

RECYT

Año 17 / N° 23 / 2015 / 25–30

Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad de la madera de *Pinus douglasiana*, en relación a su contenido de humedad

Density, ultrasound speed and modulus of elasticity of *Pinus douglasiana* wood related to its moisture content

Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1,*}

1 - Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Múgica

S/N Ciudad Universitaria, CP 58030, Morelia, Michoacán, México.

* E-mail: madera999@yahoo.com

Resumen

Se estudió experimentalmente madera de *Pinus douglasiana* Martínez durante un proceso de secado, en el cual se disminuyó el contenido de humedad de la madera desde su estado natural hasta su estado anhidro. De manera discreta, para 48 contenidos de humedad, se midieron densidad y velocidad del ultrasonido y se calculó el módulo de elasticidad de la madera. Coeficientes de higroelasticidad por ultrasonido fueron determinados a partir de las pendientes de las correlaciones entre módulo de elasticidad y contenido de humedad correspondientes a las zonas de bajo contenido de humedad e higroelástica. Para un contenido de humedad de la madera de 12%, la densidad fue 521 kg/m³, la velocidad del ultrasonido fue de 6 487 m/s y el módulo de elasticidad correspondiente fue 21.96 GPa. Para la zona de bajo contenido de humedad, el coeficiente de higroelasticidad fue de -0.09 GPa/% y para la zona higroelástica -0.30 GPa/%.

Palabras clave: Secado de madera; Punto de saturación de la fibra; Coeficiente de higroelasticidad.

Abstract

Pinus douglasiana Martinez wood was experimentally investigated during a drying process in which the moisture content of the wood was reduced from natural state to anhydrous state. For 48 moisture contents, the wood density and the ultrasound speed were measured and the modulus of elasticity was calculated. Wood coefficients of higroelasticity were determined using correlations between the modulus of elasticity and the moisture content. For a wood moisture content of 12%, the density was 521 kg/m³, the ultrasound speed was 6487 m/s and the corresponding modulus of elasticity was 21.96 GPa. For the low-moisture zone, the coefficient of higroelasticity was -0.09 GPa/%, and 0.30 GPa/% for the higroelastic zone.

Keywords: Wood drying; Fiber saturation point; Coefficient of higroelasticity.

Introducción

La madera es un material poroso e higroscópico que combinado con agua, forma un sistema bifásico. Si la madera es sometida a un proceso de secado, el fenómeno de desorción de agua se verifica. Desde el punto de vista mecánico, la madera es un sólido de medio continuo con propiedades higroelásticas. Es decir, las propiedades elásticas del material están relacionadas con su comportamiento higroscópico. La humedad en la madera plastifica al material modificando su resistencia mecánica. Este fenómeno se verifica en dos dominios higroscópicos: el primero, cuando el contenido de humedad es superior al punto de saturación de la fibra y el segundo, cuando la pared celular no está

saturada de agua [1].

La madera es un material que puede almacenar y disipar energía. Esta propiedad está controlada por los mismos mecanismos que determinan su comportamiento mecánico en condiciones estáticas al admitir deformaciones elásticas. Es decir, la estructura anatómica de la madera es la base de su comportamiento mecánico. Como consecuencia, es posible relacionar sus propiedades mecánicas utilizando métodos de análisis numérico tales como las correlaciones estadísticas. Dado que las ondas ultrasónicas pueden viajar a través de la madera, midiendo la velocidad del ultrasonido y determinando la densidad de la madera, el material puede ser caracterizado. Pellerin y Ross [2] recomendaron el uso de pruebas por ultrasonido para determinar el módulo de

elasticidad de la madera en el dominio no higosaturado ($CH < PSF$).

Mishiro [3] estudió el efecto del contenido de humedad de la madera sobre la velocidad del ultrasonido. El investigador concluye que la velocidad del ultrasonido aumenta a medida que el contenido de humedad de la madera disminuye. Sin embargo, para contenidos de humedad de la madera mayores al punto de saturación de la fibra, ocasionalmente el fenómeno puede ser 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.

Arriaga *et al.* [4] investigaron en varias especies de madera para uso estructural la variación de su rigidez elástica en función del contenido de humedad, sus resultados, utilizando un aparato *Sylvatest*® con ultrasonido, demuestran que esta técnica es aplicable para estimar el módulo de elasticidad de la madera en el dominio no higosaturado. Asimismo, los investigadores demostraron que cuando el contenido de humedad de la madera disminuyó en porcentaje, en el rango comprendido entre 30% y 5%, la velocidad del ultrasonido en la dirección longitudinal aumentó 0.8% y el módulo de elasticidad aumentó en una proporción del 2% por cada uno por ciento de disminución del contenido de humedad.

Kabir, *et al.* [5], estudiaron los efectos que tienen el contenido de humedad y el ángulo de la fibra sobre la velocidad del ultrasonido y la rigidez de la madera de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. Los investigadores concluyen que ambos factores afectan substancialmente la velocidad del ultrasonido y en consecuencia el valor de la rigidez de la madera. En la dirección longitudinal se denotó una mayor velocidad con respecto a las direcciones radial y tangencial. Igualmente, los autores proponen correlaciones estadísticas significativas entre la rigidez y el contenido de humedad de la madera. De sus resultados, los autores proponen que el tiempo de transmisión del impulso ultrasónico es mayor en madera húmeda en comparación con el de la madera seca.

Simpson [6] investigó la velocidad del sonido en la madera de *Quercus rubra* y *Acerrubrum* durante su secado. El autor concluye que para la dirección longitudinal de la madera, el tiempo de transmisión del ultrasonido disminuye 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 madera.

Con base a los conocimientos anteriores, este trabajo tuvo dos objetivos: el primero fue conocer las variaciones que experimentan la densidad y el módulo de elasticidad, tomando como referencia la variación de la velocidad del ultrasonido al variar el contenido de humedad, utilizando para este caso madera de *Pinus douglasiana* Martínez. El segundo objetivo fue determinar el coeficiente de higoelasticidad de esta especie.

Materiales y métodos

El material experimental se obtuvo de un árbol de *P. douglasiana* recolectado en el área forestal de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Del ejemplar seleccionado, se cortó una troza de 0.5 m 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 32 probetas normalizadas según la norma ISO 3129:2012 [7]. Las dimensiones de las probetas fueron de 20 mm x 20 mm de sección transversal, por 320 mm de longitud, orientadas respectivamente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal con respecto al plano leñoso. Las probetas se elaboraron solamente con madera de albura y se revisó que estuviesen libres de anomalías de crecimiento y de madera de duramen.

Para proceder con una sesión de ensayos correspondiente a un estado de contenido de humedad, se mantuvieron las probetas dentro de una cámara climática a una humedad relativa y temperatura constante hasta alcanzar el equilibrio interno en la madera, de esta forma se consiguió una humedad distribuida de manera homogénea. Una vez que la madera fue estabilizada y las probetas mantuvieron un peso constante de cada probeta, se procedió a realizar una sesión de ensayos correspondiente a ese contenido de humedad. Durante cada sesión las probetas se mantuvieron aisladas de la humedad relativa ambiente y a una temperatura de laboratorio de 20 °C. 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 (CH), varió entre 154%, que corresponde a su estado de humedad inicial y 0% de contenido de humedad, correspondiente a su estado anhidro. Para el cálculo de parámetros donde la densidad (ρ_H) y las dimensiones de la madera variaron debido a su contracción natural al deshidratarse, se realizaron los ajustes necesarios para cada uno de los 48 niveles de contenido de humedad correspondiente a cada ensayo en particular (Figura 1).

El ensayo por ultrasonido consistió en suministrar un impulso ultrasónico en transmisión directa y en la dirección longitudinal de la probeta, empleando un dispositivo para pruebas no destructivas desarrollado en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por Sotomayor-Castellanos *et al.* [8].

El impulso fue aplicado en un punto de contacto en el centro geométrico de una de las secciones transversales de la probeta. La onda resultante se registró en un segundo punto de contacto localizado en el centro geométrico de la sección transversal opuesta. El aparato registró el tiempo de transmisión del pulso ultrasónico entre los puntos de contacto.

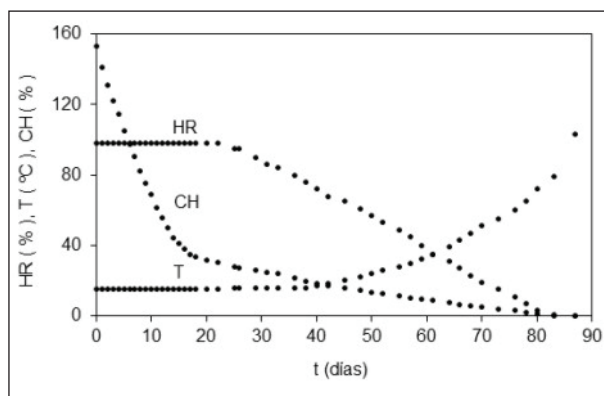


Figura 1: Acondicionamiento de la madera. HR = Humedad relativa del aire; CH = Contenido de humedad de la madera; T = Temperatura, t = tiempo.

El contenido de humedad correspondiente a cada uno de los 48 contenidos 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 la madera, es decir el peso de la probeta en la última sesión de ensayos. Para cada contenido de humedad se realizaron 32 mediciones correspondientes a cada una de las probetas estudiadas.

En cada prueba 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 correspondiente al momento del ensayo. Posteriormente, se midió el tiempo de transmisión de la onda de ultrasonido para lo cual se utilizó un aparato *Sylvatest*®. La velocidad del ultrasonido se calculó dividiendo la dimensión longitudinal de cada probeta entre el tiempo de transmisión medido.

El módulo de elasticidad se estimó utilizando la expresión (1) reportada por Pellerin y Ross [2]:

donde:

$$E_{us} = V_{us}^2 \rho_H \quad (1)$$

E_{us} = Módulo de elasticidad (Pa)

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

ρ_H = Densidad de la madera (kg/m^3)

El coeficiente de higroelasticidad de la madera (η_{us}), se determinó a partir de las pendientes de las ecuaciones lineales de las correlaciones de los módulos de elasticidad en función del contenido de humedad de la madera. El coeficiente de higroelasticidad de la madera es definido para un determinado rango como el cociente de la variación del módulo de elasticidad respecto a la variación porcentual del contenido de humedad de la madera para el mismo rango. El coeficiente de higroelasticidad se calculó con la fórmula (2) reportada por Villaseñor-Aguilar [9]:

donde:

$$\eta_{us} = \frac{\Delta E}{\Delta H} \quad (2)$$

η_{us} = Coeficiente de higroelasticidad (Pa/%)

ΔE = Variación del módulo de elasticidad (Pa)

ΔH = Variación del contenido de humedad (%)

Para cada sesión de ensayos, correspondientes a un contenido de humedad, y para la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo de elasticidad correspondiente, se calcularon los valores de la curtosis y del coeficiente de asimetría para el grupo de 32 probetas. La permanencia de los valores estadísticos de la curtosis y del coeficiente de asimetría al interior del intervalo -2 a $+2$, permitió agrupar, para cada contenido de humedad de la madera, los datos de las 32 probetas, en un resultado promedio correspondiente a una sesión de ensayo. Cada uno de los valores o puntos que se registran en las Figuras 1, 2, 3 y 4 representan la media aritmética de las mediciones de las 32 probetas ensayadas.

Resultados y discusión

El volumen de las probetas fue constante para valores de $CH > 32\%$ y disminuyó proporcionalmente en función del contenido de humedad en el intervalo $32\% > CH > 0\%$. Este comportamiento está ligado al fenómeno de la higrocontracción de la madera. Motivo por el cual se realizaron los ajustes en el volumen de las probetas necesarios para cálculos posteriores de la densidad. Como referencia, en la Tabla 1 se presentan valores de la densidad de la madera de *P. douglasiana* correspondientes a $CH = 0\%$; $CH = 12\%$ y $CH = 32\%$.

Tabla 1: Densidad de la madera.

| CH (%) | ρ_H (kg/cm^3) | Dominio higroscópico | Correlación | R^2 |
|--------|-------------------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| 0 | 495 | DNHS: CH < PSF | $\rho_H = 2.14 CH + 496$ | 0.99 |
| 12 | 521 | | | |
| 32 | 567 | | | |
| >PSF | > 567 | DHS: CH > PSF | $\rho_H = 4.23 CH + 435$ | 1.00 |

CH = Contenido de humedad; ρ_H = Densidad; PSF = Punto de saturación de la Fibras; DNHS = Dominio no higrosaturado; DHS = Dominio higrosaturado; R^2 = Coeficiente de determinación.

De la misma manera, para valores de $CH > 32\%$, la densidad (ρ_H) disminuye proporcionalmente a la reducción del contenido de humedad (Tabla 1 y Figura 2). A partir de este punto de inflexión, este parámetro disminuye de manera semejante pero con una tasa menor. Esta desviación en la tendencia es ocasionada por la pérdida de masa de agua en el intervalo $32\% > CH > 0\%$ y por la disminución del volumen de la probeta ocasionado por la higrocontracción de la madera en contenidos de humedad menores al punto de saturación de la fibra.

Las correlaciones de la Tabla 1 muestran coeficientes de determinación (R^2) altos y las correlaciones correspondientes permiten predecir la densidad (ρ_H) en función de la variación del contenido de humedad de la madera (CH).

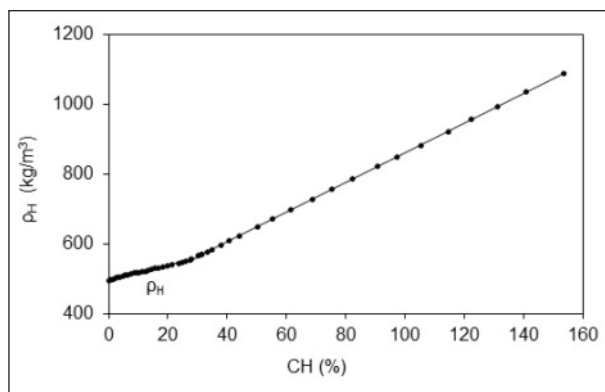


Figura 2: Densidad de la madera (ρ_H), en función de su contenido de humedad (CH).

Tsoumis [10] en un proceso de secado similar al aplicado en esta investigación, el valor del contenido de humedad de la madera en el que los valores de sus propiedades físicas y mecánicas presentan un punto de inflexión, lo define como el punto de saturación de la fibra. Este valor es considerado como el estado donde es máxima la masa de agua en la pared celular y es nula en los lúmenes.

La tendencia de variación de la densidad en función de la variación del contenido de humedad, presenta un punto de inflexión común, que es definido como el punto de saturación de la fibra (PSF) para la madera de *P. douglasiana* y corresponde a un CH del 32%. Este valor coincide

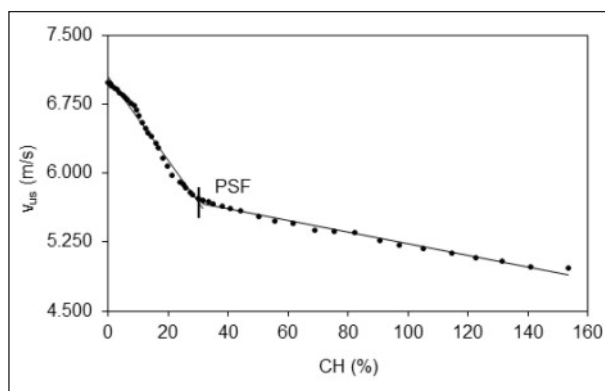


Figura 3: Velocidad del ultrasonido (v_{us}), en función del contenido de humedad de la madera (CH). PSF = Punto de saturación de la fibra.

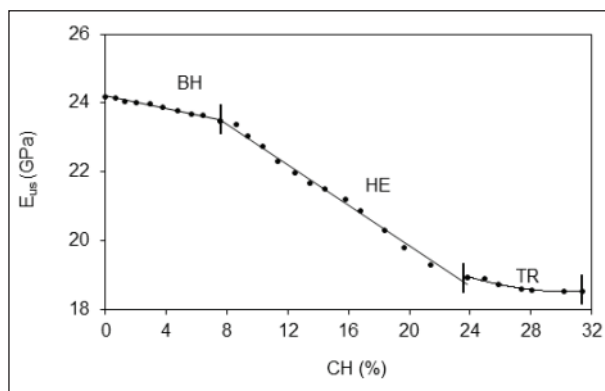


Figura 4: Módulo de elasticidad (E_{us}), con base a la velocidad del ultrasonido, en función del contenido de humedad (CH). BH = Zona de baja humedad; HE = Zona higroelástica; TR = Zona de transición.

con el de las tendencias de la velocidad (Figura 3) y del módulo de elasticidad (Figura 4), las cuales comienzan igualmente a modificarse en este punto. Estos resultados permiten afirmar que el punto de saturación de la fibra para *P. douglasiana* es en promedio de 32% de CH.

El PSF permite distinguir dos dominios higroscópicos, el dominio no higrosaturado (DNHS) correspondiente al intervalo $32\% > CH > 0\%$ y el dominio higrosaturado (DHS) correspondiente al rango $154\% > CH > 32\%$.

La densidad de *P. douglasiana* para un CH de 12%, fue de 495 kg/m^3 , valor que se encuentra dentro del rango de valores propuesto por Silva *et al.* [11]: $470 < \rho_H < 610 \text{ kg/m}^3$.

En la Tabla 2 se muestran valores de v_{us} para diferentes contenidos de humedad. La magnitud de estas variables es similar a los presentados por Buchar y Slonek [12] para diferentes especies con densidades de la madera de *Pinus* spp.

Tabla 2: Velocidades del ultrasonido.

| CH (%) | ρ_H (kg/m ³) | v_{us} (m/s) | Dominio higroscópico | Correlación | R ² |
|--------|-------------------------------|----------------|----------------------|--------------------------------------|----------------|
| 0 | 495 | 6 983 | DNHS: CH < PSF | $v_{us} = -45.57 \text{ CH} + 7 044$ | 0.99 |
| 12 | 521 | 6 487 | | | |
| 32 | 567 | 5 706 | | | |
| >PSF | > 567 | < 5 706 | DHS: CH > PSF | $v_{us} = -6.29 \text{ CH} + 5 859$ | 0.98 |

CH = Contenido de humedad; ρ_H = Densidad; v_{us} = Velocidad del ultrasonido; PSF = Punto de saturación de la Fibra; DNHS = Dominio no higrosaturado; DHS = Dominio higrosaturado; R² = Coeficiente de determinación.

La variación de la velocidad del ultrasonido en función del contenido de humedad de la madera es presentada en la Figura 3. La velocidad del ultrasonido aumenta cuando el contenido de humedad decrece. Para el dominio no higrosaturado (DNHS): ($32\% > CH > 0\%$), la tasa de disminución es mayor que para el dominio higrosaturado (DHS): ($154\% > CH > 32\%$). En ambas tendencias se refleja un punto de inflexión igual a 32% de contenido de humedad.

Para el caso de solicitaciones longitudinales como las de las ondas de ultrasonido, en el DHS las ondas mecánicas utilizan el agua libre como soporte para transitar. A partir del punto de saturación de la fibra, es decir en el dominio no higrosaturado (DNHS), las ondas se transmiten cada vez más en el sólido madera que en el fluido agua [2].

Las correlaciones de v_{us} en función de CH son lineales y con coeficientes R² cercanos a la unidad (Tabla 2). Estos resultados coinciden con los encontrados por Mishiro [3], Kabir, *et al.* [5] y Simpson [6].

Por otro lado, la Tabla 3 y la Figura 4 explican para el dominio no higroscópico, que el módulo de elasticidad disminuye cuando el contenido de humedad se ve reducido. Para fines de cálculo, el valor de referencia del módulo de elasticidad de la madera es cuando su contenido de humedad es de 12%, es decir: 14 GPa, valor que es 31% mayor que el valor promedio para *Pinus douglasiana* (10.7 GPa,

Tabla 3: Módulos de elasticidad y coeficientes de higroelasticidad

| CH (%) | ρ_H (kg/m ³) | E_{us} (GPa) | Zona higroscópica | Correlación | R ² | η_{us} (GPa/%) |
|--------|-------------------------------|----------------|--------------------|---|----------------|---------------------|
| 0 | 495 | 24.17 | BH: 0% < CH < 8% | $E_{us} = -0.09 \text{ CH} + 24.2$ | 0.99 | -0.09 |
| 12 | 521 | 21.96 | HE: 8% < CH < 24% | $E_{us} = -0.30 \text{ CH} + 25.8$ | 0.99 | -0.30 |
| 32 | 567 | 18.51 | TR: 24% < CH < 32% | $E_{us} = 0.01 \text{ CH}^2 - 0.60 \text{ CH} + 27.7$ | 0.96 | ----- |
| >PSF | > 567 | < 18.51 | DHS: CH >PSF | $E_{us} = 0.07 \text{ CH} + 16.5$ | 0.99 | ----- |

CH = Contenido de humedad; ρ_H = Densidad; E_{us} = Módulo de elasticidad por ultrasonido; η_{us} = Coeficiente de higroelasticidad; PSF = Punto de saturación de la Fibra; BH = Zona de baja humedad; HE = Zona higroelástica; TR = Zona de transición; DHS = Dominio higosaturado; R² = Coeficiente de determinación.

para madera seca al aire con un contenido de humedad entre 12% y 15%), sugerido por Silva, *et al.* [11].

Como se observa en la Figura 4, en el dominio no higosaturado, se distinguen tres intervalos continuos y con comportamientos diferentes: el intervalo 32% > CH > 24% definido como zona de transición (TR), el rango 24% > CH > 8% llamado zona higroelástica (HE) y el intervalo 8% > CH > 0% definido como zona de baja humedad (BH), de acuerdo con las definiciones propuestas por Villaseñor-Aguilar [9].

Para la zona de transición, los valores de E_{us} presentan una tendencia que puede ser descrita por una correlación de segundo grado y con un alto coeficiente de determinación R², pero 3% menor a los coeficientes de las otras tres zonas (Tabla 3). Para la zona higroelástica los módulos de elasticidad E_{us} aumentan a medida que el contenido de humedad disminuye y puede ser explicado por una correlación lineal. De la misma manera la tendencia de los módulos E_{us} correspondiente a la zona de baja humedad presenta una correlación lineal que aumenta cuando decrece el contenido de humedad de la madera, pero con una tasa menor si se compara con la zona higroelástica.

El punto de inflexión de las tendencias que separa los dos dominios higroscópicos corresponde a un valor de contenido de humedad igual a 32% y coincide con el punto de saturación de la fibra determinado con los diagramas de ρ_H y v_{us} versus CH (Figuras 2 y 3).

En la Tabla 3 se presentan como referencia valores de E_{us} para contenidos de humedad correspondientes a 0%, 12% y 32%. La magnitud de estos valores coincide con los resultados de especies de maderas que presentan valores de densidad similares a la especie en estudio como son *Pinus* spp. y *Picea Rubens* reportados por Bucur y Archer [13], así como para madera de *Pinus* spp. señalados por Buchar y Slonek [12].

La inestabilidad observada de las tendencias del módulo de elasticidad en función del contenido de humedad en la zona de transición y asociada a la diferencia de los coeficientes de higroelasticidad entre intervalos de CH, sugieren dividir el dominio no higosaturado en tres zonas de análisis: TR, HE y BH. Debido al comportamiento inestable y no lineal de la zona TR, se proponen solamente dos coeficientes de higroelasticidad para las zonas BH y HE.

Los coeficientes de higroelasticidad por ultrasonido son determinados a partir de las pendientes de las correlaciones entre E_{us} y CH que corresponden a las zonas de baja hume-

dad e higroelástica. Estos valores se presentan en la Tabla 3. Los coeficientes de higroelasticidad propuestos expresan la tasa de cambio del valor del módulo de elasticidad de la madera por cada variación porcentual de su contenido de humedad.

La variación del módulo de elasticidad en función de la variación del contenido de humedad es más rápida en el intervalo correspondiente a la zona higroelástica, en comparación con la variación correspondiente a la zona de baja humedad.

La correlación entre la velocidad del ultrasonido con el módulo de elasticidad, sólo es válida para el dominio no higosaturado (CH <PSF), más no para para el dominio higosaturado, por lo que puede ser incorrecto inferir el módulo de elasticidad con la velocidad del ultrasonido en niveles por arriba del punto de saturación de la fibra.

El punto de saturación de la fibra determinado a partir de los resultados de las velocidades del ultrasonido y complementado con las tendencias de los módulos de elasticidad por ultrasonido hace referencia a un contenido de humedad particular igual a 32%.

Sin embargo, en la zona higroscópica de transición cercana al punto de saturación de la fibra, la distribución del agua ligada en la pared celular y del agua libre en el lumen capilar no es uniforme. Además, el estado del agua puede ser intercambiable entre líquido y vapor, lo que implica que su modo de transferencia puede ser por difusión y/o por capilaridad, de acuerdo con Keey *et al.* [14], que concluyen que el punto de saturación de la fibra de la madera no es un valor puntual. La zona alrededor del punto de saturación de la fibra es entonces un intervalo de contenido de humedad, argumento que propone que la zona de transición puede ser considerada como una zona de saturación de la fibra.

Conclusiones

Se determinó la variación que experimentan la densidad y el módulo de elasticidad, empleando la variación de la velocidad del ultrasonido al modificar el contenido de humedad, de la madera de *Pinus douglasiana* Martínez. A partir de estos datos, se determinan ecuaciones que describen las tendencias de estas constantes elásticas de la madera. De esta forma se caracteriza el comportamiento higroelástico de la madera en función de la disminución de su contenido de humedad.

El comportamiento higroelástico de la madera de

P. douglasiana puede ser analizado en dos dominios: saturado y no saturado. Estos dominios están divididos por un punto de inflexión definido como el punto de saturación de la fibra e igual a 32% de contenido de humedad.

El comportamiento higroelástico de la madera de *P. douglasiana* en el dominio no saturado, puede ser dividido en tres zonas características: la zona de transición que comprende el intervalo de contenido de humedad entre el 32 y el 24%, la zona higroelástica que comprende el intervalo de 24 a 8% de contenido de humedad y la zona de baja humedad que comprende valores entre 8 y 0% de contenido de humedad de la madera.

A partir de las correlaciones lineales entre el módulo de elasticidad y el contenido de humedad de esta especie, se determinaron los coeficientes de higroelasticidad para dos zonas con comportamiento diferente: la zona de baja humedad y la higroelástica. La zona higroelástica presenta un comportamiento lineal que permitió proponer un coeficiente de higroelasticidad que relaciona la tasa de cambio unitaria del módulo de elasticidad en función de la disminución del contenido de humedad de la madera. La zona de baja humedad presenta una tendencia similar a la zona higroelástica pero sus coeficientes higroelásticos son menores.

Referencias

1. Siau, J. F. *Transports Process in Wood*. Springer Series in Wood Sciences. Berlin. 248 p. 1984.
2. Pellerin, R. F. y Ross, R. J. (Eds). *Nondestructive Evaluation of Wood*. Forest Products Society. Madison, Wis. 201 p. 2002.
3. Mishiro, A. *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. 1996.
4. Arriaga, F.; Iñiguez, G.; Esteban, M. y Fernández-Golfín, J. I. *Structural Tali timber (Erythrophieumivorense A. Chef., Erythrophleumsuaveolens Brenan.): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods*. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64(5): 357-362. 2006.
5. Kabir, M. F.; Leininger, T. D.; Araman, P. A. y Winn, M. F. *Detection of wetwood by ultrasonics*. *Forest Products Journal*, 56(3): 70-74. 2006.
6. Simpson, W. T. *Relationship between speed of sound and moisture content of red oak and hard maple during drying*. *Wood and Fiber*, 30(4): 405-413. 1998.
7. International Organization for Standardization. ISO 3129:2012. *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. 9 p. 2012.
8. Sotomayor Castellanos, J. R.; García Mariscal, L. J.; Hernández Maldonado, S. A.; Moya Lara, C. E. y Olguín Cerón, J. B. *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. 2011.
9. Villaseñor Aguilar, J. M. *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. 87 p. 2007.
10. Tsoumis, G. *Science and technology of wood*. Structure, Properties and Utilization. Van Nostrand Reinhold. New York. 494 p. 1991.
11. Silva Guzmán, J. A.; Fuentes talavera, F. J.; Rodríguez Anda R.; Torres Andrade, P. A.; Lomelí Ramírez, M. A.; Ramos Quirarte, J.; Waitkus, C. y Richter, H. G. *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, Guadalajara, México. 208 p. 2010.
12. Buchar, J. y Slonek, L. *Ultrasonic velocities and elastic constants of wood*. In: *Proceedings of the First European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood*. 1: 240-249. Hungary. 1994.
13. Bucur, V. y Archer, R. R. *Elastic constants for wood by an ultrasonic method*. *Wood Science and Technology*, 18: 255-265. 1984.
14. Keey, R. B.; Langrish, T. A. G. y Walker, J. C. F. *Kiln-Drying of Lumber*. Springer. New York. 337 p. 1999.

Recibido: 14/06/2014.

Aprobado: 01/12/2014.