

## **Ondas de esfuerzo e higrroelasticidad de la madera de Pinusdouglasiana**

Javier Sotomayor & José Villaseñor

J. Sotomayor & J. Villaseñor  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Gral. Francisco J. Múgica s/n, Felicitas del Río, 58030 Morelia,  
Michoacán  
madera999@yahoo.com

M. Ramos., V.Aguilera., (eds.) .Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago,  
Guanajuato, 2014.

## Abstract

*Pinus douglasiana* wood was experimentally studied during a drying process. For 48 moisture contents wood density, stress wave velocity and modulus of elasticity were assessed. From correlation of modulus of elasticity and moisture content, wood coefficients of hysteresis were determined. Stress waves velocity for a wood moisture content of 12 % was  $5258 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and the corresponding modulus of elasticity was 14.22 GPa. For the low-moisture zone, coefficient of hysteresis was  $-0.05 \text{ GPa}\cdot\%^{-1}$  and for the hysteresis-elastic zone was  $-0.15 \text{ GPa}\cdot\%^{-1}$ . For the saturated domain the values of modulus of elasticity diminished when moisture content reduced, observing an inflexion point defined as the fiber saturation point equal to 32 % of wood moisture content.

## 4 Introducción

La madera es un material poroso e higroscópico y combinado con agua, forma un sistema bifásico que la puede retener o eliminar. Además, la madera es un material que puede almacenar y disipar energía, lo que permite que una onda mecánica viaje a través de ella (Pellerin y Ross, 2002). Estas propiedades de la madera están reguladas por los mismos mecanismos que determinan su comportamiento mecánico en condiciones estáticas al admitir deformaciones elásticas. Como consecuencia, es posible relacionar estas características por medio del análisis de regresiones entre la velocidad de propagación de las ondas de esfuerzo y el módulo de elasticidad lo cual puede ser útil para predecir sus características higroelásticas (Han, Wu y Wang, 2006).

El contenido de humedad en la madera influye significativamente en los parámetros derivados de la medición de ondas de esfuerzo en la madera. El tiempo de transmisión de las ondas de esfuerzo en la madera se incrementa con el contenido de humedad del material. Arriba del punto de saturación de la fibra la velocidad de ondas de esfuerzo se incrementa lentamente cuando decrece el contenido de humedad, mientras por abajo del punto de saturación de la fibra, la tasa de incremento es mayor (Kang y Booker, 2002).

Por abajo del punto de saturación de la fibra de la madera, los valores del módulo de elasticidad aumentan a medida que el contenido de humedad se reduce. Este comportamiento consiste en dos segmentos separados por el punto de saturación de la fibra, alrededor del cual, el módulo de elasticidad presenta un valor (Moreno-Chan, Walker y Raymond, 2011). Por su parte, Yamasaki y Sasaki (2010) y Yamasaki, Sasaki y Iijima (2010) proponen un método basado en simulaciones Monte Carlo para estimar el módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo. Los autores recomiendan ajustar los valores del módulo de elasticidad en relación a la densidad y al contenido de humedad de la madera.

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana* utilizando ondas de esfuerzo. Particularmente, calcular el módulo de elasticidad y el coeficiente de hysteresis cuando el contenido de humedad de la madera disminuye.

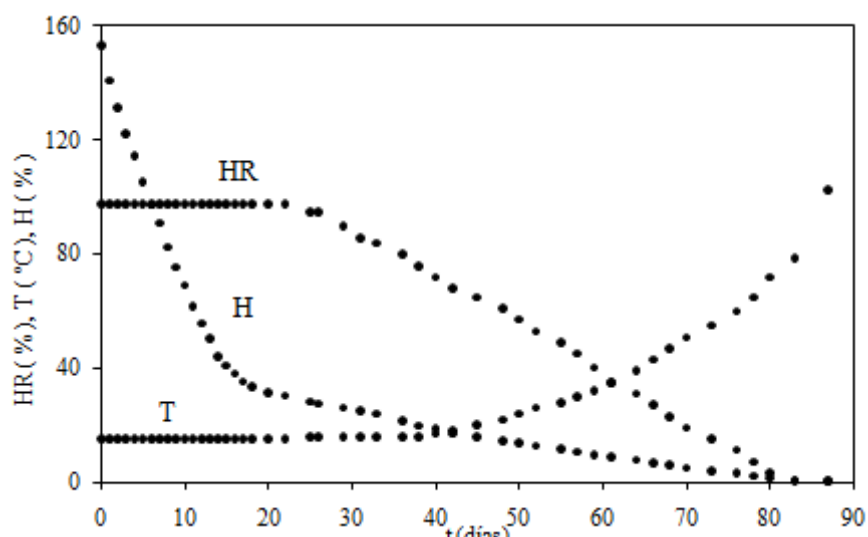
### 4.1 Materiales y métodos

El material experimental se obtuvo de un árbol de *Pinus douglasiana* Martínez recolectado en el área forestal de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. 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.

De cada uno de estos segmentos se recortaron 2 probetas totalizando una muestra de 32 probetas normalizadas (International Organization for Standardization [ISO], 1975). Las dimensiones de las probetas 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.

Las probetas se colocaron en una cámara climática durante 87 días. La humedad relativa (HR) dentro de la cámara varió de 98 a 0 %. La temperatura (T) varió entre 15 y 103 °C. El contenido de humedad (H) de la madera varió entre 154 %, que corresponde a su estado de humedad natural, y 0 % correspondiente a su estado anhidro. Durante el período experimental se ensayaron 48 estados de contenido de humedad y estos corresponden a cada uno de los puntos presentados en la Figura.

**Figura 4** Condiciones de humedad relativa (HR) y temperatura (T) en la cámara climática y contenido de humedad (H) de la madera



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 de cada 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.

Para proceder con una sesión de ensayos correspondiente a un estado de contenido de humedad, las probetas se mantuvieron dentro de la cámara climática a una humedad relativa y temperatura constante hasta alcanzar el equilibrio interno en la madera. Una vez que la madera fue estabilizada y con un peso constante de cada probeta, se procedió a realizar una sesión de pruebas correspondiente a este estado de humedad. Para el cálculo de parámetros donde la densidad y las dimensiones de la madera variaron, se realizaron los ajustes necesarios para cada estado de humedad correspondiente a cada ensayo en particular.

Para las pruebas de ondas de esfuerzo, se empleó un aparato metriguard®. 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.

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:

$$E_{oe} = v_{oe}^2 \rho_H \quad (4.1)$$

Donde:

$E_{oe}$  = Módulo de elasticidad (Pa)

$v_{oe}$  = Velocidad de las ondas de esfuerzo ( $m \cdot s^{-1}$ )

$\rho_H$  = Densidad ( $kg \cdot m^{-3}$ )

Los coeficientes de higr elasticidad de la madera fueron determinados a partir de las pendientes de las ecuaciones de regresión lineal de los módulos de elasticidad en función del contenido de humedad de la madera. El coeficiente de higr elasticidad de la madera es definido como el cociente de la variación del módulo de elasticidad entre la variación porcentual en el contenido de humedad de la madera. El coeficiente de higr elasticidad se puede calcular con la fórmula:

$$\eta_{oe} = \frac{\Delta E}{\Delta H} \quad (4.2)$$

Donde:

$\eta_{oe}$  = Coeficiente de higr elasticidad ( $Pa \cdot \%^{-1}$ )

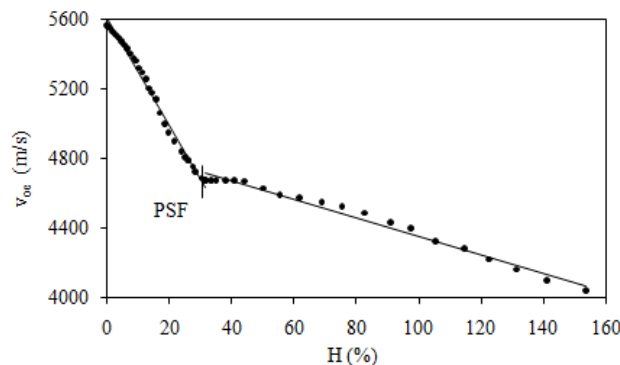
$\Delta E$  = Variación del módulo de elasticidad (Pa)

$\Delta H$  = Variación del contenido de humedad (%)

## 4.2 Resultados y discusión

La velocidad de las ondas de esfuerzo aumenta cuando el contenido de humedad decrece. Para el dominio no saturado (DNS) la tasa de disminución es mayor que para el dominio saturado (DS). Ambas tendencias quedan diferenciadas en un punto de inflexión correspondiente al punto de saturación de la fibra (Figuras 2 y 3). Este fenómeno puede ser explicado por el hecho de que en el dominio saturado las ondas mecánicas utilizan para viajar preferentemente el agua libre como soporte. A partir del punto de saturación de la fibra (PSF), es decir en el dominio no saturado, las ondas se transmiten cada vez más en el sólido madera que en el fluido agua. Este resultado coincide con los de Kang y Booker (2002).

**Figura 4.1** Velocidad de las ondas de esfuerzo ( $v_{oe}$ ) en función del contenido de humedad (H) de la madera



Las correlaciones para las velocidades  $v_{oe}$  en función del contenido de humedad  $H$  pueden ser aproximadas como lineales y con coeficientes de determinación  $R^2$  cercanos a la unidad (Cuadro 1). Estos resultados coinciden con los encontrados por Kabir, Sidec, Daud y Khalid (1997) y Simpson (1998). No obstante, en la Figura 2 se observa un intervalo en el contenido de humedad alrededor del punto de saturación de la fibra, en el cual la tendencia de la velocidad de las ondas de esfuerzo a aumentar de manera lineal no es evidente.

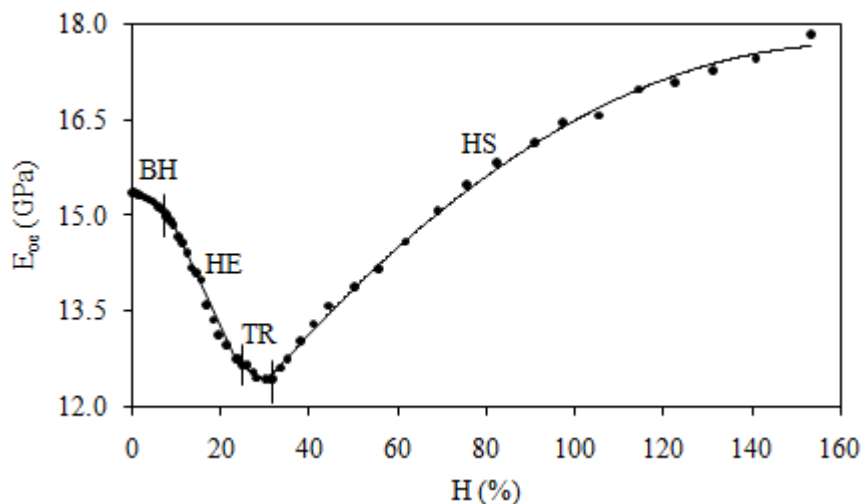
**Tabla 4** Velocidades de las ondas de esfuerzo

H (%)	$v_{oe}$ (m/s)	Dominio higroscópico	Correlación	$R^2$
0	5567	DNS: $H < PSF$	$v_{oe} = - 31.19 H + 5611$	0.99
12	5258			
32	4674			
		DS: $H > PSF$	$v_{oe} = - 5.34 H + 4888$	0.98

En la tabla se muestran valores de  $v_{oe}$  para diferentes contenidos de humedad. La magnitud de estas variables es similar a las presentadas por Buchar y Slonek (1994) para especies de densidades comparables. Los resultados de la densidad están igualmente de acuerdo con los propuestos por Silva -Guzmán et al. (2010) para madera de *P. douglasiana*.

Para el dominio saturado ( $154 \% > H > 32 \%$ ) los valores de  $E_{oe}$  disminuyen a medida que el contenido de humedad de la madera decrece (Figura 2). La tendencia de  $E_{oe}$  en función de  $H$  presentó una correlación de segundo grado y con un coeficiente  $R^2$  casi igual a la unidad (Cuadro 2). Estos resultados coinciden con las conclusiones de Van Dyk y Rice (2005). En el dominio no saturado ( $32 \% > H > 0 \%$ ), se distinguen tres intervalos continuos y con comportamientos diferentes (Figura 3): el intervalo  $32 \% > H > 24 \%$  definido como zona de transición (TR), el rango  $24 \% > H > 8 \%$  referido como zona higroelástica (HE) y el intervalo  $8 \% > H > 0 \%$  llamado zona de baja humedad (BH). Estos resultados coinciden con los de Moreno Chan, Walker y Raymond (2011).

**Figura 4.2** Módulo de elasticidad ( $E_{oe}$ ) en función del contenido de humedad ( $H$ ) de la madera



Para la zona de transición los valores de  $E_{oe}$  presentan una tendencia que puede ser descrita por una correlación de segundo grado y con un alto coeficiente de correlación  $R^2$ , pero ligeramente menor a los coeficientes de las otras tres zonas. Este intervalo en el contenido de humedad, coincide con el de la zona de transición en la tendencia a aumentar la velocidad de las ondas de esfuerzo, a medida que disminuye el contenido de humedad de la madera.

Para la zona higroelástica los módulos de elasticidad 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 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 la tendencia de la velocidad de ondas de esfuerzo.

En el Cuadro 2 se presentan como referencia valores de  $E_{oe}$  para contenidos de humedad correspondientes a 0, 12 y 32 %. El orden 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. reportados por Bucur (1995).

Los coeficientes de higroelasticidad fueron determinados a partir de las pendientes de las correlaciones entre  $E$  y  $H$  correspondientes a las zonas de baja humedad e higroelástica. Estos coeficientes representan la tasa de cambio del valor del módulo de elasticidad de la madera por cada variación porcentual de su contenido de humedad. Debido al comportamiento no lineal de las zonas TR y DS se proponen solamente dos coeficientes de higroelasticidad para las zonas BH y HE.

**Tabla 4.1** Módulos de elasticidad y coeficientes higroelásticos

Eus (GPa)	H (%)	$\rho$ (kg/cm <sup>3</sup> )	Zona higroscópica	Correlación	R2	$\eta_{oe}$ (GPa/%)
15.37	0	495	BH	$E_{oe} = -0.05 H + 15.4$	0.96	-0.05
14.44	12	521	HE	$E_{oe} = -0.15 H + 16.2$	0.99	-0.15
12.43	32	567	TR	$E_{oe} = 0.01H^2 - 0.33H + 17.7$	0.96	-----
			DS	$E_{oe} = 0.0003 H^2 - 0.097 H + 9.75$	0.99	-----

### 4.3 Conclusiones

Se caracterizó el comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana* 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.

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.

### **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México y a la Coordinación de la Investigación Científica, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

### **Referencias**

Buchar, J., & Slonek, L. (1994). Ultrasonic velocities and elastic constants of wood. In: Proceedings of the First European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood. Volume 1. Hungary. pp: 240-249.

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.

International Organization for Standardization. (ISO). (1975). ISO 3129 (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). Geneva, Switzerland: Autor.

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.

Kang, H., & Booker, R.E. (2002). Variation of stress wave velocity with MC and temperature. *Wood Science and Technology*, 36, 41-54.

Moreno Chan, J., Walker, J.C., & Raymond, C.A. (2011). Effects of moisture content and temperature on acoustic velocity and dynamic MOE of radiate pine sapwood boards. *Wood Science and Technology*, 45, 609-626.

Pellerin, R.F., & Ross, R.J. (Eds.), (2002). Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society.

Silva-Guzmán, J.A., Fuentes-Talavera, F.J., Rodríguez-Anda, R., Torres-Andrade, P.A., Lomelí-Ramírez, M.G., Ramos-Quirarte, J.,... Richter, H.G. (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.

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.

Van Dyk, H., & Rice, R.W. (2005). An assessment of the feasibility of ultrasonic as a defect detector in lumber. *Holzforschung*, 59, 441-445.

Yamasaki, M., Sasaki, Y., & Iijima, Y. (2010). Determining Young's modulus of timber on the basis of a strength database and stress wave propagation velocity II: effect of the reference distribution database on the determination. *Journal of Wood Science*, 56, 380-386.

Yamasaki, M., & Sasaki, Y. (2010). Determining Young's modulus of timber on the basis of a strength database and stress wave propagation velocity I: an estimation method for Young's modulus employing Monte Carlo simulation. *Journal of Wood Science*, 56, 269-275.