

Caracterización mecánica por ondas de esfuerzo de madera plastificada de *Quercus scytophylla*

Mechanical characterization by stress waves of *Quercus scytophylla* plasticized wood

Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*}, Joel Benancio Olguín Cerón¹

Sotomayor Castellanos, J. R., Olguín Cerón, J. B., Caracterización mecánica por ondas de esfuerzo de madera plastificada de *Quercus scytophylla*. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Número 61: 33-40, enero-abril 2014.

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 higosaturada de la madera. De manera no destructiva se confirmó empíricamente que el tratamiento higratérmico en combinación con el deformado plástico no modifica la capacidad de la madera para transmitir ondas de esfuerzo.

ABSTRACT

Stress wave speed and modulus of elasticity were calculated for *Quercus scytophylla* wood. The specimens were plasticized with heat transmitted by low temperature and pressure steamed for higróthermal state of wood. Using non destructive testing it was shown that higró-thermal treatment, combined with plastic molding, do not modify the wood capacity to transmit stress waves.

Palabras clave: densidad, contenido de humedad, calor, vapor, velocidad de onda de esfuerzo, módulo de elasticidad, madera de *Quercus scytophylla*.

Keywords: density, moisture content, heat, steam, stress wave speed, modulus of elasticity, *Quercus scytophylla* wood.

Recibido: 16 de enero de 2013, aceptado: 27 de agosto de 2013

¹ Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

* Autor para correspondencia: madera999@yahoo.com

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, Martínez Cruz, Salcedo Cabrales y Bello González (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 microanatómicas 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, Guridi Gómez y García Moreno (2010), determinaron 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.

La madera es un material termoelástico: cuando la temperatura interna de la madera aumenta, su módulo de elasticidad disminuye. Esta manifestación tiene un carácter instantáneo y temporal. Es decir, si la madera recobra su temperatura inicial, el módulo de elasticidad recobra su valor anterior. Este hecho se observa preferentemente en un rango de temperaturas de 0 a 120°C (Kollmann y Côté, 1968).

La madera es también un material higróelástico: si el contenido de humedad de la madera se incrementa, el módulo de elasticidad decrece. Este fenómeno es igualmente de efecto momentáneo

y temporal. Es decir, cuando la madera recupera su contenido de humedad inicial, el valor del módulo de elasticidad se recupera. Este síntoma se verifica principalmente en el dominio higroscópico de la madera, que va de su estado anhidro al 32% en su contenido de humedad (Kollmann y Côté, 1968).

El efecto combinado en la madera de los parámetros temperatura y contenido de humedad se relaciona de tal forma, que el incremento de la temperatura puede ocasionar una disminución en el contenido de humedad, pero no viceversa.

Por otra parte, la madera es un material plástico: si la madera es deformada más allá del dominio elástico, se observa en ella una condición de deformación geométrica permanente; es decir, un estado plástico. Estas tres propiedades de la madera pueden ser incorporadas en un mismo procedimiento: el plastificado mecánico, en presencia de un ingrediente hídrico, combinado con uno térmico. En esta investigación, a este proceso se le denomina plastificado higrotérmico 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 semiindustrial. El curvado de madera laminada ha sido estudiado entre otros por Hernández Santiago, Dávalos Sotelo y Salomón Quintana (2008); detalles sobre la técnica de curvado por cortes de sierra pueden ser consultados 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 Rowell, Lange, McSweeney y Davis (2002) y Weigl, Müller, Wimmer y Hansmann (2011); 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 con el método de curvado por calentamiento interno, Norimoto y Gril (1989) y Makinaga, Norimoto e Inoue (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), Hwang et al. (2002) y Rowell 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

García et al. (2012) evaluaron el efecto del tratamiento térmico sobre la madera de *Eucalyptus grandis*, con temperaturas que van de 180°C a 230°C y por periodos 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, Titta y Lappalainen (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 una temperatura de 70°C. Sus resultados indican una velocidad del ultrasonido en la dirección longitudinal de la madera en un intervalo de 5,420 m/s a 5,520 m/s. Mohebbi, Kamran y Roohinia (2007) estudiaron el efecto del tratamiento térmico en madera de *Morus alba*. Sus temperaturas observadas fueron 100°C, 120°C y 140°C, por periodos 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, Beikircher y Fisher (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°C a 100°C. Los autores observaron que a medida que la temperatura aumenta, el módulo de elasticidad disminuye, con una tasa de -2% por °C.

Tratamientos térmicos

Oltean, Teischinger y Hansmann (2011) 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°C a 80°C. Asimismo, 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 tanto, y de acuerdo con Green, Winandy y Krestschmann (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.

Estévez 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, Estévez 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, Teischinger y Hansmann (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 periodos 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.

A partir de los argumentos anteriores, la investigación propone la siguiente hipótesis: El tratamiento higrotérmico y el deformado plástico no modifican su capacidad para transmitir ondas de esfuerzo.

El objetivo de la investigación es determinar el módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo en probetas con y sin tratamiento higrotérmico 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 dos 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 cuatro grupos de listones para las pruebas preliminares, de referencia, de suavizado y deformado.

Una vez suavizados los listones 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.

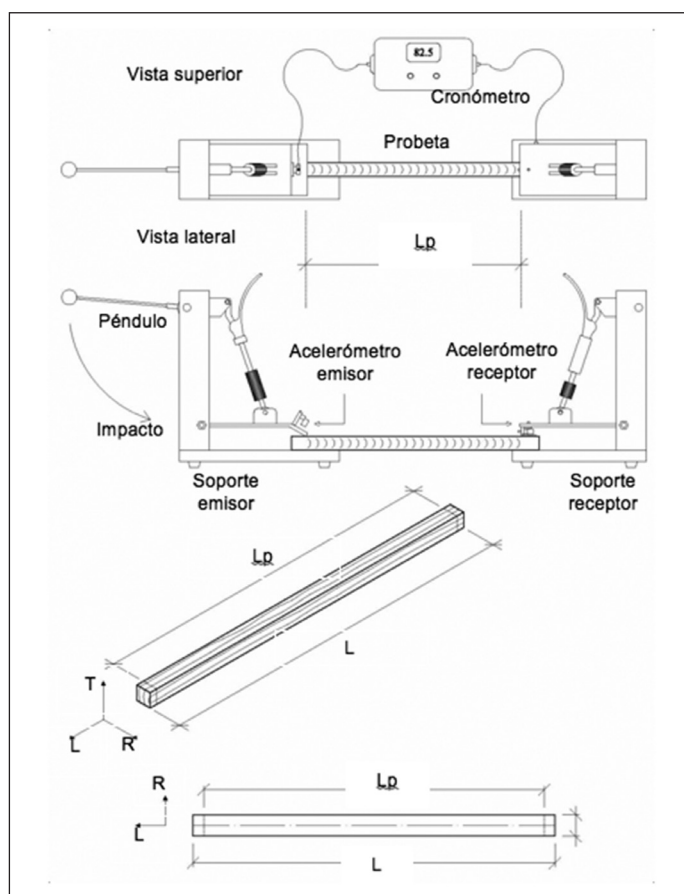


Figura 1. Dispositivo para pruebas de ondas de esfuerzo en las probetas rectas.

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:

$$Voe = \frac{L_{cen}}{t} \quad (1)$$

donde L_{cen} es la longitud al centro geométrico en la dirección de las probetas curvas, calculado con la fórmula (Perré, 2007):

$$L_{cen} = 2 \theta R_{cen} \quad (2)$$

donde θ es el ángulo formado por el centro de curvatura y los extremos de la probeta, y/o el segmento sometido a ondas de esfuerzo y R_{cen} es el radio al arco central de la probeta.

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):

$$Eoe = \rho_H Voe^2 \quad (3)$$

donde ρ_H es la densidad de la madera con un contenido de humedad H .

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 higrotérmico 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.

DISCUSIÓN

Si bien 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 higrotérmico 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 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 de 1,770 m/s a 2,260 m/s reportado por Pellerin y Ross en 2002 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. scotyphylla* (700 kg/m³).

Es conveniente señalar que una variación en el contenido de humedad de la madera modificará



Figura 2. Fotografía de probetas curvas y rectas.

la velocidad de transmisión de las ondas de esfuerzo. Para el dominio higroscópico, la velocidad aumentará proporcionalmente al contenido de humedad.

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 las probetas 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 tres 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 higrotérmico, 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 resultado en las tasas de

Tabla 1. Resultados de las pruebas de ondas de esfuerzo

	ρ_H (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	1007
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	912
C.V.	2.51	8.09	3.09	7.92
Probetas suavizadas, deformadas y plastificadas (PSDP)				
Med. Arit.	747	10.83	3638	11358
Desv. Est.	23.15	0.3274	72	477
C.V.	3.10	3.02	02.00	4.20

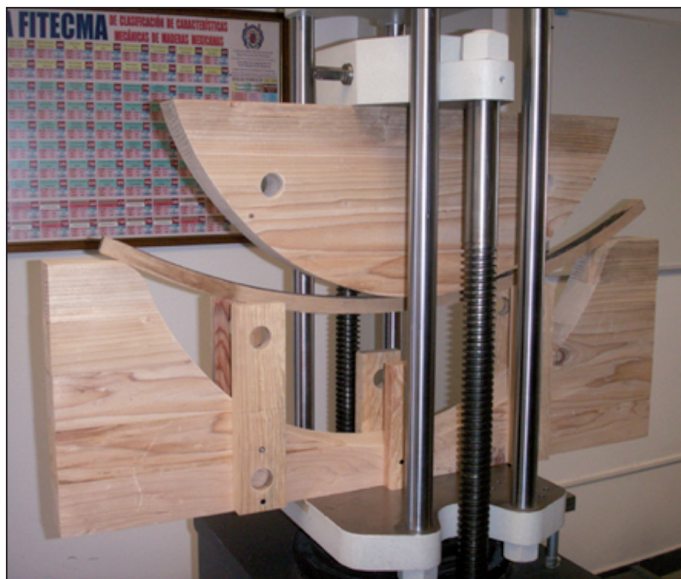


Figura 3. Dispositivo para deformación de flexión curva.
Imagen tomada por los autores.

deformación en compresión (ϵ_c : 2.93%) y en tensión (ϵ_t : 1.28%). Una vez la madera en el dominio higrotermo 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. Así, 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 higrotérmico 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 higrocontracción en el dominio higroelástico 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 higrocontracción 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 límite elástico en tensión, en la dirección longitudinal de la madera de *Q. scytophylla*. Por ello 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 (E_{oe}), 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., Teischinger (1992) y Thiam, Milota y Leichti (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°C 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 con la estabilidad de estos parámetros.

CONCLUSIONES

De manera no destructiva se confirmó empíricamente que el tratamiento higrotérmico 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 higrotérmico y de plastificación realizado con listones y probetas preparados específicamente para esta investigación, con madera de *Q. scytophylla* del estado de Michoacán.

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.

LITERATURA CITADA

- ARIZAGA, S., MARTÍNEZ CRUZ, J., SALCEDO CABRALES, M., y BELLO GONZÁLEZ, M. A. *Manual de la biodiversidad de encinos michoacanos*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología, 2009.
- BELLO GONZÁLEZ, M. A. y LABAT, J. N. *Los encinos (Quercus) del estado de Michoacán, México*. Collection Etudes Mesoaméricaines. México: Centre d'Etudes Mexicaines et Centraméricaines-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, 1987.
- CORNEJO TRONCOSO, J. y 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.
- ESTÉVEZ, B. M. y PEREIRA, H. M. Wood Modification by Heat Treatment: A Review. *Bioresources*, 4(1):370-404, 2009.
- GARCÍA, R. A., MONTEIRO DE CARVALHO, A., DE FIGUEIREDO LATORRACA, J. V., MONTEIRO DE MATOS, J. L., SANTOS, W. A. y FONSECA DE MADEIROS SILVA, R. Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. *Wood Science and Technology*, 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. y KRESTSCHMANN, D. E. Chapter 4. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. In: Forest Products Laboratory. *Wood Handbook: Wood As An Engineering Material*, Revised. FPL-GTR-113. USA: U. S. Department of Agriculture-Forest Service-Forest Products Laboratory, 1999.
- HERNÁNDEZ MALDONADO, S. A. *Comportamiento elástico de la madera. Teoría y aplicaciones*. Tesis de Maestría. México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 2010.
- HERNÁNDEZ SANTIAGO, A., DÁVALOS SOTELO, R., y 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., y NORIMOTO, M. Bending Quality of Main Korean Wood Species. *Wood Research*, 89: 6-10, 2002.
- KOLLMANN, F. F. P. y CÔTÉ, W. A. Volume I: Solid Wood. *Principles of Wood Science and Technology*. Germany: Springer-Verlag, 1968.
- KUTNAR, A. y ŠERNEK, M. Densification of Wood. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 82: 53-62, 2007.
- MAKINAGA, M., NORIMOTO, M. e INOUE, M. Permanent Fixation of Bending Deformation in Wood by Steam Treatment. *Wood Research*, 84: 39-41, 1997.
- MIETTINEN, P., TITTA, M. y LAPPALAINEN, R. Electrical and Ultrasonic Analysis of Heat-Treated Wood. In: *Proceedings of The 14th Symposium on NDT of Wood*. University of Everswalde, Germany, 265-274, 2005.
- MOHEBBY, B., KAMRAN, Y. 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. y BROWN, T. D. Steam Bending Red Alder. In: Western Hardwoods. *Value-Added Research and Demonstration Program. General Technical Report FPL-GTR-85*. USA: U.S. Department of Agriculture-Forest Service-Forest Products Laboratory, 1995.
- NORIMOTO, M. y GRIL, J. Wood Bending Using Microwave Heating. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 24(4): 203-212, 1989.
- OLGUÍN CERÓN, J. B. y SOTOMAYOR CASTELLANOS, J. R. Plástico higró-termico de madera de *Quercus scytophylla*. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 59: 25-33, 2013.
- OLTEAN, L., TEISCHINGER, A. y HANSMANN, C. Influence of Temperature on Cracking and Mechanical Properties of Wood During Wood Drying-A Review. *BioResources*, 2(4): 789-811, 2007.
- PECK, E. C. *Bending Solid Wood to Form*. Agriculture Handbook No. 125. USA: U.S. Department of Agriculture-Forest Service, 1957.
- PELLERIN, R. F. y ROSS, R. J. *Nondestructive Evaluation of Wood*. USA: Forest Products Society, 2002.
- PÉREZ OLVERA, C. P. y 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. *Holzforchung*, 61: 419-429, 2007.
- ROWELL, R. LANGE, S., MCSWEENEY, J., y 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., y 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. y DANIEL, G. Industrial kiln drying and its effect on microstructure, impregnation and properties of Scots pine timber impregnated for above ground use. *Holzforchung*, 56: 434-439, 2002.
- THIAM, M., MILOTA, M. R., y 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., y 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. y 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.

De páginas electrónicas

- KATSURAGI, K. *Furniture Maker Tai-Workshop*. De: <http://www.tai-workshop.com/english/index-e.html>. Japan, jun. 2012.
- OLTEAN, L., TEISCHINGER, A. y 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. DOI 10.1007/s00107-010-0467-1.