Morales y León Gómez (1984); Gutiérrez Carvajal y Dorantes

López (2007); Tamarit Urias y López Torres (2007). Estos autores, recomiendan el empleo de las especies del género *Abies*, para la fabricación de instrumentos musicales.

Para recomendar el uso y/ó la promoción de ciertas especies mexicanas, los trabajos citados parten del análisis de la estructura anatómica de las maderas. Como complemento, los autores retoman la opinión de fabricantes de instrumentos musicales.

Sin embargo, a excepción de Sotomayor Castellanos y Bocanegra Ojeda (2009) y Sotomayor Castellanos y col. (2010), la revisión de la bibliografía del país sobre el tema de características acústicas e indicadores relacionados con la calidad de la madera, evidenció una ausencia de información al respecto.

Con el objeto de valorar este género de especies en México, es relevante realizar estudios específicos sobre esta madera

Por otra parte, dado que la madera de algunas especies del género *Abies* es destinada a la industria de la laudería, es pertinente estudiarlas con métodos de carácter no destructivo que no alteren su estructura y/o modifiquen sus propiedades tecnológicas.

OBJETIVO

Determinar los módulos de elasticidad de la madera de *Abies* sp. empleando métodos no destructivos de vibraciones transversales, de ondas de esfuerzo y de ultrasonido.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

El material experimental consistió en 20 probetas de madera de *Abies* sp., recortadas y orientadas en las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L) del plano leñoso. Las dimensiones de las probetas fueron de 20 mm x 20 mm x 320 mm, en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, respectivamente.

Las probetas estuvieron libres de particularidades de crecimiento y fueron divididas en dos conjuntos, de acuerdo a dos criterios de calidad tecnológica:

El primer criterio de calidad fue la orientación de los anillos de crecimiento, respecto a los ejes de ortotropía de la madera (Hernández Maldonado, 2010). El grupo de probetas de madera catalogadas como de calidad A, presentó una mejor orientación respecto al conjunto de probetas B.

El segundo criterio de calidad fue el número de anillos en la sección transversal de las probetas, por centímetro en la dirección radial. La madera de calidad A, presentó un intervalo de 4 a 7.2 anillos de crecimiento por centímetro (An/cm). El intervalo correspondiente al grupo de madera de calidad B, varió de 2 a 3.6 anillos de crecimiento por centímetro.

Métodos

Cálculo de la densidad

La densidad de la madera (ρ) fue calculada con la relación peso seco / volumen verde, propia a cada probeta.

Cálculo del contenido de humedad

Dado que las pruebas fueron de carácter no destructivo, para calcular el contenido de humedad de la madera (CH) se emplearon dos grupos de 5 probetas complementarias correspondientes a cada uno de los conjuntos de calidades A y B. El contenido de humedad fue determinado con la relación peso húmedo/peso anhidro de la madera. El contenido de humedad de la madera para los dos grupos de madera fue en promedio de 10.25%.

Pruebas de vibraciones transversales

Los ensayos de vibraciones transversales (vt) siguieron el protocolo experimental propuesto por Villaseñor Aguilar (2005) utilizando la tecnología *Grindosonic*® (Lemmens, sin fecha), con la cual se determinó la frecuencia natural de las probetas y se calculó el módulo de elasticidad con la ayuda de la fórmula:

$$Evt = \frac{4 \pi^2 l_{vt}^4 f^2 \rho}{m^4 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{L_{vt}^2} K\right)$$

Donde:

Evt = Módulo de elasticidad en vibraciones transversales (Pa).

- l_{vt} = Largo de la portada entre apoyos (m).
- L_{vt} = Largo de la probeta (m).
- f = Frecuencia natural de la probeta (Hz).
- ρ = Densidad de la probeta (kg/m³).
- m, K = Constantes (adimensionales).
- r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m^2) .

La Figura 1 esquematiza el ensayo de vibraciones transversales y el diagrama de una probeta.



Figura 1. Ensayo de vibraciones transversales y diagrama de una probeta (Villaseñor Aguilar, 2005).



Figura 2. Ensayo de ondas de esfuerzo y diagrama de una probeta (Villaseñor Aguilar, 2007). *Pruebas de ondas de esfuerzo*

Las pruebas de ondas de esfuerzo (oe) siguieron el protocolo experimental propuesto por Villaseñor Aguilar (2007) utilizando la tecnología *Metriguard*® (Metriguard, 1998). La Figura 2 presenta el ensayo ondas de esfuerzo y el diagrama de una probeta. El módulo de elasticidad en ondas de esfuerzo se determinó a partir de la velocidad de las ondas de esfuerzo con la fórmula:

$$Eoe = Voe^2 \rho$$

Donde:

Eoe = Módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo (Pa).

 $\begin{array}{ll} Voe & = Velocidad \; de \; las \; ondas \; de \; esfuerzo \; (m/s). \\ \rho & = Densidad \; de \; la \; madera \; (kg/m^3). \end{array}$

Pruebas de ultrasonido

Las pruebas de ultrasonido (us) siguieron las formalidades propuestas por Villaseñor Aguilar (2007) utilizando la tecnología *Sylvatest*® (Conceptsboisstructure, 2004) y el módulo de elasticidad por ultrasonido se calculó a partir de la velocidad del ultrasonido aplicando la fórmula:

$$Eus = Vus^2 \rho$$

Donde:

Eus = Módulo de elasticidad por ultrasonido (Pa). Vus = Velocidad del ultrasonido (m/s). ρ = de la madera (kg/m³).

La figura 3 presenta el ensayo de ultrasonido y el diagrama de una probeta.



Figura 3. Ensayo de ultrasonido y diagrama de una probeta (Villaseñor Aguilar, 2007).

RESULTADOS

El Cuadro 1 presenta los resultados de las características estudiadas, para los 2 grupos de probetas de calidad A y B, de madera de *Abies* sp. Los parámetros ahí anotados son:

A/cm: Anillos de crecimiento por centímetro en la dirección radial de la probeta.

- ρ : Densidad de la madera (kg/m³).
- *f*: Frecuencia natural de la probeta en flexión transversal (Hz).
- Evt: Módulo de elasticidad de la madera en vibraciones transversales (MPa).
Eoe: Módulo de elasticidad de la madera en ondas de esfuerzo (MPa).

Eus: Módulo de elasticidad de la madera en ultrasonido (MPa).

Los valores de los módulos de elasticidad presentados en la Tabla 1, fueron ajustados con los factores propuestos por Villaseñor Aguilar (2007), para estandarizar los resultados de la velocidad entre las pruebas de flexión estática, ondas de esfuerzo y ultrasonido.

ANÁLISIS

Densidad de la madera

De acuerdo con la TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas (Sotomayor Castellanos, 2008), la madera de *Abies* sp. clasifica como de densidad media (401 - 600 kg/m³). Este resultado es válido para los 2 grupos de calidades estudiadas. De acuerdo con Hernández Maldonado (2010), el coeficiente de variación calculado, para las dos calidades de madera, es proporcional y cerca de la mitad de la variación al interior de una especie, de la densidad para maderas angiospermas mexicanas (C.V. = 10%).

El valor de la media aritmética de la densidad de la madera de calidad A, fue 1.02 veces mayor, que el valor correspondiente a la densidad de la madera de calidad B.

Número de anillos por centímetro

El número promedio de anillo por centímetro de la madera de calidad A, fue 1.4 veces mayor, que el número de anillos por centímetro de la madera de calidad B.

Frecuencia y módulo de elasticidad en vibraciones transversales

El valor de la media aritmética de la frecuencia en vibraciones transversales de la madera de calidad A, fue 1.04 veces mayor que el valor correspondiente a la madera de calidad B.

Los valores de la media aritmética del módulo de elasticidad en vibraciones transversales de la madera de calidad A, fue mayor a los valores correspondientes al módulo de elasticidad de la madera de calidad B: $E_{vt} A / E_{vt} B=1.11$.

Los valores de la media aritmética del módulo de elasticidad en vibraciones transversales, fue ligeramente mayor a los módulos de elasticidad por ondas de esfuerzo y por ultrasonido: $E_{vt} / E_{oe} = 1.13 \text{ y } E_{vt} / E_{us} = 1.05 \text{ (ver Figura 4)}.$

Probeta	A/cm	ρ	f	Evt	Voe	Eoe	Vus	Eus
		kg/m ³	Hz	MPa	m/s	MPa	m/s	MPa
A01	5.6	402	885	13736	4688	9593	6250	11259
A02	7.2	439	913	13736	4747	9593	6349	11259
A03	4.4	393	848	10904	4464	7597	6061	9185
A04	4.0	423	904	12950	4870	9732	6557	11575
A05	4.4	406	884	11857	4688	8671	6349	10436
A06	5.6	389	856	10761	4518	7709	6061	9100
A07	6.4	447	919	14166	4808	10025	6667	12646
A08	5.6	412	887	12198	4688	8791	6349	10581
A09	6.8	446	986	13821	4747	9752	6508	12028
A10	6.0	415	983	12808	4630	8642	6400	10835
Media aritmética	5.60	417	906	12694	4685	9011	6355	10891
Desviación estándar	1.07	21	46.8	1228	123	867	196	1132
Coeficiente de variación	0.19	0.05	0.05	0.10	0.03	0.10	0.03	0.10
Duchata	A /	-	ſ	Ent	Vaa	Ess	V	Ene
Probeta	A/cm	ρ	f	Evt	Voe	Eoe	Vus	Eus
Probeta	A/cm	ρ kg/m ³	f Hz	Evt MPa	Voe m/s	Eoe MPa	Vus m/s	Eus MPa
Probeta B01	A/cm	ρ kg/m ³	<i>f</i> Hz 874	Evt MPa	Voe m/s	Eoe MPa 7803	Vus m/s	Eus MPa
Probeta B01 B02	A/cm 3.6 3.2	ρ kg/m ³ 384 406	<i>f</i> Hz 874 883	Evt MPa 10950	Voe m/s 4573 4630	Eoe MPa 7803 8453	Vus m/s 6349 6349	Eus MPa 9868 10430
Probeta B01 B02 B03	A/cm 3.6 3.2 1.8	ρ kg/m ³ 384 406 388	f Hz 874 883 875	Evt MPa 10950 11819 11177	Voe m/s 4573 4630 4808	Eoe MPa 7803 8453 8702	Vus m/s 6349 6349 6452	Eus MPa 9868 10430 10281
Probeta B01 B02 B03 B04	A/cm 3.6 3.2 1.8 3.2	ρ kg/m ³ 384 406 388 398	f Hz 874 883 875 871	Evt MPa 10950 11819 11177 11312	Voe m/s 4573 4630 4808 4688	Eoe MPa 7803 8453 8702 8484	Vus m/s 6349 6349 6452 6452	Eus MPa 9868 10430 10281 10543
Probeta B01 B02 B03 B04 B05	A/cm 3.6 3.2 1.8 3.2 2.0	ρ kg/m ³ 384 406 388 398 405	f Hz 874 883 875 871 750	Evt MPa 10950 11819 11177 11312 8520	Voe m/s 4573 4630 4808 4688 4076	Eoe MPa 7803 8453 8702 8484 6525	Vus m/s 6349 6349 6452 6452 5556	Eus MPa 9868 10430 10281 10543 7952
Probeta B01 B02 B03 B04 B05 B06	A/cm 3.6 3.2 1.8 3.2 2.0 3.2	ρ kg/m ³ 384 406 388 398 405 378	f Hz 874 883 875 871 750 809	Evt MPa 10950 11819 11177 11312 8520 9274	Voe m/s 4573 4630 4808 4688 4076 4121	Eoe MPa 7803 8453 8702 8484 6525 6238	Vus m/s 6349 6349 6452 6452 5556 5634	Eus MPa 9868 10430 10281 10543 7952 7649
Probeta B01 B02 B03 B04 B05 B06 B07	A/cm 3.6 3.2 1.8 3.2 2.0 3.2 3.2 3.6	ρ kg/m ³ 384 406 388 398 405 378 403	f Hz 874 883 875 871 750 809 890	Evt MPa 10950 11819 11177 11312 8520 9274 11957	Voe m/s 4573 4630 4808 4688 4076 4121 4808	Eoe MPa 7803 8453 8702 8484 6525 6238 9044	Vus m/s 6349 6452 6452 5556 5634 6452	Eus MPa 9868 10430 10281 10543 7952 7649 10684
Probeta B01 B02 B03 B04 B05 B06 B07 B08	A/cm 3.6 3.2 1.8 3.2 2.0 3.2 3.6 2.8	ρ kg/m ³ 384 406 388 398 405 378 403 430	f Hz 874 883 875 871 750 809 890 862	Evt MPa 10950 11819 11177 11312 8520 9274 11957 11989	Voe m/s 4573 4630 4808 4688 4076 4121 4808 4518	Eoe MPa 7803 8453 8702 8484 6525 6238 9044 8520	Vus m/s 6349 6349 6452 6452 5556 5634 6452 6061	Eus MPa 9868 10430 10281 10543 7952 7649 10684 10057
Probeta B01 B02 B03 B04 B05 B06 B07 B08 B09	A/cm 3.6 3.2 1.8 3.2 2.0 3.2 3.6 2.8 3.6 2.8 3.6	ρ kg/m ³ 384 406 388 398 405 378 403 403 430 394	f Hz 874 883 875 871 750 809 890 862 891	Evt MPa 10950 11819 11177 11312 8520 9274 11957 11989 11653	Voe m/s 4573 4630 4808 4688 4076 4121 4808 4518 4747	Eoe MPa 7803 8453 8702 8484 6525 6238 9044 8520 8616	Vus m/s 6349 6349 6452 6452 5556 5634 6452 6061 6452	Eus MPa 9868 10430 10281 10543 7952 7649 10684 10057 10442
Probeta B01 B02 B03 B04 B05 B06 B07 B08 B09 B10	A/cm 3.6 3.2 1.8 3.2 2.0 3.2 3.6 2.8 3.6 2.0	ρ kg/m ³ 384 406 388 398 405 378 405 378 403 430 394 396	f Hz 874 883 875 871 750 809 890 862 891 941	Evt MPa 10950 11819 11177 11312 8520 9274 11957 11989 11653 11282	Voe m/s 4573 4630 4808 4688 4076 4121 4808 4518 4747 4747	Eoe MPa 7803 8453 8702 8484 6525 6238 9044 8520 8616 8659	Vus m/s 6349 6349 6452 6452 5556 5634 6452 6061 6452 6295	Eus MPa 9868 10430 10281 10543 7952 7649 10684 10057 10442 9991
Probeta B01 B02 B03 B04 B05 B06 B07 B08 B09 B10 B10 B05 B10 B05 B06 B07 B08 B09 B10 B08 B09 B10 B05 B07 B08 B09 B10 B05 B06 B07 B08 B09 B10 B07 B08 B09 B10 B07 B08 B09 B10 B08 B09 B10 B07 B08 B09 B10 B08 B09 B09 B10 B08 B09 B09 B10 B08 B09 B09 B10 B08 B09 B08 B09 B09 B10 B08 B09 B08	A/cm 3.6 3.2 1.8 3.2 2.0 3.2 3.6 2.8 3.6 2.0	ρ kg/m ³ 384 406 388 398 405 378 405 378 403 430 394 396	f Hz 874 883 875 871 750 809 890 862 891 941	Evt MPa 10950 11819 11177 11312 8520 9274 11957 11989 11653 11282	Voe m/s 4573 4630 4808 4688 4076 4121 4808 4518 4747 4747	Eoe MPa 7803 8453 8702 8484 6525 6238 9044 8520 8616 8659	Vus m/s 6349 6349 6452 6452 5556 5634 6452 6061 6452 6295	Eus MPa 9868 10430 10281 10543 7952 7649 10684 10057 10442 9991
Probeta B01 B02 B03 B04 B05 B06 B07 B08 B09 B10 Media aritmética	A/cm 3.6 3.2 1.8 3.2 2.0 3.2 3.6 2.8 3.6 2.0 3.99	ρ kg/m ³ 384 406 388 398 405 378 403 403 430 394 396 407	f Hz 874 883 875 871 750 809 890 862 891 941 873	Evt MPa 10950 11819 11177 11312 8520 9274 11957 11989 11653 11282 11475	Voe m/s 4573 4630 4808 4688 4076 4121 4808 4518 4747 4747 4747	Eoe MPa 7803 8453 8702 8484 6525 6238 9044 8520 8616 8659 8384	Vus m/s 6349 6349 6452 6452 5556 5634 6452 6061 6452 6295 6205	Eus MPa 9868 10430 10281 10543 7952 7649 10684 10057 10442 9991 10131
Probeta B01 B02 B03 B04 B05 B06 B07 B08 B09 B10 Media aritmética Desviación estándar	A/cm 3.6 3.2 1.8 3.2 2.0 3.2 3.6 2.8 3.6 2.0 3.99 1.89	ρ kg/m³ 384 406 388 398 405 378 403 430 394 396 407 23	f Hz 874 883 875 871 750 809 890 862 891 941 873 61.6	Evt MPa 10950 11819 11177 11312 8520 9274 11957 11989 11653 11282 11475 1636	Voe m/s 4573 4630 4808 4688 4076 4121 4808 4518 4747 4747 4571 267	Eoe MPa 7803 8453 8702 8484 6525 6238 9044 8520 8616 8659 8384 985	Vus m/s 6349 6349 6452 6452 5556 5634 6452 6061 6452 6295 6205 343	Eus MPa 9868 10430 10281 10543 7952 7649 10684 10057 10442 9991 10131 1264

Cuudo 1. Resultados para madera de $noves sp., cundados n y D. Ch = 10.25 /$
--

Velocidad y módulo de elasticidad en ondas de esfuerzo

Los valores promedio de la velocidad de las ondas de esfuerzo en la madera de calidad A, fue 1.02 veces mayor que la velocidad correspondiente a la madera de calidad B.

Los valores de la media aritmética de los módulos de elasticidad en ondas de esfuerzo de la madera de calidad A, fueron 1.07 veces mayores que los valores correspondientes a los de los módulos de la madera de calidad B (ver Figura 4).

Velocidad y módulo de elasticidad en ultrasonido

Los valores medios de la velocidad del ultrasonido en la madera de calidad A, fueron 1.02 veces mayor que la velocidad del ultrasonido correspondiente a la madera de calidad B.

Los valores promedio de los módulos de elasticidad en ultrasonido de la madera de calidad A, fueron 1.07 veces mayores que los valores correspondientes a los de los módulos de la madera de calidad B (ver Figura 4).



Figura 4. Variación de los valores promedio de los módulos de elasticidad entre dos calidades de madera y diferentes métodos de determinación. Evt: Módulo de elasticidad de la madera en vibraciones transversales (MPa); Eoe: Módulo de elasticidad de la madera en ondas de esfuerzo (MPa); Eus: Módulo de elasticidad de la madera en ultrasonido (MPa).

A manera de corolario, se infiere que la madera de calidad A tuvo indicadores superiores dinámicos y de resistencia a los de la madera de calidad B. Parece ser que el incremento del número de anillos por centímetro, y en consecuencia un incremento en la densidad de la madera, resulta en más altas frecuencias naturales, velocidades de onda y módulos de elasticidad correspondientes.

Por ejemplo, una ganancia relativa de 2% en la densidad, resultará en un aumento del 7% en el valor de los módulos de elasticidad por ondas de esfuerzo y por ultrasonido: Para una muestra de madera de una especie en particular, la densidad es un indicador confiable para valorar los parámetros dinámicos estudiados en esta investigación.

CONCLUSIONES

Los métodos no destructivos de vibraciones transversales, ondas de esfuerzo y ultrasonido, permitieron la caracterización dinámica de la madera de *Abies* sp.

Para la madera de *Abies* sp., estudiada en esta investigación, un número mayor de anillos por centímetro, reflejó un incremento en su densidad. El incremento de los valores promedio de esta característica tecnológica de la madera, incrementó proporcionalmente los valores medios de los módulos de elasticidad en vibraciones transversales, por ondas de esfuerzo y por ultrasonido.

REFERENCIAS

Barajas Morales, J.; León Gómez, C. 1984. Anatomía de maderas de México: Especies de una selva caducifolia. Instituto de Biología. Publicaciones especiales 1. Universidad Nacional Autónoma de México.

Beall, F.C. 2002. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology*. (36):197-212.

Booker, R.E.; Froneberg, J.; Collins, F. 1996. Variation of sound velocity and dynamic Young's modulus with moisture content in the three principal directions. In: Proceedings of 10th International Symposium on Non-Destructive Testing of Wood. Switzerland. pp:279-295.

Bucur, V. 1995. Acoustics of Wood. CRC Press. USA.

Conceptsboisstructure. 2004. Sylvatestduo user manual. France.

Echenique Manrique, R.; Becerra Martínez, J. 1972. Algunas características físico-mecánicas de la madera de tres especies de la cordillera neo-volcánica. Nota Técnica Número 27. INIF. México.

Gerhards, C.C. 1975. Stress wave speed and MOE of sweetgum ranking from 150 to 15 percent moisture content. *Forest Products Journal*. 25(4):51-57.

Gerhards, C.C. 1982. Longitudinal stress wave for lumber stress grading: factors affecting applications: state of the art. *Forest Products Journal*. 32(2):20-25.

Görlacher, R. 1984. Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des E-modulus von Holz. *Holz als Roh-und Werkstoff.* (42):212-222.

Guridi Gómez, L.I.; García López, A. 1997. Las maderas en los instrumentos musicales de cuerda de Paracho. Secretaría de Difusión Cultural. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Gutiérrez Carvajal, L.; Dorantes López, J. 2007. Especies forestales de uso tradicional del Estado de Veracruz. Comisión Forestal Nacional - Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-Universidad de Veracruz 2003-2004. México.

Haines, D.W.; Leban, J.M.; Herbé, C. 1996. Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood Science and Technology*. 30:253-263.

Hernández Maldonado, S.A. 2010. Comportamiento elástico de la madera. Teoría y aplicaciones. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Ilic, J. 2001. Relations among the dynamic and static elastic properties of air-dry Eucalyptus delegatensis R. Baker. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 59:169-175.

James, W.L. 1961. Effect of temperature and moisture content on: Internal Friction and Speed of Sound in Douglas-fir. *Forest Products Journal*. 11(9):383-390.

James, W.L.; Boone, R.S.; Galligan, W.L. 1982. Using speed of sound in wood to monitor drying in a kiln. *Forest Products Journal*. 32(1):27-34.

Kawamoto, S.; Williams, R.S. 2002. Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood-Based Composites – A Review. Gen. Tech. Rep. FPL-GRT-134. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA.

Lemmens, J.W. (sin fecha). Operating Instructions for the GrindoSonic MK5 "Industrial" Instrument. J.W. Lemmens, Inc. USA.

Metriguard Inc. 1998. Metriguard Model 239A Maintenance & Operation Manual. Metriguard Inc. USA.

Nakai, T.; Tanaka, T.; Nagao, H. 1991. Nondestructive Evaluation of Bending Properties of Flat Square Sawn Timber. In: Proceedings of the 1991 International Timber Engineering Conference. Volume 2. United Kingdom. pp: 2.236-2.241.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA.

Romero Amaya, C.; De la Paz Pérez Olvera, C.; Corral López, G. 1982. Características anatómicas y físicomecánicas de ocho especies de coníferas de Baja California Norte. Boletín Técnico Número 57. INIF. México.

Ross, R.J.; Pellerin, R.F. 1991. NDE of green material with stress wave: preliminary results using dimension lumber. *Forest Products Journal*. 41(6):57-59.

Sakai, H.; Minamisawa, A.; Takagi, K. 1990. Effect of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in woods. *Ultrasonics*. 28(November):382-385.

Sandoz, J.L. 1993. Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood Science and Technology*. 27:373-380.

Smulski, S.J. 1991. Relationship of Stress Wave and Static Bending Determined Properties of Four Northeastern Hardwoods. *Wood and Fiber Science*. 23(1):44-57.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2005. Características mecánicas y clasificación de 150 especies de maderas Mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. UMSNH. 1(1):3-22. México.

10. HIGROSCOPÍA Y ANISOTROPÍA DE LA MADERA DE PINUS MICHOACANA, PINUS DOUGLASIANA Y PINUS PRINGLEI. Higrocontracción, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad dinámico.

INTRODUCCIÓN

La madera es un material higroscópico, elástico y plástico. Estas tres propiedades físicas e intrínsecas del material revelan un carácter anisotrópico y están íntimamente relacionadas entre si. Es decir, las propiedades elásticas y plásticas varían proporcionalmente a la variación del contenido de humedad en la madera.

La madera es un material higroscópico porque puede retener y liberar masa de agua, tanto a nivel intermolecular, como entre su estructura anatómica. Este fenómeno se da preferentemente en el dominio higroscópico de la madera, el cual va desde un contenido de humedad nulo, donde el peso de la madera corresponde únicamente al de la substancia lignocelulosica, hasta el contenido de humedad congruente con el punto de saturación de la fibra, es decir, aproximadamente un intervalo entre 28% y 32% en relación al peso seco de la masa de la madera.

La madera es un material plástico porque su geometría puede deformarse de manera permanente y sin perder sus propiedades de continuidad material. Este fenómeno es el resultado de la aparición de deformaciones que exceden su capacidad de distorsión elástica.

En el caso que nos ocupa, la plasticidad de la madera es una expresión, por una parte, y a nivel molecular, de la dislocación permanente de sus componentes químicos. Por otra parte, la deformación plástica de la madera se observa en la deformación permanente de su estructura anatómica a nivel celular y al de sus tejidos de crecimiento.

El fenómeno de higroplastificación de la madera se relaciona con la variación de su contenido de humedad. Este estado puede detallarse desde dos perspectivas: una deformación permanente, es decir plástica, cuando varía el contenido de humedad entre dos estados higroscópicos, y desde otra perspectiva, como una deformación reversible, es decir elástica, la cual es posible una vez que la madera recupera su estado de humedad inicial.

En otras palabras, cuando el contenido de humedad en la madera disminuye en el dominio higroscópico, su geometría se contrae y aparece el fenómeno de higrocontracción. En contraste, sí la madera recupera su estado higroscópico inicial, es decir, su contenido de humedad se incrementa, su geometría puede dilatarse hasta recobrar su aspecto original, revelando el fenómeno de higroexpansión.

Estos fenómenos citados manifiestan magnitudes diferentes según la dirección de observación. Es decir, la variación dimensional de la madera tiene un carácter anisotrópico.

La expresión más notoria de las propiedades elásticas de la madera es su capacidad para almacenar energía. Por ejemplo, la facultad de la madera sólida para transmitir y propagar ondas mecánicas, tales como el ultrasonido.

Al igual que sus propiedades de variación dimensional de la madera, las características derivadas de su comportamiento elástico, están relacionadas con su carácter higroscópico y de acuerdo con la dirección de observación. Estas direcciones privilegiadas son las direcciones radial, tangencial y longitudinal en el plano leñoso.

Siempre en el dominio higroscópico, la magnitud de sus indicadores elásticos disminuye general y proporcionalmente con la presencia de masa de agua entre los espacios intermoleculares e intracelulares. Es decir, el agua tiene un efecto de plastificación en la madera. Conjuntamente, el valor de su módulo de elasticidad, varía de acuerdo con la dirección de observación. Este carácter anisotrópico es congruente con otras expresiones mecánicas de la madera. Entre otras, su variación dimensional y su capacidad para transmitir ondas de ultrasonido.

En el caso de las maderas gimnospermas, por ejemplo las del género *Pinus*, es importante considerar sus propiedades higroscópicas, elásticas y plásticas en su función estructural. Por ejemplo, en la concepción de conexiones que transmiten fuerzas o disipan energía, y en la fabricación de madera reconstituida o de madera de Ingeniería.

Bajos índices de higrocontracción mantienen estable la estructura interna de materiales compuestos y/o reconstituidos de madera. Además, las características elásticas proporcionan rigidez a las estructuras diseñadas con madera. Igualmente, la capacidad para transmitir ondas de ultrasonido a través de su estructura, pondera la capacidad de la madera como material aislante o de resonancia, según los fines de diseño.

Finalmente, la variación dimensional de la madera es una de las variables más importantes a controlar durante el proceso de secado y de su acondicionamiento. Esto con el fin de evitar defectos como la distorsión de la geometría de las piezas comerciales de madera.

Sobre la variación dimensional de la madera

La variación dimensional de la madera es una propiedad que influye en el comportamiento mecano-sorcivo del material (Grossman, 1976; Ishimaru y col., 2001a y 2001b; Ormarsson y col., 1998, 1999 y 2000). Por otra parte, cuando el contenido de humedad de la madera varía debido al contexto ambiental, sus características tecnológicas y de Ingeniería, utilizadas para el diseño y cálculo de estructuras deben ajustarse a las condiciones reales de servicio (Meyer y Kellogg, 1982).

La variación dimensional de la madera ocasionada por la disminución en su contenido de humedad, ha sido estudiada entre otros autores por: Brown y col. (1952), Stamm (1964), Kollmann y Côté (1968), Siau (1984), Skaar (1988), Bodig y Jayne (1982), Haygreen y Bowyer (1996) y Walker (2006). Sus observaciones indican que la madera se contrae proporcionalmente a la disminución de su contenido de humedad, este fenómeno se observa en el intervalo comprendido entre el punto de saturación de la fibra y el estado anhidro de la madera. Para valores de contenido de humedad mayores al punto de saturación de la fibra, la contracción de la madera es nula aunque varíe su contenido de humedad. Estos autores concluyen que los valores de las contracciones direccionales presentan una importante anisotropía: para la dirección tangencial, la contracción de la madera puede ser hasta dos veces el valor de la contracción en la dirección radial. Además la contracción en la dirección longitudinal es mucho menor.

A nivel microanatómico, Yamamoto (1999), Yamamoto y col. (2001), Yamamoto y Kojima (2002) y Kojima y Yamamoto (2004), consideran que la causa del encogimiento anisótropico de la madera durante la desorción de agua, puede ser ocasionada por la interacción entre el entramado de las microfibrillas de celulosa y la matriz de lignina-hemicelulosas. Esta aseveración esta basada en la hipótesis de la matriz reforzada propuesta por Barber y Meylan (1964). Varios investigadores adoptaron esta hipótesis y desarrollaron sus propios modelos para la contracción de la madera a nivel microanatómico: Barber (1968), Barrett y col. (1972), Cave (1972a, 1972b y 1976) y Koponen y col. (1989).

A nivel tejido celular, Ylinen y Jumppanen (1967), plantean para el estudio de la contracción de la madera un modelo para cada anillo de crecimiento, como un compósito formado de láminas alternadas de madera temprana y tardía. Este modelo conforma un sistema indeterminado con dos redundantes. Las redundantes son las fuerzas cortantes que actúan en el límite entre las capas de madera temprana y tardía en las direcciones longitudinal y tangencial de un modelo material cilíndrico. Los autores proponen que resolviendo estos sistemas indeterminados se puede conocer el estado de esfuerzo y deformación de cualquier elemento de madera y en consecuencia se puede determinar el esfuerzo y el encogimiento en las direcciones radial, tangencial y longitudinal.

Tauchert y Hsu (1977), generalizan el modelo de Ylinen y Jumppanen (1967) al estudiar la contracción de la madera como un material multicapas con un modelo cilíndrico. Los autores consideran simultáneamente tres causas del esfuerzo de contracción en la madera: simetría cilíndrica, heterogeneidad del material y distribución no uniforme del contenido de humedad en la madera durante el secado.

Zobel y Sprague (1998) subrayan el efecto de la presencia de madera juvenil en las características de calidad de la madera, particularmente en el proceso de secado. Por ejemplo, la madera juvenil denota higrocontracciones inusuales mayores en la dirección longitudinal.

Las propiedades físicas de la madera son determinadas por cinco factores inherentes a su organización estructural (Panshin y de Zeew, 1964):

1. La cantidad de substancia presente en la pared celular en un volumen dado de madera.

2. La cantidad de agua presente en la pared celular.

3. La composición proporcional de los componentes primarios de la pared celular así como la cantidad y naturaleza de las substancias extraíbles presentes.

4. El acomodo y la orientación de los materiales de la pared celular en las células y en los tejidos.

5. El tipo, tamaño, proporción y acomodo de las células que conforman el tejido leñoso.

El primer factor es medido por la gravedad específica de la madera y proporciona el índice más útil para predecir el comportamiento físico de la madera. El segundo factor afecta profundamente el comportamiento físico de la madera, no solo a causa de que la adición de agua en la pared celular cambia su densidad y dimensiones, sí no por el efecto de plasticidad y la transferencia de energía al interior de una pieza de madera. El tercer factor está relacionado con varias propiedades particulares de ciertos tipos de madera y la variación en el comportamiento cuantitativo esperado. Los dos últimos factores son la causa de grandes diferencias encontradas en la respuesta física de la madera con respecto a la orientación de la fibra o a la "dirección del grano", es decir, la propiedad de anisotropía de la madera.

La variación dimensional de un volumen dado de materia leñosa, es decir, de madera sólida, puede explicarse por el hecho de que la adición de masa de agua o de otro líquido polar a la pared celular provoca que la red micro fibrilar se expanda proporcionalmente a la cantidad de fluido que se adiciona. Este proceso continúa hasta que se alcanza el punto de saturación de la fibra de la madera. El incremento de agua en la madera no produce ningún cambio en el volumen de la substancia de la pared celular, dado que, el agua adicional, por arriba de este nivel, se concentra en el lumen celular. Por el contrario, si se remueve la humedad de la pared celular, por abajo del punto de saturación de la fibra, se provoca el fenómeno de encogimiento o contracción de la madera, relacionado con la disminución del contenido de humedad en el material. Es decir, el fenómeno de higrocontracción de la madera.

Los cambios dimensionales que ocurren en la madera no son únicamente función de la cantidad de agua presente en la madera, lo son también en relación a la cantidad de substancia en la pared celular. En general, el encogimiento y la expansión de la madera aumentan relativamente al incremento de su densidad.

Excepcionalmente, la presencia alta de fracciones de lignina en la pared celular puede reducir la variación dimensional, particularmente en la dirección longitudinal de la madera.

Es importante señalar que el fenómeno de expansión de la madera no es un proceso recíproco al de contracción, dado que son calculados en dos bases diferentes de referencia: el encogimiento se refiere a la dimensión en estado saturado a un contenido de humedad inicial mayor y la expansión se refiere el estado anhidro o a un contenido de humedad menor de la madera.

El fenómeno de anisotropía en el proceso de higrocontracción de la madera es verificado por la desproporción de la variación, según las tres dimensiones estructurales de la madera:

radial, tangencial y longitudinal. Retomando las conclusiones de Barber y Meylan (1964), Barber (1968), Frey-Wyssling (1968) y Meylan (1968), citados por Panshin y de Zeew (1964), la variación diferencial entre las direcciones radial y tangencial puede ser explicada por los siguientes argumentos:

La pared celular de la madera consiste en microfibrillas de alta resistencia a la tensión según su eje longitudinal y que actúan como refuerzo. Estas microfibrillas están embebidas en una matriz amorfa, constituida esencialmente por lignina y hemicelulosas. Sí se adiciona o se remueve masa de agua, las microfibrillas varían muy poco a lo largo y poco lateralmente. Al mismo tiempo, la matriz tiende a cambiar sus dimensiones de manera más o menos proporcional en todas sus dimensiones, pero en una proporción mayor a la de las microfibrillas. El refuerzo de las microfibrillas deforma la matriz y produce deformaciones a lo ancho, largo y en el espesor de la pared celular, ocasionando de esta forma pequeños cambios en la dirección longitudinal pero considerables cambios dimensionales laterales.

La magnitud de los cambios dimensionales según las componentes longitudinal y transversales de la pared celular son función, por una parte, de las propiedades mecánicas de los componentes de la pared celular, es decir, de la proporción entre el módulo de elasticidad de las microfibrillas y del módulo de rigidez de la matriz lignina-hemicelulosas, para un contenido de humedad particular de la madera, así como del largo de las microfibrillas y del coeficiente de fricción de la matriz.

Por otra parte, la mayoría de las células en la madera están ordenadas con sus ejes longitudinales en la dirección longitudinal de la madera, es decir, en la dirección paralela al grano o al eje de crecimiento del árbol. Por lo tanto y en base a las consideraciones anteriores, el cambio dimensional en la dirección longitudinal es mucho menor que la variación dimensional en las direcciones transversales de la madera, a saber: radial y tangencial, cuando un cambio en el contenido de humedad ocurre.

Varias teorías han sido desarrolladas para explicar la anisotropía en la higrocontracción de la madera. De acuerdo con Hale (1957) e Ylinen y Jumppanen (1967), la razón que podría explicar la diferencia entre los cambios dimensionales en las direcciones radial y tangencial esta fundamentada en la desigualdad del espesor de la pared celular y en la diferente orientación de las capas celulares entre la madera temprana y tardía que forman una capa de crecimiento de la madera. Las células de madera temprana con sus paredes delgadas tienen un porcentaje relativamente bajo de la capa S2 y los cambios en dimensión lateral son afectados considerablemente por el bajo ángulo de la orientación micro fibrilar de las capas S1 y S3 de la pared celular.

Como resultado, la madera temprana tiene mucho menos contracción transversal que la madera tardía. Los cambios dimensionales transversales en las direcciones radial y tangencial son entonces el resultado de la diferencia en la cantidad y en la estructura de la pared celular entre la madera temprana y la tardía. La contracción tangencial es controlada principalmente en la madera tardía, dado que esta sección de un tejido de crecimiento es lo suficientemente fuerte para forzar a la madera temprana a ajustarse al fenómeno.

La dimensión radial varia, por otro lado, debido a la suma ponderada de las contribuciones de cada sección de un incremento anual. Es decir, la contracción radial es menor que la tangencial por la presencia limitada de la componente de la contracción de la madera temprana en un anillo de crecimiento. Para explicar la diferencia entre las higrocontracciones radial y tangencial, esta "teoría laminar" es interpretada en términos matemáticos y con una razonable precisión por Ylinen y Jumppanen (1967), particularmente para madera del género *Pinus*.

Caso excepcional son las contracciones en la madera temprana del género *Quercus*, en la cual, la relación radial tangencial de las higrocontracciones se aproxima excepcionalmente a la unidad. El factor que puede explicar la diferencia entre las contracciones radial y tangencial es la presencia de radios en el plano leñoso, los cuales restringen la madera temprana, la cual es relativamente más débil y reduce así su cambio dimensional en la dirección radial. Este fenómeno ha sido estudiado por Panshin y de Zeew (1964), en maderas que exhiben radios largos y paredes relativamente delgadas en el tejido longitudinal. En madera de coníferas, donde los radios son pequeños, al igual que en maderas duras, donde los rayos son pequeños y la pared celular es gruesa y rígida, la influencia de los rayos es mínima.

Desde una perspectiva más práctica, Haygreen y Bowyer (1996) proponen que la variación de las higrocontracciones entre diferentes especímenes de una misma especie y bajo las mismas condiciones de ensayo, resulta principalmente de tres factores:

- El tamaño y forma de la pieza de madera. Estas variables están relacionadas con la dirección de la fibra y la uniformidad en la distribución del contenido de humedad en la sección transversal de una pieza de madera aserrada.

- La densidad del espécimen. A mayor densidad de la madera, su higrocontracción se incrementará proporcionalmente.

- La velocidad con la cual el espécimen se seca.

En México, entre otros autores que han estudiado el fenómeno de la higrocontracción en la madera se puede citar a: Echenique Manrique y Díaz Gómez (1969), Bárcenas Pazos y Dávalos Sotelo (2001) y Herrera Ferreyra (1992). Estos investigadores proporcionan valores de higrocontracciones para la madera de especies mexicanas, entre otras, para las especies motivo de este estudio: *Pinus douglasiana, Pinus michoacana y Pinus pringlei*.

Ricalde y Bárcenas (1989) discuten el origen estructural de la variación dimensional de la madera y definen su contracción en función de la disminución de las dimensiones de la madera seca, en relación a sus dimensiones cuando la madera está húmeda.

Fuentes Talavera y col. (2002) estudian el comportamiento higroscópico de la madera de *Persea americana* var. *guatemalensis* Mill (Hass). Entre otros parámetros, los autores determinan la contracción máxima y la anisotropía de la contracción en las direcciones radial

y tangencial. Fuentes Talavera y col. enfatizan en el carácter anisotrópico de las contracciones de la madera y en los diferentes intervalos del dominio higroscópico en los cuales se observa el fenómeno en la especie en estudio.

A manera de síntesis de los trabajos revisados, se puede decir que existen los argumentos teóricos que explican el fenómeno de la variación dimensional de la madera ocasionada por la disminución de su contenido de humedad. Existen además, estudios que proporcionan valores para las contracciones direccionales y sus coeficientes correspondientes para diferentes especies comerciales en México y en los Estados Unidos de América (Forest Products Laboratory, 1999).

Las experiencias fueron realizadas generalmente con contenidos de humedad extremos. No existe un estudio que observe el fenómeno de la contracción de la madera de manera secuencial durante todo su proceso de secado. Los estudios revisados fueron específicamente realizados sobre el fenómeno de la higrocontracción de la madera. No se encontraron investigaciones que relacionen las contracciones con algún otro parámetro mecánico del material, como por ejemplo, sus módulos de elasticidad.

Sobre el ultrasonido en la madera

La técnica de ultrasonido y la caracterización mecánica de la madera han sido estudiadas por varios investigadores, entre otros por: Gerhards (1975), James (1961), James y col. (1982), Bucur (1995), Beall (2002), Kawamoto y Williams (2002) y Pellerin y Ross (2002). Estos investigadores concluyen que las ondas ultrasónicas y acústicas pueden viajar a través de la madera; y a partir del cálculo de su velocidad, el material puede ser caracterizado respecto a su anisotropía y a sus propiedades mecánicas. Además, los autores recomiendan el uso de pruebas por ultrasonido para determinar el módulo de elasticidad de la madera.

Mishiro (1995) estudia el efecto del gradiente de humedad para diferentes contenidos de humedad de la madera sobre la velocidad del ultrasonido en probetas de pequeñas dimensiones (R = 30 mm, T = 20 mm, L = 50 mm) en las especies de *Chamaecyparis obtusa* ($\rho = 0.340 \text{ g/cm}^3$) y de *Fagus crenata* ($\rho = 0.620 \text{ g/cm}^3$). El autor concluye que para el cálculo de la velocidad de transmisión de las ondas de ultrasonido cuando el gradiente de humedad está alineado en paralelo a la dirección de transmisión se puede aplicar la ley de los materiales compósitos en la que se considera cada una de las propiedades de las capas que conforman el material, con una analogía de una estructura con elementos reológicos conectados en paralelo. Igualmente el investigador percibe que para una distribución del gradiente de humedad perpendicular al flujo del ultrasonido, su velocidad en la madera es más dependiente del gradiente a medida que la velocidad aumenta.

Mishiro (1996a) examina en el rango de contenido de humedad de la madera entre 0% y el punto de saturación de la fibra, el efecto del gradiente de humedad en la velocidad del ultrasonido, utilizando probetas de pequeñas dimensiones. Entre sus principales resultados el investigador concluye que para cinco especies latífoliadas y una conífera, la velocidad del ultrasonido aumenta a medida que el contenido de humedad de la madera disminuye. Esta

tendencia es independiente de las direcciones radial y tangencial. Además, el autor observa que el gradiente de humedad presente en la madera, no afecta el valor de la velocidad de transmisión del ultrasonido. Este resultado es aplicable en las tres direcciones del material.

Mishiro (1996b) complementa sus estudios anteriores (Mishiro, 1995 y 1996a) y concluye que para las especies que observó, la velocidad del ultrasonido en un proceso de desorción, se incrementa a partir del punto de saturación de la fibra. Sin embargo, para contenidos de humedad de la madera, mayores al punto de saturación de la fibra, ocasionalmente el fenómeno es inverso. El autor propone que este comportamiento está relacionado con la presencia de agua libre para el estado de humedad superior al punto de saturación de la fibra. Además, Mishiro encontró que en el dominio higroscópico no saturado, las tendencias de la velocidad de ultrasonido *versus* contenido de humedad, difieren cuando son comparadas las direcciones radial y tangencial con la dirección longitudinal.

Arriaga y col. (2006) investigan en varias especies de madera estructural la variación de su rigidez elástica en función del contenido de humedad. Utilizando la tecnología *Sylvatest Duo*® con ultrasonido, sus resultados demuestran que esta técnica es aplicable para estimar el módulo de elasticidad de la madera. Así mismo, los investigadores estiman que si el contenido de humedad de la madera disminuye en porcentaje, en un rango comprendido entre 30% y 5%, la velocidad del ultrasonido en la dirección longitudinal aumenta 0.8% y el módulo de elasticidad aumenta en una proporción del 2% por cada porcentaje de disminución del contenido de humedad.

Kabir y col. (1997) estudian el efecto del contenido de humedad y el ángulo de la fibra respecto a la velocidad del ultrasonido y a la rigidez de la madera de *Hevea brasiliensis*. Los investigadores concluyen que ambos factores afectan substancialmente la velocidad del ultrasonido y en consecuencia del valor de la rigidez de la madera. La dirección longitudinal denotó una mayor velocidad con respecto a las direcciones radial y tangencial. Así mismo, los autores proponen correlaciones estadísticas altas entre la rigidez y el contenido de humedad de la madera.

Simpson (1998) investiga la velocidad del sonido en la madera de *Quercus rubra* y *Acer rubrum* durante su secado. El autor concluye que para la dirección longitudinal de la madera, el tiempo de transmisión del ultrasonido varía por abajo del punto de saturación de la fibra. Sus resultados sugieren que la medición de la velocidad de ultrasonido puede ser utilizada para controlar procesos de secado de la madera.

Kabir y col. (2006) investigan la presencia de zonas húmedas en la madera de especies latífoliadas y concluyen que la transmisión de una onda de ultrasonido se ve afectada entre otros factores, por la cantidad de humedad presente en la madera. De sus resultados, los autores proponen que el tiempo de transmisión del impulso es mayor en madera húmeda en comparación con el de la madera seca. Respecto a la anisotropía de la madera, observaron que la energía utilizada en la dirección longitudinal es menor comparada con la correspondiente a las direcciones radial o tangencial, lo que confirma el comportamiento anisótropico de la madera.

Información sobre las características acústicas y los módulos de elasticidad de las maderas en estudio

Varios estudios anteriores se han realizado sobre las características acústicas y los módulos de elasticidad de las maderas en estudio. Entre otros autores se pueden citar: Echenique Manrique y Díaz Gómez (1969), Herrera Ferreyra (1992), Sotomayor y col. (2002; 2005; 2010) y Villaseñor Aguilar (2007). Sus resultados son presentados en las tablas 1, 2, 3 y 4 como referencia.

Echenique Manrique y Díaz Gómez (1969) presentan datos sobre características mecánicas derivadas de ensayos en flexión estática para las maderas de *Pinus michoacana* y *Pinus douglasiana*, y datos acerca de la contracción de la madera ocasionada por la disminución de su contenido de humedad.

Herrera Ferreyra (1992) proporciona valores de resistencia mecánica y concluye valores para las higrocontracciones para la especie *Pinus pringlei*.

Recientemente, Villaseñor Aguilar (2007), estudió el comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Villaseñor Aguilar en su tesis de maestría, presenta valores de las higrocontracciones y deriva los coeficientes de higrocontracción para el dominio higroscópico de la madera.

Por su parte, Sotomayor Castellanos (2002; 2005), presenta valores de resistencia mecánica y elástica para las tres especies en estudio. Sotomayor y col. (2010), proporcionan valores de la velocidad del ultrasonido y del módulo de elasticidad dinámico derivado, para las tres direcciones de anisotropía de la madera.

Del análisis de la información proporcionada en estas investigaciones, resalta la diferencia en la proporción de los parámetros medidos. Esta variabilidad denota un carácter anisotrópico en el comportamiento higroelástico de la madera. Los datos de estas investigaciones con las maderas mexicanas en estudio, serán utilizados como referencia en el análisis de los resultados de esta investigación.

Información tecnológica de las especies en estudio

Varios autores han estudiado y descrito las especies en estudio. Entre otros se puede citar a: Gomez Nava y col. (1978), Olvera Coronel (1981), Perry (1991), Farjon y Styles (1997), Martínez Sánchez (1999), Cruz de León (2000), Ambriz Parra y col. (2002), García Esteban y col. (2002) y Vázquez Gaviña (2003).

La información proporcionada por estos estudios en relación al tema de estudio, son las características de crecimiento de los árboles, las características anatómicas y datos del análisis químico de las especies de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*.

Las tres especies en estudio tienen un hábitat natural en el estado de Michoacán y las tres pertenecen a la división botánica de las gimnospermas.

Problemática

Los diferentes autores revisados han realizado estudios interesantes sobre las propiedades físicas de la madera de las especies coníferas en estudio. Por ejemplo, la variación dimensional de la madera, la cual está relacionada con la variación de su contenido de humedad.

También estudiaron las propiedades de almacenamiento de energía en condiciones dinámicas, por ejemplo, investigaron la capacidad de la madera para la transmisión del ultrasonido y calcularon el módulo de elasticidad, derivado de la velocidad del ultrasonido y ponderado por su densidad.

Estos estudios fueron efectuados para las tres direcciones privilegiadas de la madera: radial, tangencial y longitudinal.

Con todo, no existen antecedentes sobre la racionalización acerca de la correspondencia significativa entre estas tres propiedades de la madera.

Tampoco existe un estudio que tenga por objeto examinar la variación de estas características y relacionarlas con la variación porcentual del contenido de humedad de la madera.

De acuerdo con Villaseñor Aguilar (2007), el fenómeno de higroelasticidad tiene un carácter lineal en el intervalo higroscópico de la madera comprendido entre 24% y 6% de contenido de humedad. Esta proposición permite enmarcar el rango del fenómeno en estudio.

A partir de la argumentación precedente sobre la relación intrínseca entre estas propiedades elásticas y plásticas y la disminución del contenido de humedad en la madera, se postulan las siguientes preguntas de investigación:

Preguntas de investigación

¿Cómo varían los valores de la densidad, de las higrocontracciones, de la velocidad del ultrasonido y de los módulos de elasticidad cuando disminuye el contenido de humedad de la madera?

¿Cuáles son las proporciones de anisotropía para las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera, particularmente para las higrocontraciones, la velocidad del ultrasonido y los módulos de elasticidad?

Para responder a estas preguntas, se proponen las siguientes hipótesis de trabajo:

HIPÓTESIS

La variación dimensional de las maderas de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*, es de carácter anisotrópico. Es decir, su magnitud varía en relación a la dirección de observación. Para el caso de la madera, la anisotropía puede ser alineada de acuerdo a las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. Esta propiedad es de la forma:

$$\alpha_{\rm R} < \alpha_{\rm T} \gg \alpha_{\rm L}$$

Igualmente, los valores de la velocidad del ultrasonido en las direcciones de anisotropía de la madera siguen la relación:

$$v_R > v_T < v_L$$

Además, los valores de los módulos de elasticidad de las maderas de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana y Pinus pringlei*, presentan una anisotropía de tal manera que:

$$E_R > E_T \ll E_L$$

Por otra parte, para un intervalo higroscópico comprendido entre 18% y 6% de contenido de humedad en la madera:

Los valores de la contracción de la madera α , aumentan a medida que el contenido de humedad disminuye, y esta variación puede cuantificarse por el higrocoeficiente λ . Es decir:

Sí H
$$\uparrow \Rightarrow \lambda \alpha \downarrow$$

La velocidad del ultrasonido y el módulo de elasticidad aumentan si el contenido de humedad de la madera disminuye. Esta variación puede cuantificarse por los higrocoeficientes: ϕ para la velocidad del ultrasonido V, y ψ para el módulo de elasticidad E:

Sí
$$H \downarrow \Rightarrow \phi V \downarrow; \psi E \downarrow$$

Con el propósito de verificar experimentalmente estas hipótesis, la investigación plantea los siguientes objetivos.

OBJETIVOS

Calcular los valores en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, de las higrocontracciones, de las velocidades del ultrasonido y de los módulos de elasticidad dinámicos para las maderas de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*.

Determinar los coeficientes de higrocontraccion y los higrocoeficientes de las velocidades del ultrasonido y de los módulos de elasticidad dinámicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

El material experimental consistió en madera de tres especies gimnospermas: *Pinus michoacana* var. *cornuta* Martínez, *Pinus douglasiana* Martínez y *Pinus pringlei* Shaw. Los árboles fueron recolectados en el municipio de Morelia, en el Estado de Michoacán.

A partir de un ejemplar de cada especie, se recortaron trozas de 2.5 metros de largo, de 40 y 70 centímetros de diámetro. De estas trozas se aserraron secciones de 30 x 30 x 60 centímetros, las cuales fueron almacenadas en agua durante el periodo previo a los trabajos de laboratorio (ver figura 1).

De cada especie, se dimensionaron listones de 7.5 x 7.5 x 60 centímetros, a partir de los cuales se prepararon 41 probetas en forma de cubos de $50 \times 50 \times 50$ milímetros y orientadas en las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L) del plano leñoso. Estas probetas fueron empleadas para las pruebas de anisotropía en las direcciones radial y tangencial.

De otra serie de listones de cada una de las trozas, se elaboraron 33 prismas rectangulares con dimensiones de 20 x 20 x 200 milímetros, correspondientes a las direcciones R, T y L de la madera. Estas últimas probetas se destinaron a las pruebas de anisotropía en la dirección longitudinal. Todas las probetas estuvieron libres de particularidades de crecimiento.

Métodos

La estrategia experimental consistió en observar el proceso de secado de la madera a partir de su condición saturada (H > 30%) hasta su condición anhidra (H = 0%). Durante el intervalo correspondiente al dominio higroscópico (0% < H < 30%). De esta manera, se realizaron 12 mediciones de los parámetros necesarios para el cálculo de las higrocontracciones y de las velocidades del ultrasonido durante el proceso de secado del material. Las mediciones fueron realizadas en las tres direcciones de anisotropía de la madera (ver figura 2). Posteriormente, fueron estimados los módulos de elasticidad de la madera correspondientes a sus direcciones anisotrópicas. Durante el proceso de secado observado, las mediciones de las diferentes velocidades del ultrasonido medidas, se fueron adecuando a medida que las probetas fueron contrayéndose.



Figura 1. Selección y orientación de las probetas.



Figura 2. Diagrama de las pruebas de ultrasonido.

A partir de los datos recolectados en el dominio higroscópico, se calcularon las regresiones lineales entre las diferentes variables estudiadas y la variación del contenido de humedad de la madera. De la pendiente de la recta, se estimaron los valores correspondientes al contenido de humedad de 12%.

A manera de ejemplo, la figura 3a, presenta la dispersión de los valores promedio de las mediciones para la velocidad del ultrasonido en la dirección longitudinal en función de la variación del contenido de humedad de la madera de *Pinus michoacana*. Asimismo, la figura 3b, indica la dispersión de los valores promedio de las mediciones para el módulo de elasticidad en la dirección radial en función de la variación del contenido de humedad de la madera de *Pinus douglasiana*. A partir de regresiones como las presentadas en las figuras 3a y 3b, se estimó la velocidad del ultrasonido, así como el módulo de elasticidad para un contenido de humedad del 12%.



Figura 3. a) Dispersión y correlaciones de los valores de *Pinus michoacana* para la velocidad del ultrasonido longitudinal; b) Dispersión y correlaciones de los valores de *Pinus douglasiana* para el módulo de elasticidad radial.

Esta estrategia se empleó para el análisis de las mediciones respecto a la velocidad del ultrasonido y al módulo de elasticidad para cada una de las tres especies estudiadas. Estos

cálculos comprendieron el intervalo higroscópico entre 20% y 0% de contenido de humedad en la madera.

Contenido de humedad

El contenido de humedad (H) de la madera se determinó por el método de diferencia de pesos: el contenido de humedad correspondiente a cada estado de humedad de la madera se calculó a partir del peso de la probeta que se midió al momento del ensayo, en relación al peso de la madera medido en el estado anhidro de las probetas, es decir, el peso de la probeta en la última sesión de ensayos.

Densidad de la madera

La densidad ρ se refiere a la relación del peso seco de la madera (H = 0%) y el volumen de la madera en estado saturado (H > PSF). Durante el proceso de secado, la densidad (ρ_H) de la madera se calculó directamente de las mediciones del peso (w_H) y del volumen (v_H) al momento de cada prueba, con la relación (Villaseñor Aguilar, 2007):

$$\rho_{\rm H} = \frac{w_{\rm H}}{V_{\rm H}}$$

La variación de la densidad por porciento de contenido de humedad ($\delta \rho$) se calculó con la fórmula:

$$\delta\rho=\frac{\Delta\,\rho}{\Delta\,H}$$

Variación dimensional de la madera

Durante el proceso de secado se midió la variación dimensional de la madera y se calcularon las higrocontracciones radial (α_R), tangencial (α_T), longitudinal (α_L) y volumétrica (α_V). Estos parámetros fueron evaluados para cada estado de contenido de humedad (H) al momento de 14 pruebas, de las cuales 12 fueron al interior del dominio higroscópico de la madera (0 < PSF < 30%).

Las higrocontracciones direccionales de la madera (α_i) se definen como el cociente de la variación dimensional entre la dimensión correspondiente al contenido de humedad inicial (H > PSF) y la final (H = 0%). Las higrocontracciones direccionales se pueden calcular con la siguiente fórmula (Villaseñor Aguilar, 2007):

$$\alpha_i = \frac{\Delta L_i}{L_i}$$

Donde:

 α_i = Higrocontracción de la madera según la dirección i (%).

Para la determinación experimental de la higrocontracción volumétrica de la madera, se procedió con la argumentación propuesta por Skaar (1998) quien retoma el análisis de Greenhill (1936):

La contracción volumétrica de un volumen dado de madera es menor que la suma de sus tres componentes direccionales. La expresión exacta para una probeta con forma de prisma es:

$$\alpha_{\rm V} = 100 \left[1 - (1 - 0.01 \ \alpha_{\rm R}) (1 - 0.01 \ \alpha_{\rm T}) (1 - 0.01 \ \alpha_{\rm L}) \right]$$

es decir:

 $\alpha_{\rm V} = \alpha_{\rm R} + \alpha_{\rm T} + \alpha_{\rm L} - (0.01)(\alpha_{\rm R}\alpha_{\rm T} + \alpha_{\rm T}\alpha_{\rm L} + \alpha_{\rm R}\alpha_{\rm L}) + (0.0001)(\alpha_{\rm R}\alpha_{\rm T}\alpha_{\rm L})$

Donde las higrocontracciones son dadas en porcientos.

Dado que α_L , es pequeño para la madera normal, los términos que se multiplican por este factor son numéricamente insignificantes, aun cuando α_R y α_T sean grandes. Las expresiones anteriores pueden reducirse a:

$$\alpha_{\rm V} = \alpha_{\rm R} + \alpha_{\rm T} + \alpha_{\rm L} - (0.01 \ \alpha_{\rm R} \alpha_{\rm T})$$

Lo cual es suficientemente exacto para los rangos de α_R y α_T encontrados comúnmente para la madera. Sí el último término que involucra el producto ($\alpha_R \alpha_T$) es descartado, el cálculo del la higrocontracción volumétrica se reduce a su forma simple:

 $\alpha_V = \alpha_R + \alpha_T + \alpha_L$

El coeficiente de higrocontracción direccional (λ_i) se define como el cociente de la variación dimensional de la probeta entre la variación porcentual en el contenido de humedad de la madera. El coeficiente de higrocontracción direccional se puede calcular con la fórmula (Villaseñor Aguilar, 2007):

$$\lambda_i = \frac{\Delta \alpha_i}{\Delta H}$$

Donde:

El coeficiente de higrocontracción volumétrico (λ_V) se define como el cociente de la variación del volumen de la probeta entre la variación porcentual en el contenido de humedad de la madera. El coeficiente de higrocontracción volumétrica se puede calcular con la fórmula (Villaseñor Aguilar, 2007):

$$\lambda_V = \ \frac{\Delta \alpha_V}{\Delta H}$$

Donde:

 $\begin{array}{ll} \lambda_V & = \mbox{ Coeficiente de higrocontracción volumétrica de la madera (% \alpha_V / % H).} \\ \Delta \alpha_V & = \mbox{ Variación de la higrocontracción volumétrica de la probeta (% \alpha_V).} \\ \Delta H & = \mbox{ Variación del contenido de humedad de la madera (% H).} \end{array}$

El punto de saturación de la fibra (PSF) se calculó con la relación (Walker, 2006):

$$PSF = \frac{\alpha_V}{\rho}$$

Donde:

 $\begin{array}{lll} PSF & = \mbox{ Punto de saturación de la fibra (\%):} \\ \alpha_V & = \mbox{ Higrocontracción volumétrica de la probeta (\%).} \\ \rho & = \mbox{ Densidad de la madera (gr/cm³).} \end{array}$

Velocidad del ultrasonido

Para cada estado de humedad correspondiente a cada prueba, la velocidad del ultrasonido se calculó directamente de la medición de la distancia (d) y del tiempo (t) de transmisión del ultrasonido (Villaseñor Aguilar, 2007):

$$v_i = \frac{d_i}{t_i}$$

Donde:

- v_i = Velocidad del ultrasonido en la madera según la dirección i (m/s).
- d_i = Dimensión de la probeta en la dirección i (m).
- t_i = Tiempo de transmisión del ultrasonido en la dirección i de la probeta (s)
- i = R,T,L. (Ver figura 1)

Higrocoeficiente de velocidad del ultrasonido

El higrocoeficiente de velocidad del ultrasonido (ϕ_i) se define como el cociente de la variación de la velocidad del ultrasonido en la probeta en la dirección i, entre la variación

porcentual en el contenido de humedad de la madera. El higrocoeficiente de velocidad del ultrasonido se puede calcular con la fórmula:

$$\phi_i = \frac{\Delta v_i}{\Delta H}$$

Donde:

 $\begin{array}{lll} \phi_i & = & Higrocoeficiente de la velocidad del ultrasonido de la madera (m/s/%H). \\ \Delta v_i & = & Variación de la velocidad del ultrasonido de la probeta (m/s). \\ \Delta H & = & Variación del contenido de humedad de la madera (%H). \\ i & = & R,T,L. \end{array}$

Módulos de elasticidad

De la misma manera, para cada estado de humedad correspondiente a cada prueba, los módulos de elasticidad fueron calculados con la relación (Villaseñor Aguilar, 2007):

$$E_i = v_{us}^2 \rho_H$$

Donde:

Higrocoeficiente de elasticidad

El higrocoeficiente de elasticidad (ψ_i) se define como el cociente de la variación del módulo de elasticidad de la probeta en la dirección i, entre la variación porcentual en el contenido de humedad de la madera, y se puede calcular con la fórmula:

$$\psi_i = \frac{\Delta E_i}{\Delta H}$$

Donde:

 ψ_i = Coeficiente de higrocontracción de elasticidad de la madera (MPa/%H).

 ΔE_i = Variación del módulo de elasticidad de la probeta (MPa).

 ΔH = Variación del contenido de humedad de la madera (%H).

El intervalo del contenido de humedad para el cálculo de los higrocoeficientes, de la velocidad del ultrasonido y del módulo de elasticidad fue de: 20% > H > 0%.

RESULTADOS

La tabla 1 presenta las higrocontracciones y los coeficientes de higrocontracción de la madera. También se muestran datos de referencia.

Especie	ρ	δρ	PSF	α _R	α_{T}	α_L	$\alpha_{\rm V}$	λ_R	λ_{T}	$\lambda_{ m L}$
	g/cm ³	g/cm ³ / %H	%	%	%	%	%	% / %H	% / %H	% / %H
Valores experimentales										
Pinus michoacana	0.369	0.00222	28	3.09	6.88	0.28	10.3	0.11	0.25	0.010
Pinus douglasiana	0.367	0.00222	25	2.97	5.90	0.30	9.2	0.12	0.24	0.012
Pinus pringlei	0.471	0.00223	24	3.98	7.14	0.37	11.5	0.17	0.30	0.015
Valores de referencia										
Pinus michoacana Echenique y Díaz (1969)	0.450	-	26	3.65	7.46	-	-	0.14	0.28	-
Pinus douglasiana Villaseñor Aguilar (2007)	0.495	0.00214	26	4.28	8.50	0.29	12.67	0.16	0.31	0.003
Pinus pringlei Herrera Ferreyra (1992)	0.500	-	23	4.70	6.50	0.11	11.3	0.20	0.28	0.005

Tabla 1. Higrocontracciones y coeficientes de higrocontracción.

La tabla 2 enumera los valores de la velocidad del ultrasonido y los higrocoeficientes de velocidad del ultrasonido. La tabla presenta igualmente valores de referencia.

Espacia	ρ	Η	PSF	VR	v_{T}	$v_{\rm L}$	ϕv_R	ϕv_T	ϕv_L
Especie	g/cm ³	%	%	m/s	m/s	m/s / %H	m/s / %H	m/s / %H	m/s / %H
Valores experimentales									
Pinus michoacana	0.369	12	28	1890	1206	5185	10	5	27
Pinus douglasiana	0.367	12	25	1867	1220	5676	18	13	46
Pinus pringlei	0.470	12	24	1707	1330	5137	14	8	21
Valores de referencia									
Pinus michoacana Sotomayor y col. (2010)	0.463	12	26	3663	1080	6518	-	-	-
<i>Pinus douglasiana</i> Sotomayor y col. (2010)	0.405	12	26	1845	1283	5993	-	-	-
<i>Pinus pringlei</i> Sotomayor y col. (2010)	0.580	12	23	2579	1868	6390	-	-	_

Tabla 2. Velocidades del ultrasonido e higrocoeficientes de velocidad del ultrasonido.

La tabla 3 relaciona los módulos de elasticidad y los higrocoeficientes de elasticidad. La tabla presenta igualmente valores de referencia.

Esserie	ρ	Н	PSF	E _R	ET	E_L	ψE_{R}	ψE_{T}	ψE_L	Anillos
Especie	g/cm ³	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa /%H	MPa / %H	MPa /%H	A/cm
Valores experimentales										
Pinus michoacana	0.369	12	28	1583	641	12265	25	8	63	2.6
Pinus douglasiana	0.367	12	25	1522	696	14074	24	8	153	2.4
Pinus pringlei	0.470	12	24	2015	1129	14502	44	15	62	4.6
Valores de referencia										
Pinus michoacana Sotomayor y col. (2010)	0.463	12	26	6949	604	21999	-	-	-	-
Pinus douglasiana Sotomayor y col. (2010)	0.405	12	26	1543	747	16280	-	-	-	-
Pinus pringlei Sotomayor y col. (2010)	0.580	12	23	4315	2265	26495	-	-	-	-

Tabla 3. Módulos de elasticidad e higrocoeficientes de elasticidad.

La tabla 4 muestra las relaciones de anisotropía. Igualmente, se presentan las relaciones de anisotropía estimadas utilizando los valores de referencia de las tablas 1, 2 y 3.

Análisis

Densidad de la madera

La densidad aparente (ρ) de la madera de *Pinus michoacana* y de *Pinus douglasiana* fue menor que la densidad correspondiente a la madera de *Pinus pringlei*. Resultados que coinciden con los datos de los autores referidos en la tabla 1: Echenique y Díaz (1969), Villaseñor Aguilar (2007) y Herrera Ferreyra (1992). Sin embargo, los valores experimentales de la densidad de las tres especies fueron menores comparativamente con los datos de referencia.

La variabilidad de las características mecánicas de las maderas mexicanas puede explicarse principalmente por las diferencias en las particularidades anatómicas propias de cada especie. Conjuntamente, otro factor importante de variación es la diversidad de normas y condiciones de ensayo en que fueron determinadas estas cotas (Sotomayor Castellanos, 2009).

De acuerdo a la clasificación de la TABLA FITECMA (Sotomayor Castellanos, 2002), las maderas de *Pinus michoacana* y de *Pinus douglasiana* se clasifican como de densidad media, y la madera de *Pinus pringlei* se clasifica como de densidad alta.

La variación $\delta \rho$ es similar para las tres especies investigadas. Las dimensiones son proporcionales a los resultados de Villaseñor Aguilar (2007), particularmente para la madera de *Pinus douglasiana*.

ρ (g/cm ³)	α_R	α_{T}	$\alpha_{\rm L}$	VR	v_{T}	v_L	E_R	E _T	E_L
			Valore	es experim	entales				
			Pini	us michoad	cana				
0.369	1	2.23	0.09	1	0.64	2.74	1	0.40	7.75
			Pinı	ıs douglas	iana				
0.367	1	1.99	0.10	1	0.65	3.04	1	0.46	9.25
			P	inus pring	lei				
0.470	1	1.79	0.09	1	0.78	3.01	1	0.56	7.20
	Valores de referencia								
Pinus michoacana									
0.450*	1	2.04	-	-	-	-	-	-	-
0.463**	-	-	-	1	0.29	1.78	1	0.09	3.17
			Pinı	us douglas	iana				
0.450*	1	1.92	-	-	-	-	-	-	-
0.405**	-	-	-	1	0.70	3.25	1	0.48	10.55
Pinus pringlei									
0.500***	1	1.38	-	-	-	-	-	-	-
0.580*	-	-	-	1	0.72	2.50	1	0.53	6.14
 * Echenique Manrique y Díaz Gómez (1969). ** Sotomayor y col. (2010). *** Herrera Ferreyra (1992). 									

Tabla 4. Anisotropía de las contracciones, velocidades y módulos de elasticidad.

ANÁLISIS

Densidad de la madera

La densidad aparente (ρ) de la madera de *Pinus michoacana* y de *Pinus douglasiana* fue menor que la densidad correspondiente a la madera de *Pinus pringlei*. Resultados que coinciden con los datos de los autores referidos en la tabla 1: Echenique y Díaz (1969), Villaseñor Aguilar (2007) y Herrera Ferreyra (1992). Sin embargo, los valores experimentales de la densidad de las tres especies fueron menores comparativamente con los datos de referencia.

La variabilidad de las características mecánicas de las maderas mexicanas puede explicarse principalmente por las diferencias en las particularidades anatómicas propias de cada especie.

Conjuntamente, otro factor importante de variación es la diversidad de normas y condiciones de ensayo en que fueron determinadas estas cotas (Sotomayor Castellanos, 2009).

De acuerdo a la clasificación de la TABLA FITECMA (Sotomayor Castellanos, 2002), las maderas de *Pinus michoacana* y de *Pinus douglasiana* se clasifican como de densidad media, y la madera de *Pinus pringlei* se clasifica como de densidad alta.

La variación $\delta \rho$ es similar para las tres especies investigadas. Las dimensiones son proporcionales a los resultados de Villaseñor Aguilar (2007), particularmente para la madera de *Pinus douglasiana*.

Punto de saturación de la fibra

Los valores del punto de saturación de la fibra (PSF) de las tres especies fueron proporcionales a su densidad y a la higrocontracción volumétrica de la madera, resultado congruente con los argumentos para su cálculo: la higrocontracción volumétrica (α_V) y la densidad (ρ). Este corolario coincide con los datos de los autores referidos en la tabla 1, quienes utilizaron un método similar en sus investigaciones para la determinación del PSF.

Higrocontraciones

Las higrocontracciones medidas presentan una correspondencia con la densidad de la madera. A mayor densidad, la contracción aumenta.

Respecto a los coeficientes de higrocontraccion λ_R , λ_T y λ_L no se observa alguna regularidad con respecto a la densidad.

Los valores de las higrocontracciones de las especies estudiadas son ligeramente menores a los reportados en la bibliografía: Echenique Manrique y Díaz Gómez (1969) Herrera Ferreyra (1992) y Villaseñor Aguilar (2007).

La contracción de la madera sólida, provocada por la disminución de su contenido de humedad al interior de la pared celular, y vista como una deformación permanente, es decir como una deformación plástica, puede ser relacionada con las direcciones de anisotropía de la madera a nivel molecular, de pared celular y de tejido de crecimiento: A nivel molecular, las cadenas holocelulósicas están orientadas preferentemente en la dirección longitudinal de las células. En el caso que nos ocupa, de las traqueidas de forma tubular de la madera de gimnospermas.

A nivel de la pared celular, las microfibrillas están orientadas, -con un ángulo de rotación alrededor del eje longitudinal de las células-, preferentemente en la dirección paralela al sentido de la fibra, es decir, coinciden en la dirección longitudinal que a nivel macroscópico se identifica la dimensión a lo largo del fuste del árbol. Esta dirección privilegiada de la madera, denota una contracción mínima, con respecto a la variación dimensional en las direcciones radial y tangencial.

La tabla 5 presenta la clasificación de las higrocontracciones α_R y α_T y del coeficiente de anisotropía (C.A.). Esta clasificación es de acuerdo con la categorización de la higrocontracción del Instituto Forestal de Oxford (1997), al disminuir –para un intervalo de PSF < H > 0% -, su contenido de humedad del estado verde a un contenido del 0%, citado por Fuentes Talavera y col. (2002), y del Coeficiente de anisotropía propuesto por Ordóñez y col. (1990).

Clasificación	Instituto Fore (19	stal de Oxford 97)	Clasifiancián	Ordóñez y col. (1990)		
Clasificación	$\alpha_{ m R}$	α_{T}	Clasificación	Coeficiente de anisotropía (C.A.)		
Muy pequeña	< 3.0	< 5.0	Muy estable	< 1.5		
Pequeña	3.1 - 4.0	5.1 - 6.5	Estable	1.6 - 2.0		
Moderada	4.1 - 5.0	6.6 - 8.0	Moderadamente estable	2.1 - 2.5		
Ligeramente grande	5.1 - 6.0	8.1 - 9.5	Inestable	2.6 - 3.0		
Grande	> 6.0	> 9.5	Muy inestable	> 3.0		

Tabla 5. Clasificación de las higrocontracciones y del coeficiente de anisotropía (C.A.) de la madera.

La clasificación de α_R , α_T y C.A. para las maderas en estudio se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de las higrocontracciones y del coeficiente de anisotropía (C.A.) de la madera de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*.

Especie	$\alpha_{\rm R}$	Clasificación	$\alpha_{\rm T}$	Clasificación	C.A.	Clasificación
Pinus michoacana	3.09	Pequeña	6.88	Moderada	2.23	Moderadamente estable
Pinus douglasiana	2.97	Muy pequeña	5.90	Pequeña	1.99	Estable
Pinus pringlei	3.98	Pequeña	7.14	Moderada	1.79	Estable

De acuerdo a los resultados (ver tabla 1) y a la clasificación propuesta por Echenique Manrique (1975) para los higrocoeficientes (ver tabla 7), las maderas de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei* califican como madera estables.

1 0	×					
Clasificación	$\lambda_{ m R}$ $\lambda_{ m T}$					
Estable	0.15	- 0.35				
Moderadamente estable	0.36 - 0.55					
No estable	0.56	- 1.00				

Tabla 7. Clasificación para higrocoeficientes de contracción (Echenique y col., 1975).

Respecto a la variación en los resultados de las higrocontracciones, de acuerdo con Panshin y de Zeew (1964), estas varían en función de la posición en el fuste del árbol de donde se extrajeron las probetas. Para la madera juvenil, -alrededor de la médula-, la contracción en la dirección longitudinal es mayor en comparación con cualquier contracción de madera normal y madura con otra localización en el tronco. El fenómeno disminuye a medida que la observación se aleja de la médula y desaparece la madera juvenil. Esta tendencia es

ocasionada por la reducción precipitada del ángulo de las microfibrillas de la pared celular, al incremento en longitud de las células y de su contenido de celulosa.

Igualmente, para la madera madura, tanto en madera de especies gimnospermas como en la de angiospermas, las contracciones radial, tangencial y volumétrica están relacionadas con la densidad de la madera, el largo de las fibras y con el ángulo de sus microfibrillas presentes en las diferentes capas que conforman la pared celular. Todos estos caracteres de crecimiento están relacionados con la posición relativa de la muestra de madera en estudio en el plano leñoso.

Por otra parte, la presencia de sustancia extraíbles libres y su influencia en el encogimiento de la madera, muestran patrones de variación similares al de la densidad de la mayoría de las especies. No obstante, la madera de duramen que contiene compuestos extraíbles, se contrae menos en comparación con la madera de albura, siempre de la misma especie. Esta reducción ocurre cuando las moléculas de los extraíbles son lo suficientemente pequeñas para ocupar los espacios internos en la pared celular y disminuir el espacio libre para la absorción de agua.

De acuerdo a los resultados experimentales, la madera de *Pinus pringlei* es más compacta en comparación con la madera de *Pinus michoacana* y de *Pinus douglasiana*. Sin embargo, comparando las densidades de las especies estudiadas, con la densidad de las maderas de referencia, estas últimas son mayores. En consecuencia, las muestras de madera recolectadas y estudiadas recientemente son más ligeras y con crecimientos más rápidos. En efecto, la medición del número de anillos o capas de crecimiento anual por centímetro en la dirección radial de las probetas fue de: *Pinus michoacana*: 5; *Pinus douglasiana*: 6; *Pinus pringlei*: 7.

Finalmente, de la observación de los resultados presentados en la tabla 3, se deduce que la variación dimensional de las tres especies estudiadas es de carácter anisotrópico. Es decir, su magnitud varía en relación a la dirección de observación. Esta propiedad es de la forma:

 $\alpha_{R} < \alpha_{T} \gg \alpha_{L}$

Este resultado verifica experimentalmente la hipótesis sobre el carácter anisotrópico de las higrocontracciones.

Velocidad del ultrasonido

Los valores experimentales para la velocidad del ultrasonido son del mismo orden y coinciden con los de las referencias: Villaseñor Aguilar (2007) y Sotomayor Castellanos (2010).

De la observación de la tabla 2, se deduce que las velocidades del ultrasonido no corresponden proporcionalmente con la densidad. Igualmente, se observa una relación de anisotropía del orden: $v_R > v_T \ll v_L$. Los cocientes de anisotropía presentados en la tabla 4, coinciden con los datos propuestos por Bucur y Declercq (2006) y Bucur y col. (2000),

para madera de *Picea abies* y de *Prunus avion*, especies cuyos valores son comúnmente utilizados como referencia en la literatura especializada.

Este resultado verifica la hipótesis sobre el carácter anisotrópico de las velocidades del ultrasonido.

Respecto a los higrocoeficientes del ultrasonido, estos son pequeños en relación las dimensiones de las velocidades. Sin embargo, para fines prácticos, cuando se calcula el módulo de elasticidad, la velocidad es un término que se potencia al cuadrado, de donde su influencia es importante en el cálculo de este parámetro.

Esta conclusión es congruente con las correcciones de la velocidad del ultrasonido cuando varía el contenido de humedad de la madera, propuestas por Unterwieser y Schickhofer (2010). Estos investigadores proponen un modelo para ajustar la velocidad del ultrasonido (V_H), valor de la velocidad correspondiente al 12% de H (v₁₂), en función del contenido de humedad (H) de la madera de *Picea* spp. en el dominio higroscópico 0% < H < PSF:

$$v_{12} = \frac{v_{\rm H}}{1-0.0061*({\rm H}\text{-}12)}$$

Si se calcula la variación de la velocidad aplicando la relacion precedente, se llega a resultados de orden numérico similares, empleando higrocoeficientes φv_L como los presentados en la tabla 2. Es decir, el método de estimar las correlaciones entre la velocidad y la variación del contenido de humedad, es útil para estimar la variación de la velocidad del ultrasonido en función de H, y su aplicación para ajustar la velocidad para diferentes contenidos de humedad en la madera, resultado que permite valorizar la metodología propuesta en esta investigación.

Respecto al higrocoeficiente φv_L para *Pinus douglasiana*, es de 46 (m/s / %H), valor que coincide con el de Villaseñor Aguilar: 45.57 (m/s / %H) para la misma especie. Este resultado sugiere la validación de la metodología empleada en esta investigación.

Módulos de elasticidad

De la observación de la tabla 3, se deduce que $E_R > E_T \ll E_L$. Resultado que verifica la hipótesis sobre el carácter anisotrópico de los módulos de elasticidad de la madera.

Unterwieser y Schickhofer (2010) proponen un modelo para ajustar el módulo de elasticidad de la madera de *Spruce (Picea spp.)* en el dominio higroscópico 0% < H < PSF, estimado a partir de la velocidad del ultrasonido y ponderado por la densidad de la madera:

$$E_{12} = \frac{E_{\rm H}}{1-0.00825 \, (\rm H-12)}$$

La variación numérica en el módulo de elasticidad longitudinal para la madera de *Pinus michoacana* y *Pinus douglasiana*, calculada con la expresión precedente, es del mismo orden que los resultados de ψE_L (ver tabla 3).

Para *Pinus douglasiana*, el coeficiente calculado ψE_L es de 153 MPa/%H para una densidad de 0.367 g/cm³, valor proporcional al resultado de Villaseñor Aguilar de 300 MPa/%H para la misma especie pero con una densidad de 495 g/cm³. Este resultado sugiere que la variación del módulo de elasticidad es proporcional a la densidad para madera de una misma especie.

Por otra parte, se observa que las higrocontracciones disminuyen proporcionalmente a los valores del módulo de elasticidad. Resultado que coincide con los postulados de la Teoría de la elasticidad: a medida que la rigidez de la madera aumenta, es más difícil deformarla.

CONCLUSIONES

Se determinaron los valores de las higrocontracciones, de las velocidades del ultrasonido y de los módulos de elasticidad dinámicos para las maderas de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*.

Las características plásticas, -como la variación dimensional relacionada con la variación del contenido de humedad de la madera-, las propiedades acústicas, -como la velocidad del ultrasonido-, y las características elásticas, -como el módulo de elasticidad-, denotaron una correspondencia de carácter anisotrópico en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso.

Para el caso de las especies estudiadas, sus valores de higrocontracción resultaron en la relación: α_R mayor que α_T y mucho mayor que α_L

Igualmente, los valores de la velocidad del ultrasonido en las direcciones de anisotropía de la madera siguieron la relación: v_R mayor que v_T y mucho menor que v_L

Además, los valores de los módulos de elasticidad de las maderas de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*, presentaron una anisotropía de tal manera que: E_R mayor que E_T y mucho menor que E_L

Estas conclusiones verifican experimentalmente las hipótesis de la investigación.

REFERENCIAS

Ambriz Parra, J.E. y col. 2002. Anatomía de la madera e índices de calidad de pulpa de dos variedades de pino lacio (*Pinus michoacana* var. Michoacana Martínez y *Pinus michoacana* var. Cornuta Martínez) de un bosque de pino-encino del Municipio de Morelia, Michoacán, México. *Ciencia y Tecnología de la Madera*. Época 2. (7):2-16.

Arriaga, F.; Iñiguez, G.; Esteban, M.; Fernández-Golfín, J.I. 2006. Structural Tali timber (*Erythrophieum ivorense* A. Chef., *Erythrophleum suaveolens* Brenan.): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods. *Holz als Rho- und Werkstoff.* 64(5):357-362.

Bárcenas Pazos, G.; Davalos Sotelo, R. 2001. Shrinkage Values for 106 Mexican Woods. *Journal of Tropical Forest Products*. 7(2):126-135.

Bárcenas Pazos, G.M. 1985. Recomendaciones para el uso de 80 maderas de acuerdo con su estabilidad dimensional. Nota técnica No 11. INIREB. Laboratorio de ciencia y tecnología de la madera. México.

Barber, N.F. 1968. A theoretical model of shrinking wood. Holzforschung. 22(4):97-103.

Barber, N.F.; Meylan, B.A. 1964. The anisotropic shrinkage of wood. A theoretical model. *Holzforschung*. 18(5):146-156.

Barret, J.D.; Schniewind, A.P.; Taylor, R.L. 1972. Theoretical shrinkage model for wood cell walls. *Wood Science*. 4:178-192.

Beall, F.C. 2002. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood propierties. *Wood Science and Technology*. 36:197-212.

Kawamoto, S.; Williams, R.S. 2002. Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood-Based Composites – A Review. Gen. Tech. Rep. FPL-GRT-134. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA.

Koponen, S.; Toratti, T.; Kanerva, P. 1989. Modelling longitudinal elastic and shrinkage properties of wood. *Wood Science and Technology*. 23:55-63.

Bodig, J.; Jayne, B.A. 1982. Mechanics of Wood Composites. Van Nostrand Reinhold. USA.

Brown, H.P.; Panshin A.J.; Forsaith C.C. 1952. Textbook of Wood technology. Volume II. McGraw-Hill. USA.

Bucur, V. 1995. Acoustics of wood. CRC Press.

Bucur, V.; Declercq, N.F. 2006. The anisotropy of biological composites studied with ultrasonic technique. *Ultrasonics*. 44:e829-e831. <u>www.sciencedirect.com</u>.

Bucur, V.; Garros, S.; Barlow, C.Y. 2000. The effect of hydrostatic pressure on physical properties and microstructure of spruce and cherry. *Holzforschung*. 54(1):83-92.

Cruz de León, J. 2000. Análisis del ancho de anillos de *Pinus pringlei* SHAW del municipio de Villa Madero, Mich. México. *Ciencia y Tecnología de la Madera*. Época 2. (6):2-12.

Echenique Manrique, R. y col. 1975. Caracterización tecnológica de diez especies. Estudio botánico y ecológico de la región de Uxpanapa, Ver. No. 1. INIREB-P.I.N.E.T.-CONACYT. México.

Echenique Manrique, R.; Díaz Gómez, V. 1969. Algunas características tecnológicas de la madera de once especies mexicanas. Boletín técnico No. 27. SARH. SFF. INIF. México.

Farjon, A.; Styles, B.T. 1997. Flora neotrópica. *Pinus (Pinaceae)*. The New York Botanical Garden. USA.

Forest Products Laboratory. 1999. Wood Handbook. Wood as an Engineering Material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA.

Frey-Wyssling, A. 1968. The Ultrastructure of Wood. *Wood Science and Technology*. 2(2):73-83.

Fuentes Talavera, F.J. y col. 2002. Comportamiento higroscópico de la madera de *Persea* americana var. guatemalensis Mill (Hass). *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y* del ambiente. 8(1):49-56.

García Esteban y col. 2002. Anatomía e identificación de maderas de coníferas a nivel de especie. Coedición: Fundación Conde del Valle de Salazar y Ediciones Mundi-Prensa. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. España.

Cave, I.D. 1972a. Swelling of a fiber reinforced composite in which the matrix is water reactive. *Wood Science and Technology*. 6:157-161.

Cave, I.D. 1972b. A theory of shrinkage of wood. Wood Science and Technology. 6:284-292.

Cave, I.D. 1976. Modelling the Structure of the Softwood Cell Wall for Computation of Mechanical Properties. *Wood Science and Technology*. 10:19-28.

Gerhards, C.C. 1975. Stress wave speed and MOE of sweetgum ranking from 150 to 15 percent moisture content. *Forest Products Journal*. 25(4):51-57.

Gomez Nava, M.S.; Echenique Manrique, R.; Salinas Quinard, R. 1978. Segunda edición. Índices de Laboratorio sobre resistencia de la madera a la pudrición en once especies forestales mexicanas. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subsecretaría Forestal y de la Fauna. Dirección General de Investigación y Capacitación Forestal. México.

Grossman, P.U.A. 1976. Requirements for a Model that Exhibits Mechano–Sorptive Behaviour. *Wood Science and Technology*. 10:163-168.

Hale, J.D. 1957. The Anatomical Basis of Dimensional Changes of Wood in Response to Changes in Moisture Content. *Forest Products Journal*. 7(4):140-144.

Haygreen, J.G.; Bowyer, J.L. 1996. Forest Products and Wood Science, An Introduction. Iowa State University Press. USA.

Herrera Ferreyra, M.A. 1992. Características físico-mecánicas de la madera de 15 especies del municipio de Morelia. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Ishimaru, Y., y col. 2001a. Physical and mechanical properties of wood after moisture conditioning. *Journal of Wood Science*. 47:185-191.

Ishimaru, Y.; Oshima, K.; Iida, I. 2001b. Changes in the mechanical properties of wood during a period of moisture conditioning. *Journal of Wood Science*. 47:254-261.

James, W.L. 1961. Effect of temperature and moisture content on: Internal Friction and Speed of Sound in Douglas-fir. *Forest Products Journal*. 11(9):383-390.

James, W.L.; Boone, R.S.; Galligan, W.L. 1982. Using speed of sound in wood to monitor drying in a kiln. *Forest Products Journal*. 32(1):27-34.

Kabir, M.F.; Leininger, T.D.; Araman, P.A.; Winn, M.F. 2006. Detection of wetwood by ultrasonics. *Forest Products Journal*. 56(3):70-74.

Kabir, M.F.; Sidec, H.A.A.; Daud, W.M.; Khalid, K. 1997. Effect of Moisture Content and Grain Angle on the Ultrasonic Properties of Rubber Wood. *Holzforschung*. 51(3):263-267.

Kojima, Y.; Yamamoto, H. 2004. Properties of the cell wall constituents in relation to the longitudinal elasticity of wood. Part 2: Origin of the moisture dependency of the longitudinal elasticity of wood. *Wood Science and Technology*. 37:427-434.

Kollmann, F.F.P.; Côté, W.A. 1968. Principles of Wood Science and Technology. Volume I: Solid Wood. Springer-Verlag. Germany.

Martínez Sánchez, I.G. 1999. Características anatómicas microscópicas de la madera de 11 especies del género *Pinus* del municipio de Morelia, Michoacán; México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de hidalgo. México.

Meyer, R.W.; Kellogg, R.M. Editors. 1982. Structural Use of Wood in Adverse Environments. Society of Wood Science and Technology. Van Nostrand Reinhold. USA.

Meylan, B.A. 1968. Cause of High Longitudinal Shrinkage in Wood. *Forest Products Journal*. 18(4):75-78.

Mishiro, A. 1995. Ultrasonic Velocity in Wood and Its Moisture Content I: Effects of moisture gradients on ultrasonic velocity in wood. *Mokuzai Gakkaishi*. 41(12):1086-1092.

Mishiro, A. 1996a. Ultrasonic Velocity in Wood and Its Moisture Content II: Ultrasonic velocity and average moisture content in wood during desorption (1); Moisture content below the fiber saturation point. *Mokuzai Gakkaishi*. 42(6):612-617.

Mishiro, A. 1996b. Ultrasonic Velocity in Wood and Its Moisture Content III: Ultrasonic velocity and average moisture content in wood during desorption (2); During desorption from a water-saturated condition. *Mokuzai Gakkaishi*. 42(10):930-936.

Olvera Coronel, P. 1981. Estudio anatómico de la madera de siete especies del genero *Pinus*. Boletín técnico No. 71. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.

Ordóñez, V.R.; Bárcenas Pasos, G.M.; Quiróz, A. 1990. Características físico-mecánicas de la madera de diez especies de San Pablo Macuiltianguis, Oax. La Madera y su Uso. No. 21. Instituto de Ecología, A.C. Universidad Autonoma Metropolitana. México.

Ormarsson, S.; Dahlblom, O.; Peterson, H. 1998. A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation. Part 1: Theory. *Wood Science and Technology*. 32:325-334.

Ormarsson, S.; Dahlblom, O.; Peterson, H. 1999. A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation. Part 2: Simulation of drying board. *Wood Science and Technology*. 33:407-423.

Ormarsson, S.; Dahlblom, O.; Peterson, H. 2000. A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation. Part 3: influence of annual ring orientation. *Wood Science and Technology*. 34:207-219.

Oxford Forestry Institute. 1997. The Wood Database CD. PROSPECT, Ver. 2.1. England.

Panshin, A.J.; de Zeeuw, C. 1964. Textbook of Wood Technology. Volume I. McGraw-Hill. USA.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society.

Perry Jr., J. P. 1991. The Pines of Mexico and Central America. Timber Press. USA.

Ricalde, M.; Bárcenas, G. 1989. Manual para el diseño de estructuras de madera. 1.3. Propiedades físicas de la madera. Instituto de Ecología A.C. Lacitema. México.
Sandoz, J.L. 1993. Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood Science and Technology*. 27:373-380.

Siau, J.F. 1984. Transport Processes in Wood. Springer-Verlag. Germany.

Simpson, W.T. 1998. Relationship between speed of sound and moisture content of red oak and hard maple during drying. *Wood and Fiber*. 30(4):405-413.

Skaar, C. 1988. Wood-water relations. Springer Series in Wood Sciences. USA.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2002. TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Coordinación de la Investigación Científica. UMSNH. México. Formato: 60 x 90 cm. 1 p.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2005. Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies de maderas mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la madera*. UMSNH. 1(1):3-20. México.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2009. Variabilidad de la densidad y de las características mecánicas de 150 madera mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 5(1):23-32.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Guridi Gómez, L.I.; García Moreno, T. 2010. Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 6(1):3-32.

Stamm, A.J. 1964. Wood and Cellulose Science. The Ronald Press Company. USA.

Tauchert, T.R.; Hsu, N.N. 1977. Shrinkage Stresses in Wood Logs Considered as Layered, Cylindrically Orthotropic Materials. *Wood Science and Technology*. 11:51-58.

Unterwieser, 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*. Published on line. 11p.

Vázquez Gaviña, Y. 2003. Índices de calidad de pulpa para papel de 98 maderas de la región de Morelia. Tesina Profesional. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de hidalgo. México.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Walker, J.C.F. 2006. Second Edition. Primary Wood Processing. Principles and Practice. Springer. The Netherlands.

Yamamoto, H. 1999. A model of the anisotropic swelling and shrinkage process of wood. Part 1. Generalization of Barber's wood fiber model. *Wood Science and Technology*. 33:311-325.

Yamamoto, H.; Kojima, Y. 2002. Properties of cell wall constituents in relation to longitudinal elasticity of wood. Part 1. Formulation of the longitudinal elasticity of an insolated wood fiber. *Wood Science and Technology*. 36:55-74.

Yamamoto, H.; Sassus, F.; Ninomiya, M.; Gril, J. 2001. A model of the anisotropic swelling and shrinking process of wood. Part 2. A simulation of shrinking wood. *Wood Science and Technology*. 35:167-181.

Ylinen, A.; Jumppanen, P. 1967. Theory of the Shrinkage of Wood. *Wood Science and Technology*. 1:241-252.

Zobel,B.J.; Sprage, J.R. 1998. Juvenile Wood in Forest Trees. Springer Series in Wood Sciences. Germany.

11. TRATAMIENTO HIGRO-TÉRMICO Y PRUEBAS DE ULTRASONIDO EN LA MADERA DE *PINUS DOUGLASIANA* Y DE *QUERCUS* SPP.

INTRODUCCIÓN

Cuando la madera aserrada se encuentra en servicio y está expuesta a la intemperie, se deteriora. Particularmente su apariencia y calidad de superficie se modifican de tal forma que su apreciación estética disminuye. Entre otras soluciones, el tratamiento y/o el recubrimiento de su superficie ha sido recientemente estudiado entre otros autores por Tamarit Urias y col. (2002).

El término intemperismo se refiere a la degradación física y química de la madera cuando es expuesta a condiciones de lluvia y de insolación. El mecanismo de deterioro del material depende del tipo y especie de madera y de la combinación de factores encontrados en las condiciones de servicio de la madera. Por ejemplo: la humedad, la luz solar, el calor y el frío, así como agentes biológicos (Williams, 2005).

A manera de simulación del efecto del intemperismo sobre la madera de los factores humedad y calor, esta investigación propone que se pueden someter probetas a ciclos de calor y de humidificación en condiciones de laboratorio, de tal forma que su contenido de humedad (CH) varíe en condiciones excesivas, por ejemplo, desde un estado completamente seco (CH = 0%), hasta un estado higro-saturado en el cual el contenido de humedad de la madera es mayor al punto de saturación de la fibra (CH > PSF). De aquí el nombre de tratamiento higro-térmico: higro por la variación del contenido de humedad en la madera y térmico por la aplicación de calor hasta alcanzar temperaturas de 103 °C.

Los valores exagerados de este tratamiento son mucho más intensos que los valores reales de temperatura y contenido de humedad a los que está expuesta la madera en condiciones de servicio en climas temperados. No obstante, la idea de trabajar con valores extremos de contenido de humedad tiene por objeto simular y acelerar el proceso de envejecimiento de la madera y observar si existe un efecto inmediato, de pocos ciclos pero en condiciones extremas de calor y humidificación, sobre dos características mecánicas de la madera: velocidad de onda y módulo de elasticidad estimados mediante la técnica de ultrasonido.

La técnica de ultrasonido, por su carácter no destructivo, permite medir la velocidad del ultrasonido y evaluar el módulo de elasticidad de la madera antes del tratamiento y al final de éste. De esta forma, el tratamiento higro-térmico sobre la madera es el único factor a tomar en cuenta si varían los valores iníciales.

La técnica de ultrasonido y la caracterización mecánica de la madera han sido estudiadas por varios investigadores, entre otros por: Kawamoto y Williams (2002) y Pellerin y Ross (2002). Estos autores concluyen que las ondas ultrasónicas y acústicas pueden viajar a través de la madera y a partir del cálculo de su velocidad, el material puede ser caracterizado respecto a

su anisotropía y a sus propiedades mecánicas. Además, los investigadores recomiendan el uso de pruebas por ultrasonido para determinar el módulo de elasticidad de la madera.

El principio de utilización de los métodos no destructivos está fundamentado en la medición de la velocidad de las ondas mecánicas a través de la estructura celular de la madera. Si una alteración existe en la madera, por ejemplo deterioro del tejido leñoso o colapso del material, la velocidad variará. Como consecuencia, si la velocidad del ultrasonido varía, probablemente hay un cambio en la estructura del material, el cual resulta en una disminución de sus propiedades elásticas, en este caso, en el módulo de elasticidad calculado a partir de la velocidad y de la densidad del material.

Recientemente, en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la madera (UMSNH), se han realizado investigaciones sobre la resistencia mecánica de la madera que ha estado expuesta a condiciones reales de intemperismo (Sotomayor y col., 2004a, 2004b, 2005a y 2005b). En síntesis, estos trabajos concluyen que el hecho de que un elemento estructural de madera sufra variaciones de su contenido de humedad, resulta en una disminución en las propiedades de resistencia y elásticas de varias maderas. Igualmente, los autores reportan la importancia de la densidad de la madera como indicador del estado material de la madera.

Sin embargo, una revisión bibliográfica a la fecha, no resultó en información adicional sobre investigaciones referentes a la resistencia mecánica de la madera relacionada con el efecto del intemperismo en sus propiedades estructurales. Información tecnológica sobre las maderas en estudio y otras especies pertenecientes a los mismos géneros, puede ser consultada en: Villaseñor Aguilar (2007), Hernández Maldonado (2010) y Olguín Cerón (2011).

OBJETIVO

Determinar el efecto del tratamiento higro-térmico en la velocidad y en el módulo de elasticidad por ultrasonido en las maderas de *Pinus douglasiana* y de *Quercus* spp.

MATÉRIALES Y MÉTODOS

Materiales

El material experimental consistió en madera de *Pinus douglasiana* Martínez y de *Quercus* spp. Para las pruebas de ultrasonido se emplearon 30 probetas de *P. douglasiana* y 30 probetas de *Quercus* spp. Los dos grupos se estudiaron antes y después del tratamiento higro-térmico.

Las probetas fueron recortadas del tronco de árboles de acuerdo a la metodología propuesta por Villaseñor Aguilar (2007). Las dimensiones normalizadas de las probetas fueron de 20 x 20 x 320 mm, orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal con respecto al plano leñoso. La madera estuvo libre de irregularidades de crecimiento y de madera de

duramen, de acuerdo con la norma ISO (International Organization for Standardization, 1975).

Métodos

La estrategia experimental consistió en someter a la madera a cinco períodos de secado y de hidratado en condiciones extremas, con el objeto de verificar experimentalmente el efecto del tratamiento higro-térmico sobre sus características físicas y mecánicas. La Figura 1 explica los ciclos de variación de los valores del contenido de humedad (CH en porcentaje). i es el valor inicial de contenido de humedad de la madera; H1... son los valores del contenido de humedad de las probetas después de 48 horas de inmersión en agua; S1... son los valores del contenido de humedad igual a cero después de cada ciclo de secado de 24 horas y f es el valor final. Antes y después de cada ciclo de hidratado-secado se realizaron pruebas de ultrasonido, con carácter no destructivo y siguiendo el protocolo propuesto por Villaseñor Aguilar (2007).

Tratamiento higro-térmico

El tratamiento higro-térmico aplicado a la madera consintió en secar las probetas durante 24 horas a una temperatura de 103 °C, hasta alcanzar un peso constante, es decir el estado anhidro de la madera. Para cada ciclo y después de realizar las mediciones de peso y dimensiones a cada una de las probetas, se procedió a su rehumidificación durante un periodo de 48 horas a una temperatura ambiente de laboratorio de 23 °C. Para el ciclo siguiente, una vez más se procedió a la medición de peso y dimensiones de cada una de las probetas. *Cálculo del módulo de elasticidad*

El módulo de elasticidad fue calculado con la fórmula (Villaseñor Aguilar, 2007):

$$Eus = \rho Vus^2$$
(1)

Donde:

Eus = Módulo de elasticidad por ultrasonido (MPa)

 ρ = Densidad de la madera (kg/cm³)

Vus = Velocidad del ultrasonido (m/s)



Figura 1. Ciclos de tratamiento higro-térmico.

RESULTADOS

La Tabla 1 presenta los resultados de las pruebas de ultrasonido y los valores de referencia de las autores ahí citados. Los estadígrafos son: \bar{x} : Media aritmética, σ : Desviación estándar y CV: Coeficiente de variación.

Parámetros		Antes tratamiento	Después tratamiento	Villaseñor Aguilar (2007)				
Pinus douglasiana								
	x	535	538	521				
ρ (kg/m ³)	σ	49.52	49.15	-				
	CV	0.09	0.09	-				
CH (%)	x	13.17	12.59	12.00				
	x	6222	6108	6 487				
Vus (m/s)	σ	192	257	-				
	CV	0.03	0.04	-				
	x	20729	20064	21 960				
Eus (MPa)	σ	2270	2221	-				
	CV	0.11	0.11	-				
Quercus spp.								
Parámetros		Antes tratamiento	Después tratamiento	Sotomayor Castellanos y col. (2010)				
	x	838	806	786				
ρ (kg/m ³)	σ	65	61	-				
	COV	0.08	0.08	-				
CH (%)	x	11.09	12.23	12.00				
	x	5459	5361	5 282				
Vus (m/s)	σ	471	450	-				
	COV	0.09	0.08	-				
	x	25368	23486	24 630				
Eus (MPa)	σ	5421	4811	-				
	COV	0.21	0.20	-				

Tabla 1. Resultados pruebas de ultrasonido.

ANÁLISIS

El análisis de resultados está orientado a la observación de la influencia del tratamiento aplicado en las probetas en las características físicas y mecánicas de la madera. Para cada una de las características estudiadas, se presenta la comparación de sus valores de las medias aritméticas sin tratamiento *versus* los valores posteriores o con tratamiento.

Un enfoque privilegiado en el análisis fue la realización de pruebas *t* de *student* para comparar las medias ($\bar{\mathbf{x}}_1$ y $\bar{\mathbf{x}}_2$) de las dos muestras independientes con un nivel de confianza del 95 %, en este caso, los resultados antes y después de tratamiento respectivamente. La hipótesis nula fue: H₀: $\bar{\mathbf{x}}_1 - \bar{\mathbf{x}}_2 = 0$.

P. douglasiana

El valor de la densidad de la madera de *P. douglasiana* aumentó en un 1 % después del tratamiento y el coeficiente de variación está de acuerdo con los índices de variación de la densidad de la madera. Los valores de densidad son proporcionales a la densidad propuesta en la Tabla FITECMA (Sotomayor Castellanos, 2008) para la misma especie, densidad que está calculada por la relación peso seco/volumen verde. Esta diferencia es mínima y puede ser un resultado combinado con errores de medición durante el tratamiento. Sin embargo, es importante notar que la densidad, no obstante que se ajustó a la reducción del volumen ocasionada por el efecto del secado, no varió estadísticamente de manera significativa.

Respecto a la velocidad del ultrasonido, no obstante que se observó una variación numérica en los valores promedio de las velocidades, la prueba *t* de *student* para comparar las medias de las dos muestras demostró que no hay diferencia significativa entre las medias de las dos muestras. Además, el valor *P* calculado no es menor que 0.05. En consecuencia, no se puede rechazar la hipótesis nula. En otras palabras, la velocidad del ultrasonido en la madera no varió estadísticamente por el efecto del tratamiento higro-térmico aplicado a la madera de *P*. *douglasiana*.

Por su parte, el módulo de elasticidad por ultrasonido disminuyó en un 3 % y su coeficiente de variación es acorde a los valores propios de este parámetro. Sin embargo, el valor promedio del módulo es ligeramente menor que el propuesto por Villaseñor Aguilar (2007). En este caso, el resultado de la prueba *t* de *student* propone no rechazar la hipótesis nula. Es decir, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras con un nivel de confianza del 95%. Los valores particulares a cada probeta, de donde se estimaron los estadígrafos, se presentan gráficamente en la Figura 2.

Quercus spp.

El valor de la densidad de la madera de *Quercus* spp. disminuyó en un 4 % y su coeficiente de variación fue aceptable en comparación al de la densidad de otras especies de encinos mexicanos. No obstante, este resultado fue menor que el propuesto por Sotomayor Castellanos y col. (2010).

Respecto a la velocidad del ultrasonido en las probetas con tratamiento de *Quercus* spp, ésta disminuyó un 2 %. Su coeficiente de variación es acorde con los valores de variabilidad de este parámetro y en general, los resultados son congruentes con los de Sotomayor Castellanos y col. (2010).

Por otra parte, el módulo de elasticidad por ultrasonido de *Quercus* spp. disminuyó en un 7 % y su coeficiente de variación fue demasiado grande para la variabilidad encontrada en este parámetro y en esta especie. Además, su valor medio es ligeramente menor que el presentado por Sotomayor Castellanos y col. (2010).

Para ambos parámetros, el resultado de la prueba *t* de *student* propone no rechazar la hipótesis nula. Es decir, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras con un nivel de confianza del 95 % para la velocidad del ultrasonido ni para el módulo de elasticidad correspondiente. Los valores particulares a cada probeta, de donde se estimaron los estadígrafos, se presentan gráficamente en la Figura 3.

Las Figuras 2 y 3 presentan los valores de la velocidad del ultrasonido y del módulo de elasticidad correspondientes a la madera de *P. douglasiana* y de *Quercus* spp. Si se comparan los resultados probeta a probeta, antes y después del tratamiento, es decir, sin y con tratamiento, es difícil distinguir una tendencia clara del efecto del procedimiento aplicado. Sin embargo, un análisis más detallado permite distinguir que después del tratamiento higro-térmico, la velocidad y el módulo estudiados tienden a disminuir. Sí otras variables que intervienen en el proceso y las posibles causas de variación en los resultadas son ignoradas, los resultados sugieren que el tratamiento disminuye la velocidad y el módulo de elasticidad de la madera de ambas especies estudiadas.

Resistencia residual

Retomando la propuesta de Sotomayor Castellanos y Cruz de León (2004a y 2005a), la resistencia elástica residual, en este caso representada por el módulo de elasticidad (Eus) de las maderas estudiadas puede ser calculada por:

$$\beta_{\rm Eus} = \frac{\rm Eus^{final}}{\rm Eus^{inical}} \ (100) \tag{2}$$

Donde:

 β_{Fus} = Resistencia elástica residual (%)

Eus^{final} = Módulo de elasticidad por ultrasonido final, después de tratamiento (MPa)

Eus^{inicial} = Módulo de elasticidad por ultrasonido inicial, antes de tratamiento (MPa)

El cálculo aritmético de la diferencia entre los valores promedio de los parámetros mecánicos observados, antes y después del tratamiento, mostraron disminuciones del orden del 2 al 4%. Sin embargo, los resultados de las pruebas de diferencias de medias no permitieron rechazar la hipótesis nula de que éstas son iguales. Este argumento permite concluir que, si bien hay diferencias aritméticas por el efecto del tratamiento aplicado, para fines prácticos de empleo de estos resultados, esta desigualdad debe ser tomada con discreción.

Las diferencias observadas en la velocidad y en el módulo de elasticidad pueden ser ocasionadas por las contracciones y expansiones causadas por los ciclos de secado y de hidratado a las cuales la madera estuvo sometida.



Figura 2. Velocidades y módulos de elasticidad para las probetas de P. douglasiana.

Analizando los resultados presentados en la Tabla 1 se tiene: para la madera de *P*. *douglasiana*: β_{Eus} = 97 %, y para la madera de *Quercus* spp.: β_{Eus} = 93 %. Estos parámetros, cuantifican el efecto observado. Sin embargo, existe la incongruencia de que el análisis estadístico no evidencia diferencias importantes de los valores promedio o medias estadísticas de los parámetros estudiados, mientras que el cálculo de la resistencia residual enseña disminuciones de 3 a 7 %.

CONCLUSIONES

Los valores promedio de la velocidad y del módulo de elasticidad de la madera de *P*. *douglasiana* y de *Quercus* spp, disminuyeron después de ser sometidos a un tratamiento cíclico de secado y de hidratado. Por su parte, la variación de la densidad de las maderas no fue significativa.

La resistencia elástica residual para la madera de *P. douglasiana* fue de 97 %, y para la madera de *Quercus* spp, fue de 93 %.



Figura 3. Velocidades y módulos de elasticidad para las probetas de Quercus spp.

REFERENCIAS

Hernández Maldonado, S.A. 2010. Comportamiento elástico de la madera. Teoría y aplicaciones. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

International Organization for Standardization. 1975. Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO). Disponible en: <u>http://www.iso.org/iso/home.html</u> (Consultado en Mayo, 2012).

Kawamoto, S.; Williams, R.S. 2002. Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood-Based Composites – A Review. Gen. Tech. Rep. FPL-GRT-134. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA.

Olguín Cerón, J.B. 2011. Plastificado higro-térmico de la madera de *Quercus scytophylla*. Estudio por ondas de esfuerzo. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Guridi Gómez, L.I.; García Moreno, T. 2010. Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 6(1):3-32. México.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2008. Tabla FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. FITECMA. UMSNH. México. Disponible en: <u>http://www.fitecma.umich.mx/</u> (Consultado en Mayo 2012).

Sotomayor Castellanos, J.R.; Cruz de León, J. 2004a. Resistencia mecánica residual en madera deteriorada. *Revista Ciencia Nicolaita*. UMSNH. (37):157-175. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Cruz de León, J. 2005a. Distribución de la densidad, del contenido de humedad y de la resistencia mecánica residual al interior de una viga de madera deteriorada. *Revista Ciencia Nicolaita*. UMSNH. (40):143-154. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Cruz de León, J.; Pérez Díaz, M.; Trujillo Jiménez, U. 2004b. Comparación de la vitalidad mecánica de la madera de *Prosopis* spp. (Mezquite). *Revista Ciencia Nicolaita*. UMSNH. (37):143-155. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Villaseñor Aguilar, J.M.; Cruz De León, J. 2005b. Evaluación mecánica de madera estructural en servicio. Estudio de caso: Diagnóstico del estado mecánico de madera deteriorada del ex-convento franciscano de Tzintzuntzan, Michoacán. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 1(2):21-31. México.

Tamarit Urias, J.C.; Borja de la Rosa, A.; Flores Velázquez, R; Corona Ambriz, A. 2002. Vida útil de dos barnices para exteriores mediante intemperismo artificial en madera de aile pino y encino. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 8(1):83-90.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Williams, R.S. 2005. Weathering of Wood. In: Rowell, R.M. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. CRC Press. USA.

12. MÓDULOS DE ELASTICIDAD DINÁMICOS E INDICADORES DE CALIDAD DE CINCO MADERAS MEXICANAS ESTUDIADAS POR MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

RESUMEN

El módulo de elasticidad dinámico es el parámetro de referencia para el diseño de productos y de estructuras de madera funcionando en condiciones reales de servicio. Sin embargo, debido a la diversidad en las propiedades tecnológicas de las maderas mexicanas, es necesario relativizar los parámetros de ingeniería mediante indicadores de calidad. El objetivo de este trabajo fue determinar las características dinámicas y los indicadores de calidad de cinco maderas mexicanas estudiadas por ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones transversales. Se determinaron la densidad, el contenido de humedad, el módulo de elasticidad, así como la impedancia acústica en ultrasonido, el coeficiente de radiación acústica, el factor de calidad en ondas de esfuerzo y en vibraciones transversales y el índice material en ondas de esfuerzo y en vibraciones transversales y el índice material en ondas de esfuerzo y en vibraciones transversales de esfuerzo y variedad entre especies y entre métodos de prueba. Sin embargo, las magnitudes de los parámetros determinados fueron congruentes con valores para maderas con densidades similares a las de las especies estudiadas.

Palabras clave: ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales.

INTRODUCCIÓN

La madera de especies mexicanas presenta una diversidad en sus características mecánicas que permite su empleo en una amplia gama de productos utilitarios. Información acerca de esta bio-diversidad puede ser consultado entre otros autores en: Kukachka (1970), Berni y col. (1979) y Chudnoff (1980). Igualmente, en México, información sobre las características mecánicas de especies de maderas ha sido recopilada, entre otros investigadores por: Echenique-Manrique (1970), Torelli (1982), Echenique-Manrique y Plumptre (1994), Tamarit Urias y López Torres (2007), Silva Guzmán (2008) y Silva Guzmán y col. (2010).

Respecto a información de módulos de elasticidad determinados por métodos no destructivos y sus índices de calidad de maderas mexicanas, la literatura es escasa, con excepción de Sotomayor-Castellanos y col. (2010). Además, es notoria la ausencia de datos derivados de pruebas mecánicas que puedan aplicarse en el estudio del comportamiento de productos de madera funcionando en condiciones dinámicas, o para fines de diseño sísmico de estructuras de madera.

Sin embargo, debido a la diversidad en las propiedades tecnológicas de las maderas mexicanas, es necesario relativizar los parámetros de ingeniería mediante indicadores de calidad, parámetros que tienen por objeto estandarizar los valores particulares determinados experimentalmente.

Los métodos de evaluación no destructivos se caracterizan principalmente por su rapidez, bajo costo y por no afectar la estructura física del material en estudio. Entre otros métodos, el ultrasonido, las ondas de esfuerzo y las vibraciones transversales han demostrado su habilidad para determinar la velocidad de onda y el módulo de elasticidad de la madera (Kawamoto y Williams, 2002; Pellerin y Ross, 2002).

Entre las características mecánicas de la madera necesarias para el diseño de productos y de estructuras de madera, el módulo de elasticidad determinado en condiciones dinámicas es el parámetro de referencia (Brémaud y col., 2011; Íñiguez González u col., 2007). Igualmente, la velocidad de onda y la frecuencia natural de piezas de madera, son propiedades empleadas en el diseño de productos de madera con vocación para aplicaciones acústicas (Spycher y col., 2008; Wegst, 2008).

Los indicadores de calidad de la madera relacionados con sus propiedades dinámicas son, entre otros: la impedancia acústica en ultrasonido (Wegst, 2008); el coeficiente de radiación acústica (Wegst, 2008); el factor de calidad en ondas de esfuerzo y en vibraciones transversles (Spycher y col., 2008); y el índice material en ondas de esfuerzo y en vibraciones transversales (Ashby, 1999). Estos parámetros son derivados de la ponderación de la velocidad de onda, la frecuencia natural de vibración y del módulo de elasticidad, por la densidad de la madera y tienen por objeto estandarizar los valores particulares determinados experimentalmente. Un alto índice de calidad de una madera propone una mejor resistencia en relación a su densidad y una buena apreciación como material acústico y de ingeniería.

OBJETIVO

Determinar los módulos de elasticidad dinámicos e indicadores de calidad de cinco especies de maderas mexicanas estudiadas por métodos no destructivos. Las especies son: *Gyrocarpus americanus, Cedrela odorata, Juglans pyriformis, Platymiscium dimorphandrum y Acacia farnesiana*.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material experimental consistió en madera del cinco especies (Tabla 1), recolectada en aserraderos localizados en el Municipio de Arteaga, del Estado de Michoacán. Las especies fueron identificadas en el Laboratorio de Mecánica de la Madera de la Facultad de Ingeniería de la Madera, UMSNH. En una primera etapa, se prepararon piezas de madera aserrada de diferentes tamaños. La madera se almacenó durante 24 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20°C y una humedad relativa de 60%. Posteriormente, en una segunda fase, se prepararon para cada especie, 35 probetas con dimensiones de 20 mm x 20 mm x 320 mm, orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente y de acuerdo a las recomendaciones de la norma de la Organización Internacional para la Estandarización (ISO, 1975).

El contenido de humedad se determinó por el método de diferencia de pesos (Fórmula 1) con grupos complementarios de probetas. Para cada probeta normalizada se calculó la densidad

correspondiente al contenido de humedad de la madera en el momento de las pruebas (Fórmula 2). Igualmente, se midieron las velocidades de onda y las frecuencias naturales necesarias para el cálculo de los módulos de elasticidad por ultrasonido, ondas de esfuerzo (Apéndice A) y vibraciones transversales (Apéndice B). Posteriormente, se calcularon los indicadores de calidad.

El contenido de humedad de la madera se calculó con la fórmula (1):

$$H = \frac{W_H - W_A}{W_A} (100)$$
(1)

Donde:

H = Contenido de humedad de la madera al momento del ensayo (%)

 w_H = Peso de la probeta a un contenido de humedad H (kg)

 w_A = Peso de la probeta en estado anhidro: H = 0% (kg)

La densidad de la madera se calculó con la fórmula (2):

$$\rho_{\rm H} = \frac{w_{\rm H}}{V_{\rm H}} \tag{2}$$

Donde:

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

 w_H = Peso de la probeta a un contenido de humedad H (kg)

 $V_{\rm H}$ = Volumen de la probeta a un contenido de humedad H (m³)

Ultrasonido

Las pruebas por ultrasonido (us) consistieron en suministrar un impulso ultrasónico en transmisión directa en la probeta con el aparato *Sylvatest*® (Figura 1) posicionado en un dispositivo para pruebas no destructivas (Sotomayor-Castellanos y col., 2011). De esta forma, se midió el tiempo de transmisión de la onda en la dirección longitudinal. Se calculó la velocidad y se determinó el módulo de elasticidad con la fórmula (3) (Pellerin y Ross, 2002):

$$E_{us} = v_{us}^2 \rho_{\rm H} \tag{3}$$

Donde:

 E_{us} = Módulo de elasticidad por ultrasonido (Pa)

- v_{us} = Velocidad del ultrasonido (m/s)
- $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

La impedancia acústica en ultrasonido se calculó con la fórmula (4) (Wegst, 2008):

$$z_{us} = v_{us} \rho_{H}$$
(4)

Donde:

 z_{us} = Impedancia acustica de la madera (kg/s • m²)

 v_{us} = Velocidad del ultrasonido (m/s)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

El coeficiente de radiación acustica se calculó con la fórmula (5) (Wegst, 2008):

$$R_{us} = \sqrt{\frac{E_{us}}{\rho_{H}^{3}}}$$
(5)

Donde:

 $\begin{array}{ll} R_{us} & = Coeficiente \ de \ radiación \ de \ la \ madera \ por \ ultrasonido \ (m^4/s \ {\ } kg) \\ E_{us} & = M \acute{o} dulo \ de \ elasticidad \ de \ la \ madera \ (Pa) \\ \rho_H & = Densidad \ de \ la \ madera \ a \ un \ contenido \ de \ humedad \ H \ (kg/m^3) \end{array}$

Ondas de esfuerzo

Las pruebas de ondas de esfuerzo (oe) consistieron en medir el tiempo de transmisión de una onda a través de la probeta. Para las pruebas se empleó el aparato *Metriguard*® (Figura 2). Se calculó la velocidad y se determinó el módulo de elasticidad con la fórmula (6) (Pellerin y Ross, 2002):

$$E_{oe} = v_{oe}^2 \rho_{\rm H} \tag{6}$$

Donde:

E_{oe} = Módulo de elasticidad de la madera en ondas de esfuerzo (Pa)

 v_{oe} = Velocidad de las ondas de esfuerzo (m/s)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

El factor de calidad en ondas de esfuerzo se calculó de acuerdo la relación (7) (Spycher y col., 2008):

$$F_{oe} = \sqrt{\frac{E_{oe}}{\rho_{H}^{3}}}$$
(7)



Figura 1. Dispositivo para pruebas de ultrasonido.



Figura 2. Dispositivo para pruebas de ondas de esfuerzo (Sotomayor-Castellanos y col. 2011).



Figura 3. Dispositivo para pruebas de vibraciones transversales.

Donde:

 F_{oe} = Factor de calidad de la madera en ondas de esfuerzo (m⁴/s • kg)

 E_{oe} = Módulo de elasticidad de la madera en ondas de esfuerzo (Pa)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

El índice material en ondas de esfuerzo se calculó con la fórmula (8) (Ashby, 1999):

$$I_{oe} = \frac{E_{oe}}{\rho_{\rm H}}$$
(8)

Donde:

 $\begin{array}{ll} I_{oe} & = \mbox{Indice material de la madera en ondas de esfuerzo (m^2/s^2)} \\ E_{oe} & = \mbox{Módulo de elasticidad de la madera en ondas de esfuerzo (Pa)} \\ \rho_{H} & = \mbox{Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m^3)} \end{array}$

Vibraciones transversales

Las pruebas de vibraciones transversales (vt) consistieron en medir la frecuencia natural de vibración perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta. Con tal propósito, se utilizó el aparato *Grindosonic*® (Figura 3). El módulo de elasticidad en vibraciones transversales fue calculado con la fórmula (9) (Machek y col., 2001a):

$$E_{\rm vt} = \frac{4 \pi^2 L_{\rm vt}^4 f_{\rm vt}^2 \rho_{\rm H}}{m^4 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{l_{\rm vt}^2} K\right)$$
(9)

Donde:

- E_{vt} = Módulo de elasticidad en vibraciones transversales (Pa)
- L_{vt} = Largo de la probeta (m)
- l_{vt} = Distancia entre apoyos (m)
- f_{vt} = Frecuencia natural de la probeta (Hz)
- $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)
- m, K = Constantes a dimensionales (12.65, 49.48)
- r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m^2)
- Con: $\mathbf{r} = \sqrt{\mathbf{I}/\mathbf{A}}$
- I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m^4)
- A = Área de la sección transversal de la probeta (m^2)

El factor de calidad en vibraciones transversales se calculó con la fórmula (10) (Spycher y col., 2008):

$$F_{\rm vt} = \sqrt{\frac{E_{\rm vt}}{\rho_{\rm H}^{3}}}$$
(10)

Donde:

- F_{vt} = Factor de calidad de la madera en vibraciones transversales (m⁴/s kg)
- E_{vt} = Módulo de elasticidad de la madera en en vibraciones transversales (Pa)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

El índice material en vibraciones transversales se calculó con la fórmula (11) (Ashby, 1999):

$$I_{vt} = \frac{E_{vt}}{\rho_{H}}$$
(11)

Donde:

 I_{vt} = Índice material de la madera en vibraciones transversales (m²/s²)

 E_{vt} = Módulo de elasticidad de la madera en vibraciones transversales (Pa)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Tabla 1 muestra los resultados de las pruebas de ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones transversales. Se presentan la densidad y el contenido de humedad y las características dinámicas velocidad de onda, frecuencia, así como los módulos de elasticidad correspondientes a cada prueba. Los estadísticos que se detallan son la media (\bar{x}) , la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (CV). La Tabla 2 presenta, para las cinco especies estudiadas, los indicadores de calidad procedentes de las tres pruebas realizadas.

Especie		Características físicas		Ultrasonido		Ondas de esfuerzo		Vibraciones transversales	
(Nombre común)		$\rho_{\rm H}$	Н	V_{us}	E_{us}	\mathbf{V}_{oe}	Eoe	\mathbf{f}_{vt}	E_{vt}
		(kg/m^3)	(%)	(m/s)	(MPa)	m/s	(MPa)	(Hz)	MPa
	$\overline{\mathbf{X}}$	407	10.53	3,040	3,771	3,729	5,701	1,769	4,349
<i>Gyrocarpus americanus</i> (Rabalero)	σ	22.16	0.57	297	619	409	1,168	235	714
(ItubuleIo)	CV	0.05	0.05	0.10	0.16	0.11	0.20	0.13	0.16
	$\overline{\mathbf{X}}$	566	10.63	3,385	6,513	4,208	10,037	873	9,795
<i>Cedrela odorata</i> (Cedro rojo)	σ	51.49	0.57	230	1,018	262	1,355	89	1,262
(ceuro rojo)	CV	0.09	0.05	0.07	0.16	0.06	0.13	0.10	0.13
	$\overline{\mathbf{x}}$	725	10.40	3,306	8,179	5,089	19,011	1,140	15,986
Juglans pyriformis (Nogal)	σ	16.73	0.13	496	2,583	506	4,023	313	1,652
(itogui)	CV	0.02	0.01	0.15	0.32	0.1	0.21	0.27	0.10
Platymiscium	$\overline{\mathbf{X}}$	866	9.48	3,301	9,476	4,670	18,965	823	14,077
dimorphandrum	σ	33.26	0.35	172	1,179	221	2,191	40	1,637
(Hormiguillo)	CV	0.04	0.04	0.05	0.12	0.05	0.12	0.05	0.12
	$\overline{\mathbf{X}}$	901	9.90	3,350	10,178	3,540	11,424	946	13,965
Acacia farnesiana (Huizache)	σ	41.17	0.42	331	2,076	332.52	2,402	182	2,539
	CV	0.05	0.04	0.10	0.20	0.09	0.21	0.19	0.18

Tabla 1. Resultados pruebas dinámicas.

	Ultrasonido		On de est	das	Vibraciones	
Especie (Nombre común)	$\frac{R_{us}}{(m^4/s \bullet kg)}$	z_{us} (m ² /s ²)	F _{oe} (m ⁴ /s•kg)	$\frac{I_{oe}}{(kg/s \bullet m^2)} \times \frac{10^3}{x \ 10^3}$	F _{vt} (m ⁴ /s•kg)	Isacs Ivt (m ² /s ²) x 10 ⁻³
<i>Gyrocarpus americanus</i> (Rabalero)	7.47	1,518	9.16	9.27	8.03	10.69
<i>Cedrela odorata</i> (Cedro rojo)	5.98	2,382	7.43	11.51	7.35	17.31
Juglans pyriformis (Nogal)	4.56	3,690	7.02	11.28	6.48	22.05
<i>Platymiscium dimorphandrum</i> (Hormiguillo)	3.81	4,044	5.39	10.94	4.66	16.26
Acacia farnesiana (Huizache)	3.72	3,190	3.93	11.30	4.37	15.50

Tabla 2. Indicadores de calidad.

Los valores dinámicos determinados son proporcionales a los datos para maderas de densidades similares presentados por Villaseñor Aguilar (2007) y Sotomayor-Castellanos y col. (2010). Sin embargo, el contenido de humedad experimental fue ligeramente inferior al indicado en las bases de datos empleadas usualmente en ingeniería de la madera, el cual es del 12%. Con el objeto de normalizar los resultados para fines de diseño, se rectificaron los resultados en ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones transversales, empleando los coeficientes de higroelasticidad de la madera de *Pinus douglasiana*, propuestos por Villaseñor Aguilar (2007), para la zona de baja humedad (8% < H > 32%), del dominio no higrosaturado (0% < H > 32%):

$$\eta_{\rm us} = 300 \tag{12}$$

$$\eta_{oe}^{-}=150$$
 (13)

$$\eta_{vt} = 150 \tag{14}$$

Donde:

 η_{us} = Coeficiente de higroelasticidad en ultrasonido (MPa/%H)

 η_{oe} = Coeficiente de higroelasticidad en ondas de esfuerzo (MPa/%H)

 η_{vt} = Coeficiente de higroelasticidad en vibraciones transversales (MPa/%H)

La densidad de la madera se ajustó igualmente con la fórmula (15) propuesta por Unterwieser y Schickhofer (2010):

$$\rho_{12} = \frac{\rho_{\rm H}}{1 + 0.0042 * (\rm H - 12)}$$
(15)

Donde:

ρ ₁₂	= Densidad de la madera con un	n contenido de humedad de 12%	(kg/m^3)
-----------------	--------------------------------	-------------------------------	------------

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera con un contenido de humedad de H (kg/m³)

H = Contenido de humedad de la madera de 12%

La Tabla 3 propone los valores ajustados, para un contenido de humedad de 12%, de la densidad y de los módulos de elasticidad. Al pasar del contenido de humedad experimental, al ajustado de 12%, la densidad de las cinco especies aumentó en promedio 0.8%. En contraste, sus módulos de elasticidad disminuyen en promedio: 2% para el ultrasonido, 4% para las ondas de esfuerza y 2% para las vibraciones transversales.

Especie	Características físicas		Ultrasonido	Ondas de esfuerzo	Vibraciones transversales
(Nombre común)	ρ_{12} kg/m ³	H %	E _{us} MPa	E _{oe} MPa	E _{oe} MPa
Gyrocarpus americanus (Rabalero)	410	12	5,596	3,546	4,124
<i>Cedrela odorata</i> (Cedro rojo)	569	12	9,917	6,288	9,570
Juglans pyriformis (Nogal)	730	12	18,545	7,954	15,761
Platymiscium dimorphandrum (Hormiguillo)	875	12	18,524	9,251	13,852
<i>Cedrela odorata</i> (Cedro rojo)	909	12	11,110	9,953	13,740

Tabla 3. Módulos de elasticidad para un contenido de humedad de 12%.

Tabla 4. Módulo de elasticidad estático y sus cocientes con los módulos dinámicos.

	2				
<i>Especie</i> (Nombre común)	$\rho_{12} \\ kg/m^3$	E _{es} MPa	E _{es} /E _{us} MPa	E _{es} /E _{oe} MPa	E _{es} /E _v t MPa
<i>Gyrocarpus americanus</i> (Rabalero)	410	9,161	2.58	1.64	2.22
<i>Cedrela odorata</i> (Cedro rojo)	569	15,969	2.53	1.61	1.67
Juglans pyriformis (Nogal)	730	16,328	2.06	0.88	1.04
<i>Platymiscium dimorphandrum</i> (Hormiguillo)	875	19,580	2.15	1.06	1.43
<i>Cedrela odorata</i> (Cedro rojo)	909	20,335	2.06	1.83	1.49

La diferencia entre el contenido de humedad experimental de 10.19% y el ajustado (12%) fue de 1.81%, un valor proporcional a la variación entre los parámetros densidad y módulo de elasticidad: la densidad aumenta proporcionalmente al contenido de humedad de la madera y el módulo de elasticidad disminuye, resultados que concuerdan con los de Villaseñor Aguilar (2007).

A manera de comparación con valores estimados teóricamente para condiciones estáticas, los modelos propuestos por Hernández Maldonado (2010) para especies angiospermas:

$$E_{es} = 22,370 \rho_{12} \tag{16}$$

y para gimnospermas:

$$E_{es} = 28,052 \rho_{12} \tag{17}$$

Donde:

 $\begin{array}{ll} E_{es} & = M \acute{o} dulo \ de \ elasticidad \ de \ la \ madera \ en \ flexión \ estática \ (Pa) \\ = Densidad \ de \ la \ madera \ con \ un \ contenido \ de \ humedad \ de \ 12\% \ (kg/m^3) \end{array}$

Dan por resultado valores mayores que los valores dinámicos, tal como se muestra en la tabla 4. Este corolario se distingue de los resultados encontrados para otras especies de madera por trabajos anteriores.

CONCLUSIONES

Cinco especies de madera fueron estudiadas con métodos no destructivos. Los módulos de elasticidad y los indicadores de calidad fueron propios a cada especie.

Los valores de los módulos de elasticidad por los tres métodos, fueron proporcionales a la densidad de la madera. Excepcionalmente, *Cedrela odorata* presenta valores equitativamente menores para su densidad.

Con el objeto de estandarizar valores útiles en el diseño y cálculo de productos y estructuras de madera, es necesario ajustar valores experimentales medidos con un contenido de humedad diferente al que se presenta usualmente en métodos normalizados, que es de 12%. Particularmente, la densidad y la velocidad de onda.

REFERENCIAS

Ashby, M.F. 1999. Materials selection in mechanical design. Second Edition. Butterworth Heinemann. England.

Berni, C.A.; Bolza, E.; Christensen, F.J. 1979. South American timbers, the properties, uses and characteristics of 190 species. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. Division of Building Research. Australia.

Brémaud, I.; Gril, J.; Thibaut, B. 2011. Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology*. 45: 735-754.

Chudnoff, M. 1980. Tropical Timbers of the World. Forest Products Laboratory. Forest Service. U.S. Department of Agriculture. USA.

Chui, Y.H.; Smith, I. 1990. Influence of rotatory inertia, shear deformation and support condition on natural frequencies of wooden beams. *Wood Science and Technology*. 24: 233-245.

Echenique-Manrique, R. 1970. Descripción, características y usos de 25 maderas tropicales mexicanas. Maderas de México. Número 1. Cámara Nacional de la Industria de la Construcción, México.

Echenique-Manrique, R.; Plumptre, R.A. 1994. Guía para el uso de maderas de Belice y México. Universidad de Guadalajara, Consejo Británico, Universidad de Oxford, LACITEMA. México.

Goens, E. 1931: Determination of Young's modulus from flexural vibrations. *Annalen der Physik*. 11(6): 649-678.

Görlacher, R. 1984. Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des E-modulus von Holz. *Holz als Roh-und Werkstoff.* 42: 212-222.

Hearmon, R.F.S. 1966. Theory of the Vibration Testing of Wood. *Forest Products Journal*. 16(8):29-40.

Hernández Maldonado, S.A. 2010. Comportamiento elástico de la madera. Teoría y aplicaciones. Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Íñiguez González, G.; Arriaga Martitegui, F.; Esteban Herrero, M.; Argüelles Álvarez, R. 2007. Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural. *Informes de la Construcción*. 59(506): 97-105.

International Organization for Standardization ISO 3129-1975 (E). 1975. Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO).

Jayne, B.A. 1959. Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*. 9(11): 413-416.

Kawamoto, S.; Williams, R.S. 2002. Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood-Based Composites – A Review. Gen. Tech. Rep. FPL-GRT-134. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA.

Kaiserlik, J.H.; Pellerin, R.F. 1977. Stress wave attenuation as an indicator of lumber strength. *Forest Products Journal*. 27(6): 39-43.

Kukachka, B.F. 1970. Properties of imported tropical woods. Paper FPL 125. U.S. Department of Agriculture. Forest Products Laboratory Research. USA.

Machek, L.; Militz, H.; Sierra-Alvarez, R. 2001a. The influence of wood moisture content on dynamic modulus of elasticity measurements in durability testing. *Forschung verwertung*. 5(2001): 97-100.

Machek, L.; Militz, H.; Sierra-Alvarez, R. 2001b. The use of an acoustic technique to assess wood decay in laboratory soil-bed tests. *Wood Science and Technology* 34(6): 467-472.

Meyers, M.A. 1994. Dynamic Behavior of Materials. John Wiley & Sons. USA.

Olguín Cerón, J.B. 2011. Plastificado higro-térmico de la madera de *Quercus scytophylla*. Estudio por ondas de esfuerzo. Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Pellerin, R.F. 1965. A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. *Forest Products Journal*. 15(3): 93-101.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA.

Perstorper, M. 1992. Predicting the stiffness of structural timber using dynamic modal tests. In: Proceedings of IUFRO S5.02 Timber Engineering 1992 Conference. France. pp: 305-324.

Perstorper, M. 1993. Dynamic modal tests of timber evaluation according to the Euler and Timoshenko theories. In: Proceedings of the 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Washington State University. USA. pp: 45-54.

Ross, R.J. y col. 1997. Relationship between log and lumber modulus of elasticity. *Forest Products Journal*, 47(2): 89-92.

Ross, R.J.; Pellerin, R.F. 1988. NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves. *Forest Products Journal*, 38(5): 39-45.

Sandoz, J.L. 2000. 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. 6 p.

Sandoz, J.L. 2002. 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, Selangor, Malaysia. 7 p.

Silva Guzmán, J.A. 2008. Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México. Tomo I. Conafor, México.

Silva Guzmán, J.A. y col. 2010. Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas se México e importadas. Departamento de Madera, Celulosa y Papel, Universidad de Guadalajara y Comisión Nacional Forestal, México.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2003. Caracterización Mecánica de madera reconstituida: Módulo de Elasticidad de Tableros de Partículas de Madera evaluado con métodos no destructivos. *Revista Maderas: Ciencia y Tecnología*. (5)1: 20-43.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Bernabé Santiago, R.; Hernández Maldonado, S.A.; Sarmiento Bustos, D.; Fernández García, G.; Alfaro Trujillo, I. 2009. Caracterización no destructiva de vigas de madera de Pinus spp. utilizando ultrasonido y ondas de esfuerzo. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 5(1) :3-22. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Guridi Gómez, L.I.; García Moreno, T. 2010. Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 6(1):3-32. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; García Mariscal, L.J.; Hernández Maldonado, S.A.; Moya Lara, C.E.; Olguín Cerón, J.B. 2011. Dispositivo de usos múltiples para pruebas no destructivas en madera y materiales compuestos de madera. Ultrasonido, Ondas de esfuerzo y Vibraciones transversales. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 7(3):20-33.

Spycher, M.; Schwarze, F.W.M.R.; Steiger, R. 2008. Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Science and Technology*. 42:325-342.

Tamarit Urias, J.C.; López Torres, J.L. 2007. Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México. Libro técnico No. 3. INIFAP-CIR Golfo Centro, Campo experimental San Martinito. Tlahuapan, Puebla, México.

Timoshenko, S.; Young, D.H.; Weaver, W. 1994. Reprinted Edition. Vibration problems in Engineering. New York: John Wiley. USA.

Timoshenko, S.P.; Goodier, J.N. 1970. Third Edition. Theory of Elasticity. McGraw-Hill. USA.

Torelli, N. 1982. Estudio promocional de 43 especies forestales tropicales mexicanas. Programa de Cooperación Científica y Técnica, México-Yugoslavia. SARH. SFF. México.

Unterwieser, 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.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2005. Comportamiento mecánico de la madera de *Prosopis* sp. en relación con la variación de su masa. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Wegst, U.G.K. 2008. Bamboo and Wood in Musical Instruments. Annual Review of Materials Research. 38:323-349.

APÉNDICE A: ECUACIÓN PARA CALCULAR EL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN ULTRASONIDO Y ONDAS DE ESFUERZO

De acuerdo con Sotomayor-Castellanos (2003) y Villaseñor Aguilar (2005), la caracterización del comportamiento de la madera en condiciones dinámicas y los métodos de laboratorio recientemente desarrollados, han sido de carácter no destructivo y han utilizado la hipótesis fundamental en mecánica de la madera, propuesta por Jayne en 1959:

La madera y los materiales fabricados con ella pueden almacenar y disipar energía, por ejemplo, la propiedad de la madera de almacenar energía es manifestada por la velocidad a la cual una onda mecánica viaja a través de ella. En contraste, la capacidad de la madera para atenuar una onda de vibración, denota su capacidad para disipar energía. Jayne propuso así la hipótesis fundamental de que estas propiedades de la madera para almacenar y disipar energía, están controladas por los mismos mecanismos que determinan su comportamiento mecánico en condiciones estáticas. Es decir, la estructura molecular y anatómica del material es la base del comportamiento mecánico de la madera. Como consecuencia, es posible relacionar estadísticamente estas propiedades utilizando métodos de análisis numéricos tales como las correlaciones estadísticas.

Esta proposición ha sido verificada experimentalmente por los trabajos de Jayne (1959), Pellerin (1965), Kaiserlik y Pellerin (1977), Ross y Pellerin (1988), Ross y col. (1997) y más recientemente por: Sandoz (2000 y 2002) y Olguín Cerón (2011).

En una escala de observación macroscópica, la madera es un material homogéneo y lignocelulósico que admite simetrías materiales cartesianas y cilíndricas (Hernández Maldonado, 2010). Esta proposición facilita el estudio de la madera independiente del tipo, tamaño y acomodo de sus componentes estructurales moleculares y anatómicos. Además, este concepto permite idealizar a la madera como un material que admite referenciales materiales y de geometría, compatibles entre sí con coordenadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso.

Desde el punto de vista mecánico, la madera es un sólido de medio continuo con propiedades visco-elásticas. Este enfoque considera a la madera como un sólido elástico y admite la teoría

matemática propia al estudio de los medios continuos. Este punto de vista permite igualmente emplear las leyes de la resistencia de materiales en el análisis del comportamiento mecánico de la madera. Conjuntamente, este criterio considera que las propiedades elásticas del material están relacionadas con su comportamiento higroscópico.

La idealización de una barra delgada e infinitamente larga de un material visco-elástico se limita a volúmenes de probetas de madera sólida, cuyo contenido de humedad permanece constante y distribuido de manera uniforme en las probetas.

A una escala de observación de un volumen elemental de materia, la representación reológica de la madera es un sistema a un grado de libertad, caracterizado por la respuesta de una masa que representa la probeta de estudio, la cual está unida a cuerpos de *Kelvin* y de *Voigt*, compuestos éstos por elementos elásticos y viscosos (Hernández Maldonado, 2010).

En una escala celular o de tejido leñoso, esta misma idea se aplica, pero modelando sistemas a varios grados de libertad, donde cada uno de éstos puede ser una célula o un tejido en particular. De esta manera, se transfieren resultados de una probeta en particular o de una muestra de material en estudio, como características generales de una especie de madera (Villaseñor Aguilar, 2007).

La teoría de la elasticidad permite la representación matemática del comportamiento de probetas de madera, durante los ensayos que pretenden determinar sus características mecánicas. En la práctica de laboratorio, los resultados entre representaciones completas del fenómeno y su simplificación para fines del cálculo de parámetros de ingeniería son casi iguales, lo que permite que los métodos experimentales se faciliten, ignorando los fenómenos puntuales y locales ocasionados por las condiciones particulares a la configuración del ensayo respectivo (Villaseñor Aguilar, 2007).

Respecto al efecto del tiempo, el carácter viscoso de la madera modifica su respuesta elástica, particularmente en las pruebas donde las solicitaciones son mantenidas constantes durante periodos temporales largos. Por ejemplo durante los ensayos de relajación de esfuerzos y flujo de deformaciones. Adicionalmente, las propiedades viscoelásticas de la madera pueden ser observadas en ensayos dinámicos, donde la velocidad de carga es muy alta. Por ejemplo, los ensayos mecánicos por impacto y en vibraciones (Villaseñor Aguilar, 2007).

Los fenómenos ocasionados por fuerzas y deformaciones a través del tiempo son estudiados idealizando al material con modelos reológicos, compuestos de elementos elásticos y viscosos, sujetos a una masa representativa de la madera. Este estudio hace uso de ese tipo de modelos para anticipar la respuesta del material.

El desarrollo de la ecuación de onda y los parámetros derivados que caracterizan al movimiento de una barra están basados en Meyers (1994) y Timoshenko y Goodier (1970), y adaptado de Sotomayor-Castellanos y col. (2009).

Estudio del movimiento de una barra delgada e infinitamente larga de un material viscoelástico.

La ecuación de movimiento de un elemento diferencial de la barra mostrada en la Figura A.1, es:

$$-\sigma A + \left(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx\right) A = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$
(A.1)

Donde:

- \boldsymbol{u} = Desplazamiento desde la posición de equilibrio
- \boldsymbol{x} = Coordenada espacial
- A =Área de la sección transversal de la barra
- σ = Esfuerzo normal a la sección transversal
- ρ = Densidad del material
- \boldsymbol{t} = Tiempo



Figura A.1. a) Esquema de un segmento de barra delgada de coordenada x y desplazamiento u de una sección transversal. b) Diagrama del cuerpo libre de una sección transversal infinitesimal con los esfuerzos σ actuando en un elemento diferencial dx de la barra.

La ecuación (A.1) se puede reducir a:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$
(A.2)

Para el caso de un material elástico se puede proponer:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{E} \boldsymbol{\varepsilon} \tag{A.3}$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad del material

 $\boldsymbol{\varepsilon}$ = Deformación en el material

La deformación material $\boldsymbol{\varepsilon}$ puede ser definida por:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial \boldsymbol{x}} \tag{A.4}$$

Substituyendo la ecuación (A.4) en la ecuación (A.3) y procediendo igualmente en la ecuación simplificada (A.2), se puede establecer:

$$E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$
(A.5)

La ecuación (A.5) puede ser transformada en la forma:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$
(A.6)

Donde c_0 es la velocidad de onda:

$$c_0^2 = \frac{E}{\rho} \tag{A.7}$$

La ecuación (A.6) explica la propagación de una onda elástica, longitudinal y unidimensional en una barra delgada. Esta ecuación es llamada usualmente ecuación de onda.

La ecuación (A.7) es equivalente a las fórmulas (3) y (6), empleadas para calcular los módulos de elasticidad por ultrasonido y ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal de las probetas.

APENDICE B: ECUACIÓN PARA CALCULAR EL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN VIBRACIONES TRANSVERSALES

Los ensayos dinámicos no destructivos consistieron en el estudio de la probeta modelada como una barra continua, de sección transversal rectangular, con geometría uniforme y estructuralmente homogénea, sometida a vibración transversal sobre apoyos simples, representando un sistema a un grado de libertad e idealizando a la madera como un material elástico.

La idealización de una barra delgada e infinitamente larga de un material visco-elástico se limita a volúmenes de probetas de madera sólida, cuyo contenido de humedad permanece constante y distribuido de manera uniforme en las probetas.

La ecuación de movimiento de una barra equivalente a la probeta presentada en la figuras 1 y 2, fue derivada por Timoshenko y col. (1994), y viene dada por:

$$E I \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_l \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \left(m_l r^2 + \frac{E I m_l}{K' A G} \right) \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{m_l^2 r^2}{K' A G} \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0$$
 (B.1)

Donde:

E = Módulo de Elasticidad de la madera (Pa) T = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m^4) = Masa por unidad de longitud de la probeta (kg/m) m_1 А = Área de la sección transversal de la probeta (m^2) = Módulo de Rigidez de la madera (Pa) G = Desplazamiento en la dirección transversal de la probeta (m) v = Distancia en la dirección longitudinal de la probeta (m) х = Tiempo (s) t K' = Factor de forma en cortante (0.833 para probetas prismáticas) = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m^2) r $\mathbf{r} = \sqrt{\mathbf{I}/\mathbf{A}}$ Con: = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m^4) T

En la ecuación (B.1), el primer término de la izquierda esta ligado a la rigidez de la probeta, el segundo a la inercia del movimiento, el tercer término representa el efecto de la inercia de rotación de la sección transversal de la probeta y el cuarto significa el efecto del esfuerzo cortante interno.

Una solución numérica de la ecuación (B.1) para el caso de una probeta de sección rectangular, apoyada sobre soportes rígidos de tipo simple-simple, como es este caso de estudio, fue presentada por Goens (1931), y ha sido aplicada en estudios con madera por Hearmon (1966), Görlacher (1984), Chui y Smith (1990), Perstorper (1992 y 1993) y Machek y col. (2001a y 2001b). Esta fórmula fue utilizada en la investigación para la determinación del módulo de elasticidad dinámico y viene dada por la ecuación:

$$E_{vt} = \frac{4 \pi^2 L_{vt}^4 f_{vt}^2 \rho_H}{m^4 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{l_{vt}^2} K\right)$$
(B.2)

Donde:

- E_{vt} = Módulo de elasticidad en vibraciones transversales (Pa)
- L_{vt} = Largo de la probeta (m)
- l_{vt} = Distancia entre apoyos (m)
- f_{vt} = Frecuencia natural de la probeta (Hz)
- $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)
- m, K = Constantes adimensionales (12.65, 49.48)
- r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m^2)

Con: $\mathbf{r} = \sqrt{\mathbf{I}/\mathbf{A}}$ I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m⁴) A = Área de la sección transversal de la probeta (m²)

La ecuación (B.2) es equivalente a la fórmula (9), empleada para calcular el módulo de elasticidad en vibraciones tranversales de las probetas sobre apoyos simple-simple.

13. CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS E INDICADORES DE CALIDAD DE LA MADERA DE *LYSILOMA* SPP. (TZALAM) DEL ESTADO DE QUINTANA ROO. Estudio por métodos no destructivos.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue determinar las características dinámicas e indicadores de calidad de la madera de *Lysiloma* spp. del estado de Quintana Roo. Se calculó la densidad, el contenido de humedad, la velocidad de ondas de esfuerzo, la frecuencia natural en vibraciones transversales y los módulos de elasticidad derivados de pruebas de ondas de esfuerzo y de vibraciones transversales. Además, se determinaron el factor de calidad y el índice material, correspondientes a las pruebas realizadas. Los resultados sugieren que para una muestra de madera de *Lysiloma* spp, no existe una diferencia significativa entre los valores promedio de los módulos de elasticidad, cuando se emplean las técnicas de ondas de esfuerzo o de vibraciones transversales. Igualmente, los indicadores de calidad de *Lysiloma* spp., son muy similares independientemente del método de determinación.

Palabras clave: velocidad de onda, ondas de esfuerzo, frecuencia, vibraciones transversales, módulo de elasticidad, factor de calidad, índice material

INTRODUCCIÓN

La madera del género *Lysiloma* se comercializa como madera de tzalam en la mayor parte del país. Sus principales usos son en la fabricación de muebles, duela para pisos, elementos para puertas, ventanas y escaleras, y como elementos estructurales en construcciones ligeras de madera (Tamarit Urias y López Torres, 2007).

El Ingeniero en Tecnología de la Madera emplea el módulo de elasticidad para fines de análisis y cálculo estructural. Por su parte, el Diseñador, requiere de indicadores de calidad para la selección material de la madera. No obstante, después de una revisión de trabajos acerca del tópico de investigación, se detectó poca información relativa a los índices de calidad de la madera del género *Lysiloma*.

En la literatura especializada se reportan sus características mecánicas determinadas con ensayos destructivos y en condiciones estáticas (Tamarit Urias y López Torres, 2007). Respecto a las propiedades tecnológicas de la madera del género *Lysiloma*, Bárcena-Pazos y col. (2005) y Martínez-Castillo y Martínez-Pinillos (1996), estudiaron sus propiedades anatómica, físicas y de maquinado. Sin embargo, es notable en la literatura nacional, la ausencia de información técnica de carácter dinámico y de evaluaciones con métodos no destructivo de especies mexicanas.

Las ondas de esfuerzo y las vibraciones transversales son considerados como técnicas rápidas y de bajo costo (Pellerin y Ross, 2002). Además, los métodos no destructivos para evaluar las características mecánicas respetan la integridad física del material. De tal forma, que se pueden realizar varias pruebas sobre un mismo ejemplar.

El factor de calidad (Radiation ratio R en Spycher y col., 2008) es el parámetro más significativo para la determinación de la calidad de la madera para aplicaciones acústicas. Un valor alto del factor de calidad de una madera indica una buena calidad acústica comparativa, es decir, una vocación para "madera de resonancia", de acuerdo con Müller (1986) y Ono y Norimoto (1983), citados por Sotomayor-Castellanos y col. (2010).

Un índice material es la combinación de las propiedades físico-químicas de un material, las cuales caracterizan su rendimiento para una aplicación específica (Ashby, 1999). Por ejemplo, un buen diseño de estructuras de madera puede contribuir a mejorar el ambiente sonoro en construcciones, gracias a las propiedades acústicas del material. Entre otros indicadores de calidad de los materiales de construcción, el índice material que relaciona su módulo de elasticidad con su densidad es un indicador de la calidad de la madera para usos específicos (Sotomayor-Castellanos y col., 2010).

Esta investigación propone como hipótesis de trabajo que, comparativamente con otras maderas de densidades similares, la madera de *Lysiloma* spp. tiene buenas propiedades dinámicas e indicadores de calidad, y que su conocimiento puede contribuir a diversificar su empleo en usos distintos a los que tradicionalmente es utilizada.

OBJETIVOS

Determinar la velocidad de onda, la frecuencia natural en vibraciones transversales y los módulos de elasticidad de la madera de *Lysiloma* spp. Derivados de pruebas de ondas de esfuerzo y de vibraciones transversales.

Determinar los indicadores de calidad factor de calidad y el índice material derivados de estas pruebas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material experimental consistió en madera de *Lysiloma* spp, recolectada en terrenos forestales de Estado de Quintana Roo. A partir de vario árboles, se prepararon 20 barras con dimensiones de 50 mm x 50 mm x 500 mm, orientadas respectivamente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. La madera se almacenó durante 6 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20°C y una humedad relativa de 60%.

El contenido de humedad se determinó por el método de diferencia de pesos con grupos complementarios de probetas (Fórmula 1). Para cada barra se calculó la densidad correspondiente al contenido de humedad de la madera en el momento de las pruebas (Fórmula 2). Igualmente, se midió la velocidad de las ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal, así como la frecuencia natural en vibraciones transversales, parámetros necesarios para calcular los módulos de elasticidad por ondas de esfuerzo y en vibraciones transversales. Posteriormente, se calcularon los indicadores de calidad: factor de calidad e índice material. El análisis estadístico de los resultados se realizó con el programa de análisis estadístico *Statgraphics*®.

El contenido de humedad de la madera se calculó con la fórmula (1):

$$H = \frac{W_{\rm H} - W_{\rm A}}{W_{\rm A}} (100) \tag{1}$$

Donde:

H = Contenido de humedad de la madera al momento del ensayo (%) $w_H = Peso de la probeta a un contenido de humedad H (kg)$ Peso de la probeta a un contenido de humedad H (kg)

 w_A = Peso de la probeta en estado anhidro: H = 0% (kg)

La densidad de la madera se calculó con la fórmula (2):

$$\rho_{\rm H} = \frac{w_{\rm H}}{V_{\rm H}} \tag{2}$$

Donde:

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³) $w_{\rm H}$ = Peso de la barra a un contenido de humedad H (kg) $V_{\rm H}$ = Volumen de la barra a un contenido de humedad H (m³)

Ondas de esfuerzo

Las pruebas de ondas de esfuerzo (oe) consistieron en medir el tiempo de transmisión de una onda a través de la dirección longitudinal de la barra. Para las pruebas se empleó el aparato *Fakopp*® (Figura 1). Se calculó la velocidad de onda y se determinó el módulo de elasticidad con la fórmula (3) (Pellerin y Ross, 2002):

$$E_{oe} = v_{oe}^2 \rho_{\rm H} \tag{3}$$

Donde:

E_{oe} = Módulo de elasticidad de la madera en ondas de esfuerzo (Pa)

- v_{oe} = Velocidad de las ondas de esfuerzo (m/s)
- $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)



Figura 1. Dispositivo para pruebas de ondas de esfuerzo y aparato *Fakopp*® (Sotomayor-Castellanos y col. 2011).

El factor de calidad en ondas de esfuerzo se calculó con la fórmula (4) (Spycher y col., 2008):

$$F_{oe} = \sqrt{\frac{E_{oe}}{\rho_{\rm H}^3}}$$
(4)

Donde:

 F_{oe} = Factor de calidad de la madera en ondas de esfuerzo (m⁴/s • kg)

E_{oe} = Módulo de elasticidad de la madera en ondas de esfuerzo (Pa)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

El índice material en ondas de esfuerzo se calculó con la fórmula (5) (Ashby, 1999):

$$I_{oe} = \frac{E_{oe}}{\rho_{\rm H}}$$
(5)

Donde:

 I_{oe} = Índice material de la madera en ondas de esfuerzo (m²/s²)

E_{oe} = Módulo de elasticidad de la madera en ondas de esfuerzo (Pa)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

Vibraciones transversales

Las pruebas de vibraciones transversales (vt) consistieron en medir la frecuencia natural de vibración transversal a la dirección longitudinal de la barra. Para tal fin se utilizó el aparato *Grindosonic*® (Figura 2).



Figura 2. Dispositivo para pruebas de vibraciones transversales.

El módulo de elasticidad en vibraciones transversales se calculó con la fórmula (6) (Machek y col., 2001):

$$E_{vt} = \frac{4 \pi^2 L_{vt}^4 f_{vt}^2 \rho_H}{m^4 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{l_{vt}^2} K\right)$$
(6)

Donde:

 E_{vt} = Módulo de elasticidad en vibraciones transversales (Pa)

 L_{vt} = Largo de la barra (m)

 l_{vt} = Distancia entre apoyos (m)

 f_{vt} = Frecuencia natural de la barra (Hz)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

m, K = Constantes adimensionales (12.65, 49.48)

r = Radio de giro de la sección transversal de la barra (m^2)

Con: $r = \sqrt{I/A}$

I = Momento de inercia de la sección transversal de la barra (m^4)

A = Área de la sección transversal de la barra (m^2)

El factor de calidad en vibraciones transversales se calculó de acuerdo con la fórmula (7) (Spycher y col., 2008):

$$F_{vt} = \sqrt{\frac{E_{vt}}{\rho_{H}^{3}}}$$
(7)

Donde:

 F_{vt} = Factor de calidad de la madera en vibraciones transversales (m⁴/s • kg)

 E_{vt} = Módulo de elasticidad de la madera en vibraciones transversales (Pa)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

El índice material en vibraciones transversales se calculó con la fórmula (8) (Ashby, 1999):
$$I_{vt} = \frac{E_{vt}}{\rho_{H}}$$
(8)

Donde:

 I_{vt} = Índice material de la madera en vibraciones transversales (m²/s²)

 E_{vt} = Módulo de elasticidad de la madera en vibraciones transversales (Pa)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

Se realizaron una prueba t-*Student*, para comparar las medias de las dos muestras y una prueba F-*Fisher* para comparar sus varianzas, la hipótesis nula fue: H₀: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0 para un valor de α = 0.05.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Tabla 1 muestra los resultados de las pruebas de ondas de esfuerzo y vibraciones transversales. Se presentan la densidad (ρ_H) y el contenido de humedad (H) y las características dinámicas: velocidad de ondas de esfuerzo (v_{oe}), frecuencia natural en vibraciones transversales (f_{vt}) y módulos de elasticidad respectivos (E_{oe} y E_{vt}). Los estadísticos que se detallan son la media (\bar{x}), la desviación estándar (σ), el coeficiente de variación correspondiente (CV), el sesgo y el coeficiente de apuntalamiento.

Los datos proporcionados en la Tabla 1, no permiten distinguir de manera clara si existen diferencias entre los valores de los módulos de elasticidad calculados con dos técnicas diferentes. Igualmente, si se grafican estos datos (Figura 3), estas desigualdades no son evidentes. Esta paradoja sugiere un análisis estadístico para comparar resultados entre los dos métodos empleados.



Figura 3. Módulos de elasticidad en función de la densidad, de acuerdo al método de determinación.

Barra	$\rho_{\rm H}$	Н	V _{oe}	E _{oe}	\mathbf{f}_{vt}	E _{vt}
	(kg/m^3)	(%)	(m/s)	(MPa)	(Hz)	(MPa)
01	581	9.04	4,322	10,858	872	11,987
02	620	8.74	4,322	11,576	854	12,235
03	781	9.44	4,342	14,732	885	15,819
04	474	9.50	4,389	9,123	795	7,795
05	759	9.72	4,219	13,513	846	12,514
06	756	9.60	4,107	12,751	814	12,965
07	668	9.46	4,438	13,150	825	12,397
08	662	9.52	4,195	11,649	839	12,450
09	711	9.34	4,268	12,942	950	15,698
10	735	9.62	4,435	14,455	942	14,907
11	545	9.69	4,429	10,682	866	10,451
12	745	9.20	4,057	12,260	777	11,910
13	505	9.20	4,313	9,393	846	9,799
14	560	8.53	4,339	10,540	853	10,660
15	581	9.08	4,389	11,192	867	11,668
16	732	9.38	4,147	12,581	858	13,122
17	662	8.86	4,468	13,212	881	13,433
18	742	8.68	4,124	12,615	778	11,722
19	627	9.26	3,867	9,381	718	8,385
20	553	9.26	4,587	11,636	893	12,136
$\overline{\mathbf{X}}$	650	9.26	4,288	11,912	848	12,103
σ	94	0.34	168	1603	55	2,070
CV	0.14	0.04	0.04	0.13	0.06	0.17
Sesgo	-0.297	-0.673	-0.694	-0.149	0.302	-0.179
Apuntalamiento	-1.171	-0.382	0.699	-0.609	-1.350	0.394

Tabla 1. Resultados pruebas dinámicas no destructivas.

Los valores de los estadísticos, sesgo y apuntalamiento, fuera del rango de -2 a +2, indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar, 2012). En este caso, todos los valores de sesgo y apuntalamiento se encuentran dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal. Estos resultados permiten realizar pruebas de hipótesis para contrastar medias y desviaciones estándares entre datos obtenidos en una muestra pareada común, pero medidos por dos métodos diferentes. En el caso que nos ocupa, datos de los módulos de elasticidad por ondas de esfuerzo, se contrastan con los obtenidos en vibraciones transversales.

Los datos proporcionados en la Tabla 1, no permiten distinguir de manera clara si existen diferencias entre los valores de los módulos de elasticidad calculados con dos técnicas diferentes. Igualmente, si se grafican estos datos (Figura 3), estas desigualdades no son evidentes. Esta paradoja sugiere un análisis estadístico para comparar resultados entre los dos métodos empleados.



Figura 3. Módulos de elasticidad en función de la densidad, de acuerdo al método de determinación.

Los valores de los estadísticos, sesgo y apuntalamiento, fuera del rango de -2 a +2, indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar, 2012). En este caso, todos los valores de sesgo y apuntalamiento se encuentran dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal. Estos resultados permiten realizar pruebas de hipótesis para contrastar medias y desviaciones estándares entre datos obtenidos en una muestra pareada común, pero medidos por dos métodos diferentes. En el caso que nos ocupa, datos de los módulos de elasticidad por ondas de esfuerzo, se contrastan con los obtenidos en vibraciones transversales.

Una prueba t-*Student*, para comparar las medias de los módulos E_{oe} y E_{vt} , resultó con un intervalo de confianza que va desde -1376 hasta 995. Puesto que el intervalo contiene el valor de 0, no hay diferencia significativa entre las medias de las dos muestras de datos, con un nivel de significancia del 95%. La prueba de hipótesis nula: H₀: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0, resultó en un valor-p = 0.747. Puesto que el valor-p calculado no es menor que 0.05, no se puede rechazar la hipótesis nula, para un valor de α = 0.05.

Igualmente, una prueba F-*Fisher* para comparar las varianzas de las dos muestras, el intervalo de confianza se extiende desde 0.237 hasta 1.516. Puesto que el intervalo contiene el valor de 1, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de las dos muestras con un nivel de significancia del 95%. La prueba de hipótesis nula: H₀: $\bar{\sigma}_1 \div \bar{\sigma}_2 = 1$, resultó en un valor-p = 0.274. Puesto que el valor-p calculado no es menor que 0.05, no se puede rechazar la hipótesis nula, para un valor de $\alpha = 0.05$.

Comparativamente con madera de densidad similar, por ejemplo *Lysiloma bahamensis*, recolectada en el Estado de Quintana Roo, y con densidad mayor ($700 < \rho_H > 880 \text{ kg/m}^3$),

Silva Guzmán y col. (2010) proponen un módulo de elasticidad de 9,900 a 13,100 MPa, para esta madera con un contenido de humedad del 12 al 15%. Igualmente, Tamarit Urias y López Torres (2007) reportan valores del módulo de elasticidad del orden de 13,180 MPa, para madera de la misma especie con un contenido de humedad del 12% y con una densidad de 712 kg/m³. Los valores reportados en la Tabla 1, son cercanos. Sin embargo, es necesario considerar que la densidad de la madera en nuestro caso de estudio fue menor, de tal manera que los valores calculados con ondas de esfuerzo y vibraciones transversales pueden ser considerados relativamente superiores a los calculados en condiciones estáticas.

Respecto a los indicadores de calidad, la Tabla 2 presenta los indicadores de calidad correspondientes a las pruebas de ondas de esfuerzo y de vibraciones transversales. Al igual que los resultados de los módulos de elasticidad, los factores de calidad y los índices materiales de *Lysiloma* spp., son similares entre métodos de determinación (Figura 4).

Tabla 2. Valores promedio y su desviación estandar de los indicadores de calidad.				
Ondas de	esfuerzo	Vibraciones transversales		
F _{oe} (m ⁴ /s kg)	$I_{oe} (m^2/s^2)$	$\begin{array}{c} F_{vt} \\ (m^4/s \bullet kg) \end{array}$	I_{vt} (m ² /s ²) x 10 ⁻³	
6.76	18.41	6.79	18.68	
1.18	1.43	1.17	2.23	
	y su desviación Ondas de F_{oe} $(m^4/s kg)$ 6.76 1.18	y su desviación estandar de losOndas de esfuerzo F_{oe} I_{oe} $(m^4/s kg)$ (m^2/s^2) 6.76 18.41 1.18 1.43	y su desviación estandar de los indicadores de caOndas de esfuerzoVibraciones t F_{oe} I_{oe} F_{vt} $(m^4/s kg)$ (m^2/s^2) $(m^4/s \cdot kg)$ 6.7618.416.791.181.431.17	



Figura 4. Comparación de los indicadores de calidad.

CONCLUSIONES

Los resultados sugieren que para el caso de estudio de una muestra de madera de *Lysiloma* spp., no existe una diferencia estadísticamente significativa cuando se emplean las técnicas de ondas de esfuerzo o de vibraciones transversales en el cálculo del módulo de elasticidad.

Igualmente, los factores de calidad y los índices materiales de *Lysiloma* spp., son similares independientemente del método de determinación. Su magnitud posiciona a esta especie como una madera de buena calidad.

REFERENCIAS

Ashby, M.F. 1999. Materials selection in mechanical design. Second Edition. Butterworth Heinemann. England.

Bárcenas-Pazos, G.M.; Ortega-Escalona, F.; Ángeles-Álvarez, G.; Ronzón-Pérez, P. 2005. Relación estructura-propiedades de la madera de angiospermas mexicanas. *Universidad y Ciencia, Trópico Húmedo*. 21(42): 45-55.

Gutiérrez Pulido, H. ; de la Vara Salazar, R. 2012. 3a Edición. Análisis y diseño de experimentos. Mc Graw Hill. México.

Machek, L. ; Militz, H. ; Sierra-Alvarez, R. 2001. The influence of wood moisture content on dynamic modulus of elasticity measurements in durability testing. *Forschung verwertung*. 5(2001): 97-100.

Martínez Castillo, J.L.; Martínez-Pinillos Cueto, E. 1996. Características de maquinado de 32 especies de madera. Madera y Bosques 2(1): 45-61.

Müller, H.A. 1986. How violin makers choose wood and what this procedure means from a physical point of view. Catgut Acoustical Society International Symposium on musical Acoustics. USA.

Ono, T.; Norimoto, M. 1983. Study on Young's modulus and internal friction of wood in relation to the evaluation of wood for musical instruments. *Japan Journal of Applied Physics*. 22(4): 611-614.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA.

Spycher, M.; Schwarze, F.W.M.R.; Steiger, R. 2008. Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Science and Technology*. 42: 325-342.

Silva Guzmán, J.A. y col. 2010. Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas. Departamento de Madera, Celulosa y Papel, Universidad de Guadalajara y Comisión Nacional Forestal, México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Guridi Gómez, L.I.; García Moreno, T. 2010. Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 6(1): 3-32.

Sotomayor Castellanos, J.R.; García Mariscal, L.J.; Hernández Maldonado, S.A.; Moya Lara, C.E.; Olguín Cerón, J.B. 2011. Dispositivo de usos múltiples para pruebas no destructivas en madera y materiales compuestos de madera. Ultrasonido, Ondas de esfuerzo y Vibraciones transversales. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 7(3): 20-33.

Tamarit Urias, J.C.; López-Torres, J.L. 2007. Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México. Libro Técnico No. 3. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.

14. MÓDULOS DE ELASTICIDAD E INDICADORES DE CALIDAD DE LA MADERA DE *QUERCUS* SPP. (ENCINO) DEL ESTADO DE MICHOACÁN Determinados por ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones

RESUMEN

La madera es un componente constructivo que compite con otros materiales y tecnologías propias de la industria de la construcción. Con el objeto de mejorar la productividad industrial, es prudente el conocimiento fundamental de los atributos relativos a la aptitud de de construcción con este material. El objetivo de este trabajo fue determinar módulos de elasticidad e indicadores de calidad de la madera de Quercus spp. del Estado de Michoacán. A partir de la velocidad del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo en la madera, se calcularon los módulos de elasticidad correspondientes a estas dos técnicas. Además, se determinó el índice material, el factor de calidad y el coeficiente de radiación del sonido. Se presenta también su densidad y su clasificación de acuerdo a la tabla FITECMA. Se realizaron pruebas no destructivas de ultrasonido, ondas de esfuerzo y en vibraciones transversales en probetas normalizadas con un contenido de humedad promedio de 10%. La densidad promedio de la madera fue de 902 kg/m³. El valor del módulo de elasticidad en ultrasonido fue de 23,128 MPa; el del módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo fue de 11,053 MPa; y el del módulo de elasticidad en vibraciones transversales fue de 17,611 MPa. Comparativamente con otras especies, los valores promedio de los indicadores de calidad fueron similares a los resultados de estudios semejantes.

Palabras clave: densidad, módulo de elasticidad, índice material, factor de calidad, coeficiente de radiación del sonido.

INTRODUCCIÓN

Los métodos de evaluación no destructivos, que emplean la capacidad de la madera para almacenar y disipar energía, han confirmado su utilidad para predecir, entre otros parámetros mecánicos del material, su frecuencia natural de vibración y la velocidad de transmisión de una onda mecánica (Kawamoto y Williams, 2002). La velocidad del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo en la madera, son indicadores de sus propiedades de calidad acústica. Estos parámetros, al igual que la frecuencia natural y la densidad, son necesarios al cálculo del módulo de elasticidad determinado por métodos no destructivos. Por su parte, el módulo de elasticidad de la madera es uno de los parámetros de ingeniería más importantes para el diseño y cálculo de productos y estructuras de madera. Entre otras aplicaciones, el módulo de elasticidad se emplea para dimensionar elementos estructurales que satisfagan requisitos de calidad y de seguridad estructural. Los índices de calidad tales como el índice material, el factor de calidad y el coeficiente de radiación del sonido de la madera, son también indicadores para su empleo en productos o en aplicaciones donde el comportamiento acústico es relevante.

La utilización de la madera en la manufactura de instrumentos musicales de cuerda, viento y percusión es una de las más altas valoraciones de utilización del material, particularmente las especies de maderas con óptimas propiedades acústicas, calificadas como "madera de resonancia" (Bucur, 1995). Las propiedades de la madera relacionadas con su caracterización acústica son importantes también para su valoración como materia prima para la elaboración de muebles para amplificadores de sonido y cajas de resonancia musicales.

Para una correcta evaluación de la madera en aplicaciones acústicas, por ejemplo su calidad de tono para instrumentos musicales, son necesarios entre otros parámetros, la densidad, la velocidad del ultrasonido, el módulo de elasticidad y el coeficiente de radiación del sonido de la madera (Spycher y col., 2008; Wegst, 2008). Por ejemplo, el factor de calidad (*Radiation ratio R* en Spycher y col.) es el parámetro más significativo para la determinación de la calidad de la madera para aplicaciones acústicas. De acuerdo con Müller (1986) y Ono y Norimoto (1983), un valor alto del factor de calidad de una madera indica una buena calidad acústica comparativa, es decir, una vocación para "madera de resonancia".

Por otra parte, un buen diseño de estructuras de madera puede contribuir a mejorar el ambiente sonoro en construcciones, gracias a las propiedades acústicas del material. Entre otros indicadores de calidad de los materiales de construcción, el índice material que relaciona su módulo de elasticidad con su densidad, es un indicador de la calidad de la madera para usos específicos (Ashby, 1999). Un significativo índice material de una madera propone una mejor resistencia en relación a su densidad y una buena apreciación como material de ingeniería.

Asimismo, la madera es un componente constructivo que compite con otros materiales y tecnologías propias de la industria de la construcción. Con el objeto de mejorar la productividad industrial, es prudente el conocimiento fundamental de los atributos relativos a la aptitud de construcción con este material. En el asunto que nos ocupa, es recomendable contar con información técnica de materiales para su incorporación en el proceso constructivo, como es el caso de la madera, la cual se caracteriza por ser resistente pero a la vez ligera (Sotomayor Castellanos y col. 2010).

La caracterización mecánica-acústica de la madera ha sido posible gracias a la aplicación de métodos de evaluación de carácter no destructivo en el estudio de especies con vocación acústica y constructiva (Bucur, 1995; Pellerin y Ross, 2002). Particularmente, las técnicas que utilizan ondas y vibraciones mecánicas para estimar su módulo de elasticidad, están documentadas recientemente, entre otros, por Halabe y col. (1997); Sandoz y col. (2000); Villaseñor Aguilar (2007); Ortiz Mansilla y col. (2009).

En la bibliografía especializada, se encuentran datos de características elásticas de maderas mexicanas determinadas en condiciones de carga estáticas (Tamarit Urias y López Torres, 2007; Silva Guzmán y col., 2010). Con todo, es notoria la ausencia de datos derivados de pruebas mecánicas que puedan aplicarse en el estudio del comportamiento de productos funcionando en condiciones dinámicas, o para fines de diseño sísmico de estructuras.

En México existen publicaciones que proponen maderas mexicanas para su estudio y promoción en aplicaciones acústicas. Entre otros autores se pueden citar: Guridi Gómez y García López (1977); Barajas Morales y León Gómez (1984); Gutiérrez Carvajal y Dorantes López (2007); Tamarit Urias y López Torres (2007). Estos trabajos se orientan principalmente a la caracterización de su estructura anatómica y de sus posibles usos de la madera en instrumentos musicales. Con excepción de Sotomayor Castellanos y col. (2010), la revisión de la bibliografía del país sobre el tema de características acústicas e indicadores relacionados con la calidad de la madera, evidenció una ausencia de información al respecto. No se encontró información acerca de los índices materiales y los factores de calidad de especies la madera del Género *Quercus* que habitan en el Estado de Michoacán.

Respecto a las propiedades tecnológicas de la madera del género *Quercus*, Silva Guzmán (2008), propone la siguiente información sobre la madera de Quercus spp: Características: Albura de color gris rosáceo claro, con transición gradual al duramen de color castaño rosáceo y con matiz amarillento o rojizo. Anillos de crecimiento claramente marcados por bandas de poros grandes, veteado; textura gruesa, superficie algo lustrosa; madera seca sin olor o sabor característico; Trabajabilidad: Madera de peso medio a alto, dura y tenaz, con buena resistencia mecánica bajo carga estática como dinámica. Debido a su acentuada porosidad anular, la madera con anillos de crecimiento anchos es más pesada y dura que la madera de crecimiento lento. Buena para trabajar con herramientas manuales y en todas las operaciones de maquinado. Ofrece un buen acabado y se deja pegar fácilmente; retiene clavos y tornillos muy bien pero requiere taladrado previo para evitar que la madera se raje; Secado: La madera se seca lentamente al aire libre presentando deformaciones y grietas no muy severas. El secado técnico se lleva a cabo en tiempo moderado y con tendencia marcada de agrietamiento superficial y en las testas así como al apanalamiento. Las tablas de 1"-11/2" requieren programas cuidadosos tales como el T4-C2 (EUA) o bien, C (Reino Unido); Durabilidad natural: Madera poco resistente al ataque de hongos e insectos; su aplicación en usos exteriores requiere tratamiento previo al cual es moderadamente resistente; Usos: Construcción interior, carpintería de obra, muebles finos, pisos, redilas y pisos para vehículos de carga, chapas decorativas y paneles. No sirve para barricas debido a su elevada permeabilidad.

OBJETIVO

Determinar las características dinámicas y los indicadores de calidad de la madera de *Quercus* spp. empleando métodos de ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones transversales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material experimental consistió en madera del género *Quercus*, recolectada en aserraderos localizados en la región Oriente del Estado de Michoacán. En una primera etapa, se prepararon 23 barras con dimensiones de 50 mm x 50 mm x 400 mm, orientadas respectivamente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. Las barras se almacenaron durante 24 meses en una cámara de acondicionamiento con una

temperatura de 20°C y una humedad relativa de 60%. En las barras se realizaron las pruebas de ultrasonido en la dirección transversal a la dirección de la fibra (RT) y en la dirección longitudinal de la fibra (L). Las pruebas de ondas de esfuerzo se realizaron únicamente en barras y en dirección longitudinal.

Posteriormente, en una segunda fase, las barras se recortaron y se prepararon 67 probetas con dimensiones de 20 mm x 20 mm x 320 mm, orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente, y de acuerdo a las recomendaciones de la norma de la Organización Internacional para la Estandarización (International Organization for Standardization, 1975). En estas probetas ISO se realizaron pruebas de ultrasonido, ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal y de vibraciones transversales.

El contenido de humedad se determinó por el método de diferencia de pesos con un grupo complementario de probetas. Para cada probeta se calculó la densidad correspondiente al contenido de humedad de la madera en el momento de las pruebas. Igualmente, se midieron las velocidades de onda y las frecuencias naturales necesarias para el cálculo de los módulos de elasticidad por ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones transversales. Posteriormente, se calcularon los indicadores de calidad: índice material, factor de calidad para las tres pruebas realizadas, y para los resultados de ultrasonido y ondas de esfuerzo, se calculó el coeficiente de radiación del sonido.

El contenido de humedad de la madera se calculó con la fórmula:

$$H = \frac{W_{H} - W_{A}}{W_{A}} (100)$$
(1)

Donde:

H = Contenido de humedad de la madera al momento del ensayo (%)

 w_H = Peso de la probeta a un contenido de humedad H (kg)

 w_A = Peso de la probeta en estado anhidro: H = 0% (kg)

La densidad aparente de la madera se calculó con la fórmula:

$$\rho_{\rm H} = \frac{w_{\rm H}}{V_{\rm H}} \tag{2}$$

Donde:

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

 w_H = Peso de la probeta a un contenido de humedad H (kg)

 $V_{\rm H}$ = Volumen de la probeta a un contenido de humedad H (m³)

Ultrasonido

Las pruebas por ultrasonido (us) consistieron en suministrar un impulso ultrasónico con una frecuencia de 22 kHz, en transmisión directa en los extremos de la probeta con el aparato

Sylvatest® (Figura 1). Se midió el tiempo de transmisión de la onda, se calculó la velocidad y se determinó el módulo de elasticidad con la fórmula (3) (Pellerin y Ross, 2002):

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

Donde:

 $E_{us} = M \delta du lo de elasticidad por ultrasonido (Pa)$

 v_{us} = Velocidad del ultrasonido (m/s)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

La impedancia acústica en ultrasonido se calculó con la fórmula (4) (Wegst, 2008):

$$z_{us} = v_{us} \rho_{H} \tag{4}$$

Donde:

 z_{us} = Impedancia acústica de la madera (kg/s m²)

 v_{us} = Velocidad del ultrasonido (m/s)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

El coeficiente de radiación acustica se calculó con la fórmula (5) (Wegst, 2008):

$$R_{\rm us} = \sqrt{\frac{E_{\rm us}}{\rho_{\rm H}^{-3}}}$$
(5)

Donde:

 R_{us} = Coeficiente de radiación de la madera por ultrasonido (m⁴/s • kg)

 E_{us} = Módulo de elasticidad de la madera (Pa)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

Ondas de esfuerzo

Las pruebas de ondas de esfuerzo (oe) consistieron en medir el tiempo de transmisión de una onda a través de la probeta. Se empleó el aparato *Metriguard*® (Figura 2). Se calculó la velocidad y se determinó el módulo de elasticidad con la fórmula (6) (Pellerin y Ross, 2002):

$$E_{oe} = v_{oe}^2 \rho_{\rm H} \tag{6}$$

Donde:

E_{oe} = Módulo de elasticidad de la madera en ondas de esfuerzo (Pa)

 v_{oe} = Velocidad de las ondas de esfuerzo (m/s)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)



Figura 1. Dispositivo para pruebas de ultrasonido. Foto a la derecha) Barras; Foto a la izquierda) Probetas ISO (Sotomayor-Castellanos y col., 2011).



Figura 2. Dispositivos para pruebas de ondas de esfuerzo. Foto a la derecha) Barras; Foto a la izquierda) Probetas ISO (Sotomayor-Castellanos y col., 2011).



Figura 3. Dispositivo para pruebas de vibraciones transversales.

El factor de calidad en ondas de esfuerzo se calculó con la fórmula (7) (Spycher y col., 2008):

$$F_{oe} = \sqrt{\frac{E_{oe}}{\rho_{\rm H}^3}}$$
(7)

Donde:

F_{oe} = Factor de calidad de la madera en ondas de esfuerzo (m ⁴ /s	; kg	z)
---	------	----

 E_{oe} = Módulo de elasticidad de la madera en ondas de esfuerzo (Pa)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

El índice material en ondas de esfuerzo se calculó con la fórmula (8) (Ashby, 1999):

$$I_{oe} = \frac{E_{oe}}{\rho_{\rm H}}$$
(8)

Donde:

 $\begin{array}{ll} I_{oe} & = \mbox{Indice material de la madera en ondas de esfuerzo (m^2/s^2)} \\ E_{oe} & = \mbox{Módulo de elasticidad de la madera en ondas de esfuerzo (Pa)} \\ \rho_{H} & = \mbox{Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m^3)} \end{array}$

Vibraciones transversales

Las pruebas de vibraciones transversales (vt) consistieron en medir la frecuencia natural de vibración transversal a la dirección longitudinal de la probeta. Para tal fin se utilizó el aparato *Grindosonic*® (Figura 3). El módulo de elasticidad en vibraciones transversales fue calculado con la fórmula (9) (Machek y col., 2001):

$$E_{\rm vt} = \frac{4 \pi^2 L_{\rm vt}^4 f_{\rm vt}^2 \rho_{\rm H}}{m^4 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{l_{\rm vt}^2} K\right)$$
(9)

Donde:

- E_{vt} = Módulo de elasticidad en vibraciones transversales (Pa)
- L_{vt} = Largo de la probeta (m)
- l_{vt} = Distancia entre apoyos (m)
- f_{vt} = Frecuencia natural de la probeta (Hz)
- $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)
- m, K = Constantes a dimensionales (12.65, 49.48)

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta
$$(m^2)$$

Con: $r = \sqrt{I/A}$

I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m^4)

A = Área de la sección transversal de la probeta (m^2)

El factor de calidad en vibraciones transversales se calculó con la fórmula (10) (Spycher y col., 2008):

$$F_{vt} = \sqrt{\frac{E_{vt}}{\rho_{H}^{3}}}$$
(10)

Donde:

- F_{vt} = Factor de calidad de la madera en vibraciones transversales (m⁴/s kg)
- E_{vt} = Módulo de elasticidad de la madera en vibraciones transversales (Pa)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

El índice material en vibraciones transversales se calculó con la fórmula (11) (Ashby, 1999):

$$I_{vt} = \frac{E_{vt}}{\rho_{H}}$$
(11)

Donde:

 I_{vt} = Índice material de la madera en vibraciones transversales (m²/s²)

 E_{vt} = Módulo de elasticidad de la madera en vibraciones transversales (Pa)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Tablas 1 y 2 muestran los resultados de las pruebas dinámicas en barras y probetas ISO en madera de *Quercus* spp. respectivamente. Se presentan la densidad, el contenido de humedad y las características dinámicas. Además, se muestran los índices de calidad correspondientes. Los estadísticos que se detallan son la media (\bar{x}), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (CV). Además, las Tablas presentan los valores promedio de los indicadores de calidad determinados.

Características acústicas			Ultrasonido				Ondas de esfuerzo	
	ρ	Н	Vus L	Eus L	Vus RT	Eus RT	Voe L	Eoe L
	(kg/m^3)	(%)	(m/s)	(MPa)	(m/s)	(MPa)	(m/s)	(MPa)
x	898	10	4,929	22,022	1,718	2,692	4,366	17,299
σ	89	0.57	376	4,661	169	556	351	3,851
CV	0.10	0.06	0.08	0.21	0.10	0.21	0.08	0.22
Indicadores de calidad			Ultras	sonido		Ondas de	esfuerzo	
			z _{us} L	R _{us} L	$z_{us} RT$	$R_{us} RT$	Foe L	I _{oe} L
			$\frac{(\text{kg/s m}^2)}{\text{x }10^3}$	(m ⁴ /s kg)	(kg/s m ²) x 10 ³	(m ⁴ /s kg)	(m ⁴ /s kg)	(m^2/s^2)
	$\overline{\mathbf{X}}$		4,434	5.53	1,541	1.93	4.89	19.18

Tabla 1. Resultados de las pruebas dinámicas en barras de Quercus spp.

El valor de contenido de humedad es menor en 2% respecto al que especifican las normas para la determinación de características mecánicas, el cual es de 12% (International Organization for Standardization, 1975). Para fines de diseño y cálculo, es necesario ajustar los parámetros mecánicos aquí calculados a un contenido de humedad estandarizado de la madera.

El valor promedio de la densidad es aparente, ya que es calculado con un contenido de humedad promedio de 10%, lo que implica un incremento en el peso de la madera seca, ocasionado este por la presencia de agua de la madera. De acuerdo con la TABLA FITECMA (Sotomayor-Castellanos, 2008), la densidad de la madera de *Quercus* spp., clasifica como muy alta. La magnitud de la variación de esta característica fue acorde a otros resultados propuestos por trabajos de investigación similares (Silva Guzmán y col., 2010; Tamarit Urias y López-Torres, 2007).

			1		1	~		
Carac	cterísticas a	cústicas	Ultras	sonido	Ondas de	esfuerzo	Vibraciones	transversales
	ρ	Н	Vus L	Eus L	Voe L	Eoe L	fvt L	Evt L
	(kg/m^3)	(%)	(m/s)	(MPa)	(m/s)	(MPa)	(Hz)	(MPa)
x	902	10	5,018	23,128	3,462	11,053	887	17,611
σ	61	0.57	602	6,097	287	1,977	89	4,036
CV	0.07	0.06	0.12	0.26	0.08	0.18	0.10	0.23
Indic	cadores de	calidad	Ultras	sonido	Ondas de	esfuerzo	Vibraciones	transversales
			z _{us} L	R _{us} L	F _{oe} L	I _{oe} L	F _{vt} L	I_{vt}
			(kg/s, m ²) x 10 ³	(m ⁴ /s•kg)	$(m^4/s \cdot kg)$	(m^2/s^2)	$(m^4/s \cdot kg)$	(m ² /s ²) x 10 ⁻³
	$\overline{\mathbf{x}}$		4,535	5.58	3.85	12.24	4.88	19.46

Tabla 2. Resultados de las pruebas dinámicas en probetas ISO de Quercus spp.

Velocidades de onda y frecuencias

Sotomayor-Castellanos y col. (2010) presentan para especies del género *Quercus*, con densidad de 812 kg/m³ y contenido de humedad de 11%, valores promedio de la velocidad del ultrasonido de 5,200 m/s y del módulo de elasticidad de 24,630 MPa en la dirección longitudinal. Estos datos son cercanos, pero mayores a los resultados de esta investigación. En efecto, para este caso, la madera empleada por los autores citados, consistió en probetas de la colección de la xiloteca de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Es decir, probetas de madera seleccionada con excelentes características estructurales y convenientemente orientadas. De aquí, que sus parámetros mecánicos sean mayores a los determinados con barras y probetas, si bien normalizadas, con una calidad tecnológica menor.

Respecto a las ondas de esfuerzo, Sotomayor-Castellanos y Olguín-Cerón (2013), estudiando madera de *Quercus scytophylla*, con densidad de 852 kg/m³ y con un contenido de humedad del 12%, indican valores para la velocidad de ondas de esfuerzo de 3,642 m/s y un módulo de elasticidad de 11,385 MPa.

En el mismo contexto, y para resultados obtenidos con ensayos de vibraciones transversales en madera de *Quercus scytophylla* de densidad de 852 kg/m³, y con un contenido de humedad de 12%, Sotomayor-Castellanos y col. (2013) presentan valores promedio de frecuencias

naturales en vibraciones transversales de 747 Hz y módulos de elasticidad correspondientes de 13,922 MPa.

Por otra parte, los valores promedio del módulo de elasticidad encontrados en este trabajo con las tres técnicas de carácter dinámico, son superiores a los datos propuestos por De la Paz Pérez-Olvera y Davalos-Sotelo (2008), quienes presentan para 24 especies del género *Quercus* de México, valores de módulos de elasticidad en flexión estática y determinados en madera en estado verde. Sus módulos de elasticidad varían desde 9,902 MPa para *Q. coccolobifolia* hasta 15,516 MPa, correspondiente a *Q. conspersa*. Por su parte, Silva Guzmán (2008) propone un rango para la densidad de la madera seca al aire (12% < H > 15%) de madera del género *Quercus* de 650 a 780 kg/m³, y un rango para el módulo de elasticidad en flexión estática de 10,300 MPa a 15,700 MPa.

Estas diferencias de valores encontradas entre los autores revisados y los resultados de esta investigación, pueden ser explicadas, entre otros factores, por el hecho de que las pruebas de esta investigación fueron realizadas con madera con un contenido de humedad de alrededor del 10%, condición que elevará el valor del módulo de elasticidad, en comparación con el de madera en estado saturado, como es el caso de los resultados de los investigadores citados (De la Paz Pérez-Olvera y Davalos-Sotelo, 2008). Otra posible causa en la diferencia entre los valores determinados y los consultados, es que la solicitación aplicada aquí fue de carácter dinámico, con velocidades de aplicación de la carga muy elevada, en comparación con las de los ensayos estáticos. En el estudio del comportamiento mecánico de la madera, es comúnmente aceptado que los módulos de elasticidad determinados en condiciones dinámicas son superiores a los calculados en pruebas de carácter estático (Pellerin y Ross, 2002; Ilic, 2003).

Influencia de la técnica

Las solicitaciones aplicadas con los métodos de ultrasonido y de ondas de esfuerzo pueden considerarse similares. Sin embargo, los valores promedio de las velocidades y de los módulos presentados en la Tabla 1, denotan diferencias importantes según la técnica empleada.

Los resultados de la pruebas t-*Student* para comparar medias suponiendo varianzas iguales, con la hipótesis nula: $H_0: \bar{x}_1 + \bar{x}_2 = 0$, y la hipótesis alterna: $H_1: \bar{x}_1 + \bar{x}_2 \neq 0$, para un nivel de significancia del 95%, se presentan en la Tabla 3. Su análisis demuestra que, puesto que los intervalos de confianza para la diferencia entre las medias no contienen el valor 0, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los valores promedio determinados con las diferentes técnicas empleadas (es decir, las dos muestras). En el mismo contexto, dado que los valores-*p* calculados son menores que 0.05, se pueden rechazar la hipótesis nula en favor de la alterna, de acuerdo con Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar (2012).

Estos resultados se pueden explicar por el hecho de que el módulo por ultrasonido esta medido a partir de una solicitación simple y en la dirección longitudinal de la madera. Las

ondas de ultrasonido viajan a través de la estructura anatómica de la madera y se difunden por el medio que facilita más su transmisión. Por ejemplo, a través de las paredes celulares.

i		
Muestra 1: E _{oe} Fakopp (Barras) Muestra 2: E _{us} Sylvatest (Barras)	Parámetros	Interpretación
Intervalo de confianza del 95%:	[-7264, -2182]	Existe diferencia significativa
$H_0: \overline{\boldsymbol{x}}_1 - \overline{\boldsymbol{x}}_2 = \boldsymbol{0}$	t = -3.75	Se rechaza la hipótesis
$H_1: \overline{x}_1 - \overline{x}_2 \neq 0$	Valor-p = 0.000519	nula H ₀ para $\alpha = 0.05$
Muestra 1: E _{oe} Metriguard (Probetas ISO) Muestra 2: E _{us} Sylvatest (Probetas ISO)	Parámetros	Interpretación
Intervalo de confianza del 95%:	[-13,619, -10,530]	Existe diferencia significativa
$H_0: \overline{x}_1 - \overline{x}_2 = 0$	t = -15.47	Se rechaza la hipótesis
$\mathbf{H}_{1}: \overline{\mathbf{x}}_{1} - \overline{\mathbf{x}}_{2} \neq 0$	Valor- <i>p</i> << 0.0	nula H ₀ para $\alpha = 0.05$

Tabla 3. Prueba t-Student para comparar medias suponiendo varianzas iguales.

Por su parte, la solicitación de ondas de esfuerzo, implica la vibración de cada una de las secciones transversales y adyacentes que conforman todo el volumen de la probeta. Este movimiento se realiza idealmente en la dirección de la solicitación, en este caso, en la longitudinal. Sin embargo, este tipo de esfuerzo provoca la vibración de la masa de cada sección de la probeta, requiriendo más energía en comparación con la transmisión simple del ultrasonido por la madera. Aparentemente, en el caso de ondas de esfuerzo, la velocidad de onda es menor y en consecuencia, el valor del módulo así determinado será más pequeño en comparación con el calculado por ultrasonido.

Por otra parte, la solicitación en vibraciones transversales, es de modalidad compuesta y ocasionando esfuerzos internos y deformaciones locales de compresión, tensión y cortante. Esta combinación resultará en deformaciones más amplias para esfuerzos aplicados equivalentes. De tal forma, que el módulo de elasticidad en vibraciones transversales es aparentemente mayor que el determinado con ondas de esfuerzo, pero menor en comparación con el módulo por ultrasonido.

Otro enfoque para explicar estos contrastes en los resultados, puede ser el siguiente: cada técnica está basada en un modelo explicativo distinto del fenómeno. Los parámetros derivados de las pruebas de ultrasonido y ondas de esfuerzo están fundamentadas en una ecuación de onda, la cual se transmite a través de la barra o probeta, mientras que los parámetros derivados de las pruebas de vibraciones, se calculan a partir de una ecuación de movimiento de la masa representativa de la barra o de la probeta.

Por otra parte, es conveniente considerar que el ultrasonido y las ondas de esfuerzo utilizan los tejidos leñosos y las particularidades estructurales de la madera como medios de transmisión. Por su parte, las vibraciones transversales ponen en movimiento el total de la masa de la pieza. En consecuencia, las deformaciones relacionadas con el cálculo del módulo de elasticidad, serán particulares a cada tipo de solicitación.

Los datos del módulo de elasticidad E_{vt} , corresponden a magnitudes esperadas y comparables con otros materiales de ingeniería. La Figura 4, esquematiza, en ejes con escala logarítmica (log), las nubes de distribución de valores del módulo de elasticidad de la madera de *Quercus* aquí detallada, de varias especies de madera en las direcciones longitudinal y transversal, del acero y del concreto. De su observación se concluye que el *Quercus*, tiene parámetros dinámicos comparables a los del concreto y menores que los del acero. No obstante, la madera es más competitiva si se pondera su módulo de elasticidad E_{vt} , con su densidad. Un examen en el mismo tenor, analizando los módulos E_{us} y E_{oe} , resulta en corolarios similares.



Figura 4. Carta de selección de materiales (Adaptado de Ashby, 1999)



Figura 5. Comparación de indicadores de calidad entre barras y probetas ISO.

Indicadores de calidad

Una comparación gráfica de los indicadores de calidad entre las barras y las probetas ISO es presentada en la Figura 5, particularmente para la dirección longitudinal. Los resultados presentados en las tablas 1 y 2, y en la figura 5, sugieren que no existe una diferencia importante en los valores promedio. Igualmente, de la comparación de las Tablas 1 y 2, no se perciben diferencias importantes entre los coeficientes de variación, particularmente para los indicadores derivados de las pruebas de ultrasonido y de ondas de esfuerzo, en la dirección longitudinal.

Índice material

Sotomayor-Castellanos y col. (2010) presentan valores similares del índice material y del factor de calidad para maderas mexicanas del género *Quercus*, con un contenido de humedad similar al de esta investigación. Es interesante notar que no obstante la desigualdad en calidad estructural de la madera entre las barras y probetas empleadas en las dos investigaciones, los indicadores de calidad corrigen estas diferencias. De aquí la utilidad de estos parámetros. Estos pueden relativizar las características propias a cada especie y servir como referencia para fines de cálculo y diseño de productos elaborados con madera.

Coeficiente de radiación del sonido

El coeficiente de radiación de sonido calculado en la madera del género *Quercus* de Michoacán, presenta un valor de 24% menor al coeficiente de radiación del sonido, estimado para los valores promedio de los encinos mexicanos estudiados por Sotomayor-Castellanos y col. (2010). Es importante insistir, en que las probetas estudiadas por estos autores, son tablillas de laboratorio, con cualidades materiales destacables. En cambio, la madera aquí estudiada es más representativa de la madera empleada usualmente.

Para el caso de las ondas de esfuerzo, no se encontró información con la cual se pudiera contrastar los resultados relacionados con el coeficiente de radiación de sonido. Empero, dado que las solicitudes de las pruebas de ultrasonido y ondas de esfuerzo son similares, se pueden plantear conclusiones análogas.

Anisotropía

Los parámetros evaluados con ultrasonido en las direcciones longitudinales y transversales de las barras, velocidad y módulo de elasticidad (Tabla 1), mostraron una anisotropía del orden de 2.9 y 8.2 respectivamente. La magnitud de estos resultados coinciden con la de los trabajos anteriores (Sotomayor Castellanos y col., 2010), y confirma las propiedades de anisotropía de la madera del género *Quercus*.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo son comparables con los datos proporcionados por trabajos anteriores y afines al tema de investigación, siempre y cuando se comparen los datos tomando en cuenta los valores de la densidad y del contenido de humedad de la madera en los diferentes experimentos.

De acuerdo a los resultados, se concluye que las discrepancias en los diferentes modos de transmisión de la onda a través de la madera, y/o en la forma en que se deforman las probetas, puede explicar las diferencias numéricas entre resultados.

REFERENCIAS

Ashby, M.F. 1999. Materials selection in mechanical design. Second Edition. Butterworth Heinemann. England.

Barajas Morales, J.; León Gómez, C. 1984. Anatomía de maderas de México: Especies de una selva caducifolia. Instituto de Biología. Publicaciones especiales 1. Universidad Nacional Autónoma de México.

Bucur, V. 1995. Acoustics of wood. CRC Press. USA.

De la Paz Pérez-Olvera, C.; Davalos-Sotelo, R. 2008. Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México. *Madera y Bosques*. 14(3): 43-80.

Guridi Gómez, L.I.; García López, A. 1997. Las maderas en los instrumentos musicales de cuerda de Paracho. Secretaría de Difusión cultural. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Gutiérrez Carvajal, L.; Dorantes López, J. 2007. Especies forestales de uso tradicional del Estado de Veracruz. CONAFOR-CONACYT-UV 2003-2004. México.

Gutiérrez Pulido, H.; de la Vara Salazar, R. 2012. 3a Edición. Análisis y diseño de experimentos. Mc Graw Hill. México.

Halabe, U.B.; Bidigalu, G.H.; GangaRao, H.V.S.; Ross, R.J. 1997. Nondestructive Evaluation of Green Wood Using Stress Wave and Transverse Vibration Techniques. *Materials Evaluation*. 55(9): 1013-1018.

Ilic, J. 2003. Dynamic MOE of 55 species using small wood beams. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 61: 167-172.

International Organization for Standardization ISO 3129-1975 (E). 1975. Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. ISO Catalog 79 Wood

technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO). Brussels.

Kawamoto, S.; Williams, R.S. 2002. Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood-Based Composites – A Review. Gen. Tech. Rep. FPL-GRT-134. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA.

Machek, L.; Militz, H.; Sierra-Alvarez, R. 2001. The influence of wood moisture content on dynamic modulus of elasticity measurements in durability testing. *Forschung verwertung*. 5(2001): 97-100.

Müller, H.A. 1986. How violin makers choose wood and what this procedure means from a physical point of view. Paper presented at Catgut Acoustical Society International Symposium on musical Acoustics. USA.

Ono, T.; Norimoto, M. 1983. Study on Young's modulus and internal friction of wood in relation to the evaluation of wood for musical instruments. *Japan Journal of Applied Physics*. 22(4): 611-614.

Ortiz Mansilla, R.; Baradit A., E.; Navarrete A., J. 2009. 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. *Ingeniería e Investigación*. 29(3): 139-141.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA.

Sandoz, J.L.; Benoit, Y.; Demay, L. 2000. Wood testing using Acousto-ultrasonic. In: Proceedings of the WCTE 2000 World Conference on Timber Engineering. Canada. pp: 136-142.

Silva Guzmán, J.A. 2008. Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México. Tomo I. CONAFOR, México.

Silva Guzmán, J.A. et al. 2010. Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas. Departamento de Madera, Celulosa y Papel, Universidad de Guadalajara y Comisión Nacional Forestal, México.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2008. TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. FITECMA. UMSNH. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Guridi Gómez, L.I.; García Moreno, T. 2010. Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 6(1): 3-32.

Sotomayor Castellanos, J.R.; García Mariscal, L.J.; Hernández Maldonado, S.A.; Moya Lara, C.E.; Olguín Cerón, J.B. 2011. Dispositivo de usos múltiples para pruebas no destructivas en madera y materiales compuestos de madera. Ultrasonido, Ondas de esfuerzo y Vibraciones transversales. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 7(3): 20-33.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Olguín Cerón, J.B. 2013. Caracterización mecánica por ondas de esfuerzo de madera plastificada de *Quercus scytophylla*. *Investigación y Ciencia*. Universidad Autónoma de Aguascalientes. México. En prensa.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Suárez Bejar, G.; Olguín Cerón, J.B. 2013. Efecto del tratamiento higro-térmico en las características acústicas de la madera de *Quercus scytophylla. Revista Madera y Bosques*, Instituto de Ecología. México. En Revisión.

Spycher, M.; Schwarze, F.W.M.R.; Steiger, R. 2008. Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Science and Technology*. 42: 325-342.

Tamarit Urias, J.C.; López-Torres, J.L. 2007. Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México. Libro Técnico No. 3. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Wegst, U.G.K. 2008. Bamboo and Wood in Musical Instruments. Annual Review of Materials Research. 38: 323-349.

15. MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA MADERA DE *PINUS DOUGLASIANA* EXPUESTA A CONDICIONES CONTROLADAS DE TEMPERATURA Y DE CONTENIDO DE HUMEDAD.

RESUMEN

La madera de *Pinus douglasiana*, es una especie comercialmente apreciada en el Estado de Michoacán. Sin embargo, como material de Ingeniería, es subutilizada por la limitada disponibilidad de información de sus características tecnológicas. El objetivo de este trabajo fue verificar experimentalmente el efecto del tratamiento higro-térmico sobre su módulo de elasticidad. El material experimental consistió en 45 probetas de madera de *P. douglasiana*. Treinta probetas se estudiaron después de aplicar el tratamiento higro-térmico y 15 sin tratamiento. Se determinaron la densidad, la frecuencia natural y el módulo de elasticidad en vibraciones trasversales. El módulo de elasticidad en madera con tratamiento fue en promedio 13,828 MPa. Para madera sin tratamiento, fue 14,341 MPa. Se concluye que el módulo de elasticidad de la madera de *P. douglasiana* no varía de manera significativa después de la aplicación del tratamiento. Esta afirmación corresponde a rangos bajos y moderados de temperatura.

INTRODUCCIÓN

La madera es un material biodegradable y es sensible al intemperismo. Este proceso es difícil de apreciar y necesita de periodos largos de observación para concluir sobre el efecto de la luz ultravioleta, la variación de temperatura y de humedad, parámetros a los que está expuesta la madera en condiciones naturales de servicio. Un enfoque metódico para estudiar este comportamiento, es la implementación en condiciones de laboratorio de ciclos de variación en la temperatura y en el contenido de humedad del material.

Las pruebas de laboratorio para estudiar el efecto de estas variables, son importantes puesto que se pueden controlar y reproducir. Estos ensayos de carácter acelerado, necesitan contrastar alguna propiedad física o mecánica de la madera, antes y después de la experimentación. De tal forma, que los parámetros estudiados, denoten el efecto del tratamiento, en este caso, artificial. En el tema de estudio que nos ocupa, se trata de las características densidad y módulo de elasticidad de la madera de *Pinus douglasiana*.

La madera de *P. douglasiana*, es una specie comercialmente apreciada en el Estado de Michoacán. Sin embargo, como material de Ingeniería, es subutilizada por la limitada disponibilidad de información de sus características tecnológicas. Sáenz Reyes y col. (2011) presentan información desde el punto de vista del aprovechamiento forestal y clasifican esta especie de clima templado como promisoria para plantaciones forestales comerciales en Michoacán.

Información sobre estudios de caracterización mecánica realizados con madera de esta especie se puede consultar, entre otros autores, en los trabajos anteriores del Laboratorio de Mecánica de la Madera de la FITECMA (Sotomayor Castellanos y col., 2007a, 2007b, 2010, 2012 y 2013). Por su parte, Silva-Guzmán (2009), recopila consideraciones y características tecnológicas de la especie en estudio.

Varios autores han demostrado que el tratamiento térmico modifica y puede alterar las propiedades físicas y tecnológicas de la madera:

Oltean y col. (2010), estudian programas de secado de madera con temperaturas bajas y moderadas, y su influencia en características mecánicas de la madera de *Picea abies*. Las temperaturas estudiadas van de 45 a 80 °C. Los autores discutidos resaltan la problemática para comparar los datos disponibles en la literatura. La dificultad radica en las diferentes condiciones experimentales que se emplean en cada investigación.

Thompson (1969), encuentra una reducción en el módulo de elasticidad de 1.6 % en madera de *Pinus palustris*, tratada a una temperatura de 83.3 °C. Terziev y Daniel (2002), ven reducido el módulo de elasticidad para esta misma especie hasta en un 12.8 %, para una temperatura de 60 °C. Finalmente Graham (1957), observó una reducción en el módulo de elasticidad de 1% en madera de *Pseudotsuga menziesii*, tratada a 94 °C.

Estas temperaturas corresponden a rangos bajos y moderados de secado. Por lo tanto, y de acuerdo con Green y col. (1999), la disminución en la resistencia mecánica de la madera ocasionada por el calor a temperaturas menores de 100 °C, debería ser reversible e inmediata.

Estevez y Pereira (2009), revisan las modificaciones sufridas por la madera, ocasionadas por tratamientos térmicos. Entre otros tópicos, los autores discuten las transformaciones en la estructura química y anatómica de la madera. Además, Estevez y Pereira (2009) tratan el efecto del calor en la alteración de las características mecánicas del material. Por ejemplo, el módulo de elasticidad de la madera se incrementa con el aumento de la cristalinidad de la celulosa. Este fenómeno predomina al principio de un tratamiento térmico, pero si continúa el aumento de la temperatura, la degradación de la madera resulta en la disminución del módulo de elasticidad.

Oltean y col. (2007), hacen notar que la resistencia mecánica de la madera no es afectada de manera permanente si ésta es expuesta por periodos cortos y a temperaturas menores a 100 °C. Sin embargo, la resistencia puede disminuir de manera permanente si la madera se expone a una temperatura mayor de 65 °C, durante períodos de tiempo prolongado. Estos investigadores indican como factores principales en la modificación de la resistencia de la madera la temperatura del tratamiento, el medio de transferencia de calor, el contenido de humedad de la madera, la especie y el volumen de la madera a tratar.

A la fecha, respecto a investigaciones sobre el tópico en estudio en la madera de *P*. *douglasiana*, no se encontraron datos.

De aquí, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influye la variación de las condiciones controladas de temperatura y de contenido de humedad en el módulo de elasticidad de la madera de *P. douglasiana*?

Para responder a esta interrogación, se propone como hipótesis de trabajo que la exposición periódica y de corta duración de la madera de *P. douglasiana* a cambios de temperatura de baja intensidad, provocando ésta variaciones en su contenido de humedad, no modifican de manera sustancial los valores de su densidad y de su módulo de elasticidad.

OBJETIVO

Determinar y contrastar los valores del módulo de elasticidad de la madera de *P. douglasiana*, antes y después de un tratamiento controlado de variación de temperatura y contenido de humedad.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación adaptó la metodología presentada en trabajos anteriores desarrollados en el Laboratorio de Mecánica de la Madera de la FITECMA por Sotomayor Castellanos y Suárez Béjar (2012 y 2013). Igualmente, el grupo de probetas que se utilizaron en este trabajo, pertenecen al mismo que se estudió por los autores citados.

Materiales

El material experimental consistió en 45 probetas de madera de *P. douglasiana*. Treinta probetas se estudiaron después de aplicar el tratamiento higro-térmico y 15 sin tratamiento. Las probetas fueron recortadas del tronco de árboles de acuerdo a la metodología propuesta por Villaseñor Aguilar (2007). Las dimensiones normalizadas de las probetas fueron de 20 x 20 x 320 mm, orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal con respecto al plano leñoso. La madera estuvo libre de irregularidades de crecimiento y de madera de duramen, de acuerdo con la norma ISO (International Organization for Standardization, 1975).

Métodos

La estrategia experimental consistió en someter a la madera a cinco períodos de secado y de hidratado en condiciones controladas, con el objeto de verificar experimentalmente el efecto del tratamiento higro-térmico sobre sus características físicas y mecánicas. La Figura 1 explica los ciclos de variación de los valores del contenido de humedad (H en porcentaje). i es el valor inicial de contenido de humedad de la madera; H1... son los valores del contenido de humedad de las probetas después de 48 horas de inmersión en agua; S1... son los valores del contenido de humedad igual a cero después de cada ciclo de secado de 24 horas y f es el valor final. Antes y después de cada ciclo de hidratado-secado se realizaron pruebas de vibraciones transversales, con carácter no destructivo y siguiendo el protocolo propuesto por Villaseñor Aguilar (2007).





El tratamiento higro-térmico aplicado a la madera consintió en secar las probetas durante 24 horas a una temperatura de 103 °C, hasta alcanzar un peso constante, es decir el estado anhidro de la madera. Para cada ciclo y después de realizar las mediciones de peso y dimensiones a cada una de las probetas, se procedió a su rehumidificación durante un periodo de 48 horas a una temperatura ambiente de laboratorio de 23 °C. Para el ciclo siguiente, una vez más se procedió a la medición de peso y dimensiones de cada una de las probetas.

Cálculo del módulo de elasticidad

Las pruebas de vibraciones transversales (vt) consistieron en medir la frecuencia natural de vibración transversal a la dirección longitudinal de la probeta. Para tal fin se utilizó el aparato *Grindosonic*® (Figura 2). El módulo de elasticidad en vibraciones transversales fue calculado con la fórmula (1) (Machek y col., 2001):

$$E_{vt} = \frac{4 \pi^2 L_{vt}^4 f_{vt}^2 \rho_H}{m^4 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{l_{vt}^2} K\right)$$
(1)

Donde:

- E_{vt} = Módulo de elasticidad en vibraciones transversales (Pa)
- L_{vt} = Largo de la probeta (m)
- l_{vt} = Distancia entre apoyos (m)
- f_{vt} = Frecuencia natural de la probeta (Hz)
- $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m³)
- m, K = Constantes adimensionales (12.65, 49.48)
- r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m^2)

Con: $r = \sqrt{I/A}$

- I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m^4)
- A = Área de la sección transversal de la probeta (m^2)



Figura 2. Pruebas de vibraciones transversales.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Tabla 1 presenta los resultados de las pruebas de vibraciones transversales para la madera de *P. douglasiana*. Los datos están agrupados en dos bloques: madera con tratamiento y sin tratamiento. Las características ahí detalladas son la densidad (ρ_H), la frecuencia natural (f) y el módulo de elasticidad determinado en vibraciones trasversales (E_{vt}). Los estadísticos son: media (\bar{x}), desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (CV).

Estadístico	Estadístico $\rho_{\rm H} ({\rm kg/m^3})$		Evt (MPa)		
Con tratamiento					
$\overline{\mathbf{X}}$	538	1,065	13,828		
σ	50	38	1,628		
CV	0.09	0.04	0.12		
Sin tratamiento					
$\overline{\mathbf{X}}$	530	1092	14,341		
σ	39	24	1,241		
CV	0.07	0.02	0.09		

Los valores mostrados en la Tabla 1, son similares entre los dos grupos de probetas estudiados. Sin embargo, tal y como se muestra en la Figura 3, existe una dispersión importante en los valores particulares a cada probeta observada. Esta observación, sugiere un estudio más detallado con el objeto de verificar los resultados.



Figura 3. Módulos de elasticidad vs densidad. a) Con tratamiento; b) Sin tratamiento.

Influencia del tratamiento

Resultados de pruebas t-*Student* para comparar medias suponiendo varianzas iguales, con la hipótesis nula $H_0: \bar{x}_1 + \bar{x}_2 = 0$ y la hipótesis alterna $H_1: \bar{x}_1 + \bar{x}_2 \neq 0$, para un un nivel de significancia del 95%, se presenta en la Tabla 2. Su análisis demuestra que, puesto que los intervalos de confianza para la diferencia entre las medias contienen el valor 0, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los valores promedio de la densidades y de los módulos de elasticidad, con y sin tratamiento, para cada una de las dos muestras.

En el mismo contexto, dado que los valores-*p* calculados no son menores que 0.05, de tal forma que no se puede rechazar la hipótesis nula en favor de las alterna, de acuerdo con Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar (2012). Este análisis sugiere que los valores promedio

de las densidades y de los módulos presentados en la Tabla 1, no denotan diferencias importantes para las muestras con y sin tratamiento de fatiga higro-térmica.

Muestra 1: Densidad (con tratamiento) Muestra 2: Densidad (sin tratamiento)	Parámetros	Interpretación
Intervalo de confianza del 95%:	[-22.12, 36.99]	No existe diferencia significativa
$H_0 = \overline{x}_1 - \overline{x}_2 = 0$ $H_1 = \overline{x}_1 - \overline{x}_2 \neq 0$	t = 0.507 Valor- $p = 0.615$	Se acepta la hipótesis alternativa H ₁ para $\alpha = 0.05$
Muestra 1: Módulo de elasticidad (con tratamiento) Muestra 2: Módulo de elasticidad (sin tratamiento)	Parámetros	Interpretación
Intervalo de confianza del 95%:	[-1478.15, 451.08]	No existe diferencia significativa
$ \begin{aligned} H_0 &= \bar{\mathbf{x}}_1 - \ \bar{\mathbf{x}}_2 = 0 \\ H_1 &= \bar{\mathbf{x}}_1 - \ \bar{\mathbf{x}}_2 \neq 0 \end{aligned} $	<i>t</i> = -1.074 Valor- <i>p</i> << 0.289	Se acepta la hipótesis alternativa H ₁ para α = 0.05

Tabla 2. Prueba t-Student para comparar medias suponiendo varianzas iguales.

Estos resultados coinciden con los datos de Oltean y col. (2010), Teischinger (1992) y Thiam y col. (2002). Estos investigadores no encontraron una diferencia estadísticamente significativa para el módulo de elasticidad de la madera, evaluado en flexión tres puntos, cuando el material fue sometido a tratamientos térmicos que van de 50 a 116 °C. Estos resultados son específicos para las especies *Picea* spp. y *Tsuga heterophylla*.

Igualmente, Olguín-Cerón y Sotomayor-Castellanos (2013) proponen que el tratamiento higro-térmico de baja intensidad y la deformación plástica, a los cuales fue sometida la madera de *Q. scytophylla*, no modificaron la capacidad del material para transmitir ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal con respecto al plano leñoso. Sus valores de módulos de elasticidad calculados por ondas de esfuerzo, no presentaron diferencias estadísticas significativas al nivel de significancia del 95 %, en una prueba de comparación de medias.

CONCLUSIONES

La densidad y la frecuencia natural en vibraciones transversales de la madera de *P*. *douglasiana*, no varían significativamente por el efecto del tratamiento de fatiga higrotérmica. Esta afirmación, corresponde a rangos bajos y moderados de temperatura.

La disminución en la resistencia mecánica de la madera ocasionada por el calor a temperatura menor de 100 °C, es reversible e inmediata, de tal forma, que el tratamiento higro-térmico no modifica sustancialmente el valor del módulo de elasticidad.

La variación de las condiciones controladas de temperatura y de contenido de humedad no influyen en el módulo de elasticidad de la madera de *P. douglasiana*.

REFERENCIAS

Estevez, B. M.; Pereira, H. M. 2009. Wood Modification by Heat Treatment: A Review. *Bioresources*. 4(1): 370-404.

Graham, R. D. 1957. Effect of several drying conditions on strength of coast-type Douglasfir timbers. *Forest Products Journal*. 7(7): 228-233.

Green, D.W.; Winandy, J.E.; Krestschmann, D.E. 1999. In: Forest Products Laboratory. 1999. Wood Handbook: Wood As An Engineering Material, Revised. Chapter 4. FPL-GTR-113. U. S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA.

Gutiérrez Pulido, H.; de la Vara Salazar, R. 2012. 3a Edición. Análisis y diseño de experimentos. Mc Graw Hill. México.

International Organization for Standardization ISO 3129-1975 (E). 1975. Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization. Brussels.

Machek, L.; Militz, H.; Sierra-Alvarez, R. 2001. The influence of wood moisture content on dynamic modulus of elasticity measurements in durability testing. *Forschung verwertung*. 5(2001): 97-100.

Olguín Cerón, J.B.; Sotomayor Castellanos, J.R. 2013. Plastificado higro-térmico de madera de *Quercus scytophylla*. *Investigación y Ciencia*. En prensa.

Oltean, L.; Teischinger, A.; Hansmann, C. 2007. Influence of Temperature on Cracking and Mechanical Properties of Wood During Wood Drying – A Review. *BioResources* 2(4): 789-811.

Oltean, L.; Teischinger, A.; Hansmann, C. 2010. Influence of low and moderate temperature kiln drying schedules on specific mechanical properties of Norway spruce wood. *European Journal of Wood Products*. 69(3): 451-457.

Sáenz Reyes, J.T.; Muñoz Flores, H.J.; Rueda Sánchez, A. 2001. Especies promisorias de clima templado para plantaciones forestales comerciales en Michoacán. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. Campo Experimental Uruapan. Libro Técnico Núm. 10. México.

Silva Guzmán, J.A. 2009. Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México. Tomo II. Comisión Foresta Nacional. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; García Mariscal, J.L.; Moya Lara, C.E.; Olguín Cerón, J.B. 2010. Higroscopía y anisotropía de la madera de *Pinus michoacana, Pinus douglasiana* y

Pinus pringlei. Higrocontracción, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad dinámico. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 6(3): 3-32.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Suárez Béjar, G. 2012. Tratamiento higro-térmico y pruebas de ultrasonido en la madera de *Pinus douglasiana* y de *Quercus* spp. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 8(1): 22-32.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Suárez Bejar, G. 2013. Efecto del tratamiento de higro-térmofatiga en las características acústicas de la madera de *Pinus douglasiana* y *Quercus* spp. *Ciencia Nicolaíta*. 59: 7-20.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Villaseñor Aguilar, J.M.; Aoi, I. 2007a. Módulos de elasticidad evaluados por métodos no destructivos y ruptura de la madera de *Pinus douglasiana*: Vibraciones transversales, ultrasonido, ondas de esfuerzo y flexión estática. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 3(2): 3-17.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Villaseñor Aguilar, J.M.: Aoi, H. 2007b. Moisture content, frequency and modulus of elasticity of *Pinus douglasiana* studied using transversal vibration. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 3(1): 16-27.

Teischinger, A. 1992. Effect of different drying temperatures on selected physical wood properties. In: Proceedings of the 3rd IUFRO international wood drying conference. Austria.

Terziev, N.; Daniel, G. 2002. Industrial kiln drying and its effect on microstructure, impregnation and properties of Scots pine timber impregnated for above ground use. *Holzforschung*. 56: 434-439.

Thompson, W. S. 1969. Effect of steaming and kiln drying on the properties of Southern pine poles. *Forest Products Journal*. 19(1): 21-28.

Thiam, M.; Milota, M.R.; Leichti, R.J. 2002. Effect of high-temperature drying on bending and shear strengths of western hemlock lumber. *Forest Products Journal*. 52(4): 64-68.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

16. DISPOSITIVO DE USOS MÚLTIPLES PARA PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS EN MADERA Y MATERIALES COMPUESTOS DE MADERA. Ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones transversales.

INTRODUCCION

Aparte de los métodos de ensayo normalizados, la caracterización mecánica de la madera y los materiales compuestos de madera, requiere de técnicas de laboratorio de carácter no destructivo, como por ejemplo, el ultrasonido, las ondas de esfuerzo y las vibraciones transversales. Este enfoque se refiere a la técnica de evaluación de características físicas y mecánicas del material, sin alterar permanentemente sus propiedades para su uso final (Bucur, 2006 y Pellerin y Ross, 2002). Para el caso de la madera, estas pruebas no están aún normalizadas, sin embargo, son de uso común.

Las principales ventajas de la utilización de métodos no destructivos son la rapidez para obtener resultados precisos y la adaptabilidad para su empleo en condiciones de laboratorio, *In-Situ* y en contexto industrial, entre otras. Además, gracias a su repetividad en las mediciones, los métodos no destructivos permiten analizar pequeñas muestras de material, evitando estudios necesitando numerosos especímenes de ensayo. Este argumento permite realizar investigaciones intensivas sobre una muestra pequeña de material, sin poner en juego la validez de los resultados (Sotomayor Castellanos, 2003).

La aplicación de métodos no destructivos en la caracterización mecánica de los productos de madera se basa en el siguiente enunciado: La madera y los materiales fabricados con ella pueden almacenar y disipar energía. Por ejemplo, la propiedad de la madera de almacenar energía es manifestada por la velocidad a la cual una onda mecánica viaja a través de ella. En contraste, la capacidad de la madera para atenuar una onda de vibración denota su capacidad para disipar energía.

Jayne en 1959 propuso la hipótesis fundamental de que estas propiedades de la madera para almacenar y disipar energía, están controladas por los mismos mecanismos que determinan su comportamiento mecánico en condiciones estáticas. Es decir, la estructura molecular y anatómica del material es la base del comportamiento mecánico de la madera. Como consecuencia, es posible relacionar estadísticamente estas propiedades y el comportamiento mecánico, utilizando métodos de análisis numéricos tales como las correlaciones estadísticas.

En el Laboratorio de Mecánica de la madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, se realizan pruebas no destructivas en diferentes formas y estados del material madera. Algunas experiencias van desde la determinación de la frecuencia de vibración de árboles y sus relaciones con algunas características físicas y mecánicas de la madera (Sotomayor Castellanos y col., 2010a), hasta la caracterización acústica de la madera de especies mexicanas (Sotomayor Castellanos y col., 2010b), pasando por la caracterización no destructiva de vigas de madera utilizando

ultrasonido y ondas de esfuerzo (Sotomayor Castellanos y col., 2009), la caracterización mecánica de madera reconstituida, por ejemplo, tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera evaluados con métodos no destructivos (Sotomayor Castellanos y col., 2011; y Sotomayor Castellanos y Arellano García, 2011).

Dada la diversidad en las dimensiones y tipos del material por estudiar, en el Laboratorio se desarrolló un dispositivo de fácil manejo y de usos múltiples para realizar pruebas no destructivas en diferentes materiales y productos comerciales compuestos de madera. El dispositivo con sus diferentes configuraciones se muestra en las Figuras de la 1 a la 4.

Por una parte, el dispositivo puede ser empleado para evaluar madera reconstituida en forma de tableros, por ejemplo, tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados. Además, el dispositivo es útil para la caracterización de probetas de madera sólida normalizadas.

Por otra parte, el dispositivo puede adaptarse para realizar pruebas de ultrasonido., ondas de esfuerzo y vibraciones transversales.

Descripción del dispositivo

El dispositivo consiste en un soporte general de madera de *Pinus* sp. con dimensiones de 50 mm x 250 mm x 1500 mm. El soporte está aislado por gomas que funcionan como amortiguadores. Igualmente los soportes están recubiertos con material plástico para aislar las probetas de interferencias y posibles vibraciones no deseadas.

Al soporte se le pueden adaptar diferentes apoyos según el tipo de ensayo a realizar. Los apoyos para las diferentes pruebas se ilustran en las Figuras de la 1 a la 4. Estos apoyos se pueden desmontar y colocarse a lo largo del soporte de acuerdo al tamaño de las probetas y del tipo de ensayo de que se trate.

Al soporte se le pueden adaptar diferentes instrumentos de medición. Para las pruebas de ultrasonido, se puede adecuar la tecnología *Sylvatest*®, para los ensayos de ondas de esfuerzo, la tecnología Metriguard® y para los ensayos de vibraciones transversales, la tecnología *Grindosonic*®.

Los instrumentos de medición pueden a su vez instalarse a un sistema computarizado de adquisición y tratamiento de datos.

Aplicaciones del dispositivo

El dispositivo se emplea en las prácticas de Laboratorio de las materias Física de la madera, Métodos de prueba no destructivos y Concepción de estructuras de madera, del Programa de Maestria en Ciencias y Tecnología de la Madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH. De manera puntual, el dispositivo es empleado en la determinación de la velocidad del ultrasonido, la velocidad de ondas de esfuerzo y la frecuencia en vibraciones transversales. Estos parámetros pueden ser determinados en probetas estandarizadas de madera y en probetas de tableros de madera.

Igualmente, el dispositivo se emplea en los trabajos de investigación desarrollados en el Laboratorio de Mecánica de la madera del Programa de Maestria en Ciencias y Tecnología de la Madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH.

Referencias sobre métodos no destructivos

Información sobre el empleo de los métodos de ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones transversales en la caracterización tecnológica de la madera y materiales compuestos de madera se puede encontrar, entre otros, en: Beall (2002), Bucur (2006), Haines y col. (1996), Han y col. 2006, Kawamoto y Williams (2002), Pellerin y Ross (2002), Smulski (1991), Spycher y col. (2008), Villaseñor Aguilar (2005 y 2007), y en las publicaciones y trabajos del Laboratorio de Mecánica de la Madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera: Sotomayor Castellanos y col. (2006 – 2011), estos últimos pueden ser consultados en la página de la red de la FITECMA: www.fitecma.umich.mx/. Igualmente publicaciones y trabajos recientes del Laboratorio de Mecánica de la Madera, de la Madera, de la FITECMA, acerca del empleo de métodos no destructivos en la caracterización de la madera pueden ser consultadas en la página web de la Facultad y en la página de la Coordinación Cientifica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo: http://www.cic.umich.mx/



Figura 1. Dispositivo de usos múltiples para pruebas no destructivas.



Figura 2. Configuración de pruebas para probetas normalizadas y para tableros de madera.


Figura 3. Pruebas no destructivas de ondas de esfuerzo.



Figura 4. Pruebas no destructivas de vibraciones transversales.

MODO DE EMPLEO

Pruebas de ultrasonido

Las pruebas de ultrasonido (us) consisten en medir el tiempo de transmisión del ultrasonido a través de las probetas en las diferentes direcciones estudiadas. Para tal fin, se utiliza el aparato *Sylvatest*® (Conceptsboisstructure, 2004) como cronómetro, tal como se muestra en la Figura 5, que presenta un esquema del ensayo de ultrasonido y el diagrama de una probeta.



Figura 5. Ensayo de ultrasonido y diagrama de una probeta.

El módulo de elasticidad por ultrasonido se calcula a partir de la velocidad del ultrasonido aplicando la fórmula (Bucur, 2006):

$$Eus = Vus^2 \rho$$

Donde:

Eus = Módulo de elasticidad por ultrasonido (Pa).

Vus = Velocidad del ultrasonido (m/s).

 ρ = Densidad de la madera (kg/cm³).

De esta forma se calculan las velocidades correspondientes a las direcciones longitudinal y perpendicular y a través del espesor transversal, de acuerdo a la orientación de la probeta presentada en la figura 5. Al respecto, ver igualmente de las Figuras 1 a la 4.

Pruebas de ondas de esfuerzo

Las pruebas de ondas de esfuerzo (oe) consistien en medir el tiempo de transmisión de ondas de esfuerzo a través de las probetas en las diferentes direcciones estudiadas. Para tal fin, se utiliza el aparato *Metriguard*® (Metriguard, 1998) como cronómetro, tal como se muestra en la Figura 6, que presenta un esquema del ensayo de ondas de esfuerzo y el diagrama de una probeta.



Figura 6. Ensayo de ondas de esfuerzo y diagrama de una probeta.

El módulo de elasticidad en ondas de esfuerzo se determina a partir de la velocidad de las ondas de esfuerzo con la fórmula (Pellerin y Ross, 2002):

$$Eoe = Voe^2 \rho$$

Donde:

Eoe = Módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo (Pa).

Voe = Velocidad de las ondas de esfuerzo (m/s).

 ρ = Densidad de la madera (kg/cm³).

De esta forma se calculan las velocidades correspondientes a las direcciones longitudinal y perpendicular, de acuerdo a la orientación de la probeta presentada en la figura 6. Al respecto, ver igualmente Figuras de la 1 a la 4.

Pruebas de vibraciones transversales

Las pruebas de vibraciones transversales (vt) consisten en medir la frecuencia natural de vibración transversal a la dirección longitudinal de las probetas. Para tal fin se utiliza el aparato *Grindosonic*® (Lemmens, s/f) como medidor de frecuencias, tal como se muestra en la figura 4, que presenta fotografías del dispositivo. La Figura 7, presenta un esquema del ensayo de vibraciones transversales y el diagrama de una probeta. Al respecto, ver igualmente Figuras de la 1 a la 4.



Figura 7. Ensayo de vibraciones transversales y diagrama de una probeta.

El módulo de elasticidad en vibraciones transversales se determina a partir de la frecuencia natural de la probeta con la fórmula (Villaseñor Aguilar, 2005):

$$Evt = \frac{4 \pi^2 l_{vt}^4 f^2 \rho}{m^4 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{L_{vt}^2} K\right)$$

Donde:

- Evt = Módulo de elasticidad en vibraciones transversales (Pa).
- l_{vt} = Largo de la portada entre apoyos (m).
- L_{vt} = Largo de la probeta (m).
- f = Frecuencia natural de la probeta (Hz).
- ρ = Densidad de la probeta (kg/m³).
- m, K = Constantes (adimensionales).
- r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m^2)

CONCLUSIONES

El dispositivo de usos múltiples para pruebas no destructivas es útil para realizar ensayos de ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones transversales en materiales compuestos de madera.

Sus principales características son su adaptabilidad a diferentes dimensiones de probetas y su facilidad de operación.

REFERENCIAS

Beall, F.C. 2002. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology*. (36):197-212.

Bucur, V. 2006. Acoustics of Wood. Springer-Verlag. Germany.

Conceptsboisstructure. 2004. Sylvatestduo user manual. France.

Haines, D.W.; Leban, J.M.; Herbé, C. 1996. Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood Science and Technology*. 30:253-263.

Han, G.; Wu, Q.; Wang, X. 2006. Stress-wave velocity of wood-based panels: Effect of moisture, product type, and material direction. *Forest Products Journal*. 56(1):28-33.

Jayne, B.A. 1959. Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*. 9(11): 413–416.

Kawamoto, S.; Williams, R.S. 2002. Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood-Based Composites – A Review. Gen. Tech. Rep. FPL-GRT-134. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA.

Lemmens, J.W. (s/f). Operating Instructions for the GrindoSonic MK5 "Industrial" Instrument. J.W. Lemmens, Inc. USA.

Metriguard Inc. 1998. Metriguard Model 239A Maintenance & Operation Manual. Metriguard Inc. USA.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA.

Smulski, S.J. 1991. Relationship of Stress Wave and Static Bending Determined Properties of Four Northeastern Hardwoods. *Wood and Fiber Science*. 23(1):44-57.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2003. Caracterización Mecánica de madera reconstituida: Módulo de Elasticidad de Tableros de Partículas de Madera evaluado con métodos no destructivos. *Revista Maderas: Ciencia y Tecnología*. (5)1:20-43. Chile.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Aoi, H; Nakada, R. 2010a. Frecuencia de vibración de árboles y sus relaciones con algunas características físicas y mecánicas de la madera de *Cryptomeria japonica*. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 6(2):3-32. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Arellano García, S.H. 2011. Caracterización mecánica de madera reconstituida. Tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera evaluados con vibraciones transversales y en flexión estática. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 7(2):3-32. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Bernabé Santiago, R.; Hernández Maldonado, S.A.; Sarmiento Bustos, D.; Fernández García, G.; Alfaro Trujillo, I. 2009. Caracterización no destructiva de vigas de madera de *Pinus* spp. utilizando ultrasonido y ondas de esfuerzo. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 5(1):3-22. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Correa Olivares, V.E.; García Mariscal, J.L.; Hernández Maldonado, S.A.; Moya Lara, C.E.; Olguín Cerón, J.B.; Zurita Valencia, W. 2011. Caracterización mecánica de madera reconstituida. Tableros aglomerados, contrachapados y enlistonados de madera evaluados con métodos no destructivos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 7(1):16-35. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Guridi Gómez, L.I.; García Moreno, T. 2010b. Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 6(1):3-32. México.

Spycher, M.; Schwarze, F.W.M.R.; Steiger, R. 2008. Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Science and Technology*. 42:325-342.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2005. Comportamiento mecánico de la madera de *Prosopis* sp. en relación con la variación de su masa. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

17. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA POR ONDAS DE ESFUERZO DE MADERA PLASTIFICADA DE *QUERCUS SCYTOPHYLLA*

RESUMEN

Se calcularon la velocidad y los módulos de elasticidad por ondas de esfuerzo en madera de *Quercus scytophylla*. Las probetas se plastificaron empleando calor transmitido por vapor a baja temperatura y baja presión en condición higro-saturada de la madera. De manera no destructiva se confirmó empíricamente que el tratamiento higro-térmico en combinación con el deformado plástico, no modifican la capacidad de la madera para transmitir ondas de esfuerzo.

Palabras clave: densidad, contenido de humedad, calor, vapor, velocidad de onda de esfuerzo, módulo de elasticidad, madera de *Quercus scytophylla*.

INTRODUCCIÓN

La madera del género *Quercus* muestra un potencial importante como material para la elaboración de productos de madera. Bello González y Labat (1987) y Arizaga *et al.* (2009), presentan la descripción de la especie *Q. scytophylla*, los usos de la madera y la distribución geográfica. Pérez Olvera y Dávalos Sotelo (2008), estudiaron las características macro y micro anatómicas de la madera de *Q. scytophylla*. Igualmente, Pérez Olvera y Dávalos Sotelo (2008), estudiaron las características físicas y mecánicas de *Q. scytophylla*. Por su parte, Sotomayor Castellanos *et al.* (2010), las velocidades del ultrasonido y los módulos de elasticidad de la madera en estudio. Recientemente, Hernández Maldonado (2010), empleando modelos de predicción a partir de la densidad del material, estimó para la especie *Q. scytophylla*, las características elásticas relacionadas con el modelo general de comportamiento elástico de la madera.

Curvado de la madera

Katsuragi (2005), puntualiza que el curvado de madera sólida, plastificada con vapor de baja presión, es una práctica barata y eficiente para procesos en escala semi-industrial. El curvado de madera laminada ha sido estudiado entre otros por Hernández Santiago *et al.* (2008); detalles sobre la técnica de curvado por cortes de sierra, puede ser consultada en Katsuragi (2005); la fenomenología de la modificación de la madera por tratamientos químicos y su influencia en el proceso de curvado, puede ser examinada, entre otros en Weigl *et al.* (2011) y Rowell *et al.* (2002); la tecnología de la densificación de la madera y sus implicaciones en la técnica del curvado por compresión, puede ser revisada, entre otros autores en Kutnar y Šernek (2007). En relación al método de curvado por calentamiento interno, Norimoto y Gril (1989) y Makinaga *et al.* (1997), presentan sus resultados empleando una técnica de microondas. Por otra parte, información sobre el curvado externo con métodos de calentamiento directo, de plato caliente y por cocimiento, puede ser consultada en Peck

(1957), Rowell *et al.* (2002) y Hwang *et al.* (2002). Finalmente, la tecnología de curvado por métodos con vapor, está detallada entre otros autores por Kollmann y Côté (1968) y Niemiec y Brown (1995).

Métodos no destructivos

Garcia *et al.* (2010), evaluaron el efecto del tratamiento térmico sobre la madera de *Eucalyptus grandis*, con temperaturas que van de 180 a 230 °C y por períodos de 15 minutos, 2 horas y 4 horas. Estos investigadores calcularon el módulo de elasticidad de la madera empleando un aparato de tecnología *Metriguard*®. Entre sus principales resultados, observaron que el módulo de elasticidad medido por ondas de esfuerzo disminuyó hasta un 13 %.

Miettinen et al. (2005), estudiaron el efecto de tratamiento térmico sobre la velocidad de ultrasonido en piezas de madera del género Pinus. Entre sus diferentes tratamientos térmicos, los investigadores midieron la velocidad de ultrasonido a temperatura de 70 °C. Sus resultados indican una velocidad del ultrasonido en la dirección longitudinal de la madera en un intervalo de 5420 a 5520 m/s. Mohebby et al. (2007), estudiaron el efecto del tratamiento térmico en madera de Morus alba. Sus temperaturas observadas fueron 100, 120 y 140 °C, por períodos de 1 y 5 horas. El método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad de la madera fue el de vibraciones transversales libres. Sus resultados indican que el tratamiento térmico aplicado por más de una hora incrementa ligeramente los valores del módulo de elasticidad. Widmann et al. (2007), estudiaron madera de Fagus sylvatica, sometida a tratamiento térmico con una temperatura de 180 °C, con tiempos de tratamiento de 4, 8 y 16 horas. Los autores emplearon la tecnología Grindosonic®, para evaluar el módulo de elasticidad en vibraciones libres y la tecnología Sylvatest®, para estimar el módulo de elasticidad por ultrasonido. Por su parte, Cornejo Troncoso y Beattig Palma (2009), estudiaron el módulo de elasticidad de la madera de Pinus radiata en vibraciones transversales y su variación cuando la temperatura aumenta de 0 a 100 °C. Los autores observaron que a medida que la temperatura aumenta, el módulo de elasticidad disminuye, con una tasa de -0.2 % por °C.

Tratamientos térmicos

Oltean *et al.* (2010), estudiaron programas de secado de madera con temperaturas bajas y moderadas, y su influencia en características mecánicas de la madera de *Picea abies*. Las temperaturas estudiadas van de 45 a 80 °C. Oltean *et al.* (2010) resaltan la problemática para comparar los datos disponibles en la literatura. La dificultad radica en las diferentes condiciones experimentales que se emplean en cada investigación, por ejemplo el tipo, forma y dimensiones de las probetas, así como los métodos experimentales. Thompson (1969), encuentra una reducción en el módulo de elasticidad de 1.6% en madera de *Pinus palustris*, tratada a una temperatura de 83.3 °C; Terziev y Daniel (2002), ven reducido el módulo de elasticidad para esta misma especie hasta en un 12.8 %, para una temperatura de 60 °C; Finalmente Graham (1957), observó una reducción en el módulo de elasticidad de 1 % en madera de *Pseudotsuga menziesii*, tratada a 94 °C. Estas temperaturas corresponden a rangos

de secado bajos y moderados. Por lo tanto, y de acuerdo con Green *et al.* (1999), la disminución, en la resistencia mecánica de la madera ocasionada por el calor a temperaturas menores de 100 °C, debería ser reversible e inmediata.

Estevez y Pereira (2009), revisan las modificaciones sufridas por la madera, ocasionadas por tratamientos térmicos. Entre otros tópicos, los autores discuten las transformaciones en la estructura química y anatómica de la madera. Además, Estevez y Pereira (2009) tratan el efecto del calor en la alteración de las características mecánicas del material. Por ejemplo, el módulo de elasticidad de la madera se incrementa con el aumento de la cristalinidad de la celulosa. Este fenómeno predomina al principio de un tratamiento térmico, pero si continúa el aumento de la temperatura, la degradación de la madera resulta en la disminución del módulo de elasticidad. Por su parte, Oltean *et al.* (2007), hacen notar que la resistencia mecánica de la madera no es afectada de manera permanente si ésta es expuesta por períodos cortos y a temperaturas menores a 100 °C. Sin embargo la resistencia puede disminuir de manera permanente si la madera se expone a una temperatura mayor de 65 °C, durante períodos de tiempo prolongado. En general, cuando los valores de las propiedades mecánicas de la madera se ven disminuidos por el efecto de tratamientos térmicos, la temperatura en la cual empieza a observarse este fenómeno es de 160 °C. Un tratamiento de menos de 100 °C, no deberá modificar las características mecánicas de la madera.

El objetivo de la investigación es determinar el módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo en listones con y sin tratamiento higro-térmico de la madera de *Q. scytophylla*.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material experimental consistió en madera de la especie *Q. scytophylla*, proveniente de un árbol colectado en el municipio de Morelia, Michoacán. A partir del árbol, se cortaron 2 trozas de 1.1 m de largo y de 45 cm de diámetro. De estas trozas, se aserraron tablones de corte radial, de 50 mm por 125 mm de sección transversal. Finalmente, se dimensionaron 4 grupos de listones para las pruebas preliminares, de referencia, de suavizado y de deformado.

Una vez suavizados los listones y/o deformados, se procedió a elaborar con ellos las probetas destinadas a las pruebas de ondas de esfuerzo. El proceso de plastificado de la madera para preparar las probetas, está descrito en Olguín Cerón y Sotomayor Castellanos (2013).

Del conjunto total de listones para las pruebas de ondas de esfuerzo, se recortaron 35 probetas, identificadas como probetas rectas sin tratamiento (PRST); además, se elaboraron 35 probetas, identificadas como probetas rectas suavizadas (PRS); y finalmente, se prepararon 35 probetas, identificadas como probetas suavizadas, deformadas y plastificadas (PSDP), llamadas también probetas curvas.

Las dimensiones de la sección transversal formada por el plano radial-tangencial, de las probetas PRST, PRS y PSDP, fueron de 19 x 19 mm en promedio. El largo de las probetas PRST y PRS en la dirección longitudinal fue de 320 mm. El largo de las probetas PSDP fue

considerado en su eje medio geométrico, es decir de 31.74 mm en promedio y fue proporcional a su radio de curvatura de 40 cm.

Las pruebas de ondas de esfuerzo consistieron en medir el tiempo de recorrido de las ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal de tres tipos de probetas: 35 probetas rectas sin tratamiento (PRST); 35 probetas rectas suavizadas (PRS); y 35 probetas deformadas y plastificadas (PSDP).

El tiempo de recorrido de las ondas en la madera se midió empleando un cronómetro de marca *Metriguard*®. El tiempo empleado para cálculo y análisis subsecuentes, fue el tiempo promedio de tres solicitaciones en cada probeta. El dispositivo empleado para estas pruebas, se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Dispositivo para pruebas de ondas de esfuerzo en las probetas rectas.

La velocidad (Voe) de recorrido de las ondas de esfuerzo a lo largo de las probetas fue determinada por la relación entre la distancia de los apoyos de la probeta, es decir, la portada de ondas de esfuerzo y el tiempo de recorrido de la onda entre apoyos. La velocidad Voe en las probetas curvas fue determinada con la relación:

$$Voe = \frac{Lcen}{t}$$
(1)

Donde Lcen es la longitud al centro geométrico en la dirección de las probetas curvas, calculado con la fórmula (Perré, 2007):

$$Lcen = 2 \theta Rcen$$
(2)

Donde θ es el ángulo formado por el centro de curvatura y los extremos de la probeta, y/o el segmento de ondas de esfuerzo.

El módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo (Eoe) en la dirección longitudinal de las probetas se calculó con la fórmula (Pellerin y Ross, 2002):

$$Eoe = \rho_H Voe^2$$
 (3)

RESULTADOS

En la Tabla 1, se presentan los resultados de las pruebas de ondas de esfuerzo realizadas en tres grupos de probetas: probetas rectas sin tratamiento (PRST), probetas rectas suavizadas (PRS) y probetas suavizadas, deformadas y plastificadas (PSDP). Los estadígrafos son: media aritmética (Med. Arit.), desviación estándar (Desv. Est.) y coeficiente de variación (C.V.) en porcentaje. Los resultados del tratamiento higro-térmico y de plastificado, se presentan de manera gráfica en la Figura 2. En esta Figura se muestra una fotografía de probetas producidas para los ensayos de ondas de esfuerzo.

	ρ (kg/m ³)	H (%)	Voe (m/s)	Eoe (MPa)							
		Probetas rectas sin tratamiento (PRST)									
Med. Arit.	788	11.96	3642	11385							
Desv. Est.	18.83	0.3524	150.46	1007.30							
C.V.	2.39	2.95	4.13	8.85							
	Probetas rectas suavizadas (PRS)										
Med. Arit.	744	11.70	3700	11515							
Desv. Est.	18.63	0.9462	114.38	912.16							
C.V.	2.51	8.09	3.09	7.92							
	Probe	etas suavizadas, defori	nadas y plastificadas	(PSDP)							
Med. Arit.	747	10.83	3638	11358							
Desv. Est.	23.15	0.3274	72.82	477.03							
C.V.	3.10	3.02	02.00	4.20							

Tabla 1. Resultados de las pruebas de ondas de esfuerzo.



Figura 2. Fotografía de probetas curvas y rectas.

ANÁLISIS

Bien que las características tecnológicas de la madera varían entre especies, individuos y al interior del árbol, para fines de análisis subsecuente, se considera que la variabilidad natural en las características tecnológicas de la madera, no influye de manera explicativa en los resultados de esta investigación.

Una prueba de comparación de medias entre los valores de las medias aritméticas de la velocidad de las ondas de esfuerzo entre los tres grupos de probetas, correspondientes a los tratamientos: probetas rectas sin tratamiento (PRST), probetas rectas suavizadas (PRS) y probetas suavizadas, deformadas y plastificadas (PSDP), dio como resultado que no existe una diferencia estadísticamente significativa al nivel de confianza del 95 % entre ninguno de los tratamientos.

Este resultado propone que el tratamiento higro-térmico y la deformación plástica, a los cuales fue sometida la madera de *Q. scytophylla*, no modificaron la capacidad del material para transmitir ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal con respecto al plano leñoso.

Durante esta etapa experimental se observó que la correcta orientación del listón en el sistema de coordenadas radial, tangencial y longitudinal, favorece la deformación mecánica. Igualmente, se advirtió que la variación a nivel local en el acomodo del tejido leñoso, desfavoreció al proceso, del tal forma que una tercera parte de los listones flexionados, presentaron fisuras locales. Como consecuencia, el recorte y la selección de probetas para las pruebas de ondas de esfuerzo favorecieron los listones y segmentos sin daños aparentes.

La velocidad de transmisión de las ondas de esfuerzo (3642 m/s), en las probetas rectas sin tratamiento (PRST), evaluadas con un contenido de humedad de la madera de 11.96 %, es ligeramente mayor que el intervalo de velocidades reportado por Pellerin y Ross (2002) (1770 a 2260 m/s), para madera de especies del género *Quercus*. Estos valores de comparación,

corresponden a la velocidad de ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal de la madera, con un contenido de humedad del 12 % y para densidades similares a la de Q. scytophylla (700 kg/m³).

La estructura material de las probetas (PRST) fue homogénea y bien orientada en las direcciones radial, tangencial y longitudinal. Las dimensiones de la sección transversal de estas probetas (R: 17.53 mm; T: 18.67 mm) fueron similares a las de los listones sin tratamiento (LPST). Sin embargo su longitud fue más corta (320 mm). Del mismo modo, el coeficiente de variación del contenido de humedad de la madera fue menor al 3 %. Durante las pruebas se observó, asimismo, que las 3 mediciones realizadas en cada probeta, fueron repetitivas y confiables.

Estos detalles de las probetas y de los ensayos, resultaron en un coeficiente de variación de la velocidad de las ondas de esfuerzo de 4.13 %, valor aceptable en investigación en Ciencias y Tecnología de la Madera. Estos resultados confirman que los ensayos de ondas de esfuerzos son confiables para evaluar las características tecnológicas de la madera sometida a tratamiento higro-térmico, de manera no destructiva.

Desde una perspectiva material, la estructura a nivel local de las probetas curvas, es modificada por el agente mecánico expresado en la relación radio/espesor (RE: 22.81), y resultando en las tasas de deformación en compresión (ɛc: 2.93 %) y en tensión (ɛt: 1.28 %). Una vez la madera en el dominio higro-térmo plástico, las zonas de compresión y de tensión, se transforman en deformaciones permanentes.

Esta alteración en la estructura interna de la probeta modifica la homogeneidad de la densidad a nivel local de la madera. Sin embargo, el fenómeno de transmisión de ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal de la madera, representa únicamente la vibración de la sección transversal de la probeta, en la dirección longitudinal. En consecuencia, cada sección transversal compuesta por dos sectores con densidades diferentes, se desplaza de manera uniforme y relativamente paralela unas a otras. De tal forma, que esta estructura compuesta de dos densidades no se expresa en el fenómeno de transmisión de ondas de esfuerzo.

Por otra parte, se observó que después del tratamiento de plastificado higro-térmico de la madera, un porcentaje de alrededor del 5 % de las probetas, presentaron modificaciones en su geometría y cambios en su estructura material.

Respecto a su geometría, durante las etapas de solidificado, estabilizado y acondicionado, ocasionado por el efecto de la disminución del contenido de humedad en la madera de 57 % a 12 %, el fenómeno de higro-contracción en el dominio higro-elástico, se reflejó en la variación dimensional de la sección transversal de la probeta.

Este efecto se minimizó ajustando el volumen de las probetas, necesario para el cálculo de la densidad de la madera, con mediciones promedio de sus dimensiones. De esta manera la higro-contracción de la madera no influyó para análisis posteriores.

Respecto a su estructura material, las probetas presentaron sectores de alrededor de 1 mm de espesor, con ruptura por compresión del tipo pliegues estrujados, siempre a nivel local y en la cara cóncava de las probetas, es decir en la zona de compresión. Durante esta investigación, se considera que estas alteraciones no influyeron en la transmisión de ondas de esfuerzo en la madera.

Igualmente, en la cara convexa de las probetas, se presentaron separaciones de segmentos de fibras de alrededor de 1 mm de longitud, similares a desprendimientos por cepillado. Parece ser que la tasa de deformación en tensión aplicada en la fibra extrema de la probeta excedió el limite elástico en tensión, en la dirección longitudinal de la madera de *Q. scytophylla*. De aquí, la aparición de fisuras locales. No obstante, para fines prácticos en la determinación de la velocidad de ondas de esfuerzos en la dirección longitudinal, esta anomalía no influyó de manera significativa.

En efecto, una temperatura de 92 °C, aplicada durante un período de 50 minutos en una probeta de madera de sección esbelta, independientemente de que su geometría sea recta o curva, con o sin tratamiento, mantiene, desde el punto de vista mecánico, inalterable su estructura material. Y en consecuencia, no se modifica su capacidad para transmitir ondas de esfuerzo.

Módulo de elasticidad

Los valores de los módulos de elasticidad calculados por ondas de esfuerzo (Eoe), correspondientes a los tres grupos ordenados de acuerdo a los tres tratamientos aplicados a la madera, no presentaron diferencias estadísticas significativas al nivel de confianza del 95 %, en una prueba de comparación de medias.

Este resultado coincide con los datos de Oltean *et al.* (2010), Teischinger (1992) y Thiam *et al.* (2002). Estos investigadores no encontraron una diferencia estadísticamente significativa para el módulo de elasticidad de la madera, evaluado en flexión tres puntos, cuando el material fue sometido a tratamientos térmicos que van de 50 a 116 °C. Estos resultados son específicos para las especies *Picea* spp. y *Tsuga heterophylla.* En otras palabras, el módulo de elasticidad que depende de un parámetro material, como lo es la densidad, y de un parámetro mecánico, como lo es la capacidad de transmisión de ondas de esfuerzo, no varía en correspondencia a la no alteración de estos parámetros.

CONCLUSIONES

De manera no destructiva, se confirmó empíricamente que el tratamiento higro-térmico en combinación con el deformado plástico, sin fisuras aparentes, no modifican la capacidad de la madera para transmitir ondas de esfuerzo.

Desde el punto de vista de la respuesta elástica de la madera modificada, se confirma que no se altera la estructura material de la madera, originada por el tratamiento de plastificado. Este corolario se restringe para el tratamiento higro-térmico y de plastificación realizado con

listones y probetas preparados específicamente para esta investigación, con madera de *Q*. *scytophylla*, del Estado de Michoacán.

En efecto, se demostró estadísticamente que la velocidad de ondas de esfuerzo y el módulo de elasticidad de las probetas, no varían como resultado de los tratamientos de suavizado, plastificado y deformado.

REFERENCIAS

ARIZAGA, S.; MARTÍNEZ-CRUZ, J.; SALCEDO-CABRALES, M.; BELLO-GONZÁLEZ, M.A. Manual de la biodiversidad de encinos michoacanos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. México. 2009.

BELLO GONZÁLEZ, M.A.; LABAT, J.N. Los encinos (*Quercus*) del Estado de Michoacán, México. Collection Etudes Mesoaméricaines. Centre d'Etudes Mexicaines et Centraméricaines. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. México. 1987.

CORNEJO TRONCOSO, J.; BAETTIG PALMA, R. Evolución del módulo de elasticidad longitudinal entre 10 °C y 100 °C en piezas de *Pinus radiata* usando una técnica de evaluación no destructiva. *Maderas, Ciencia y Tecnología*. 11(2):153-160. 2009.

ESTEVEZ, B.M.; PEREIRA, H.M. Wood Modification by Heat Treatment: A Review. *Bioresources*. 4(1):370-404. 2009.

GARCIA, R.A.; MONTEIRO DE CARVALHO, A.; DE FIGUEIREDO LATORRACA, J.V.; MONTEIRO DE MATOS, J.L.; SANTOS, W.A.; FONSECA DE MADEIROS SILVA, R. Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. *Wood Science and Technology*. Volume 46(1-3):41-52. 2012.

GRAHAM, R.D. Effect of several drying conditions on strength of coast-type Douglas-fir timbers. *Forest Products Journal*. 7(7):228-233. 1957.

GREEN, D.W.; WINANDY, J.E.; KRESTSCHMANN, D.E. In: Forest Products Laboratory. 1999. Wood Handbook: Wood As An Engineering Material, Revised. Chapter 4. FPL-GTR-113. U. S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA. 1999.

HERNÁNDEZ MALDONADO, S.A. Comportamiento elástico de la madera. Teoría y aplicaciones. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 2010.

HERNÁNDEZ SANTIAGO, A.; DÁVALOS SOTELO, R.; SALOMÓN QUINTANA, I. Resistencia mecánica de pequeños arcos de madera laminada. *Ingeniería*. 12(3):43-52. 2008.

HWANG, K.; JUNG, I.; LEE, W.; JANG, J.; BAE, H.; NORIMOTO, M. Bending Quality of Main Korean Wood Species. *Wood Research*. 89:6-10. 2002.

KATSURAGI, K., Furniture Maker Tai-Workshop. Japan. URL: <u>http://www.tai-workshop.com/english/index-e.html</u>. Junio, 2012.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ, W.A. *Principles of Wood Science and Technology*. Volume I: Solid Wood. Springer-Verlag. Germany. 1968.

KUTNAR, A.; ŠERNEK, M. Densification of Wood. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*. 82: 53-62. 2007.

MAKINAGA, M.; NORIMOTO, M.; INOUE, M. Permanent Fixation of Bending Deformation in Wood by Steam Treatment. *Wood Research*. 84:39-41. 1997.

MIETTINEN, P.; TITTA, M.; LAPPALAINEN, R. Electrical and Ultrasonic Analysis of Heat-Treated Wood. In: Proceedings of The 14th Symposium on NDT of Wood. University of Evesrwalde. Germany. pp:265-274. 2005.

MOHEBBY, B.; KAMRAN, Y.; ROOHINIA, M. Acoustic Properties of Hydrothermally Modified Mulberry (*Morus alba* L.) Wood. In: Proceedings of The Third European Conference on Wood Modification. United Kingdom. pp: 283-286. 2007.

NIEMIEC, S.S.; BROWN, T.D. Steam Bending Red Alder. In: Western Hardwoods. Value-Added Research and Demonstration Program. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-85. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA. 1995.

NORIMOTO, M.; GRIL, J. Wood Bending Using Microwave Heating. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 24(4):203-212. 1989.

OLGÍN CERÓN, J.B.; SOTOMAYOR CASTELLANOS, J.R. Plastificado higro-térmico de madera de *Quercus scytophylla*. En revisión en *Investigación y Ciencia*. 2013.

OLTEAN, L.; TEISCHINGER, A.; HANSMANN, C. Influence of Temperature on Cracking and Mechanical Properties of Wood During Wood Drying – A Review. *BioResources* 2(4):789-811. 2007.

OLTEAN, L.; TEISCHINGER, A.; HANSMANN, C. Influence of low and moderate temperature kiln drying schedules on specific mechanical properties of Norway spruce wood. *European Journal of Wood Products*. 69(3):451-457. 2011.

PECK, E.C. Bending Solid Wood to Form. Agriculture Handbook No. 125. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. USA. 1957.

PELLERIN, R.F.; ROSS, R.J. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA. 2002.

PÉREZ OLVERA, C.P.; DÁVALOS SOTELO, R. Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México. *Madera y Bosques*. 14(3):43-80. 2008.

PERRÉ, P. Experimental device for the accurate determination of wood-water relations on micro-samples. *Holzforschung*. 61:419-429. 2007.

ROWELL, R.; LANGE, S.; MCSWEENY, J.; DAVIS, M. Modification of Wood Fiber Using Steam. In Proceedings of: The 6th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium & Workshop on The Chemical Modification of Cellulosics. USA. pp:606-615. 2002.

SOTOMAYOR CASTELLANOS, J.R.; GURIDI GÓMEZ, L.I.; GARCÍA MORENO, T. Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 6(1):3-32. México. 2010.

TEISCHINGER, A. Effect of different drying temperatures on selected physical wood properties. In: Proceedings 3rd IUFRO international wood drying conference. Austria. 1992.

TERZIEV, N.; DANIEL, G. Industrial kiln drying and its effect on microstructure, impregnation and properties of Scots pine timber impregnated for above ground use. *Holzforschung*. 56:434-439. 2002.

THIAM, M.; MILOTA, M.R.; LEICHTI, R.J. Effect of high-temperature drying on bending and shear strengths of western hemlock lumber. *Forest Products Journal*. 52(4):64-68. 2002.

THOMPSON, W.S. Effect of steaming and kiln drying on the properties of Southern pine poles. *Forest Products Journal*. 19(1):21-28. 1969.

WEIGL, M.; MÜLLER, U.; WIMMER, R.; HANSMANN, C. Ammonia vs. Thermally Modified Timber – Comparison of Physical and Mechanical Properties. *European Journal of Wood Products*. 70(1-3):233-239. 2012.

WIDMANN, R.; BEIKIRCHER, W.; FISHER, A. Mechanical Properties of Thermal Treated Hardwood (Beech): Bending and Tension Strength and Stiffness of Boards. In: Proceedings of The Third European Conference on Wood Modification. United Kingdom. pp: 187-190. 2007.

18. EVALUACIÓN MECÁNICA POR MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS DE VIGAS DE MADERA DE *PICEA ABIES*.

RESUMEN

Con el objetivo de analizar las características mecánicas de vigas de madera, se examinaron por métodos de evaluación no destructivos 54 piezas de *Picea abies*, con dimensiones de 50mm x 127mm x 3147mm. Para cada una de las vigas, se calculó el contenido de humedad, la densidad y el factor de área/nudos. Posteriormente, se realizaron ensayos de ultrasonido, de vibraciones longitudinales y de tensión estática longitudinal.

Entre los principales resultados se destacan los siguientes valores para las vigas: Densidad: 434 (kg/m³); Contenido de humedad: 10.34%; Factor de área/nudos: 30 (%); Velocidad del ultrasonido: 5593 (m/s); Módulo de elasticidad por ultrasonido: 13.30 (GPa); Frecuencia natural en vibraciones longitudinales: 528 (Hz); Módulo de elasticidad en vibraciones longitudinales: 11.90 (GPa); Resistencia a la tensión: 28.55 (MPa); Módulo de elasticidad en tensión longitudinal: 10.53 (GPa).

Las conclusiones más importantes son: los parámetros estudiados no correlacionaron estadísticamente bien con el factor de área/nudos. Las mejores correlaciones se encontraron entre los módulos de elasticidad por ultrasonido, en vibraciones longitudinales y en flexión estática longitudinal. La investigación concluye también que la discrepancia encontrada entre los valores de los parámetros deducidos para una muestra experimental y común de vigas de madera, puede ser atribuida a los distintos principios en los cuales están basadas las técnicas aplicadas, así como a la diversidad de esfuerzos inducidos en cada una de las pruebas.

Palabras clave: ultrasonido, vibraciones longitudinales, tensión longitudinal, módulo de elasticidad, resistencia a la tensión, factor área/nudos, vigas, *Picea abies*.

INTRODUCCIÓN

La madera aserrada y los materiales compuestos de madera destinados para usos estructurales, por ejemplo las vigas de madera, pueden ser clasificados principalmente en función de su densidad, su módulo de elasticidad y su resistencia mecánica (Brancheriau y Baillères, 2003). En la actualidad la resistencia mecánica de vigas de madera y su clasificación industrial están igualmente relacionadas con la presencia de nudos, particularidad natural del material que se evalúa con el indicador "factor de área/nudos" (knot area ratio, KAR por sus siglas en inglés) (Glos, 1983; Divos y Tanaka, 1997; Boström y Holmqvist, 1999).

Un nudo es una porción de una rama que se incorporó en el tronco del árbol durante su crecimiento. Su efecto de disminución en la rigidez mecánica de un miembro estructural de madera se debe a la interrupción de la continuidad del medio y al cambio en la dirección de

la fibra de la madera alrededor del nudo (Winandy, 1994). Este fenómeno ha sido recientemente explorado entre otros investigadores por: Xu (2002), Nguedjio (1999), Grant y col. (1984) y Courchene y col. (1998), quienes concluyen que la influencia del nudo está relacionada principalmente con factores estructurales tales como su tamaño, su localización, su forma, su solidez y al tipo de esfuerzo medido.

Xu (2002) señala también que si bien las características elásticas del tejido lignocelulósico son mayores en la madera de nudos, en comparación con la madera de albura, la rigidez local en una viga de madera disminuye en el contorno de un nudo, sin afectar de manera proporcional la disminución de la rigidez global del miembro en cuestión.

Los métodos de evaluación no destructivos que utilizan mediciones acústicas en la caracterización mecánica de la madera, se pueden utilizar para detectar anomalías estructurales y/o nudos en vigas de madera (Niemz y Kucera, 1998; Ouis, 2004; Sotomayor y col. 2005). Estas técnicas se pueden dividir en dos categorías: el análisis del dominio de las frecuencias para la determinación de la frecuencia de resonancia de una probeta en vibración (Ouis, 1999 y 2005) y el estudio del dominio temporal para evaluar la velocidad de una onda mecánica y su energía de disipación en la madera (Ross y col. 1994).

La detección de nudos en vigas de madera utilizando métodos de carácter no destructivo ha sido investigada entre otros por Lee (1958), quien demostró que el tiempo ultrasónico de propagación en la madera puede indicar la desviación local de la dirección de su fibra, fenómeno que esta asociado a la presencia de nudos. Burmester (1967) publicó que los nudos en la madera pueden ser detectados observando la variación de la atenuación en la señal ultrasónica medida a lo ancho y a lo largo de piezas de madera aserrada. Lamester y Dornfeld (1987) lograron detectar la presencia de nudos y desviación de la dirección de la fibra usando una técnica de ultrasonido.

Tiita y col. (1998 y 1999) mostraron que durante un ensayo por ultrasonido, la atenuación y la forma en la lectura de la señal del voltaje del osciloscopio fueron modificadas por la presencia de nudos. Karsulovic y col. (2000) estudiaron también las posibilidades de detección de nudos en madera estructural utilizando ultrasonido. Tanaka y col. (1991) calcularon la relación estadística entre la presencia de nudos en viguetas de madera de *Cryptomeria japonica* y los parámetros determinados en vibraciones longitudinales. Las investigaciones anteriores muestran la gran dificultad para relacionar características elásticas y de resistencia de la madera con el factor de área/nudos.

Recientemente, Machado y col. (2004) concluyeron que para detectar la presencia de nudos en viguetas de madera es necesario un valor mínimo del factor área/nudos del 20%, valor que coincide con los resultados de Sandoz y col. (2000), quienes sugieren que para poder detectar discontinuidades artificiales en vigas de madera de coníferas, con una técnica de ultrasonido similar a la utilizada en la presente investigación, es necesario un porcentaje mínimo de 25% en la profundidad de la discontinuidad en la sección transversal de las probetas. Por su parte, Ouis (2005) estudió la dependencia de las propiedades de resistencia de vigas de *Picea abies* y concluyó que la presencia de defectos tales como nudos y desviación de la fibra de la

madera, entre otros, disminuyen el valor del módulo de elasticidad calculado a partir de mediciones de la frecuencia de resonancia de las probetas.

Una aplicación industrial de la determinación de parámetros de referencia, -como son el módulo de elasticidad y la resistencia a la ruptura de la madera,- estimados con métodos de evaluación no destructivos, por ejemplo el ultrasonido y las vibraciones, es la clasificación mecánica por esfuerzo (machine stress rate, en inglés). Esta tecnología esta basada en las relaciones estadísticas que existen entre parámetros elásticos de la madera como son las deformaciones y esfuerzos, sus propiedades acústicas como lo es la velocidad de una onda mecánica en la madera, sus características vibratorias como la frecuencia de resonancia y sus propiedades intensivas de resistencia mecánica, como son los las características de referencia mencionados anteriormente (Gerhards, 1982).

Para relacionar de manera adecuada parámetros de calidad en la línea de producción con las características técnicas de madera, datos que son necesarios para el cálculo y diseño de ingeniería, la industria de la madera requiere de información experimental de elementos estructurales de madera con características reales y en dimensiones comerciales de empleo.

La presente investigación propone una estrategia experimental para la caracterización mecánica la vigas de madera y su aplicación como material de Ingeniería: comparar resultados provenientes de una muestra común de vigas de *Picea abies* utilizando tres ensayos diferentes que aplican solicitaciones equivalentes en la dirección longitudinal de la fibra de la madera: dos pruebas dinámicas de carácter no destructivo y un ensayo estático concluido hasta la ruptura.

OBJETIVO

El objetivo de la investigación es analizar el comportamiento mecánico de una muestra de vigas de madera de *Picea abies*, particularmente las siguientes características y sus relaciones:

- Densidad de la madera.
- Factor de área/nudos de la sección transversal.
- Velocidad de ultrasonido en la dirección longitudinal.
- Módulo de elasticidad dinámico por ultrasonido.
- Frecuencia natural en vibración longitudinal.
- Módulo de elasticidad dinámico en vibraciones longitudinales.
- Resistencia a la tensión longitudinal.
- Módulo de elasticidad estático en tensión longitudinal.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material de ensayo consistió en 54 vigas de madera de *Picea Abies* L. Karst., provenientes de arbolado de la región forestal de Baviera, en Alemania. La especie fue identificada en el Instituto de Investigaciones de la Madera en Munich, Alemania. Las vigas fueron aserradas

y orientadas según las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. Las dimensiones promedio de las vigas fueron de 50mm x 127mm x 3147mm. El material fue almacenado durante un periodo de dos meses en una cámara de acondicionamiento hasta obtener un contenido de humedad promedio y uniforme de la madera de 10.34%.

Para cada una de las vigas, se calculó primeramente la densidad (ρ), el contenido de humedad (C.H.) y el factor de área/nudos (FAN). Posteriormente, se realizaron los ensayos de ultrasonido (us), de vibraciones longitudinales (vl) y de tensión estática longitudinal (tl).

El factor área/nudos fue definido como el porcentaje de la proyección del área del ó del grupo de nudos seleccionados, en relación al área de la sección transversal de cada viga. El FAN fue medido una sola ocasión en la sección transversal de las vigas donde se detectó la presencia del nudo o grupo de nudos con dimensiones más grandes a lo largo de su portada.

Durante los ensayos con ultrasonido, se calculó la velocidad del ultrasonido (Vus) en la dirección longitudinal de la viga a partir del tiempo medido por el aparato Sylvatest® (Conceptsboisstructure, 2004). El tiempo de transmisión registrado por el aparato fue dividido entre la distancia (L) en la viga, tal como se ilustra en la figura 1.

El módulo de elasticidad dinámico por ultrasonido (Eus) se calculó con la fórmula (Kabir y col. 1997):

$$Eus = V^2 \rho \tag{1}$$

Donde:

Eus = Módulo de elasticidad dinámico por ultrasonido longitudinal de la viga (Pa) V = Velocidad del sonido en la dirección longitudinal de la viga (m/s)

 ρ = Densidad de la madera (kg/cm³)

En los ensayos de vibraciones longitudinales, la frecuencia natural (fvl) de la viga se calculó a partir de la amplitud de la señal del acelerómetro situado en un extremo de las vigas (Figura 1). La señal original de la amplitud de las vibraciones en el dominio temporal, se convirtió al dominio de las frecuencias por medio de un programa de la *transformada rápida de Fourier* (FFT). El módulo de elasticidad dinámico en vibraciones longitudinales (Evl) se calculó con la fórmula (Brancheriau y Baillères, 2003):

$$Evl = 4L^2 fvl^2 \rho$$
 (2)

Donde:

Evl = Módulo de elasticidad dinámico en vibraciones longitudinales de la viga (Pa).

- L = Largo de la viga (m).
- fvl = Frecuencia natural en vibraciones longitudinales de la viga (Hz).
- ρ = Densidad de la madera (kg/m³).



Figura 1. Esquemas de los ensayos por ultrasonido, de vibraciones longitudinales y de tensión estática longitudinal.

Por otra parte, de los ensayos estáticos (ver figura 1), adaptados de la norma ASTM D-198 (American Society for Testing and Materials, 2000), se determinó la resistencia a la tensión longitudinal (RT) de las vigas y del dominio elástico de la relación esfuerzo-deformación se determinó el módulo de elasticidad estático en tensión longitudinal (Etl). La resistencia a la tensión longitudinal se calculó con la fórmula (Ashby, 1999):

$$RT = \frac{Pmax}{As}$$
(3)

Donde:

RT = Resistencia a la tensión longitudinal de la viga (Pa)

Pmax = Carga máxima a la ruptura de la viga (N)

As = Área de la sección transversal de la viga: b x h (m^2)

La fórmula que se aplicó para el cálculo del módulo de elasticidad estático en tensión longitudinal fue (Ashby, 1999):

$$\operatorname{Etl} = \frac{\sigma tl}{\varepsilon tl} \tag{4}$$

Donde:

Etl = Módulo de elasticidad estático en tensión longitudinal de la viga (Pa).

 σ tl = Esfuerzo en tensión en el dominio elástico (Pa).

 ϵ tl = Deformación en tensión en el dominio elástico (m/m).

RESULTADOS

Los estadísticos media aritmética, desviación estándar, coeficiente de variación, valor máximo, valor mínimo, curtosis y coeficiente de asimetría de los parámetros estudiados se presentan en la tabla 1. Igualmente se presentan como referencia los resultados de la densidad (ρ) y del contenido de humedad (C.H.) de la madera. Los parámetros listados en esta tabla son: el factor de área/nudos (FAN) de la sección transversal, la velocidad de ultrasonido en la dirección longitudinal (Vus), el módulo de elasticidad dinámico por ultrasonido (Eus), la frecuencia natural en vibraciones longitudinales (fvl), el módulo de elasticidad dinámico en vibraciones longitudinales (Evl), la resistencia a la tensión longitudinal (RT) y el módulo de elasticidad estático en tensión longitudinal (Etl).

La tabla 2 presenta para las variables estudiadas las correlaciones estadísticas lineales (y = ax + b) y el coeficiente de correlación (R^2) para un nivel de confiabilidad del 95%.

La tabla 3 presenta los resultados de las pruebas de comparación de medias *de Student* (t), de varianzas *de Fisher* (F) y de distribuciones *de Kolmogorov-Smirnov* (KS) para un nivel de confiabilidad del 95%, para las muestras módulo de elasticidad en tensión longitudinal (Etl), módulo de elasticidad por ultrasonido (Eus) y módulo de elasticidad en vibraciones longitudinales (Evl).

Estadístico	ρ (kg/m ³)	C.H. (%)	FAN (%)	Vus (m/s)	Eus (GPa)	fvl (Hz)	Evl (GPa)	RT (MPa)	Etl (GPa)
Media	434	10.34	30	5593	13.30	528	11.90	28.55	10.53
Desv. Estándar	36	0.33	9	299	1.68	29	1.55	8.29	1.62
Coef. Var. (%)	8.20	3.19	29.16	5.34	12.64	5.58	13.03	29.05	15.42
Máximo	500	10.88	49	6092	16.48	574	15.05	45.15	13.62
Mínimo	347	8,98	13	4842	9.31	457	8.54	13.51	7.14
Curtosis	-0.445	4.280	-0.697	-0.251	0.194	-0.516	-0.082	-0.770	-0.463
Coef. Asimetría	-0.382	-1.475	0.051	-0.502	-0.489	-0.438	-0.221	0.048	-0.220

Tabla	1.	Resultados.
I ao ia	••	1 contraction.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Densidad

La madera de *Picea abies* se clasifica como de densidad media de acuerdo con la tabla FITECMA (Sotomayor, 2002). El coeficiente de variación de este parámetro coincide con el sugerido por el Laboratorio de Productos Forestales de los Estados Unidos de América (Forest Products Laboratory, 1999) para madera de coníferas. Los valores de curtosis y del coeficiente de asimetría permiten considerar a los estadísticos asociados a la densidad como provenientes de una distribución normal para un nivel de confiabilidad del 95%.

Los valores de los módulos de elasticidad en tensión longitudinal, por ultrasonido y en vibraciones longitudinales y la resistencia en tensión longitudinal no presentaron correlaciones importantes con relación a los valores de la densidad de la madera: para Etl = $f(\rho)$, $R^2 = 0.16$; para Eus = $f(\rho)$, $R^2 = 0.35$; para Evl = $f(\rho)$, $R^2 = 0.31$; para RT = $f(\rho)$, $R^2 = 0.006$; tal como se muestra en la figura 2. De acuerdo con Bodig y Jayne (1993), la variación entre especies de las características mecánicas de la madera correlacionan proporcionalmente con la densidad del material. Para el caso que nos ocupa, los valores de la densidad fueron determinados para una muestra de vigas de madera de una sola especie y con características de crecimiento como nudos y desviaciones de fibra, motivos que no permitieron observar una relación clara entre las variables elásticas y la densidad de la madera de *Picea abies* la cual presentó un coeficiente de variación bajo (ver tabla 1).



Figura 2. Diagrama de dispersión de los módulos de elasticidad en tensión longitudinal, por ultrasonido y en vibraciones longitudinales y de la resistencia en tensión en relación a la densidad de la madera.

х	FAN (%) Vus (m/s)		Eus (GPa)			fvl (Hz)			Evl (GPa)			RT (MPa)			Etl (GPa)						
v	= ax + b		+ b R ²		+ b	\mathbb{R}^2	= ax	$x + b$ R^2		= ax	$+b$ \mathbf{R}^2		$\mathbf{R}^2 = \mathbf{a}$	= ax + b		= ax + b		\mathbb{R}^2	= ax + b		\mathbb{R}^2
5	а	b		а	b		а	b		а	b		а	b		а	b		а	b	1
FAN (%)	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vus (m/s)	-17.8	+6126	0.27	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eus (GPa)	-0.41	+14.5	0.04	+0.004	-10.42	0.57	-	-	1	+0.041	-8.43	0.52	-	-	-	-	-	-	+0.94	+3.42	0.82
fvl (Hz)	-2.06	+590	0.38	+0.10	-7.90	0.94	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Evl (GPa)	-0.05	+13.1	0.09	+0.004	-9.90	0.56	+0.90	-0.11	0.96	+0.040	-9.41	0.59	-	-	1	-	-	-	+0.90	+2.43	0.89
RT (MPa)	+0.51	+43.1	0.29	+0.021	-86.65	0.55	+3.28	-15.09	0.44	+0.223	-92.12	0.66	+3.95	-18.43	0.55	-	-	1	-	-	-
Etl (GPa)	-0.08	+13.1	0.21	+0.004	-13.77	0.64	+0.88	-1.11	0.82	+0.046	-13.58	0.69	+0.99	-1.20	0.89	+0.17	+5.78	0.72	-	-	1

Tabla 2. Correlaciones.

Tabla 3. Comparación de medias, de varianzas y de distribuciones.

Variables	Prueba t		Prueba F	Prueba K-S		
	Intervalo de confignas	Valor da n	Intervalo de	Valor	distancia	valor
	Intervalo de contranza	valor de <i>p</i>	confianza	de p	máxima	de p
Etl vs. Eus	-3.395 a -2.133 ⁽¹⁾	$0.0^{(2)}$	0.542 a 1.611 ⁽³⁾	0.807 (2)	0.685	0.0 (4)
Etl vs. Evl	-1.975 a -0.763 ⁽¹⁾	$0.0^{(2)}$	0.637 a 1.892 ⁽³⁾	0.736 (2)	0.463	0.0 (4)
Eus vs. Evl	0.779 a 2.013 ⁽¹⁾	$0.0^{(2)}$	0.681 a 2.024 ⁽³⁾	0.561 (2)	0.481	0.0 (4)

(1): Si el intervalo de confianza no contiene el valor 0, existe una diferencia significativa entre medias para un nivel de confiabilidad del 95%.

(2): Si: p < 0.05, se rechaza la hipótesis nula; $H_0 : x_1 = x_2$.

(3): Si el intervalo de confianza contiene el valor 1, no existe una diferencia significativa entre desviaciones estándares para un nivel de confiabilidad del 95%.

(4): Si p < 0.05, existe una diferencia significativa entre distribuciones normales para un nivel de confiabilidad del 95%.

Contenido de humedad

El valor de la media del contenido de humedad de la madera de *Picea abies* (ver tabla 1) permite considerar a la muestra de vigas como madera en estado seco. El coeficiente de variación es bajo y permite suponer que el contenido de humedad de la madera entre las vigas fue parecido. El valor del coeficiente de asimetría admite a los datos del contenido de humedad como provenientes de una distribución normal para un nivel de confiabilidad del 95%. Por otra parte, el valor calculado de la curtosis denota la repetividad encontrada en las mediciones, circunstancia que confirma que el contenido de humedad de la muestra experimental de vigas se puede considerar constante y en consecuencia este parámetro no influirá en el comportamiento de la madera para análisis posteriores.

Factor de área/nudos

El factor de área/nudos presentó valores máximos de 49% y un coeficiente de variación de más de 29%. Estos resultados explican que no obstante que los estadísticos de curtosis y del coeficiente de asimetría consideran que el FAN estuvo distribuido de manera normal para un nivel de confiabilidad del 95%, la presencia de nudos en la sección transversal de las vigas no presentó altas correlaciones con las otras variables analizadas, tal como se indica en la tabla 2 y se muestra en las figuras 3 y 4, resultados que coinciden con las conclusiones de Machado y col. (2004).

Los resultados insinúan que la presencia de un defecto estructural como lo es un nudo, influye principalmente a nivel local sobre la resistencia y la rigidez de las vigas en cuestión. En consecuencia, el parámetro factor área/nudo tal como se define en esta investigación no explica de manera satisfactoria la distribución de la rigidez en un grupo de vigas, aún si la presencia de nudos interviene en la variación del módulo de elasticidad de la madera y particularmente en su resistencia en tensión longitudinal. Este argumento coincide con las conclusiones de Brancheriau y Baillères (2003).

Es importante notar que los métodos utilizados para determinar los parámetros mecánicos están fundamentados sobre la apreciación integral de la rigidez de las probetas y en consecuencia, las observaciones realizadas en esta investigación reflejan la rigidez global de vigas con dimensiones de empleo, las cuales contienen imperfecciones de crecimiento y particularidades de transformación. Para mejorar estos resultados, es necesario medir de manera más precisa el tipo, el número, la proporción y la localización de los nudos presentes en la portada de ensayo de las vigas y su efecto a nivel local y global en las propiedades de rigidez de la madera estructural, conjeturas que coinciden con las conclusiones propuestas por Xu (2002).

Velocidad del ultrasonido

La velocidad del ultrasonido (Vus) tiende a disminuir de manera imperceptible a medida que el FAN aumenta (ver tabla 2). Además, la Vus presentó un coeficiente R² bajo con relación al factor de área/nudos (ver tabla 2). Estos resultados coinciden con los datos reportados con anterioridad por Sandoz (1989). La velocidad del ultrasonido fue calculada a partir del tiempo de transmisión de una onda mecánica durante toda la longitud de la viga. La onda viajó a

través de un material idealizado como homogéneo y continuo, pero que en realidad pudo contener varios nudos a lo largo de su longitud, desviación de la fibra a nivel local y general, y posiblemente contenía fisuras ocasionadas por la liberación de esfuerzos de crecimiento y de secado. Todas estas particularidades estructurales pudieron influir en los resultados que se explican gráficamente en la figura 4 que presenta el diagrama de dispersión de la velocidad del ultrasonido y de la frecuencia en vibraciones longitudinales en relación al factor de área/nudos de la sección transversal de las vigas.



Figura 3. Diagrama de dispersión de los módulos de elasticidad en tensión longitudinal, por ultrasonido y en vibraciones longitudinales y de la resistencia en tensión longitudinal en relación al factor de área/nudos de la sección transversal de las vigas.



Figura 4. Diagrama de dispersión de la velocidad del ultrasonido y de la frecuencia en vibraciones longitudinales en relación al factor de área/nudos de la sección transversal de las vigas.

Por otra parte, el bajo coeficiente de variación y los valores de la curtosis y del coeficiente de asimetría de la velocidad del ultrasonido que confirman que las mediciones estuvieron distribuidas de manera normal para un nivel de confiabilidad del 95%. Estos resultados

indican que la Vus permite caracterizar a elementos de madera de dimensiones reales de empleo. El argumento anterior y el valor medio de la velocidad del ultrasonido concuerda con los datos encontrados entre otros investigadores por Bucur (1995) y Pellerin y Ross (2002) para maderas de coníferas de densidades similares a las de la madera de *Picea abies*.

Frecuencia en vibraciones longitudinales

La frecuencia en vibraciones longitudinales (fvl) disminuye muy poco a medida que el FAN aumenta (ver tabla 2 y figura 4). Los estadísticos curtosis y coeficiente de asimetría de los valores de la fvl muestran que este parámetro de las vigas estuvo distribuido de manera normal para un nivel de confiabilidad del 95% (ver tabla 1). El valor del coeficiente de variación fue cercano al de los datos de la velocidad del ultrasonido. Su correlación y dispersión en relación a los valores de FAN de las secciones transversales de las vigas son también análogas a los de la Vus (ver tabla 2 y figura 4). En el mismo contexto, los resultados de la fvl y de la Vus correlacionan de madera importante entre si (ver tabla 2 y figura 5). Tomando en cuenta que las vigas posiblemente contienen irregularidades de crecimiento y defectos de acondicionamiento, estos datos indican que el fenómeno de transmisión de una onda mecánica a través de la estructura de una viga de madera en la dirección longitudinal y su frecuencia natural en vibraciones longitudinales pueden ser relacionadas para fines de caracterización mecánica, pero que para el caso que nos ocupa, no fueron eficientes para detectar particularidades a nivel local en la geometría de las vigas, como es el caso del factor área/nudos por la manera en que se definió y se calculó en el presente estudio.



Figura 5. Diagrama de dispersión y recta de correlación entre la frecuencia natural en vibraciones longitudinales y la velocidad del ultrasonido.

Módulo de elasticidad por ultrasonido

De acuerdo a los valores calculados de curtosis y del coeficiente de asimetría, los resultados del módulo de elasticidad por ultrasonido (Eus) provienen de una población con una distribución normal para un nivel de confiabilidad del 95% (ver tabla 1). El Eus de las vigas prácticamente no disminuye ni correlaciona estadísticamente bien con el valor del FAN tal como se muestra en la figura 3 y en la tabla 2. Respecto a la velocidad del ultrasonido y a la

frecuencia en vibraciones longitudinales, los datos del Eus presentaron correlaciones bajas (ver tabla 2) y sus valores tienden a aumentar ligeramente si la Vus y la fvl se incrementan, tal como se muestra en las figuras 6 y 7.

La media aritmética del módulo de elasticidad por ultrasonido fue mayor en 12% con respecto a la del módulo de elasticidad en vibraciones longitudinales. Igualmente el valor promedio del Eus fue 23% mayor que el valor correspondiente al módulo de elasticidad en tensión longitudinal de las vigas de madera de *Picea abies*. La variación de los resultados del Eus explicada por su coeficiente de variación, fue menor pero de la misma magnitud que la de los coeficientes de los módulos en tensión y en vibraciones longitudinales. Por otra parte, el Eus presentó fuertes correlaciones con el módulo de elasticidad en vibraciones longitudinales y con el módulo de elasticidad en tensión longitudinal (ver tabla 2 y figura 8). Asimismo, los valores del Eus y de la resistencia a la tensión (RT) presentaros una correlación media.



Figura 6. Diagrama de dispersión y rectas de correlación de Eus, Evl, Etl y RT en relación a la velocidad del ultrasonido.

Módulo de elasticidad en vibraciones longitudinales

La media aritmética de los valores del módulo de elasticidad en vibraciones longitudinales fue menor en un 11% que la media del módulo de elasticidad por ultrasonido y fue mayor en un 13% que la media del módulo de elasticidad en tensión longitudinal. El orden del valor del coeficiente de variación del Evl fue similar a los de los módulos Eus y Etl. Igualmente la interpretación del análisis de la curtosis y del coeficiente de asimetría del Evl permite considerar que los datos de esta variable provienen de una distribución normal para un nivel de confiabilidad del 95% (ver tabla 1). El módulo de elasticidad en vibraciones longitudinales correlacionó mal con el factor área/nudos (ver figura 3), bien con Eus y Etl (ver figuras 6 y 7) y presentó una correlación regular con RT, Vus y fvl (ver tabla 2 y figuras 8, 9 y 10). Estos datos coinciden con las observaciones de Brancheriau y Baillères (2003), quienes estudiaron el comportamiento en vibraciones longitudinales de vigas de *Larix europaea*.



Figura 7. Diagrama de dispersión y rectas de correlación de Eus, Evl, Etl y RT en relación a la frecuencia en vibraciones longitudinales.

Estos resultados sugieren por una parte, que el Evl puede se utilizado como parámetro para estimar el módulo de elasticidad por ultrasonido y la resistencia en tensión longitudinal en vigas de madera de especies coníferas con características similares a las de *Picea abies*.

Por otro lado, si los valores de la velocidad del ultrasonido en la dirección longitudinal de las vigas y su frecuencia natural en vibraciones longitudinales se ponderan con los valores de la densidad para cada viga, se puede mejorar la correspondencia estadística entre los módulos de elasticidad calculados, con diferentes técnicas y en una misma muestra de vigas de madera.



Figura 8. Diagrama de dispersión y rectas de correlación de Evl, Etl y RT en relación a Eus.



Figura 9. Diagrama de dispersión y rectas de correlación de Etl y RT en relación a Evl.



Figura 10. Diagrama de dispersión y recta de correlación de Etl en relación a RT.

Resistencia a la tensión longitudinal

Los parámetros curtosis y coeficiente de asimetría, proponen que los valores de la resistencia a la tensión longitudinal de las vigas de madera de *Picea abies* provienen de una distribución normal para un nivel de confiabilidad del 95% (ver tabla 1). Su coeficiente de variación fue relativamente alto (ver tabla 1 y figura 3) y similar al del factor área/nudos. Los valores de la resistencia a la tensión longitudinal correlacionaron bien con los del módulo de elasticidad en tensión longitudinal (ver tabla 2 y figura 10) y de manera regular con la frecuencia y el módulo de elasticidad en vibraciones longitudinales (ver figuras 7 y 9). Por otra parte, la RT correlacionó de manera mediocre con la velocidad y el módulo de elasticidad por ultrasonido (ver figuras 6 y 8).

Módulo de elasticidad en tensión longitudinal

El modulo de elasticidad en tensión longitudinal presentó valores de media aritmética 20% menores que el módulo de elasticidad por ultrasonido y de 12% menos que el módulo de elasticidad en vibraciones longitudinales. Este resultado coincide con información reportada anteriormente entre otros investigadores por Ilic (2001) y Villaseñor (2007), quienes concluyen que los valores de los módulos de elasticidad determinados con pruebas dinámicas, por ejemplo vibraciones o ultrasonido, son generalmente mayores que los módulos calculados por técnicas en condiciones estáticas.

El orden del valor del coeficiente de variación del Etl fue similar a los de los módulos Eus y Evl. Igualmente la curtosis y el coeficiente de asimetría del Etl permiten considerar que los datos de esta variable provienen de una distribución normal para un nivel de confiabilidad del 95% (ver tabla 1). El Etl presentó correlaciones fuertes con Vus, Eus, fvl, Evl y RT (ver tabla 2 y figuras 6, 7, 8, 9, 10 y 11). Al igual que los otros parámetros estudiados, el Etl no presentó una correlación importante con el FAN (ver tabla 2 y figura 3).



Figura 11. Diagrama de dispersión y recta de correlación de Eus y Evl en relación a Etl.

Variación en los resultados

El análisis de comparación entre medias de dos muestras (prueba *t de Student*) para un nivel de confiabilidad del 95%, proporcionó las deducciones siguientes (ver tabla 3): para las muestras módulo de elasticidad en tensión longitudinal (Etl), módulo de elasticidad por ultrasonido (Eus) y módulo de elasticidad en vibraciones longitudinales (Evl), se encontraron intervalos de confianza que no contienen el valor 0; es decir, que existen diferencias significativas entre medias. Igualmente, los valores de *p* calculados fueron menores a 0.05, resultado que permite rechazar la hipótesis nula: $H_0 : x_1 = x_2$, confirmando al mismo tiempo una diferencia entre las medias de estos tres parámetros. En otras palabras, los módulos son diferentes según la técnica empleada en su determinación.

Un análisis de varianza (prueba F) para un nivel de confiabilidad del 95%, proporcionó los resultados siguientes (ver tabla 3): para las muestras Etl, Eus y Evl, sus intervalos de

confianza no contienen el valor 1; es decir, que no existe una diferencia significativa entre desviaciones estándares de estas poblaciones para un nivel de confiabilidad del 95%. En la misma prueba, los valores de *p* calculados fueron mayores que 0.05, lo que no permite rechazar la hipótesis nula; $H_{0:} x_1 = x_2$, confirmando al mismo tiempo la no diferencia estadística entre las desviaciones estándares de estos características. Es decir, que los valores encontrados al interior de las muestras, no varían comparativamente entre las técnicas aplicadas en su determinación

Finalmente, la prueba de distribuciones (prueba *de Kolmogorov-Smirnov*), para un nivel de confiabilidad del 95%, proporcionó los resultados siguientes (ver tabla 3): para las muestras Etl, Eus y Evl, la distancia máxima entre las distribuciones acumulativas de las muestras fue de 0.685. Además, los valores de p calculados fueron menores a 0.05, resultados que proponen que existe una diferencia significativa entre las distribuciones normales de las tres variables para un nivel de confiabilidad del 95%. Resultado que sugiere que efectivamente, los valores de los módulos de elasticidad difieren según la prueba utilizada en su determinación.

Del análisis precedente, se desprende que si los estadísticos media aritmética de los valores de los módulos Etl, Eus y Evl son diferentes entre sí, no lo es su variación al interior y entre cada grupo de estos parámetros. Además, sus distribuciones son diferentes. Es decir, los módulos de elasticidad varían según la técnica aplicada en su determinación, pero no varían significativamente al interior y entre muestras.

Las variables que se correlacionaron y se compararon fueron calculadas en una muestra común de vigas de madera, de la misma especie y con valores de densidad y de contenido de humedad variando en un intervalo estrecho y aceptable para poder considerar mínima su influencia en la variación de los resultados. Del mismo modo, la solicitación en la dirección longitudinal de la madera fue también análoga para las tres pruebas.

Si se hace abstracción de otras variables que pueden influir en el proceso experimental, por ejemplo la variación de la temperatura en las vigas y la exactitud en las mediciones, la diferencia entre las técnicas aplicadas radica principalmente en la velocidad de solicitación. La velocidad de la onda y de vibración son muy rápidas en las pruebas dinámicas: Vus = 5593 m/s y fvl = 528 Hz respectivamente, en comparación con la velocidad casi estática de la deformación durante las pruebas de tensión.

De acuerdo a los resultados, el valor del módulo de elasticidad fue superior en los ensayos dinámicos en comparación con los valores de las pruebas estáticas.

Este comportamiento puede ser una manifestación del carácter viscoelástico de la madera. De acuerdo con Bodig y Jayne (1993), las propiedades viscoelásticas de la madera y la resistencia mecánica aparente en un ensayo de vibración es la superposición de la respuesta de su rigidez elástica más la respuesta de la rigidez viscosa, que se observa esta únicamente en ensayos donde la velocidad de solicitación es superior a la velocidad de la solicitación de un ensayo estático equivalente.

Por otra parte y de acuerdo con Villaseñor (2007), desde el punto de vista de las Ciencias de materiales, el módulo de elasticidad es una característica unívoca para un material específico. Es decir, el valor del módulo de elasticidad de una madera no debe diferir en función de la técnica experimental empleada para su deducción. En el mismo contexto, la tendencia de la variación del valor del módulo de elasticidad debe ser semejante e indiferente del fenómeno inducido ó del método de estudio.

Para el caso de estudio de esta investigación, la variación en los valores promedio de características mecánicas de una muestra de vigas de madera de *Picea abies* puede ser explicada desde los siguientes enfoques:

De acuerdo con Chauhan y col. (2005) cuando se experimenta con madera, la diferencia en los principios teóricos y en los componentes de cada tecnología utilizada puede influir de manera importante en los resultados. Los ensayos dinámicos de ultrasonido y vibraciones y sus fórmulas para calcular los módulos de elasticidad (fórmulas 1 y 2) se fundamentan en el análisis teórico de las vibraciones longitudinales de una barra (Timoshenko y col. 1994). Sin embargo, en el caso del ultrasonido se mide el tiempo de transmisión de la onda y en el caso de las vibraciones se mide su frecuencia de vibración. Dos parámetros que sí bien son teóricamente compatibles, en la práctica distan no ser equivalentes, sobre todo para el caso de la madera que incluye particularidades materiales propias y asociadas a las propiedades estructurales de una viga de madera aserrada.

Por su parte, el algoritmo propuesto por el ensayo estático (fórmula 4) parte de la teoría de la Resistencia de materiales simplificando los principios de la Teoría de la elasticidad de sólidos de medio continuo. No obstante la precisión actual en las herramientas y sensores para capturar el fenómeno de tensión, es necesario considerar otros factores que pueden alterar las mediciones en el laboratorio.

El tipo de esfuerzo inducido por cada una de las pruebas puede igualmente influir en los resultados: El ensayo dinámico de ultrasonido emite una onda mecánica que se transmite a nivel microanatómico cruzando la estructura celular de la madera y en una escala mesoanatómica la onda viaja a través de anillos de crecimiento y alrededor de posibles anomalías que encuentre en el camino, tales como nudos o discontinuidades estructurales de las vigas.

Por otra parte, la prueba dinámica de vibraciones somete a cada sección normal a la dirección longitudinal de la viga a un desplazamiento vibratorio teóricamente regular y uniforme a lo largo de la portada de ensayo. Cada sección transversal de la viga esta compuesta a nivel microanatómico por microsecciones correspondientes a las diferentes tipos de elementos celulares de la madera, cada uno de los cuales puede poseer diferente orientación relativa en el plano leñoso y distintas propiedades de cohesión. Además, a nivel mesoanatómico, si se trata de secciones en madera idealmente sin defectos, la sección en vibración puede contener propiedades de masa y rigidez homogéneas, en comparación con aquellos segmentos donde la sección transversal se encuentre cerca de nudos o discontinuidades materiales de la viga, donde la heterogeneidad propia de la viga será más importante
Finalmente, el ensayo de tensión, somete toda la viga a una carga casi estática, teóricamente uniforme y bien distribuida. Como resultado, los parámetros que se miden sobre la viga representan el comportamiento global de toda la probeta. Si se postula que la resistencia mecánica de la viga será mínima donde la estructura de la madera presente menor cohesión a nivel molecular, fibra o tejido, el resultado final de la deformación ocasionada por el esfuerzo en este caso estático, será el resultado de la dislocación material a nivel molecular, celular y/o del tejido leñoso, de la porción mecánicamente mas inestable o mas débil a lo largo de la viga.

Esta dislocación puede producirse localmente o puede ser la suma de la deformación y/o ruptura de varias regiones o secciones de la viga, las cuales trabajan de manera conjunta durante el fenómeno de esfuerzo y deformación. Sin embargo, en el ensayo estático sólo se mide la resistencia máxima encontrada de una sección con defectos, lo que simplifica demasiado su lectura e interpretación.

Las tres pruebas inducen en las vigas solicitaciones similares en la dirección longitudinal de la fibra de la madera; sin embargo, la variación en los resultados se puede deducir por el tipo de lectura experimental que se utiliza para el cálculo de los módulos de elasticidad: El ensayo por ultrasonido facilita lecturas precisas y repetitivas de la observación del

El ensayo por ultrasonido facilita lecturas precisas y repetitivas de la observación del fenómeno de transmisión de onda a través de la viga, a partir de las cuales se calcula el módulo de elasticidad por ultrasonido. En cambio, el ensayo de vibraciones proporciona una sola medida del fenómeno. Es decir, el módulo de elasticidad en vibraciones longitudinales se determina a partir de la lectura de la frecuencia natural del sistema, la cual ha sido trasformada a su vez de la lectura de la amplitud de la vibración en el dominio temporal al dominio de las frecuencias. En contraste, la prueba de tensión estática solicita a la viga de manera constante y gradual, permitiendo el acomodo paulatino de las fibras y tejidos de la madera a la deformación progresiva e inducida por un esfuerzo teóricamente uniforme y casi estático. En comparación con las lecturas de las pruebas de ultrasonido y de vibraciones longitudinales, el ensayo estático proporciona lecturas más estables.

La heterogeneidad en la estructura propia a cada especie y/o muestra de madera no permite considerarla como un material homogéneo y con características mecánicas invariables. Como resultado, el postulado acerca de la igualdad en los valores del módulo de elasticidad de un material determinado con diferentes técnicas no se comprueba en el caso de vigas de madera de *Picea abies*.

La madera proporcionará en consecuencia, una respuesta diferente de acuerdo a la naturaleza del esfuerzo al cual esta sometida. Este comportamiento se traducirá en una variación importante en los valores de parámetros derivados, tales como los estudiados en esta investigación.

REFERENCIAS

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.

Ashby, M.F. 1999. Materials Selection in Mechanical Design. Second edition. Butterworth-Heinemann. Great Britain.

Bodig, J.; Jayne, B.A. 1993. Mechanics of Wood Composites. Reprinted edition. Kreiger Publishing Company. USA.

Boström, L.; Holmqvist, C. 1999. State of the art on machine strength grading. In: 1st RILEM symposium on timber engineering. Stockholm, Sweden. Swedish National Testing and Research Institute. Rilem Publications. pp:513-522.

Brancheriau, L.; Baillères, H. 2003. Use of the Partial Least Squares Methods with Acoustic Vibrations Spectra as a New Grading Technique for Structural Lumber. *Holzforschung*. 57(6):644-652.

Bucur, V. 1995. Acoustics of wood. CRC Press.

Burmester, A. 1967. Detection of knots in pinewood by ultrasonics. *Holz Roh-Werkst*. 25(4):157-163.

Chauhan, S.S.; Entwistle, K.M.; Walker, J.C.F. 2005. Differences in acoustic velocity by resonance and transit-time methods in an anisotropic laminated wood medium. *Holzforschung*. 59(5):428-434.

Conceptsboisstructure. 2004. Sylvatestduo user manual. France.

Couechene, D.J.; Lam, F.; Barret, J.D. 1998. The effect of edge knots on the strength of SPF MSR lumber. *Forest Products Journal*. 48(4):75-81.

Divos, F.; Tanaka, T. 1997. Lumber Strength Estimation by Multiple Regression. *Holzforschung*. 51(5):467-471.

Forest Products Laboratory. 1999. Wood Handbook. Wood as an Engineering Material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA.

Gerhards, C.C. 1982. Longitudinal stress wave for lumber stress grading: factors affecting applications: state of the art. *Forest Products Journal*. 32(2):20-25.

Glos, P. 1983. Technical and economical possibilities of timber strength grading in small and medium size company. SAH-Bulletin 1983/1. Zürich, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Holzforchung.

Grant, D.J.; Anton, A.; Lind, P. 1984. Bending strength, stiffness, and stress-grade of structural *Pinus radiata*: effect of knots and timber density. *Journal of Forestry Science*. 14:331-348.

Ilic, J. 2001. Relations among the dynamic and static elastic properties of air-dry Eucalyptus delegatensis R. Baker. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 59:169-175.

Kabir, M.F.; Sidek, H.A.A.; Daud, W.M.; Khalid, K. 1997. Detection of knot and split of rubberwood by non-destructive ultrasonic method. *Journal of Tropical Forest Products*. 3(1):88-96.

Karsulovic, J.T.; Léon, L.A.; Gaete, L. 2000. Ultrasonic detection of knots and annual ring orientation in *Pinusradiata* lumber. *Wood and Fiber Science*. 32(3):278-286.

Lamester, R.L.; Dornfeld, D.A. 1987. Preliminary investigation on the feasibility of using acousto-ultrasonics to measure defects in lumber. *Journal of Acoustic Emission*. 6(3):157-165.

Lee, I.D. 1958. A non-destructive method for measuring the elastic anisotropy of wood using an ultrasonic pulse technique. *Journal of the Institute of Wood Science*. 1(1):43-57.

Machado, J.S.; Sardinha, R.A.; Cruz, H.P. 2004. Feasibility of automatic detection of knots in maritime pine timber by acousto-ultrasonic scanning. *Wood Science and Technology*. 38:277-284.

Nguedjio, C.F. 1999. Effect of knots on the relation between flatwise and edgewise stiffness. In: Proceedings of the PACIFIC timber engineering conference. New Zealand.

Niemz, P.; Lucera, L.J. 1998. Possibility of defect detection in wood with ultrasound. In: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Forest Products Laboratory. USA. pp:27-32.

Ouis, D. 1999. Vibrational and acoustical experiments on logs of spruce. *Wood Science and Technology*. 33:151-184.

Ouis, D. 2004. Assessment of severity and localization of a transversal crack in a wood beam through a study of its natural modes of vibration. *Holz Roh Werkst*. 62:17-22.

Ouis, D. 2005. Frequency dependence on strength and damping properties of wood and their influence by structural defects and rot. In: Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. pp:255-264.

Ross, R.J.; Ward, J.C.; Tenwolde, A. 2004. Stress wave non-destructive evaluation of wetwood. *Forest Products Journal*. 44(7/8):79-83.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society.

Sandoz, J.L. 1989. Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Science and Technology*. 23:95-108.

Sandoz, J.L.; Benoit, Y.; Demay, L. 2000. Wood testing using Acousto-ultrasonic. In: Proceedings of the WCTE 2000 World Conference on Timber Engineering. Canada. pp:136-142.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2002. TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. FITECMA. UMSNH. Formato: 60 x 90 cm. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Nagao, H.; Ido, H.; Kato, H.; Onishi, Y. 2005. NDE methods applied to the study of a wood beam's discontinuity. In: proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of wood. Germany. pp:359-372.

Tanaka, T.; Nagao, H.; Nakai, T. 1991. Nondestructive Evaluation of Bending and Tensile Strength by Longitudinal and Transverse Vibration of Lumber. In: Proceedings of the Eighth Symposium on the Nondestructive Testing of Wood. USA. pp:57-72.

Tiita, M.; Beall, F.C.; Biernacki, J.M. 1998. Acousto-ultrasonic assessment of internal decay in glulam beams. *Wood and Fiber Science*. 30(3):259-273.

Tiita, M.; Biernacki, J.M.; Beall, F.C. 1999. Using spatial averaging and relative measurement techniques to improve acousto-ultrasonic decay detection efficiency. In: Proceedings of the 11th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. USA: pp:185-194.

Timoshenko, S.; Young, D.H.; Weaver, W. 1994. Reprinted Edition. Vibration problems in Engineering. New York: John Wiley. USA.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Winandy, J.E.1994. Wood Properties. In: Arntzen, C. J., ed. Encyclopaedia of Agricultural Science. Vol. 4. Academic Press. USA. pp:549-561.

Xu, P. 2002. Estimating the influence of knots on the local longitudinal stiffness in radiate pine structural timber. *Wood Science and Technology*. 36:501-509.

19. CARACTERIZACIÓN NO DESTRUCTIVA DE VIGAS DE MADERA DE *PINUS SPP.* UTILIZANDO ULTRASONIDO Y ONDAS DE ESFUERZO

INTRODUCCIÓN

En México, las vigas de madera aserrada se utilizan principalmente para sustituir vigas en servicio y deterioradas, durante 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, en el ámbito nacional, se limita a dar una apreciación subjetiva sobre el estado material de la madera, orientada a sugerir al restaurador la substitución de la estructura o su demolición (Villaseñor Aguilar, 2005).

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.

Las características técnicas de las vigas de madera y su empleo como elementos de uso estructural no se ajustan a ningún sistema de normalización. Los cortes no están alineados en las direcciones de anisotropía de la madera, las aristas no son paralelas, las vigas contienen madera con médula, nudos, fisuras, etc.

En el mismo contexto, la madera no está estabilizada y el contenido de humedad es estimado de manera coloquial. Además, se desconoce muchas veces la especie en cuestión, así como las características elásticas y de resistencia mecánica de la especie de madera de la cual está elaborada la viga.

En consecuencia, las vigas no se diseñan para una función estructural, ni se utilizan los principios de la resistencia de materiales en el cálculo de la estabilidad y resistencia de las vigas como elementos estructurales. Su aplicación está basada en la experiencia empírica del restaurador, del constructor o del utilizador de la madera.

Como resultado de esta práctica, las vigas de madera no se consideran técnicamente elementos constructivos normalizados ni confiables. La madera se emplea más como elemento arquitectónico que como solución estructural.

Para cumplir con criterios de seguridad y utilizando el sentido común, en la práctica, los elementos estructurales a base de madera están sobredimensionados y se utilizan con conexiones ingenuas, las cuales no garantizan la estabilidad de las armaduras de madera, ni la seguridad de los usuarios.

Información sobre el tema de investigación.

En el país existen publicaciones que son útiles en el diseño y cálculo de elementos estructurales de madera. Entre otros se pueden citar: Robles Fernández-Villegas y Echenique-Manrique (1983), Ricalde Camacho y Bárcenas-Pazos (1989 y 1990) y el Manual de Construcción de Estructuras Ligeras de Madera, de la Comisión Forestal de América del Norte (1999).

Igualmente, se pueden consultar manuales y guías de diseño de estructuras de madera, por ejemplo: 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 y col. (2003).

Respecto a los principios fundamentales del comportamiento mecánico de la madera, se puede revisar en: Panshin y de Zeeuw (1964), Kollmann y Côté (1968), Kollmann y col. (1975), Dinwoodie (1981), Bodig y Jayne (1982), Lavers (1983), Guitard (1987), Lewin y Goldstein (1991), Tsoumis (1991), Forest Products Laboratory (1999) y Haygreen y Bowyer (1996).

En cuanto a la información de las características físicas y mecánicas de utilidad en el cálculo y el diseño con madera, existen bases de datos al respecto. Entre otros: TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas (Sotomayor Castellanos, 2002), Características mecánicas y clasificación de 150 especies de maderas Mexicanas (Sotomayor Castellanos, 2005) y Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas (Sotomayor Castellanos y col., 2008).

Durante la revisión de la bibliografía sobre el tema de investigación, no se encontraron valores del módulo de elasticidad de la madera para vigas de empleo en la industria de la construcción en México. Igualmente, no se detectó información sobre metodologías para la evaluación de madera aserrada con métodos de carácter no destructivo.

Sobre el empleo de técnicas no destructivas en el estudio de vigas y estructuras de madera, se puede encontrar información de trabajos realizados en el extranjero, entre otros en: Meyer y Kellogg (1982), Sandoz (1989), Ross y Pellerin (1994), Ashby (1999), Boström y Holmqvist (1999), American Society for Testing and Materials (2000), Forest Products Laboratory (2000), Sandoz (2000 y 2002), Kawamoto y Williams (2002), Pellerin y Ross (2002) y Grabianowski y col. (2006).

Hipótesis de trabajo.

Para contribuir a la utilización correcta de la madera empleada en la industria de la construcción, es deseable 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 (EI) independientemente de la especie y de las características tecnológicas de la madera de la viga que modifiquen 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.

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; Villaseñor Aguilar, 2007).

La investigación propone 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.

OBJETIVO

Determinar la velocidad de transmisión de onda y el módulo de elasticidad que caractericen a vigas de madera de *Pinus* spp., empleando dos métodos de evaluación no destructivos: ultrasonido y ondas de esfuerzo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales.

El material experimental consistió en 12 vigas de madera de *Pinus* spp., seleccionadas al azar de una carga de vigas comerciales de madera para maquilado, en el Laboratorio de Conservación y Preservación de la Madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. La madera fue identificada visualmente por el proveedor de la madera. La especie o especies estudiadas no fueron corroboradas de manera formal. El origen de las vigas tampoco fue documentado.

Las dimensiones de las vigas utilizadas como probetas, fueron en promedio de 19 x 13 x 500 cm³. Las vigas contenían médula, nudos de hasta 6 cm de diámetro y grietas externas incluso de 25 cm de longitud y contenían además, bolsas de resina. A manera de ilustración del material experimental, la figura 1 presenta un esquema de la viga número 4 mostrando la médula, nudos y fisuras externas.

Métodos.

El contenido de humedad (H) de la madera de las vigas se midió utilizando un higrómetro de resistencia eléctrica. Este parámetro se muestreó en 5 puntos, en cada una de las caras opuestas formadas por los planos paralelos a la dirección longitudinal de las vigas (ver figura 2). La densidad (ρ) aparente de la madera se calculó a partir del peso y de las dimensiones de cada una de las vigas en el momento de las pruebas.



Figura 1. Esquema de la viga número 4.



Figura 2. Esquema de una viga y los puntos de medición de la velocidad de transmisión del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo.

Pruebas no destructivas.

Las pruebas de ultrasonido y de ondas de esfuerzo adaptaron los procedimientos de laboratorio propuestos por Sotomayor Castellanos y Linsenmann (2006) y Sotomayor Castellanos y col. (2007). La figura 2 esquematiza una viga y los puntos de medición de la velocidad de transmisión del ultrasonido y de las ondas de esfuerzo.

Las pruebas no destructivas consistieron en medir el tiempo y la distancia de transmisión de onda en la dirección longitudinal a lo largo de las vigas y transversalmente en intervalos de 1 m. El tiempo de transmisión del ultrasonido fue medido con el aparato *sylvatest*® y el tiempo de transmisión de las ondas de esfuerzo fue medido con el aparato *Fakopp*®. A partir de estos parámetros se calculó la velocidad del ultrasonido en la dirección longitudinal (Vus L) y en la dirección transversal (Vus T) de las vigas.

De manera similar se calculó la velocidad de la onda de esfuerzo en la dirección longitudinal (Voe L) y en la dirección transversal (Voe T) de las vigas. Los módulos de elasticidad correspondientes a las direcciones transversal y longitudinal de la viga fueron calculados ponderando las velocidades de transmisión (V) del ultrasonido o de las ondas de esfuerzo, con la densidad de la madera (ρ). El desarrollo de la ecuación de onda a partir de la cual se calcularon los módulos de elasticidad se presenta en el anexo.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

La tabla 1 presenta los resultados de los parámetros adquiridos por los métodos de ultrasonido (us) y de ondas de esfuerzo (oe). El contenido de humedad H representa el valor promedio de 10 mediciones en las caras laterales de cada viga. Las velocidades Vus L y Voe L representan una medición a lo largo de cada viga. Las velocidades Voe T y Vus T representan el promedio de 5 mediciones en las direcciones correspondientes. Finalmente, los módulos de elasticidad representan los valores promedios de los cálculos propios a cada una de las vigas.

La densidad promedio de la madera fue de 0.499 g/cm³. De acuerdo con la TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas, la madera de las vigas una vez ajustada a un contenido de humedad del 12% se clasifica como de densidad media.

El contenido de humedad de la madera de las vigas fue en promedio de 12%, es decir, las vigas pueden considerase como de madera seca.

No. de viga	Н	ρ	Vus L	Voe L	Vus T	Voe T	Eus L	Eoe L	Eus T	Eoe T
	%	g/cm ³	m/s	m/s	m/s	m/s	MPa	MPa	MPa	MPa
1	11.70	0.492	4462	4894	1498	1842	8952	11791	1105	1670
2	10.94	0.391	4243	4330	1643	1808	7046	7340	1056	1280
3	11.90	0.511	4169	4666	1593	1946	9371	11134	1298	1937
4	12.36	0.555	3865	4387	1712	2077	8878	10677	1626	2393
5	12.34	0.490	4268	4727	1584	1980	8632	10953	1229	1922
6	12.36	0.528	4204	4628	1586	2052	9505	11316	1330	2224
7	11.44	0.552	4692	4902	1447	1619	12580	13275	1157	1448
8	12.18	0.508	3749	3932	1798	1968	7330	7857	1644	1968
9	11.94	0.505	4590	5059	1604	1606	10998	12932	1300	1302
10	12.88	0.471	3633	3933	1465	1660	6429	7291	1012	1300
11	11.45	0.488	4663	4987	1671	1790	10930	12125	1362	1563
12	12.08	0.497	4284	4934	1600	1762	9606	12096	1272	1542
Promedio	12.00	0.499	4235	4614	1600	1842	9188	10732	1282	1712
Desv. Est.	0.524	0.042	345.5	390.6	100.6	163.4	1764.2	2097.5	198.3	373.3
C.V. (%)	04	08	08	08	06	09	19	20	15	22

Tabla 1. Estadísticos de los parámetros estudiados.

La densidad y el contenido de humedad de la madera presentaron un coeficiente de variación (C.V.) aceptable en investigación de características físicas de madera con dimensiones de empleo (ver tabla 1).

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. Sin embargo, las vigas presentaron una cantidad importante de nudos y de fisuras, tal como se ilustra en la figura 1. En consecuencia, los valores de las velocidades, pudieron ser disminuidos por estas particularidades estructurales.

Las vigas presentaron un carácter anisotrópico en sus propiedades mecánicas. Los valores de la velocidad y del módulo de elasticidad en la dirección longitudinal fueron mayores a los correspondientes en la dirección transversal, tal como se ilustra en la figura 3.



Figura 3. Valores promedio de: a) velocidad de transmisión; b) módulo de elasticidad.

Durante los trabajos de laboratorio se observó que las aristas de las vigas no correspondían a las direcciones radial y tangencial del plano leñoso. De aquí que las mediciones en las direcciones radial y tangencial fueron promediadas de los 10 valores para la dirección transversal o perpendicular a la dirección longitudinal de las vigas. Los coeficientes de anisotropía se detallan en la tabla 2.

Ultrasonido		Ondas de esfuerzo	
Vus L / Vus T	2.65	Voe L / Voe T	2.50
Eus L / Eus T	7.16	Eoe L / Eoe T	6.27

Tabla 2. Coeficientes de anisotropía.

Estas diferencias son importantes para el cálculo de esfuerzos y deformaciones presentes en condiciones de servicio, pues es recomendable considerar el tipo de característica mecánica de la madera, el tipo de esfuerzo y la dirección de la solicitación:

Cuando una viga trabaja en flexión, las solicitaciones presentes son una combinación de esfuerzos en compresión y tensión en la dirección longitudinal de la viga, más los esfuerzos de tipo cortante que aparecen cerca del eje neutro de la sección transversal. Cuando un elemento estructural trabaja como columna o viga en tensión, los esfuerzos son principalmente en compresión o en tensión en su dirección longitudinal. Cuando una viga está ensamblada a otros elementos estructurales, aparecen cerca de las conexiones esfuerzos combinados colineales, cortantes y de torsión; sobrepuestos en las tres direcciones materiales de la madera: radial, tangencial y longitudinal, direcciones que no coinciden necesariamente con las direcciones de la geometría de la viga.

La estrategia de comparar dos técnicas para el cálculo de velocidades y módulos de elasticidad permitió observar diferencias entre los resultados. De la observación de la tabla 3 se deduce que el método de ondas de esfuerzo resultó en valores mayores de los módulos de elasticidad en la dirección longitudinal a los módulos correspondientes a la técnica del ultrasonido. La diferencia entre las velocidades calculadas por cada método fueron del orden de 9-15%. Sin embargo, una vez que se ponderan con la densidad, las diferencias se sitúan en el rango de 17-33%. Es decir casi el doble.

Dirección longitudinal		Dirección transversal		
Voe L / Vus L	1.09	Voe T / Vus T	1.15	
Eoe L / Eus L	1.17	Eoe T / Eus T	1.33	

Tabla 3. Diferencias entre métodos.

La especie o especies de la madera de las vigas no fueron identificadas de manera formal. Además, cada una de ellas contenía una gran cantidad y variedad de nudos y fisuras. Estas particularidades de las vigas resultaron en una variación normal en los valores de las velocidades y de los módulos de elasticidad tal como explican los coeficientes de variación (C.V.) en la tabla 1. Los coeficientes de variación para los módulos de elasticidad variaron entre 15 y 22%.

CONCLUSIONES

Doce vigas de madera de *Pinus* spp., fueron caracterizadas determinando la velocidad de transmisión de onda y el módulo de elasticidad de la madera en las direcciones longitudinal y transversal de la geometría de las vigas.

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 parámetros calculados con el método de ondas de esfuerzo resultaron mayores a los determinados con ultrasonido.

REFERENCIAS

American Institute of Timber Construction. 1994. Fourth edition. Timber Construction Manual. Wiley & Sons. USA.

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.

Ashby, M.F. 1999. Materials Selection in Mechanical Design. Second edition. Butterworth-Heinemann. Great Britain.

Bodig, J. 1992. Editor. Reliability-Based Design of Engineered Wood Structures. Series E: Applied Sciences, Vol. 215. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.

Bodig, J.; Jayne, B.A. 1982. Mechanics of Wood Composites. Van Nostrand Reinhold. USA. 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.

Comisión Forestal de América del Norte (COFAN). 1999. Manual de Construcción de Estructuras Ligeras de Madera. Segunda Edición. Editado por el Consejo Nacional de la Madera en la Construcción, A. C. y la Universidad Autónoma Chapingo. México.

Dinwoodie, J.M. 1981. Timber, Its Nature and Behaviour. Van Nostrand-Reinhold. USA.

Faherty, K.F.; Williamson, T.G. 1989. Editors. Third edition. Wood Engineering and Construction Handbook. McGraw-Hill. USA.

Forest Products Laboratory. 1999. Wood handbook-Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. USA.

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.

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.

Guitard, D. 1987. Mécanique du Matériau Bois et Composites. Cepadues-Editions. France.

Haygreen, J.G.; Bowyer, J.L. 1996. Forest Products and Wood Science, An Introduction. Iowa State University Press. USA.

Hoyle, R.J. Jr. 1978. Wood technology in the Design of Structures. Fourth edition. Mountain Press Publishing. USA.

Jayne, B.A. 1959. Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*. 9(11):413-416.

Kaiserlik, J.H.; Pellerin, R.F. 1977. Stress wave attenuation as an indicator of lumber strength. *Forest Products Journal*. 27(6):39-43.

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.

Kollmann, F.F.P.; Côté, W.A. 1968. Principles of Wood Science and Technology. Volume I: Solid Wood. Springer-Verlag. Germany.

Kollmann, F.F.P.; Kuenzi, E.W.; Stamm, A.J. 1975. Principles of Wood Science and Technology. Volume II: Wood Based Materials. Springer-Verlag. Germany.

Lavers, G.M. 1983. The strength properties of timber. Building Research Establishment Report. England.

Lewin, M.; Goldstein, I.S. 1991. Editors. Wood Structure and Composition. International Fiber Science and Technology Series. Marcel Dekker. USA.

Meyer, R.W.; Kellogg, R.M. Editors. 1982. Structural Use of Wood in Adverse Environments. Society of Wood Science and Technology. Van Nostrand Reinhold. USA.

Meyers, M.A. 1994. Dynamic Behavior of Materials. John Wiley & Sons. USA.

Morlier, P. 1994. Editor. Creep in Timber Structures. Report of RILEM Technical Committee 112-TSC. Chapman & Hall. England.

Ozelton, E.C.; Baird, J.A. 1976. Timber Designer's Manual. England.

Panshin, A.J.; de Zeeuw, C. 1964. Textbook of Wood Technology. Volume I. McGraw-Hill. USA.

Pellerin, R.F. 1965. A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. *Forest Products Journal*. 15(3):93-101.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA.

Ricalde Camacho, M.O.; Bárcenas-Pazos, G.M. 1989. Manual para diseño de estructuras de madera. 1.3. Propiedades físicas de la madera. LACITEMA, Xalapa, Ver. México.

Ricalde Camacho, M.O.; Bárcenas-Pazos, G.M. 1990. Manual para diseño de estructuras de madera. 1.4. Propiedades mecánicas de la madera. LACITEMA, Xalapa, Ver. México.

Robles Fernández-Villegas, F.; Echenique-Manrique, R. 1983. Estructuras de Madera. Editorial Limusa. México.

Ross, R.J. et al. 1997. Relationship between log and lumber modulus of elasticity. Forest Products Journal. 47(2):89-92.

Ross, R.J.; Pellerin, R.F. 1988. NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves. *Forest Products Journal*. 38(5):39-45.

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. 2000. 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. 2002. 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.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2002. TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. FITECMA. UMSNH. México.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2003. Caracterización Mecánica de madera reconstituida: Módulo de Elasticidad de Tableros de Partículas de Madera evaluado con métodos no destructivos. Revista Maderas: Ciencia y Tecnología. (5)1:20-43. Chile.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2005. Características mecánicas y clasificación de 150 especies de maderas Mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. UMSNH. 1(1):3-22. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Guridi Gómez, L.I.; García Moreno, T. 2008. Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 4(1):3-32.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Linsenmann, P. 2006. Evaluación mecánica por métodos no destructivos de vigas de madera de *Picea abies. Investigación e Ingeniería de la Madera*. 2(2):3-24. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Nagao, H.; Ido, H.; Kato, H.; Onishi, Y. 2007. NDE methods applied to the study of a wood beams's discontinuity. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 3(2):18-31. México.

Timoshenko, S.P.; Goodier, J.N. 1970. Theory of Elasticity. Third edition. Engineering Societies Monographs. McGraw-Hill. USA.

Tsoumis, G. 1991. Science and Technology of Wood. Structure, properties, utilization. Editorial Van Nostrand Reinhold. USA.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2005. Comportamiento mecánico de la madera de *Prosopis sp.* en relación con la variación de su masa. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

ANEXO: ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DE UNA BARRA DELGADA E INFINITAMENTE LARGA DE UN MATERIAL VISCO-ELÁSTICO.

La fórmula general utilizada para el cálculo del módulo de elasticidad en la madera que utiliza la velocidad de trasmisión de una onda mecánica ponderada por la densidad del material, se fundamenta en la teoría de la Resistencia de materiales y en la Teoría de vibraciones para sólidos elásticos. Este estudio parte de las siguientes consideraciones:

De acuerdo con Sotomayor Castellanos (2003) citado por Villaseñor Aguilar (2005), la caracterización del comportamiento de la madera en condiciones dinámicas y los métodos de laboratorio recientemente desarrollados, han sido de carácter no destructivo y han utilizado

la hipótesis fundamental en mecánica de la madera, propuesta por Jayne en 1959: la madera y los materiales fabricados con ella pueden almacenar y disipar energía, por ejemplo, la propiedad de la madera de almacenar energía es manifestada por la velocidad a la cual una onda mecánica viaja a través de ella. En contraste, la capacidad de la madera para atenuar una onda de vibración, denota su capacidad para disipar energía. Jayne propuso así la hipótesis fundamental de que estas propiedades de la madera para almacenar y disipar energía, están controladas por los mismos mecanismos que determinan su comportamiento mecánico en condiciones estáticas. Es decir, la estructura molecular y anatómica del material es la base del comportamiento mecánico de la madera. Como consecuencia, es posible relacionar estadísticamente estas propiedades utilizando métodos de análisis numéricos tales como las correlaciones estadísticas. Esta proposición ha sido verificada experimentalmente por los trabajos de Jayne (1959), Pellerin (1965), Kaiserlik y Pellerin (1977), Ross y Pellerin (1988), Ross y col. (1997), y más recientemente por: Sandoz (2000 y 2002).

La idealización de una barra delgada e infinitamente larga de un material visco-elástico se limita a volúmenes de probetas de madera sólida, cuyo contenido de humedad permanece constante y distribuido de manera uniforme en las probetas.

En una escala de observación macroscópica, la madera es un material homogéneo y lignocelulósico que admite simetrías materiales cartesianas y cilíndricas (Villaseñor Aguilar, 2007). Esta proposición facilita el estudio de la madera independiente del tipo, tamaño y acomodo de sus componentes estructurales moleculares y anatómicos. Además, este concepto permite idealizar a la madera como un material que admite referenciales materiales y de geometría, compatibles entre sí con coordenadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso.

Desde el punto de vista mecánico, la madera es un sólido de medio continuo con propiedades visco-elásticas. Este enfoque considera a la madera como un sólido elástico y admite la teoría matemática propia al estudio de los medios continuos. Este punto de vista permite igualmente emplear las leyes de la resistencia de materiales en el análisis del comportamiento mecánico de la madera. Conjuntamente, este criterio considera que las propiedades elásticas del material están relacionadas con su comportamiento higroscópico.

A una escala de observación de un volumen elemental de materia, la representación reológica de la madera es un sistema a un grado de libertad, caracterizado por la respuesta de una masa que representa la probeta de estudio, la cual esta unida a cuerpos de Kelvin y de Voigt, compuestos éstos por elementos elásticos y viscosos. En una escala celular o de tejido leñoso, esta misma idea se aplica, pero modelando sistemas a varios grados de libertad, donde cada uno de éstos puede ser una célula o un tejido en particular. De esta manera, se transfieren resultados de una probeta en particular o de una muestra de material en estudio, como características generales de una especie de madera (Villaseñor Aguilar, 2007).

La teoría de la elasticidad permite la representación matemática del comportamiento de probetas de madera, durante los ensayos que pretenden determinar sus características mecánicas. En la práctica de laboratorio, los resultados entre representaciones completas del fenómeno y su simplificación para fines del cálculo de parámetros de ingeniería son casi iguales, lo que permite que los métodos experimentales se faciliten, ignorando los fenómenos

puntuales y locales ocasionados por las condiciones particulares a la configuración del ensayo respectivo (Villaseñor Aguilar, 2007).

Respecto al efecto del tiempo, el carácter viscoso de la madera modifica su respuesta elástica, particularmente en las pruebas donde las solicitaciones son mantenidas constantes durante periodos temporales largos. Por ejemplo durante los ensayos de relajación de esfuerzos y flujo de deformaciones. Adicionalmente, las propiedades viscoelásticas de la madera pueden ser observadas en ensayos dinámicos, donde la velocidad de carga es muy alta. Por ejemplo, los ensayos mecánicos por impacto y en vibraciones (Villaseñor Aguilar, 2007).

Los fenómenos ocasionados por fuerzas y deformaciones a través del tiempo son estudiados idealizando al material con modelos reológicos, compuestos de elementos elásticos y viscosos, sujetos a una masa representativa de la madera. Este estudio hace uso de ese tipo de modelos para anticipar la respuesta del material. El desarrollo de la ecuación de onda y los parámetros derivados que caracterizan al movimiento de una barra están basados en Meyers (1994) y Timoshenko y Goodier (1970).

La ecuación de movimiento de un elemento diferencial de la barra mostrada en la figura A1 es:

$$-\sigma A + (\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx)A = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$
(1)

Donde:

- u = Desplazamiento desde la posición de equilibrio.
- x = Coordenada espacial.
- A = Sección transversal de la barra.
- σ = Esfuerzo normal a la sección transversal.
- ρ = Densidad del material.
- t = Tiempo.

La ecuación (1) se puede reducir a:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{2}$$

Para el caso de un material elástico se puede proponer:

$$\sigma = E \varepsilon \tag{3}$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad del material.

 ε = Deformación en el material.

La deformación material ε puede ser definida por:



Figura A1. a) Esquema de un segmento de barra delgada con coordenadas x y desplazamiento u de una sección transversal. b) Diagrama del cuerpo libre de una sección transversal con los esfuerzos σ actuando en un elemento diferencial dx de la barra.

Substituyendo la ecuación (4) en la ecuación (3) y procediendo igualmente en la ecuación simplificada (2), se puede establecer:

$$E\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$
(5)

La ecuación (5) puede ser transformada en la forma usual:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}$$
(6)

Donde:

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{7}$$

La ecuación (6) explica la propagación de una onda elástica, longitudinal y unidimensional en una barra delgada. Esta ecuación es llamada usualmente ecuación de onda.

Una solución para la ecuación de onda puede ser una onda armónica cuya propagación puede ser definida por:

$$u = A \sin[k (x - c t)]$$
(8)

Substituyendo la ecuación (8) en la ecuación (7) se llega a:

$$c = c_0 \tag{9}$$

Es decir, la velocidad de propagación de la onda debe ser c_0 .

Para el caso de vibraciones en una barra de largo finito, la cual es sometida a una vibración libre definida por:

$$u(x,t) = u(x)\sin(\omega t) \tag{10}$$

Con:

 ω = Frecuencia de vibración de la barra.

Remplazando la función (10) en la ecuación (6), se obtiene:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k^2 u = 0 \tag{11}$$

Con:

$$k = \frac{\omega}{c_0} \tag{12}$$

La ecuación (11) tiene como solución:

$$u(x) = C \sin(k x) + D \cos(k x)$$
(13)

Para determinar las constantes C y D, se puede suponer que se trata de una barra sobre apoyos de tipo libre-libre. Las condiciones de frontera son:

Para
$$x = 0$$
 y $x = l$: $\sigma = 0$

con: l = Largo de la barra.

Es decir, no existen esfuerzos en las extremidades de la barra.

Y combinando las ecuaciones (3) y (4), se obtiene:

Para
$$x = 0$$
 y $x = l$: $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$.

Es decir, no hay deformaciones en los extremos de la barra.

Derivando la ecuación (13) se obtiene:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = k \left(C \cos k \, x - D \sin k \, x \right) \tag{14}$$

Donde *C* y *D* son constantes.

Resolviendo para x = 0: $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$

y se obtiene:

Igualmente para
$$x = l$$
: $\frac{\partial u}{\partial x} =$

se encuentra: $D \sin k \, l = 0$

C = 0

0

n = (1, 2, ...)

Lo que implica: $k l = n \pi$

con:

Es decir:

$$\omega_n = \frac{n \pi c_0}{l} \tag{15}$$

ó:

$$f_n = \frac{n c_0}{2 l} \tag{16}$$

Donde:

 ω_n , f_n = Frecuencias naturales de vibración de la barra.

Lo cual lleva a definir los siguientes modos de vibración:

$$u(x,t) = D\cos\left(\frac{n\pi}{l}x\right)$$
(17)

con: n = (1, 2, ...)

La ecuación de movimiento (6) puede generalizarse para cualquier tipo de polarización de onda en un medio elástico:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$
(18)

Donde:

$$c = \sqrt{\frac{Rigidez}{Densidad}}$$
(19)

con c = Velocidad de onda.

Las ecuaciones (18) y (19) predicen igualmente la propagación de ondas unidireccionales.

Para el caso de una barra de un material sólido y elástico de módulo de Young *E*, y de densidad ρ , la velocidad de onda *c* puede entonces ser definida por:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{20}$$

La ecuación (20) es la relación usada comúnmente en Ciencias e Ingeniería de la madera para calcular el módulo de elasticidad de una probeta de madera.

Desde otro punto de vista, la barra esquematizada en la figura A1, puede ser modelada como un oscilador simple:



Figura A2. Modelo conceptual de una barra sólida y elástica como un oscilador simple compuesto de un resorte elástico de rigidez k y una masa sólida m.

La ecuación de movimiento del sistema representado en la figura 2 es:

$$m\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + k u = 0 \tag{21}$$

Donde:

m = Masa del sistema (material).

k = Rigidez del sistema (material).

Acomodando la ecuación (21), resulta:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \omega_0^2 \frac{\partial u}{\partial t} = 0$$
(22)

con:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{23}$$

Donde:

 ω_0 = Frecuencia angular natural del sistema en vibraciones libres

Una solución para la ecuación (22) es:

$$u = C\cos\omega_0 t + D\sin\omega_0 t \tag{24}$$

La ecuación (24) puede ser expresada en términos de la amplitud A y del ángulo de fase φ :

$$u = A\cos\left(\omega_0 t - \varphi\right) \tag{25}$$

Con:

$$A = \sqrt{C^2 + D^2}$$
(26)

$$\tan \varphi = \frac{D}{C} \tag{27}$$

Si al sistema representado en la figura A2 se le agrega un elemento amortiguador c, se forma un sistema mecánico visco-elástico (también llamado Modelo de Kelvin), tal como se muestra en la figura A3: La ecuación de movimiento para el sistema mostrado en la figura A3 es:

$$m\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c\frac{\partial u}{\partial t} + k u = 0$$
(28)

Donde:

c = Constante de amortiguamiento del sistema (material).



Figura A3. Modelo de una barra sólida y elástica como un sistema visco-elástico compuesto de un resorte elástico de rigidez k, un amortiguador viscoso c y una masa sólida m.

La ecuación (28) se puede acomodar de la manera siguiente:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{\partial u}{\partial t} + \omega_0^2 u = 0$$
⁽²⁹⁾

Donde:

Q = Factor de calidad del sistema (material).

con:

$$Q = \frac{\sqrt{m\,k}}{c} \tag{30}$$

La solución de la ecuación (29) puede tomar varias formas dependiendo del valor de Q.

Para el caso donde $Q \ge 0.5$, llamado sistema con periodo amortiguado (y que es el caso que se aplica al estudio del ultrasonido y la mayoría de sistemas simples en vibración), la solución es:

$$u = e^{-\zeta t} \left(\mathbf{A}_{1} e^{i \,\Omega t} + \mathbf{A}_{2} e^{-i \,\Omega t} \right)$$
(31)

Donde:

 $A_1 y A_2 = Constantes.$ $\Omega = Frecuencia natural angular de un sistema visco elástico en vibraciones libres.$ $<math>\zeta = Constante de disminución de la vibración del sistema (ver figura 4).$

Con:

$$\Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} \tag{32}$$

у

$$\zeta = \frac{\omega_0}{2Q} \tag{33}$$

La ecuación (31) puede expresarse en términos de una función compuesta de senos y cosenos:

$$u = e^{-\zeta t} (C \cos \Omega + D \sin \Omega)$$
(34)

La función (34) representa la curva característica de las vibraciones libres de un oscilador amortiguado y puede esquematizarse con la figura A4:



Figura A4. Disminución exponencial de las vibraciones libres de un sistema amortiguado.

Para un periodo T (ver figura A4), se puede demostrar que:

$$\frac{u(t)}{u(t+T)} = e^{\zeta T} \approx e^{\frac{\pi}{Q}}$$
(35)

Lo que implica una nueva definición del factor de calidad del sistema:

$$\Delta = \ln \frac{u(t)}{u(t+T)} = \zeta T = \frac{\pi}{Q}$$
(36)

Donde:

 Δ = Decremento logarítmico de las vibraciones del sistema (material).

20. NDE METHODS APPLIED TO THE STUDY OF A WOOD BEAM'S DISCONTINUITY

ABSTRACT

This paper presents the results of three NDE method tests – ultrasound, longitudinal vibrations and stress waves – and a static bending test applied to the study of the discontinuity of 24 wood beams. Three experimental treatments were applied to two groups of wood beams of *Cryptomeria japonica* (Japanese Sugi): the first was a group of control of twelve beams and the second an experimental group of twelve beams. The artificial discontinuities consisted of four holes of 30 mm in diameter that later were amplified to 50 mm.

The investigation evaluates the effect of artificial holes in the elastic strength of wood beams, recreating the loss of continuity and mass occasioned by the action of decay agents in the wood. With the objective of verifying the performance of the Non-Destructive Evaluation techniques in the detection of discontinuities in the beams, the Modulus of Elasticity was determined in the longitudinal direction. Also, the static Modulus of Elasticity was evaluated in the same sample with the purpose of comparing the dynamic and static results. The stress waves method in relation to the static bending contributed higher values of the Modulus of Elasticity than the methods of ultrasound and longitudinal vibrations. The values of the Modulus of the elastic strength of the beams evaluated with the four techniques were sensitive to the presence of artificial holes and it was shown that NDE could detect discontinuities and loss of mass in wood beams.

INTRODUCTION

The mechanical evaluation of the structural elements of wood prescribes the application of techniques that do not alter the constitution of the material. The mechanical vibrationss, the stress waves and the ultrasound are usually employed in the study of the mechanical comportment of beams of wood, along with other laboratory techniques, and the results are usually related to data obtained in static bending standardized tests. According to Bodig (1994), among the advantages of this combination of techniques are the rapidity and its possible application in evaluations without altering the state of the wood, and its possibilities in the forest products industrial environment.

According to Beall (1999) and Pellerin and Ross (2002), the more frequent applications of the non-destructive evaluation (NDE) methods are: quality control for wood products, the detection of irregularities in the morphology of the wood and the fissures occasioned by the liberation of stress when drying, among others. Bucur (1995) proposes other applications of these techniques: the in-situ study of deterioration in the structural elements of wood, which could be modeled in laboratory conditions such as material discontinuities, or in other words, fissures or holes can be fabricated to represent the loss of continuity or the diminution of the

mass of the wood and these results can be compared with the wood decay suffered in real conditions of service.

The principle of the utilization of these NDE techniques is based on the measurement of the mechanical waves speed through the cellular structure of the wood. If an alteration exists in the wood, as for example the deviation of the fibers or the presence of a knothole, the velocity of the waves varies. According to Ross and Pellerin (1994), the particular value of the Modulus of Elasticity of a species of wood fluctuates in relation to the presence of anomalies in the structure of the test piece which is being tested.

This investigation evaluates the effect of artificial holes in beams of wood, recreating the loss of continuity and of mass occasioned by the action of decay agents on the wood. With the objective of verifying the utility of the NDE techniques in the detection of discontinuities in the wood, the Modulus of Elasticity was determined in the longitudinal direction of a sample of twenty-four beams of *Cryptomeria japonica* wood (Japanese Sugi). The NDE techniques applied were stress waves (SW), ultrasound (AU) and longitudinal vibrations (LV). Also, the Modulus of Elasticity was evaluated in the same sample with a static bending (SB) method with the objective of comparing the dynamic and static results.

The application of the techniques of vibrations and ultrasound to the study of wood is documented by Ross and Pellerin (1994), among other authors, who have revised different field techniques and laboratory procedures used in the detection of structural particularities of wood. On the other hand, Divos and Tanaka (1997) used techniques of vibrations and ultrasound to study the effect of the presence of knotholes in beams of wood in the wood of conifers. Their results relate in an important manner the presence of knotholes and the variation of elastic resistance of the wood.

With respect to the effect of artificial holes on the flexion resistance of beams of wood, Falk et al. (2003) studied six positions of holes of 25.4 and 44 millimeters in diameter in the test span of beams of *Pseudotsuga menziesii* wood. Their results confirm that the size and position of the hole in zones of tension or compression stress are the most important factors that reduce the resistance of the wood.

The ultrasonic techniques have contributed recently to the mechanical characterization of the wood such as the investigations of Kabir et al. (1997) demonstrate, among others. These authors corroborate the diminution of the velocity of sound in function of the amplitude of discontinuities in wood, such as knotholes and fissures in the test pieces studied. Beall (2002) recently revised ultrasonic technology for the investigation of the mechanical comportment of wood composites. Among other propositions, the author shows the influence of the moisture content and the wood density in the application of tests of vibrations and ultrasound. Also, the author concludes that the geometric discontinuity and the presence of deteriorated material of the wood influence its capacity to store and dissipate energy. On the other hand, Sandoz (1994) has published data concerning the liability of wood for its use in construction using ultrasound. His results indicate that this technique is adaptable to industrial conditions for its rapidity and efficiency. Accordingly, Tanaka et al. (1991) evaluated the Modulus of Elasticity of beams of wood of *Cryptomeria japonica*, using longitudinal vibrations and static

bending tests. Their conclusions confirm the important statistic relationships within the results of the dynamic and static tests.

In synthesis, the results of these authors suggest that the effect of bio-decaying agents on the elastic resistance in beams of wood can be studied by forming artificial holes in the laboratory and studying these with NDE techniques and contrasting these results with those measured in-situ.

This argument is the premise of this exploratory investigation: to evaluate the elastic resistance of beams of wood using artificial holes as an analogy to the natural alteration of their structure. The investigation proposes that the Modulus of Elasticity of a beam is the integral expression of its properties of elastic resistance. This attribute of the wood is a function of the geometric properties of the beam – such as its continuity – and of its material peculiarities, for example, its density. It is then proposed that the presence of holes or discontinuities in the beam of wood causes diminution in its Modulus of Elasticity.

METHODOLOGY

The experimental material consisted of 12 segments of the wood of *Cryptomeria japonica* (Japanese Sugi) that had been previously kiln dried. The test pieces were cut in pairs from each segment to make up two groups of 12 test pieces each one. One was a control group and the other was for treatment. The final dimensions of the 24 test pieces were: 50 mm thick, 100 mm in width and 2000 mm in length.

The physical parameters measured in all tests were density and moisture content. In the fourpoint static bending test, the central flexion of the beam was measured related to the force applied in the elastic domain. For the ultrasound and stress waves techniques, measurements were made of the speed of the waves cross the longitudinal direction of the test pieces (2000 mm and 600 mm respectively) and in the longitudinal vibrations tests, measurements were made of the natural frequency for a span length of 2000 mm.

Three treatments were applied to the experimental group of beams: The first was the evaluation of the Modulus of Elasticity of wood in the beams without holes, called continuous beams. Afterwards, the Modulus of Elasticity was estimated after four holes of 30 millimeters in diameter were elaborated in the central zone of the test pieces. Finally, the diameters of these perforations were amplified to 50 millimeters, in this way fabricating discontinuous beams, such as shown in Figure 1.

The tests of static bending test and the longitudinal vibrations test were carried out according to Tanaka et al. (1991) methodology, the stress waves tests were realized following the procedures of Tanaka et al. (1998) and the ultrasound tests were accomplished according to the indication of the "Operation Manual of the Pundit Measurement" (C.N.S. Electronics, n/d). The elastic parameters calculated were: the Modulus of Elasticity measured in static bending (MOE), the longitudinal Modulus of Elasticity in stress waves (Esw), the longitudinal Modulus of Elasticity by ultrasound (Eau), and the longitudinal Modulus of Elasticity measured by longitudinal vibrations (Elv).



Figure 1. Cryptomeria japonica wood beams of 50 mm x 100 mm x 2000 mm.

RESULTS

The average density of the wood was 360 kg/m^3 and the moisture content of the beams at the moment of testing was around 13%.

If a first approach of analysis by comparison of samples paired is done, the results of Table 1 shows that the values of the dynamic Modulus of Elasticity determined, using NDE techniques, are superior to the corresponding values of the static Modulus of Elasticity. According to Bodig and Jayne (1993), this difference between the results is explained by the visco-elastic character of the wood that amplify the apparent rigidity of the beams given that the velocity of the load in the dynamic methods is superior to the velocity of the load in the static bending showed higher values than the methods of ultrasound and longitudinal vibrations in a range of values similar to those reported earlier by Nakai and Yamai (1982).

On the other hand, the residual values of the MOE in relation to the treatment applied diminish proportionally for each NDE technique used, as is demonstrated in Table 1. With the higher discontinuity of holes of 50 mm, the residual MOE presented less diminishment (6%) in comparison to the Eau residual (11%), with the Esw residual (19%) and with the Elv residual that presented the highest diminution (32%). If it is assumed that the artificial holes represent discontinuities occasioned by the presence of knotholes or agents of deterioration in the wood, these results coincide with the conclusions of Gerhards (1982).

On the other hand, the MOE represents the integral effect over all the beam in the testing of transversal flexion where the anatomic structure, the qualities of elasticity of the wood and the geometry of the test piece determine the apparent rigidity of the beam: The holes were located in the center of the transversal section of the beams, where the concentration of stress produced by the moment of flexion is at a minimum. For example, the difference between the NH and H30 treatment is only 1 %. In contrast, the dynamic Modulus of Elasticity was more sensitive to the discontinuities, which were artificially provoked: The values of the

dynamic Modulus of Elasticity diminished proportionally to the presence of a higher discontinuity. The technique of longitudinal vibrations was more sensitive in comparison with the techniques of ultrasound and of stress waves.

Table 1. Statistics for the Modulus of Elasticity of the four techniques used: static bending (SB), ultrasound (AU), longitudinal vibrations (LV) and stress waves (SW), according to the different treatments: control group (C), beams continuous with no holes (NH), beams discontinuous with holes of 30 mm of diameter (H30) and beams discontinuous with holes of 50 mm of diameter (H50).

Techniques	Statistics		Treatments				
rechniques	Statistics	С	NH	H30	H50		
	MOE Average (GPa)	6.79	6.95	6.89	6.56		
Static handing	Standard error	0.37	0.30	0.30	0.30		
Static bending	C. V. (%)	19	15	15	16		
	MOE Residual (%)	100	100	99	94		
	Eau Average (GPa)	7.06	8.64	8.04	7.71		
Liltracound	Standard error	0.71	0.48	0.69	0.65		
Ultrasound	C. V. (%)	35	19	21	29		
	Eu Residual (%)	100	100	93	89		
	Elv Average (GPa)	7.51	7.60	6.58	5.16		
Longitudinal with stions	Standard error	0.40	0.40	0.32	0.24		
Longitudinal vibrations	C. V. (%)	19	17	17	16		
	Elv Residual (%)	100	100	87	68		
	Esw Average (GPa)	8.10	9.08	8.78	7.40		
Strong WOMOG	Standard error	0.60	0.38	0.41	0.41		
Suess waves	C. V. (%)	26	14	16	19		
	Esw Residual (%)	100	100	97	81		

In spite of this, the variation in the results for each treatment, represented by the standard error for each technique applied were similar in the case of MOE and were variable for the dynamic tests, as demonstrated in Table 1. Furthermore, the coefficients of variation (C.V.) for the cases of MOE and of Elv were low and similar. In contrast, the coefficients of variation for the values of Eau and Esw were high and inconsistent. With this approach of analysis comparing paired groups, the techniques of static bending and longitudinal vibrations were seen to be more efficient in comparison with the techniques of stress waves and of ultrasound.

If the analysis is made with each one of the four techniques used, as presented with the results in Table 2, with the particular focus on the different values of the Modulus of Elasticity between the different treatments applied, it can be seen that in spite of the numeric differences between the values of the MOE's and the Eau's, no significant difference at the 95% confidence level is seen between the different treatments for these techniques. In contrast, the techniques of LV and SW showed significant differences, detected in the discontinuous beams, represented in the treatments H30 and H50. From this point of view, the techniques of LV and SW were more efficient in comparison with the techniques of static bending and ultrasound. As well, for the four NDE techniques there is not a statistical difference berween the group of control and the treatment NH (Continuous beams).

		Treat	ment					
	С	NH	H30	H50	Interval		p^{***}	
		Ave	rage				•	
Static bending technique								
MOE	6.79	6.95	-	-	-1.146	0.843	0.755	N.S.*
MOE	6.79	-	6.89	-	-1.074	0.897	0.855	N.S.
MOE	6.79	-	-	6.56	-0.753	1.225	0.626	N.S.
MOE	-	6.95	6.89	-	-0.819	0.946	0.883	N.S.
MOE	-	6.95	-	6.56	-0.499	1.274	0.374	N.S.
MOE	-	-	6.89	6.56	-0.552	1.200	0.451	N.S.
	•	•		Ultrasour	nd technique	•	•	•
Eau	7.06	8.64	-	-	-3.357	0.199	0.079	N.S
Eau	7.06	-	8.04	-	-2.776	0.810	0.268	N.S.
Eau	7.06	-	-	7.71	-2.652	1.349	0.506	N.S.
Eau	-	8.64	8.04	-	-0.837	2.030	0.397	N.S.
Eau	-	8.64	-	7.71	-0.758	2.613	0.266	N.S.
Eau	-	-	8.04	7.71	-1.371	2.037	0.691	N.S.
Longitudinal vibrations technique								
Elv	7.51	7.60	-	-	-1.234	1.064	0.879	N.S.
Elv	7.51	-	6.58	-	-0.133	1.994	0.082	N.S.
Elv	7.51	-	-	5.16	1.376	3.318	0.00005	S.**
Elv		7.60	6.58	-	-0.008	2.039	0.052	N.S.
Elv		7.60	-	5.16	1.505	3.359	0.00002	S.
Elv			6.58	5.16	0.598	2.234	0.00164	S.
				Stress way	ves technique			
Esw	8.10	9.08	-	-	-2.454	0.495	0.182	N.S.
Esw	8.10	-	8.78	-	-2.194	0.830	0.360	N.S.
Esw	8.10	-	-	7.40	-0.814	2.221	0.347	N.S.
Esw	-	9.08	8.78	-	-0.857	1.452	0.598	N.S.
Esw	-	9.08	-	7.40	0.521	2.844	0.006	S.
Esw	-	-	8.78	7.40	0.177	2.593	0.027	S.
*N.S. = Nc	*N.S. = No significant difference at the 95 % confidence level.							
**S. = No significant difference at the 95 % confidence level.								

Table 2. Statistics for t of *Student*'s tests of the Modulus of Elasticity for the different treatments applied with the NDE techniques used.

***p = Probability at the 95 % confidence level.

With another analysis approach, if the results are examined for the same treatment in relation to the different techniques applied, as presented in Table 3, it can be inferred that for the control group, none of the NDE techniques detected statistically significant differences between the MOE and the Eau's, Esw's and Evl's, independently of the treatment applied. On the other hand, the techniques of ultrasound and stress waves did detect important differences in the NH treatment. Also, the technique of stress waves found a significant difference between the MOE and the Esw in the H30 treatment. Finally, the longitudinal vibrations technique was the only one that identified a difference between MOE and Elv in the H50 treatment. From the preceding analysis it is difficult to see whether it compares the efficiency of each NDE technique for a single treatment, which is usually the case

encountered in the practice of the in-situ evaluation of wood structures, none of these techniques offer similar results.

	Technique		Into		~***			
	Eau	Esw	Evl	Inte	rvai	p^{***}		
	Control C							
MOE	Eau	-	-	-1.924	1.394	0.744	N.S.*	
MOE	-	Esw	-	-2.772	0.164	0.790	N.S.	
MOE	-	-	Elv	-1.851	0.423	0.206	N.S.	
				Treatment NH				
MOE	Eau	-	-	-2.875	-0.510	0.0071	S.**	
MOE	-	Esw	-	-3.136	-1.128	0.0022	S.	
MOE	-	-	Elv	-1.656	0.361	0.197	N.S.	
Treatment H30								
MOE	Eau	-	-	-2.357	0.040	0.0573	N.S.	
MOE	-	Esw	-	-2.948	-0.847	0.0011	S.	
MOE	-	-	Elv	-0.595	1.205	0.489	N.S.	
				Treatment H50				
MOE	Eau	-	-	-2.645	0.341	0.124	N.S.	
MOE	-	Esw	-	-1.897	0.224	0.116	N.S.	
MOE	-	-	Elv	0.604	2.189	0.0014	S.	
*N.S. = No significant difference at at the 95 % confidence level.								
**S. = No significant difference at at the 95 $\%$ confidence level.								
*** p = Probability at the 95 % confidence level.								

Table 3. Statistics for *t* of *Student*'s tests within the Modulus of Elasticity determined by the NDE techniques used for the control group and for the three treatments applied.

Another focus for the comparison of the performance of each technique is to analyze the values of the Modulus of Elasticity determined in each beam in particular: If the values of MOE of the experimental group (12 specimens for the treatments applied: NH, H30 and H50) decrease proportionally, this phenomenon is not clearly perceived if each beam is studied singularly. However, the pattern is uniform for the group of tests on static bending, and as a result coincides in no statistically significant difference, as demonstrated in Table 2 and discussed before. This effect is shown in Figure 2, where the difference is not clear between the treatments for the particular values of each beam.

For its part, the ultrasound method offers clear results for six beams, as is illustrated in Figure 3, but with some contradictory results. For example, the beams 4, 6, 9 and 12 demonstrate lower values in comparison with the average values of the other beams, results that coincide with what was observed with the application of other techniques. However, other structural particulars of the beams, such as local deviations of the fiber and splits, could disturb the trajectory of the acoustic waves over the length of the specimens, so that the values of Eau of beams 3, 8 and 11 are difficult to interpret.



Figure 2. Static bending Modulus of Elasticity (MOE) for each beam according to the three treatments applied (NH, H30 y H50).



Figure 3. Ultrasound Modulus of Elasticity (Eau) for each beam according the three treatments applied (NH, H30 y H50).

The proportional diminution in the value of the Modulus of Elasticity in relation to the treatment applied and calculated with the technique of longitudinal vibrations was the most clear and uniform in comparison with the other techniques, as is shown in Figure 4. For each of the 12 beams, the tendency in the loss of resistance was detected in a satisfactory manner with the technique of longitudinal vibrations.

The test of the stress waves did not present important differences between the treatments NH and H30, as is shown in Figure 5, which coincides with the data in Table 2. However, this technique was efficient for the detection of the diminishment of the values of Esw between the NH and H30 treatments, and the discontinuity of 50 mm (H50).



Figure 4. Longitudinal vibrations Modulus of Elasticity (Elv) for each beam according the three treatments applied (NH, H30 y H50).



Figure 5. Stress waves Modulus of elasticity (Esw) for each beam according the three treatments applied (NH, H30 y H50).

Another focus of comparison of the performance of the techniques studied is to compare the results in relation to the artificial diminution of the mass of the beams. Figure 6 shows the tendencies (of the group of specimens for treatment) in the reduction of the values of the Modulus of Elasticity evaluated in three treatments, the relative diminishment of the mass of the beams was: NH = 0%; H30 = 1.41% and H50 = 3.93% respectively.



Figure 6. Variation of the values of Modulus of Elasticity for the three treatments according the NDE techniques applied and related to the reduction of beams' mass: continuous beams with no holes (NH: 0 % of mass reduction), discontinuous beams with holes of 30 mm of diameter (H30: 1.41 % of mass reduction), and discontinuous beams with holes of 50 mm of diameter (H50: 3.93 % of mass reduction).

Figure 6 shows that the values of elastic resistance of the beams evaluated with the four techniques are sensitive to the presence of artificial holes and discontinuities, and that the loss of mass in the beams can be detected. These discontinuities can be occasioned (in the case of in-situ evaluation of structural elements of wood) by the attack of decay agents, material modifications in the wood provoked by factors of physical deterioration and by the necessary holes in connections and fastenings in the wood structures.

According to Figure 6, the SW and AU techniques present initial and final values and similar tendencies. In contrast, the LV technique shows lower values and a more pronounced diminution in the values of the elastic resistance. Nevertheless, with the same focus of analysis related to the diminution of the mass of the beams, the values of reference to the technique of static bending were less indicative of the phenomenon studied. According to Armstrong et al. (1991), mechanical anisotropic comportment of the wood produces variation in the results according to the orientation of the transducers in relation to the anisotropic directions of the specimens. The NDE techniques applied in this study determine similar mechanical characteristics, but the configuration of each test is different and the mode of transmission of the mechanical waves is not equivalent.

The values of the Modulus of Elasticity in the beams evaluated with three dynamic methods presented strong statistical correlations with the static Modulus of Elasticity, as is demonstrated in Table 4. These results coincide with the anterior studies of Tanaka et al. (1991), Divos and Tanaka (1997) and Smulski (1991), among other investigators. The technique of longitudinal vibrations had higher correlations than the techniques of stress waves and ultrasound, respectively, for the three treatments applied. In effect, from the observation of the diagram of dispersion of the results for the continuous beams (NH

treatment) presented in Figure 7, it can be perceived that the technique of ultrasound and stress waves present more disperse values in comparison with the longitudinal vibrations technique. This tendency in the results was also observed with the H30 and H50 treatments.

Table 4. Statistical relationships and coefficients of correlation between the NDE Modulus of Elasticity determined by the NDE techniques and the static bending Modulus of Elasticity for the three treatments applied.

Treatment	E MOE					
Treatment	у	y = a + b x	K-			
Ultrasound technique						
NH		Eau = $-0.5679 + 1.3252$ MOE	0.70			
H30	Eau	Eau = $-2.4172 + 1.5192$ MOE	0.83			
H50		Eau = $-2.6566 + 1.5805$ MOE	0.53			
Longitudinal Vibrations technique						
NH		Elv = 1.0035 + 0.7829 MOE	0.95			
H30	Elv	Elv = 0.8594 + 0.9156 MOE	0.94			
H50		Elv = 0.3413 + 1.2044 MOE	0.90			
Stress Waves technique						
NH		Esw = 1.4616 + 1.0964 MOE	0.78			
H30	Esw	Esw = 1.0316 + 1.1258 MOE	0.66			
H50		Esw = -0.8680 + 1.2598 MOE	0.83			



Figure 7. Diagrams of dispersion and correlation lines within static bending Modulus of Elasticity (MOE), and the ultrasound (AU), longitudinal vibrations (LV) and Stress waves (SW) Modulus of Elasticity for continuous beams (NH).

CONCLUSION

The four techniques employed in this research detected the presence of artificial discontinuities in the beams. The results obtained with the longitudinal vibrations technique were clearer in comparison with the ultrasound, stress waves and static bending techniques.

For the case of the study analyzed, the ultrasound technique is not efficient for the detection of discontinuities across the length of wood beams with dimensions of use. The results using the stress waves technique were clearer for the detection of larger holes. For the use of these nondestructive evaluation techniques in the evaluation of the mechanical condition of structural elements of wood, it is necessary to privilege the analysis of each member in particular in contrast with the analysis of groups of beams or test pieces of wood. Finally, the investigation proved the utility of the nondestructive evaluation techniques in the characterization of the structural elements with dimensions of use.

The differences in the values of the Modulus of Elasticity between the different techniques studied could be explained because these parameters were evaluated utilizing techniques with different modes of loading. Also, the particular geometry of each type of test applied and for each treatment in particular does not permit rigorous comparison of the numerical values. However, the NDE techniques can be recommended to explain the technological state of the structural members and for specific necessities in the evaluation of wood structures, if they are adapted to the configuration of the appropriated test for each case of study in particular.

REFERENCES

Armstrong, J.P.; Patterson, D.W.; Sneckenberger, J.E. 1991. Comparison of three equations for predicting stress wave velocity as a function of grain angle. *Wood and Fiber Science*. 23(1):32-43.

Beall, F.C. 1999. Future of nondestructive evaluation of wood and woo-based materials. The e-journal of Nondestructive Testing & Ultrasonic. 4(11). 9 p. Consulted in: <u>http://www.ndt.net</u>.

Beall, F.C. 2002. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology*. (36):197-212.

Bucur, V. 1995. Acoustics of Wood. CRC Press. USA.

Bodig, J. 1994. NDE of wood in North America – Concepts and applications. In: Proceedings of the First European symposium on nondestructive evaluation of wood. University of Sopron. Sopron, Hungary. pp:1-14.

Bodig, J.; Jayne, B. A. 1993. Mechanics of Wood Composites. Reprinted edition, Kreiger Publishing Company. Malabar, FL. USA.

C.N.S. Electronics. (no date). Pundit manual for use with the portable ultrasonic nondestructive digital indicating tester: Mark IV. C.N.S. Electronics. London, England.

Divos, F.; Tanaka, T. 1997. Lumber Strength Estimation by Multiple Regression. *Holzforschung*. 51(5):467-471.
Falk, T.; DeVisser, D.; Plume, G.R.; Fridley, K.J. 2003. Effect of drilled holes on the bending strength of large dimension Douglas-fir lumber. *Forest Products Journal*. 53(5):55-60.

Gerhards, C.C. 1982. Longitudinal stress waves for lumber stress grading. Factors affecting applications: State of the art. *Forest Products Journal*. 32(2):20-25.

Kabir, M.F.; Sidek, H.A.A.; Daud, W.M.; Khalid, K. 1997. Detection of knot and split of rubberwood by non-destructive ultrasonic method. *Journal of Tropical Forest Products*. 3(1):88-96.

Nakai, T; Yamai, R. 1982. Properties of the Important Japanese Woods. The mechanical properties of 35 important Japanese woods. Bull. For. & For. Prod. Inst. No. 319, 1982. Ibaraki, Japan.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 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. 1994. Reliability assurance of structural timber using ultrasound. In: Proceedings of the First European symposium on nondestructive evaluation of wood. University of Sopron. Hungary. pp:216-224.

Smulski, S.J. 1991. Relationship of Stress Wave and Static Bending Determined Properties of Four Northeastern Hardwoods. *Wood and Fiber Science*. 23(1):44-57.

Tanaka, T.; Nagao, H.; Nakai, T. 1991. Nondestructive Evaluation of Bending and Tensile Strength by Longitudinal and Transverse Vibrations of Lumber. In: Proceedings of the Eighth International Nondestructive Testing of Wood Symposium. Washington State University. USA. pp:57-72.

Tanaka, T; Divos, F.; Faczan, T. 1998. Nondestructive evaluation of residual bending strength of wood with artificial defects by stress wave. In: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Washington State University. USA. pp:83-91.

21. VELOCIDAD DE ONDA Y MÓDULOS DE ELASTICIDAD POR ULTRASONIDO Y ONDAS DE ESFUERZO DE VIGAS DE MADERA DE *PINUS* SPP.

RESUMEN

El módulo de elasticidad dinámico es el parámetro de referencia para el diseño de productos y de estructuras de madera funcionando en condiciones dinámicas. El objetivo de este trabajo fue determinar las velocidades de onda y los módulos de elasticidad de vigas de *Pinus* spp., empleando ultrasonido y ondas de esfuerzo. Además, se determinaron la densidad y el contenido de humedad. Los resultados mostraron la influencia del contenido de humedad, pero no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los valores promedio del módulo de elasticidad según los métodos de prueba. Las magnitudes de los módulos fueron congruentes con valores propuestos por la normatividad de la industria de la edificación con madera.

Palabras clave: ultrasonido, ondas de esfuerzo, velocidad de onda, módulo de elasticidad

INTRODUCCIÓN

La industria de edificación con madera requiere datos de resistencia mecánica de madera aserrada con dimensiones apropiadas para su uso como elementos estructurales. Además, en México, existe una gran variedad de especies maderables, pero es difícil encontrar parámetros confiables de su resistencia mecánica. En consecuencia, la madera se utiliza poco como elemento estructural y se está subempleando en aplicaciones de bajo valor agregado. En el mismo contexto, la industria de la construcción no aprovecha muchas especies por la ausencia de parámetros de ingeniería que permitan construir de acuerdo a la normalización de edificación con madera.

Una posible solución a este problema, es la determinación experimental de valores característicos de elementos estructurales, en el caso que nos ocupa, de vigas de uso en la industria de la edificación. Esta clasificación permitirá sistematizar a grupos de especies con magnitudes de características tecnológicas comparables, en categorías comerciales de resistencia estructural cuyas propiedades sean similares y se puedan aplicar a un mismo uso. Esta hipótesis de trabajo es la motivación de la investigación: sí se determinan las características de resistencia necesarias en el cálculo estructural, las especies con vocación estructural pueden ser industrializadas para este propósito.

De entre los diferentes métodos de clasificación para madera estructural, recomendados por las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera (Gobierno del Distrito Federal, 2004), la clasificación estructural mecánica se debe realizar en piezas de tamaño real y empleando pruebas no destructivas, como lo son el ultrasonido y las ondas de esfuerzo.

En el país, existen publicaciones que son útiles en el diseño y cálculo de elementos estructurales de madera. Entre otros autores, se pueden citar: Robles Fernández-Villegas y Echenique-Manrique (1983), Ricalde Camacho y Bárcenas-Pazos (1989 y 1990) y el Manual de Construcción de Estructuras Ligeras de Madera, de la Comisión Forestal de América del Norte (1999). Igualmente, se pueden consultar manuales y guías de diseño de estructuras de madera. Por ejemplo: 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 y col. (2003).

Sobre el empleo de técnicas no destructivas en el estudio de vigas y estructuras de madera, se puede encontrar información de trabajos realizados en el extranjero, entre otros en: Sandoz (2000 y 2002), Kawamoto y Williams (2002), Pellerin y Ross (2002) y Grabianowski y col. (2006). En Mexico, existen dos trabajos anteriores sobre el tema: Sotomayor-Castellanos y Linsenmann (2006) y Sotomayor-Castellanos y col. (2009).

Los métodos de ultrasonido y ondas de esfuerzo están basados en el fenómeno de que las frecuencias de vibración y la capacidad para transferir una onda mecánica en un cuerpo solido dependen de sus propiedades físicas y mecánicas, principalmente la densidad y el módulo de elasticidad, y donde la velocidad de propagación de una onda mecánica está implícita en la ecuación de onda (Olguín Cerón, 2011):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$
(1)

Donde:

v = Velocidad de onda

u = Desplazamiento desde la posición de equilibrio

x = Coordenada espacial

t = Tiempo

Con:

$$v^{2} = \frac{E (1 - v)}{\rho (1 + v) (1 - 2v)}$$
(2)

Donde:

E = Módulo de elasticidad

 ρ = Densidad

v = Coeficiente de *Poisson*

Si las dimensiones de la pieza en estudio son pequeñas en comparación con la longitud de onda, y el material es homogéneo e isotrópico, la velocidad de la onda (v) puede ser calculada con la fórmula:

$$v^2 = \frac{E}{\rho}$$
(3)

Para el caso de estudio de vigas de madera, usualmente con una estructura material heterogénea y anisotrópica, la fórmula (3) corresponde a una aproximación. Sin embargo, trabajos al respecto (Pellerin, 1965; Pellerin y Ross, 2002; Grabianowski y col., 2006) han demostrado que los datos calculados con esta simplificación, son aceptables para fines de clasificación de especies de madera y para el diseño de productos y de estructuras de madera.

La figura 1 muestra la tendencia de la velocidad de onda de 5,000 m/s, velocidad típica del ultrasonido en la dirección longitudinal de la madera (Bucur, 1995), en relación a la variación del coeficiente de *Poisson* empleando la ecuación (2) y la ecuación simplificada (3). Para el caso de una viga de madera, solicitada en la dirección longitudinal, el coeficiente de *Poisson* para los componentes de la dirección longitudinal, varía de 0.026 (V_{TL}) a 0.038 (V_{RL}) (Hernández Maldonado, 2010). Otros autores, proponen un coeficiente de *Poisson* menor a 0.30 (Bodig y Jane, 1982), lo que permitiría una desviación de menos de 10%, en casos extremos. Estos argumentos permiten aceptar la ecuación (3) simplificada, como el modelo para determinar el módulo de elasticidad de la madera, a partir de su densidad y de la velocidad de onda, ambos medidos experimentalmente.



Figura 1. Tendencia de la velocidad de onda en relación a la variación del coeficiente de *Poisson*.

El módulo de elasticidad es el parámetro necesario para las comprobaciones del estado límite de servicio y del estado límite último en régimen lineal (Orbe y col., 2010), para el modelado probabilístico de estructuras de madera (Köhler y col., 2007) y para el diseño estructural y la evaluación de estructuras en servicio (International Organization for Standardization, 2003).

En una edificación con madera, las vigas de madera son empleadas principalmente en sistemas de entramado pesado de estructuras principales. Información acerca de su

incorporación al proceso de edificación, puede ser consultado entre otros en: NAHB Research Center (2000), WoodSolutions Design and Build (2012) y Kolb (2008).

La presente investigación propone una estrategia experimental para la caracterización mecánica de vigas de madera y su aplicación como material de ingeniería compararando resultados provenientes de una muestra común de vigas de *Pinus* spp., pero utilizando dos ensayos diferentes que aplican solicitaciones equivalentes en la dirección longitudinal de la fibra de la madera: ultrasonido y ondas de esfuerzo.

OBJETIVO

Determinar las velocidades de onda y los módulos de elasticidad de vigas de *Pinus* spp., empleando ultrasonido y ondas de esfuerzo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se probaron 70 vigas de *Pinus* spp. de Michoacán, de 0.10 x 0.15 m de sección transversal, 35 de 5 m y 35 de 6 m de largo, con un contenido de humedad (H) promedio de 20% (Figura 2). Las vigas se pesaron y se midieron sus dimensiones (Figura 3). De esta forma, se calculó su densidad. Posteriormente, se midieron las velocidades del ultrasonido (v_{us}) en la dirección longitudinal (L), y de ondas de esfuerzo (v_{oe}) en las direcciones longitudinal (L) y transversal (RT) (Figura 4).

Una vez determinados la densidad y la velocidad de onda, se procedió a calcular el módulo de elasticidad para el contenido de humedad de 20% correspondiente al momento de los ensayos empleando la fórmula (3).

Posteriomente, se realizó un segundo cálculo para ajustar el módulo de elasticidad a un contenido de humedad de referencia del 12%. Antes de calcular el módulo de elasticidad, se ajustó la densidad para un contenido de humedad del 20% al 12% con la fórmula, Unterwieser y Schickhofer (2010):

$$\rho_{12} = \frac{\rho_{\rm H}}{1 + 0.0042 * ({\rm H} - 12)} \tag{4}$$

Donde:

 ρ_{12} = Densidad de la madera con un contenido de humedad de 12% (kg/m³)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera con un contenido de humedad de H% (kg/m³)

H = Contenido de humedad de la madera de 12%



Figura 2. Vigas de Pinus spp. y medición de su contenido de humedad.





Figura 3. Medición de dimensiones y peso de las vigas.



Figura 4. Medición del tiempo de transmisión de la onda en las vigas.

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

$$v_{12} = \frac{v_{\rm H}}{1 - 0.0060 * ({\rm H} - 12)}$$
(5)

Donde:

 v_{12} = Velocidad de onda en la madera con un contenido de humedad de 12% (kg/m³) v_{H} = Velocidad de onda en la madera con un contenido de humedad de H% (kg/m³) H = Contenido de humedad de la madera de 12%

El módulo de elasticidad por ultrasonido se determinó con la fórmula (Villaseñor Aguilar, 2007):

$$E_{\rm us} = v_{\rm us}^2 \,\rho_{\rm H} \tag{6}$$

Donde:

 E_{us} = Módulo de elasticidad por ultrasonido (Pa)

 v_{us} = Velocidad del ultrasonido (m/s)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera con un contenido de humedad de H% (kg/m³)

El módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo se determinó con la fórmula (Olguín Cerón, 2011):

$$E_{oe} = v_{oe}^2 \rho_{\rm H} \tag{7}$$

Donde:

E_{oe} = Módulo de elasticidad ondas de esfuerzo (Pa)

 v_{oe} = Velocidad de las ondas de esfuerzo (m/s)

 $\rho_{\rm H}$ = Densidad de la madera con un contenido de humedad de H% (kg/m³)

RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Tabla 1 presenta la media (\bar{x}), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (CV) de las densidades, velocidades y módulos de elasticidad de las 70 vigas de *Pinus* spp., para dos contenidos de humedad: el experimental igual a 20%, y el ajustado correspondiente a 12%.

Tabla 1. Densidades, velocidades y módulos de elasticidad de vigas de Pinus spp.

14014 11 2	•		1110000100			a i num op	P.
H=20%	$\rho_{\rm H}$	v _{us} L	E _{us} L	v _{oe} L	E _{oe} L	voe RT	E _{oe} RT
	(kg/m^3)	(m/s)	(MPa)	(m/s)	(MPa)	(m/s)	(MPa)
x	647	4,326	12,089	4,516	13,181	1,289	1,084
σ	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%	ρ_{12}	v _{us} L	E _{us} L	v _{oe} L	E _{oe} L	voe RT	E _{oe} RT
	(kg/m^3)	(m/s)	(MPa)	(m/s)	(MPa)	(m/s)	(MPa)
x	626	4,544	12,905	4,744	14,071	1,354	1,158
σ	87	381	2,156	350	2240	142	285
CV	0.14	0.08	0.17	0.07	0.16	0.10	0.25

Las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera (Gobierno del Distrito Federal, 2004), especifican un módulo de elasticidad con valores promedio de 9,810 MPa y 7,848 MPa, para las clases A y B de madera estructural de coníferas. 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.

Es importante destacar, que el módulo de elasticidad determinado aquí, se refiere a una solicitación dinámica, lo cual implica una magnitud mayor en comparación a valores determinados con solicitaciones en condición estática, de acuerdo a los resultados propuestos por Bodig y Jayne (1982) y Pellerin y Ross (2002). Además, las vigas contenían peculiaridades tales como nudos, porciones de médula y no estaban recortadas en las direcciones de anisotropía de la madera. Los valores aquí presentados, ejemplifican parámetros para madera con dimensiones y con calidad comercial que se emplea 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, disminuye si se ajusta al contenido de humedad de referencia del 12%. La figura 5a esquematiza la distribución de los valores de la densidad para contenidos de humedad de 20% y 12%. Las líneas rectas que limitan la distribución de los valores experimentales, representan las tendencias de los modelos de ajuste de la ecuación (4) 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 de 20% y 12%.

En contraste, la velocidad de onda aumenta si se ajusta el contenido de humedad. La figura 5b, muestra el aumento de la velocidad del ultrasonido en la dirección longitudinal si se ajustan los valores experimentales (CH=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 ecuación (5) 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 correspondientes de 20% y 12%.

Una vez ajustados los valores de la densidad y de la velocidad de onda, se puede determinar el módulo de elasticidad en ultrasonido empleando las ecuacións (6) y (7). Estos resultados se pueden representar de manera esquemática con ayuda de la figura 6, que presenta la comparación de los valores promedio de los módulos de elasticidad E_{us} y E_{oe} , al pasar de 20% a 12% de contenido de humedad.

Esta comparación aritmética de valores promedio, sugiere una diferencia en la magnitud de los parámetros estudiados. Sin embargo, si se grafican los valores experimentales de los módulos de elasticidad correspondientes a cada viga (Figura 7), es difícil identificar esta diferencia. De tal forma, que es difícil escoger un valor experimental para emplearlo en diseño de productos o para el cálculo estructural.

Para solventar esta ambigüedad, se realizó una prueba t-*Student* de comparación de medias, con la hipótesis nula: H₀: $x_1 - x_2 = 0$, para un nivel de confianza del 95%. Igualmente, se realizó una prueba F-*Fisher*, de comparación de desviaciones estándar, con la hipótesis nula: H₀: $\sigma_1 / \sigma_2 = 0$, para un nivel de confianza del 95%. Ambas pruebas se aplicaron a los valores experimentales (CH=20%) y a los valores ajustados (CH=12%). Los resultados se presentan en la tabla 2.



Figura 5. Distribución de los valores de: a) la densidad; y b) de la velocidad de onda.

El rechazo de la hipótesis nula entre las medias, sugiere 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. En el mismo contexto, pero para la prueba de diferencia de desviaciones, el no rechazo de la hipótesis nula propone que la distribución de los valores determinados por los dos métodos empleados, ultrasonido y ondas de esfuerzo, están distribuidos proporcionalmente. Estos resultados sugieren que los dos métodos son eficientes para la determinación del módulo de elasticidad.



Figura 6. Comparación de valores promedio del módulo de elasticidad por ultrasonido, para contenidos de humedad de 20% y 12%.

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

Para el caso de las ondas de esfuerzo, la velocidad de onda y 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 a los correspondientes a la dirección transversal. Este resultado confirma la anisotropía de la madera estructural encontrada en trabajos anteriores (Sotomayor-Castellanos y col., 2009).

Parámetro	E _{us} L	E _{us} L	t-Student	F-Fisher	
	(20%)	(12%)	$H_0: x_1 - x_2 = 0$	$H_0: \sigma_1 / \sigma_2 = 0$	
x	12,089	12,905	Se rechaza	-	
σ	2,019	2,156	-	No se rechaza	
	E _{oe} L	E _{oe} L			
x	13,181	14,071	Se rechaza	-	
σ	2,099	2,240	-	No se rechaza	

Tabla 2. Pruebas t-Student y F-Fisher para módulos de elasticidad.



Figura 7. Distribución de los valores de los módulos de elasticidad con contenidos de humedad del 20% y ajustados al 12% en relación a sus densidades correspondientes: a) En ultrasonido; b) Por ondas de esfuerzo.

CONCLUSIONES

La densidad y las velocidades de transmisión de onda presentaron coeficientes de variación coherentes a la heterogeneidad material de la madera. Sin embargo, 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 parámetros calculados con el método de ondas de esfuerzo resultaron mayores a los determinados con ultrasonido. Algunas vigas tenían nudos y médula, particularidades que posiblemente influyeron en la variación de los resultados.

REFERENCIAS

American Institute of Timber Construction. 1994. Fourth edition. Timber Construction Manual. Wiley & Sons. USA.

American Society of Civil Engineers. 1975. Wood Structures: A Design Guide and Commentary. American Society of Civil Engineers. USA.

Bodig, J. 1992. Editor. Reliability-Based Design of Engineered Wood Structures. Series E: Applied Sciences, Vol. 215. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.

Bodig, J.; Jayne, B.A. 1982. Mechanics of Wood Composites. Van Nostrand Reinhold. USA.

Breyer, D.E.; Fridley, K.J.; Pollock, D.G.; Cobeen, K.E. 2003. Fifth edition. Design of Wood Structures ASD. McGraw-Hill. USA.

Bucur, V. 1995. Acoustics of wood. CRC Press. USA.

Comisión Forestal de América del Norte (COFAN). 1999. Manual de Construcción de Estructuras Ligeras de Madera. Segunda Edición. Editado por el Consejo Nacional de la Madera en la Construcción, A. C. y la Universidad Autónoma Chapingo. México.

Faherty, K.F.; Williamson, T.G. 1989. Editors. Third edition. Wood Engineering and Construction Handbook. McGraw-Hill. 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.

Hernández Maldonado, S.A. 2010. Comportamiento elástico de la madera. Teoría y aplicaciones. Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Hoyle, R.J. Jr. 1978. Wood technology in the Design of Structures. Fourth edition. Mountain Press Publishing. USA.

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.

Kolb, J. 2008. Systems in Timber Engineering. Edited by: Lignunn - Holzwirtschaft Schweiz, Zurich and DGfH - German Society of Wood Research, Munich. Birkhauser. Germany.

Morlier, P. 1994. Editor. Creep in Timber Structures. Report of RILEM Technical Committee 112-TSC. Chapman & Hall. England.

National Association of Home Builders Research Center. 2000. Residential Structural Design Guide. NAHB Research Center, Inc. USA.

Olguín Cerón, J.B. 2011. Plastificado higro-térmico de la madera de *Quercus scytophylla*. Estudio por ondas de esfuerzo. Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

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. 1965. A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. *Forest Products Journal*. 15(3):93-101.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA.

Ricalde Camacho, M.O.; Bárcenas-Pazos, G.M. 1989. Manual para diseño de estructuras de madera. 1.3. Propiedades físicas de la madera. LACITEMA, Xalapa, Ver. México.

Ricalde Camacho, M.O.; Bárcenas-Pazos, G.M. 1990. Manual para diseño de estructuras de madera. 1.4. Propiedades mecánicas de la madera. LACITEMA, Xalapa, Ver. México.

Robles Fernández-Villegas, F.; Echenique-Manrique, R. 1983. Estructuras de Madera. Editorial Limusa. México.

Sandoz, J.L. 2000. 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. 2002. 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.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Bernabé Santiago, R.; Hernández Maldonado, S.A.; Sarmiento Bustos, D.; Fernández García, G.; Alfaro Trujillo, I. 2009. Caracterización no destructiva de vigas de madera de *Pinus* spp., utilizando ultrasonido y ondas de esfuerzo. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 5(1): 3-22. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Linsenmann, P. 2006. Evaluación mecánica por métodos no destructivos de vigas de madera de *Picea abies. Investigación e Ingeniería de la Madera*. 2(2): 3-24. México.

Unterwieser, 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.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

WoodSolutions Design and Build Series. 2012. Forest and Wood Products Australia Limited. Australia.

Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos

Javier Ramón Sotomayor Castellanos

Ingeniero en Tecnología de la Madera Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Morelia, Michoacán, México. 2014.