

Ensayos

Módulo dinámico por vibraciones transversales de madera densificada de *Gyrocarpus americanus*

Recibido: 15-09-2016 Aceptado: 28-04-2017 (Artículo Arbitrado)

Resumen

El densificado artificial de la madera incrementa sus propiedades tecnológicas. Como consecuencia, especies poco apreciadas pueden ser empleadas en productos con valor agregado. Los objetivos de la investigación fueron densificar madera de *Gyrocarpus americanus* con un tratamiento higr-termo-mecánico y evaluar su módulo dinámico antes y después del densificado. Se determinó la densidad de la madera y se realizaron pruebas de vibraciones transversales antes y después del densificado. Se calcularon los módulos dinámicos y el coeficiente de densificado. Para las variables de respuesta, se realizaron pruebas de normalidad, de diferencias de medias y análisis de regresiones. El tratamiento higr-termo-mecánico fue eficiente para densificar madera de *G. americanus*. Los valores de la densidad de la madera y del módulo dinámico aumentaron después de densificar la madera de *G. americanus* y sus magnitudes fueron comparables con los reportados en la bibliografía. Los coeficientes de determinación de regresiones lineales explicaron satisfactoriamente la variación ocasionada por el tratamiento de densificado en la densidad de la madera, la frecuencia y el módulo dinámico.

Abstract

The artificial densification of wood increases its technological properties. Consequently, low value species can be used in value-added products. The objective of this study was to densify *Gyrocarpus americanus* wood with a hygro-thermo-mechanical treatment to evaluate its dynamic modulus before and after densification. The density of the wood was determined, and transverse vibration tests were performed before and after densification. The Dynamic modulus and densification coefficient were calculated. For the response variables, normality tests, mean differences and regression analyses were carried out. The hygro-thermo-mechanical treatment was successful in densifying *Gyrocarpus americanus* wood. The values of wood density and dynamic modulus increased after densification of *Gyrocarpus americanus* wood and their magnitudes were comparable to those reported in the literature. The coefficients of determination from linear regressions satisfactorily explained the variation caused by the treatment of densified wood density, frequency and dynamic modulus.

Résumé

La densification artificielle du bois augmente ses propriétés technologiques. En conséquence, ceci permet d'ajouter de la valeur à des espèces peu appréciées. Les objectifs de cette recherche ont été de densifier le bois de *Gyrocarpus americanus* à l'aide d'un traitement hydro-thermo-mécanique et d'évaluer son module dynamique avant et après la densification. On a déterminé la densité du bois et on a réalisé des tests de vibrations transversales avant et après densification. On a calculé les modules dynamiques et le coefficient de densification. Pour les variables de réponse, on a réalisé des tests de normalité, de différences de moyennes et des analyses de régression. Le traitement hydro-thermo-mécanique a été suffisant pour densifier le bois de *G. americanus* et ses magnitudes ont été comparées avec celles rapportées dans la bibliographie. Les coefficients de détermination de régressions linéaires ont expliqué de manière satisfaisante la variation occasionnée par le traitement de densification sur la densité du bois, la fréquence et le module dynamique.

J.R. Sotomayor Castellanos
madera999@yahoo.com

Universidad Michoacana de San Nicolás de
Hidalgo

Palabras clave: coeficiente de densificado, densidad de la madera, frecuencia, higr-termo-mecánico. **Keywords:** coefficient of densification, wood density, frequency, hygro-thermo-mechanics. **Mots clés :** coefficient de densification, densité du bois, fréquence, hydro-thermo-mécan

Introducción

El densificado artificial de la madera incrementa sus propiedades mecánicas, higroscópicas y de resistencia al deterioro (Li, Gong, Yuan, Li, 2013). De tal forma, que mediante este tratamiento, especies con baja densidad y con características tecnológicas poco apreciadas, pueden ser empleadas en productos con valor agregado y tecnológicamente

aceptables (Macias, Knowles, Kamke, Kutnar, 2011). Por ejemplo, en madera de ingeniería y madera laminada (Kamke, 2006) y en madera reconstituida y tableros a base de madera (Sandberg, Haller, Navi, 2013).

Esta mejora tecnológica en la madera se logra por tratamientos químicos, por compresión mecánica o por la combinación de ambos (Khalil, Dungani, Mohammed, Hossain, Aprilia, Budiarmo, Rosamah, 2014). Cuando se emplea temperatura, en un medio húmedo y se aplica una carga de compresión a la madera, se dice que el tratamiento de densificado es de carácter higro-termo-mecánico (Sandberg y Navi, 2007). La eficiencia del proceso depende principalmente de la temperatura utilizada, de la fuerza y de la intensidad de las deformaciones aplicadas, del tiempo del tratamiento, así como del contenido de humedad de la madera y de la especie en cuestión (Kutnar y Šernek, 2007).

La madera densificada de manera higro-termo-mecánica, tiende a recuperar sus dimensiones originales si es expuesta a la humedad y al calor (Kutnar y Kamke, 2012). Este fenómeno es resultado principalmente de la liberación de esfuerzos incorporados durante el proceso de deshumidificado y deformado (Navi y Heger, 2005). Como paliativo para este problema, la modificación química y la impregnación de la madera han demostrado ser eficientes para mantener de manera permanente la deformación lograda con los diferentes procesos de densificación (Hill, 2006).

Existen diversas técnicas para el densificado higro-termo-mecánico de la madera, en las cuales varían el tiempo, la temperatura y las condiciones de humidificado de la madera (Morsing, 2000; Sandberg y Navi, 2007; Sandberg *et al.* 2013). Para su evaluación, el principal indicador del densificado es el coeficiente de compresión (Blomberg, Persson, Blomberg, 2005) y de densificado (Sandberg y Navi, 2007).

A partir de la medición de la frecuencia de resonancia en el primer modo de vibración de probetas de madera, las vibraciones transversales permiten determinar de manera no destructiva el módulo dinámico en madera sin densificar (Haller y Wehsener, 2004; Gabrielli y Kamke, 2010; da Silva Gherardi, Moreira, Rabelo, 2012) y en madera densificada (Hayashi y Nishimura, 2001;

Kubojima, Ohtani, Yoshihara, 2004a; Kubojima, Ohtani, Yoshihara, 2004b). Sin embargo, debido a las diferentes condiciones de ensayo entre las investigaciones, es difícil comparar los resultados (Yoshihara y Tsunematsu, 2007).

Existe poca información tecnológica de la madera de *Gyrocarpus americanus* Jacq. y se le estigma como una especie con pocas perspectivas de empleo a nivel industrial (Cordero y Boshier, 2003). El Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas (Sotomayor, 2015), reporta una densidad de 391 a 410 kg/m³, para madera con un contenido de humedad de 12 % y un módulo dinámico determinado por ultrasonido entre 5596 y 7884 MPa. No se encontraron trabajos publicados que estudien el efecto del densificado higro-termo-mecánico, sobre el módulo dinámico por vibraciones transversales de la madera de *G. americanus*.

Los objetivos de la investigación fueron densificar madera de *G. americanus* con un tratamiento higro-termo-mecánico y evaluar su densidad y su módulo dinámico antes y después del densificado.

Materiales y métodos

Se recolectaron piezas aserradas de madera de *G. americanus* en el estado de Michoacán, México y se prepararon 35 probetas con sección de 0.02 m × 0.02 m de sección transversal y de 0.32 m de longitud (ISO 3129:2012). Las probetas estuvieron orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respecto al plano leñoso. La madera estuvo libre de irregularidades de crecimiento y se acondicionó durante 24 meses en una cámara con una temperatura de 20 °C (± 1 °C) y una humedad relativa del aire de 65 % (± 2 %) hasta que alcanzó un peso constante.

La estrategia de investigación consistió en determinar la densidad de la madera y realizar pruebas de vibraciones transversales antes y después del tratamiento de densificado. El coeficiente de densificado fue evaluado después del tratamiento.

El tratamiento de densificado consistió en hidratar la madera en un baño de agua, durante 72 horas y con una temperatura de 20 °C. Posteriormente, las probetas se suavizaron durante 4 horas en un baño de agua caliente con una temperatura de 93.53 °C. Inmediatamente después, se procedió al prensado de

las probetas empleando un dispositivo de densificado fabricado ad-hoc (Figura 1) el cual se posicionó en una máquina universal de pruebas mecánicas marca Tinius-Olsen®. La velocidad de desplazamiento de la carga fue de 1 mm/min. El tiempo de cerrado del dispositivo de densificado fue de 15 min. Durante las pruebas, se registró el diagrama carga-desplazamiento y la prueba terminó cuando se alcanzó la tasa de compresión objetivo de 56 %.

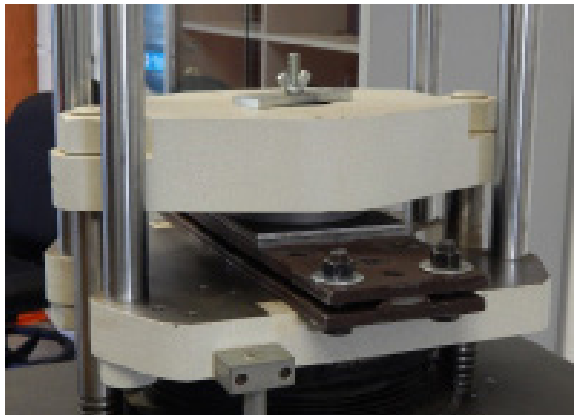


Figura 1. Dispositivo de densificado en la máquina universal.

El dispositivo de densificado consistió en dos placas de acero dulce con orificios para colocar pernos, los cuales sirvieron para mantener la deformación de las probetas en las etapas de moldeado y secado. En la placa inferior se colocaron barras circundantes de 0.006 m de espesor \times 0.013 m de base. Las barras funcionaron como soporte y control de la deformación cuando ésta alcanzó la tasa de compresión objetivo. Las barras ayudaron a sostener constante la deformación de las probetas y a conservar su temperatura durante las etapas de comprimido, moldeado y estabilizado.

A continuación, las probetas se moldearon durante 24 horas manteniéndolas prensadas con el dispositivo de densificado al interior de un horno de aire seco con una temperatura de 80 °C. Finalmente, las probetas se secaron durante 60 días en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C (\pm 1 °C) y con una humedad relativa del aire

$$\lambda = \left(\frac{\rho_{ad} - \rho_{dd}}{\rho_{ad}} \right) \times 100 \quad (1)$$

El coeficiente de densificado se calculó con la fórmula (1) (Blomberg et al. 2005):

Donde:

λ = Coeficiente de densificado (%)

ρ_{ad} = Densidad de la probeta antes del densificado (m)

ρ_{dd} = Densidad de la probeta después del densificado (m)

La densidad de la madera y el contenido de humedad se determinaron antes y después del densificado con un grupo complementario de 35 probetas con dimensiones de 0.02 \times 0.02 \times 0.06 m. El contenido de humedad se calculó por la diferencia de pesos de la probeta a un contenido de humedad CH y el de la probeta en estado anhidro de acuerdo con la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization, 2014b). La densidad se calculó con la relación entre el peso y el volumen de la probeta c adaptando la norma ISO 13061-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014a).

Antes y después del densificado, se realizaron dos rondas de pruebas dinámicas. Las pruebas de vibraciones transversales consistieron en medir la frecuencia natural de la vibración perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta. Con tal propósito, se utilizó el aparato Grindosonic®. La Figura 2 presenta la configuración de las pruebas no destructivas de vibraciones transversales.

El impulso elástico inicial fue aplicado en el centro

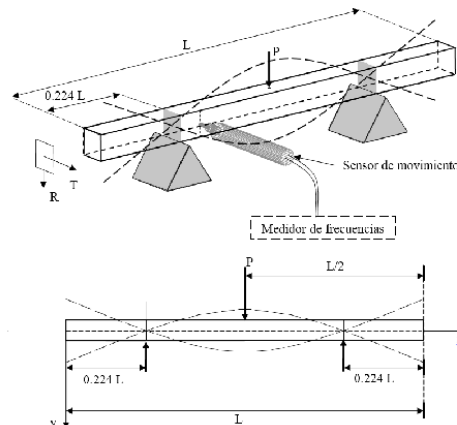


Figura 2. Configuración de las pruebas de vibraciones transversales. P = Impacto; L(x) = Longitud de la probetas; R (y) = Dirección radial; T (z) = Dirección tangencial.

geométrico de la cara superior de la probeta, en la dirección tangencial a la misma, apoyada sobre dos soportes rígidos de tipo simple a una distancia nodal de 0.224 respecto al extremo de la probeta. De esta forma, el movimiento inducido fue en vibraciones libres. El ensayo dinámico en cada probeta fue repetido tres veces y el promedio de valores fue considerado para su análisis

posterior. Durante la prueba, se calculó el momento de inercia de la sección transversal de la probeta

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

correspondiente al ensayo.

El módulo dinámico por vibraciones transversales se calculó con la fórmula (2) (Machek, Militz, Sierra-Alvarez, 2001):

Donde:

E_{vt} = Módulo dinámico (Pa)

L = Longitud de la probeta (m)

l_{vt} = Distancia entre apoyos (m)

f_{vt} = Frecuencia natural de la probeta (Hz)

ρ_{CH} = Densidad de la madera a un contenido de humedad $r = \sqrt{I/A}$ g/m^3)

m, K = Constantes adimensionales (12,65; 49,48)

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

Con:

I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m^4)

A = Área de la sección transversal de la probeta (m^2)

Para la determinación del módulo dinámico antes y después del tratamiento, empleando la ecuación (2), se utilizaron las densidades, las frecuencias y los radios de giro correspondientes para antes y después del densificado.

Diseño experimental

Se diseñaron dos experimentos de acuerdo con Gutiérrez y de la Vara (2012). Las variables de respuesta fueron el contenido de humedad de la madera, la densidad de la madera y la frecuencia de las probetas. El módulo dinámico se consideró como una variable derivada de la fórmula (2). Se calculó su media, desviación estándar y coeficiente de variación. En el tratamiento de densificado se consideró el factor de variación.

El primer experimento consistió en pruebas t de Student de diferencias de medias para muestras independientes para un nivel de confianza de 95 %. La hipótesis nula se contrastó con la hipótesis alternativa. Los subíndices 1 y 2 representan el valor de las

variables de respuesta antes y después del densificado. Se efectuaron pruebas con 35 réplicas (probetas por especie), totalizando 70 muestras observadas para cada una de las variables de respuesta.

El segundo experimento consistió en un análisis de regresión entre las variables de respuesta densidades de la madera, frecuencias y módulos dinámicos para los resultados después del densificado y su dependencia respecto a las variables independientes antes del densificado.

Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa Statgraphics®.

Resultados y discusión

Antes del densificado el contenido de humedad de la madera fue de 12.19 %. Después del densificado, el contenido de humedad fue de 11.89 %. Este efecto se consiguió después de acondicionar las probetas densificadas en la cámara de acondicionamiento durante 60 días hasta que la madera alcanzó el contenido de humedad en equilibrio. La combinación de estos resultados permitió considerar que el contenido de humedad de la madera no varió significativamente antes y después del densificado y por lo tanto, no influyó en el tratamiento.

La Tabla 1 presenta la densidad, la frecuencia y el módulo dinámico de la madera de *G. americanus* antes y después del densificado.

Después del densificado la densidad de *G. americanus* aumentó 101.5 %. Estadísticamente la prueba de t de student confirmó una diferencia igualmente significativa ($P < 0.001$, $\alpha = 0.05$).

Por su parte, la frecuencia disminuyó 54% resultado acompañado además por la prueba de diferencia de medias que permitió rechazar la hipótesis nula en favor de la alterna ($P < 0.001$, $\alpha = 0.05$). Esta diferenciación entre las frecuencias de las probetas antes y después del densificado es el resultado del tratamiento al incrementar la masa de las probetas en relación a su volumen.

Para el módulo dinámico, la prueba de diferencia de medias permitió rechazar la hipótesis nula en favor de la alterna ($P < 0.001$, $\alpha = 0.05$). El aumento de la densidad y la disminución de la frecuencia, ambos combinados con la disminución de las propiedades de la sección transversal de la probeta, resultaron en un aumento del módulo dinámico de 122%.

Tabla 1. Densidad, frecuencia y módulo dinámico de *G. americanus* antes y después del densificado.

	ρ_{CH}	f_{vt}	E_{vt}	λ
	(kg/m ³)	(Hz)	(MPa)	(%)
Antes del densificado				
\bar{x}	397	790	6274	-
σ	28	49	990	-
CV	7.0	6.2	15.8	-
Después del densificado				
\bar{x}	800	363	13929	50.3
σ	73	19	2235	1.94
CV	9.1	5.1	16.0	3.85
ρ_{CH} = Densidad; f_{vt} = Frecuencia; E_{vt} = Módulo dinámico; λ = Coeficiente de densificado; \bar{x} = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porciento.				

Sin embargo, el coeficiente de variación aumentó solo 1.3 %. De aquí, que el densificado mantuvo uniforme la distribución de los valores del módulo dinámico.

La magnitud del incremento en la densidad y en el módulo dinámico de *G. americanus* es comparable con los resultados reportados en la bibliografía. Kubojima *et al.* (2004a) reportaron para madera densificada de *Cryptomeria japónica* con densidad de 380 kg/m³ y con un coeficiente de compresión de $\lambda = 33$ %, un incremento en el módulo dinámico determinado por vibraciones de 16 %. Kutnar, Kamke y Šernek (2008) reportaron para madera densificada ($\lambda = 63$ %) de *Populus deltoides* \times *Populus trichocarpa* un incremento en el módulo de elasticidad en flexión estática de 37 %. Skyba, Schwarze y Niemz (2009) reportaron para madera densificada de *Picea abies* ($\lambda = 72$ %) y *Fagus sylvatica* ($\lambda = 45$ %) incrementos en el módulo de elasticidad en compresión de 127.8 % y 19.4 % respectivamente.

Por su parte, Ulker, Imirzi y Burdurlu (2012) encontraron para madera densificada de *Pinus sylvestris* ($\lambda = 84$ %) incremento en el módulo de elasticidad en flexión estática de 11.4 %. Gao, Huang, Lu, Chen, Guo y Zhan (2016) para madera densificada de *Populus tomentosa* (490 kg/m³ < ρ_{CH} < 588 kg/m³) con un coeficiente de densificado de 47 %, obtuvieron un incremento en el módulo de elasticidad en flexión estática de 73.2 %. No obstante la similitud entre los resultados de esta investigación y los reportados por los autores referidos, es difícil su comparación. En los casos citados, las variables de densificado

y los métodos de evaluación de las propiedades mecánicas fueron diferentes entre especies y autores. Para comparar resultados de manera correcta, es necesario considerar las condiciones particulares de cada investigación.

El coeficiente de densificado de *G. americanus* (Tabla 1) fue mayor 0.06 % al reportado por Buchelt, Dietrich y Wagenführ (2014) de 50 % para madera densificada de *Fagus sylvatica* con densidad de 600 kg/m³ y al reportado por Fang, Mariotti, Cloutier, Koubaa y Blanchet (2012) (40 % < λ < 60 %) para híbridos del género *Populus* con densidades entre 348 y 388 kg/m³. Este intervalo de valores del coeficiente de compresión utilizado por los autores citados, ha permitido estudiar la influencia del densificado de la madera en su módulo dinámico (Hill, 2006). Con todo, Yoshihara y Tsunematsu (2007) advierten que el coeficiente de densificado es uno de los principales parámetros que influyen en el aumento del módulo dinámico de la madera densificada. De aquí se infiere que son necesarios estudios particulares para identificar el coeficiente de compresión apropiado para cada especie y tratamiento en específico con el fin de incrementar el módulo de elasticidad de la madera. En el mismo orden de ideas, la magnitud del coeficiente de densificado administrado a la madera de *G. americanus* permitió evaluar el incremento en la densidad y en el módulo dinámico por vibraciones transversales sin deteriorar aparentemente su estructura.

Por otra parte, Blomberg y Persson (2004),

Kutnar y Kamke (2013) y Sheikh, Morén, Hagman, Cloutier, Fang y Elustondo (2013) reportaron las modificaciones en la estructura anatómica de la madera ocasionadas por el tratamiento de densificado y su posterior influencia en las propiedades físicas. Las principales características anatómicas que influyen en la densidad y en el módulo de elasticidad de la madera densificada son la homogeneidad y la anisotropía del plano leñoso.

Las regresiones entre las variables de respuesta (después del densificado) en función de las variables independientes (antes del densificado) resultaron con coeficientes de determinación significativos (Figura 3). Sus magnitudes ($0.74 < R^2 < 0.85$) fueron representativas de los reportados para maderas mexicanas (Sotomayor, 2016). En efecto, los coeficientes de determinación del modelo lineal explicaron con una calidad de ajuste satisfactorio entre 74 y 85 % de la variación ocasionada por el tratamiento de densificado.

Conclusiones

El tratamiento de densificado higro-termo-mecánico fue eficiente para densificar madera de *G. americanus*. Una tasa de compresión de 56 % fue suficiente para densificar madera de *G. americanus* sin destruir su estructura ni modificar significativamente su densidad y módulo de elasticidad.

El tratamiento de densificado disminuyó 2.5 % el contenido de humedad de la madera, aumentó su densidad 101.5 % y el módulo dinámico se incrementó 122 %. Además, comparativamente con los valores del módulo dinámico de antes del densificado, el densificado de la madera aumentó la variabilidad del módulo dinámico 1.3 %.

Es pertinente hacer notar que los resultados de la investigación son particulares a la madera de *G. americanus* densificada con el tratamiento higro-termo-mecánico utilizado en esta investigación. Para mejorar el tratamiento de densificado es necesario practicar estudios sobre los cambios en la anatomía de la madera e identificar en qué medida se modifican su estructura y sus propiedades físicas.

Agradecimientos

A los alumnos de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San

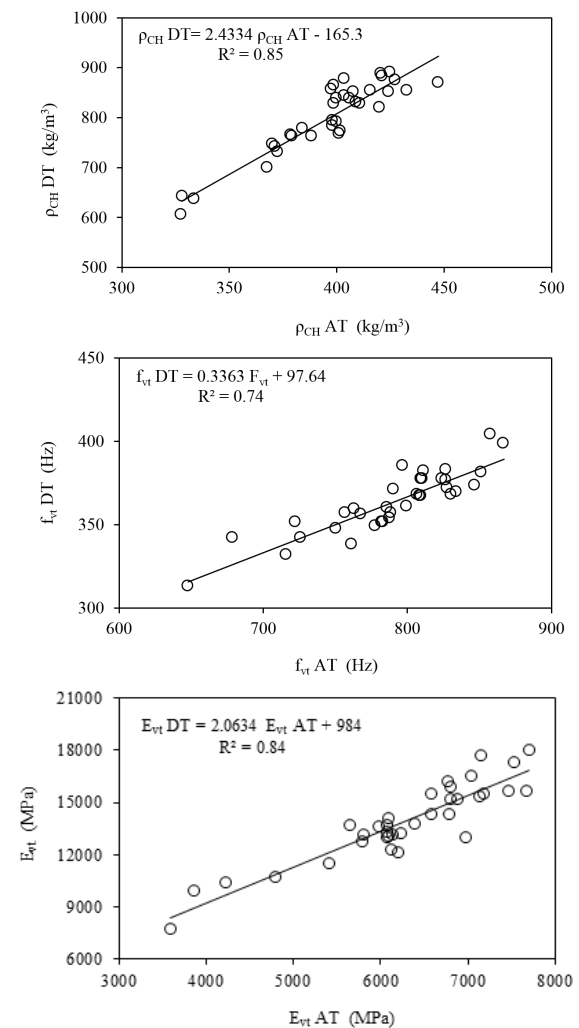


Figura 3. Regresiones de la densidad, de la frecuencia y del módulo dinámico entre antes y después del densificado.

Nicolás de Hidalgo (UMSNH), por su participación en los trabajos de laboratorio. Al Profesor Juan Zárate Medina de la UMSNH, por facilitar el equipo para las pruebas de vibraciones. La investigación estuvo patrocinada por la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera y por la Coordinación de la Investigación Científica, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Bibliografía

- Blomberg, J., and B. Persson. (2004). Plastic deformation in small clear pieces of Scots pine (*Pinus sylvestris*) during densification with the CaLignum process. *Journal of Wood Science*. 50(4):307-314.
- Blomberg, J., B. Persson., and A. Blomberg. (2005). Effects of semi-isostatic densification of

- wood on the variation in strength properties with density. *Wood Science and Technology*. 39(5):339-350.
- Buchelt, B., Dietrich, T., and A. Wagenführ. (2014). Testing of set recovery of unmodified and furfurylated densified wood by means of water storage and alternating climate tests. *Holzforschung*. 68(1):23-28.
- Cordero, J., y D. H. Boshier. (2003). *Árboles de Centroamérica*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba. 1091 p.
- da Silva Leite, E. R., Gherardi Hein, P. R., Moreira de Souza, T., and G. F. Rabelo. (2012). Estimation of the dynamic elastic properties of wood from *Copaifera langsdorffii* Desf using resonance analysis. *Cerne*. 18(1):41-47.
- Fang, C-H., Mariotti, N., Cloutier, A., Koubaa, A., and P. Blanchet. (2012). Densification of wood veneers by compression combined with heat and steam. *European Journal of Wood and Wood Products*. 70(1):155-163.
- Gabrielli, C. P., and F. A. Kamke. (2010). Phenol-formaldehyde impregnation of densified wood for improved dimensional stability. *Wood Science and Technology*. 44(1):95-104.
- Gao, Z., Huang, R., Lu, J., Chen, Z., Guo, F., and T. Zhan. (2016). Sandwich compression of wood: control of creating density gradient on lumber thickness and properties of compressed wood. *Wood Science and Technology*. 50(4):833-844.
- Gutiérrez P. H., y R. de la Vara S. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. Mc Graw Hill. México. 564 p.
- Haller, P., and J. Wehsener. (2004). Festigkeitsuntersuchungen an Fichtenpressholz (FPH). *Holz als Roh- und Werkstoff*. 62(6):452-454.
- Hayashi, S., and H. Nishimura. (2001). Study on static & dynamic bending strength of compressed lumber and the utilization for reinforcement. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Part A*. 67(656):757-762.
- Hill, C. A. S. (2006). *Wood modification: chemical, thermal and other processes*. Wiley. Chichester. 249 p.
- ISO (International Organization for Standardization). (2012). ISO 3129:2012. Wood. Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. ISO/IEC Office. Geneva. 9 p.
- ISO (International Organization for Standardization). (2014). ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. ISO/IEC Office. Geneva. 4 p.
- ISO (International Organization for Standardization). (2014). ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. ISO/IEC Office. Geneva. 5 p.
- Kamke, F. A. (2006). Densified Radiata Pine for Structural Composites. *Maderas. Ciencia y Tecnología*. 8(2):83-92.
- Khalil, H. P. S. A., Dungani, R., Mohammed, I. A., Hossain, M. S., Aprilia, N. A. S., Budiarto, E., and E. Rosamah. (2014). Determination of the Combined Effect of Chemical Modification and Compression of Agatis Wood on the Dimensional Stability, Termite Resistance, and Morphological Structure. *Bioresources*. 9(4):6614-6626.
- Kubojima, Y., Ohtani, T., and H. Yoshihara. (2004a). Effect of shear deflection on vibrational properties of compressed wood. *Wood Science and Technology*. 38(3):237-244.
- Kubojima, Y., Ohtani, T., and H. Yoshihara. (2004b). Effect of shear deflection on bending properties of compressed wood. *Wood and Fiber Science*. 36(2):210-215.
- Kutnar, A., and F. A. Kamke. (2013). Transverse compression behavior of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) in saturated steam environment. *European Journal of Wood and Wood Products*. 71(4):443-449.
- Kutnar, A., and F. A. Kamke. (2012). Influence of temperature and steam environment on set recovery of compressive deformation of wood. *Wood Science and Technology*. 46(5):953-964.
- Kutnar, A., and M. Šernek. (2007). Densification of wood. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*. 82:53-62.
- Kutnar, A., Kamke, F. A., and M. Šernek. (2008). The mechanical properties of densified VTC wood relevant for structural composites. *Holz Roh Werkst*. 66(6):439-446.
- Li, L., Gong, M., Yuan, N., and D. Li. (2013). An Optimal

- Thermo-Hydro-Mechanical Densification (THM) Process for Densifying Balsam Fir Wood. *BioResources*. 8(3):3967-3981.
- Macias, N., Knowles, C., Kamke, F., and A. Kutnar. (2011). Commercialization Potential of Viscoelastic Thermal Compressed Wood: Insights from the US Forest Products Industry. *Forest Products Journal*. 61(7):500-509.
- Machek, L., Militz, H., and R. Sierra-Alvarez. (2001). The influence of wood moisture content on dynamic modulus of elasticity measurements in durability testing. *Forschung verwertung*. 53(5):97-100.
- Morsing, N. (2000). Densification of wood. The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to the grain. Technical University of Denmark. Lyngby. 138 p.
- Navi, P., and F. Heger. (2005). *Comportement thermo-hydrromechanique du bois*. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne. 320 p.
- Sandberg, D., and P. Navi. (2007). Introduction to Thermo-hydro-mechanical (THM) Wood Processing. Växjö University. Växjö. 168 p.
- Sandberg, D., Haller, P., and P. Navi. (2013). Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science & Engineering*. 8(1):64-88.
- Sheikh, A. A., Morén, T., Hagman, O., Cloutier, A., Fang, C-H., and D. Elustondo. (2013). Anatomical properties and process parameters affecting blister/blow formation in Densified European aspen and downy birch sapwood boards by thermo-hygro-mechanical compression. *Journal of Materials Science*. 48(24):8571-8579.
- Skyba, O., Schwarze, F., and P. Niemz. (2009). Physical and Mechanical Properties of Thermo-Hygro-Mechanically (THM)-Densified Wood. *Wood Research*. 54(2):1-18.
- Sotomayor C., J. R. (2016). *Investigaciones en Ciencias, Tecnología e Ingeniería de la Madera*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 179 p.
- Sotomayor C., J. R. (2015). Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia. 65 p.
- Ulker, O., Imirzi, O., and E. Burdurlu. (2012). The Effect of Densification Temperature on Some Physical and Mechanical Properties of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *BioResources*. 7(4):5581-5592.
- Yoshihara, H., and S. Tsunematsu. (2007). Bending and shear properties of compressed Sitka spruce. *Wood Science and Technology*. 41(2):117-131.