

Disminución del módulo dinámico de la madera por exposición al fuego.

Evaluación por ondas de esfuerzo.

Reduction of the dynamic modulus of wood due to exposure to the fire.

Evaluation by stress waves.

Javier Ramón Sotomayor Castellanos¹

Recibido: mayo 2018

Aprobado: setiembre 2018

Resumen. - La madera es un material combustible. Por lo tanto, el diseño arquitectural y el cálculo ingenieril requieren de información experimental sobre parámetros para la fabricación de productos o estructuras de madera. El objetivo de la investigación fue medir la disminución del módulo dinámico de la madera, ocasionada por la exposición al fuego con piezas de pequeñas dimensiones. Se estudiaron probetas de madera de *Tabebuia rosea*, *Andira inermis*, *Juglans pyriformis*, *Quercus spp.* y *Cordia elaeagnoides*. Se determinaron la densidad aparente, la velocidad de onda, el módulo dinámico y la disminución de la masa. Después de las pruebas de reacción al fuego en las cinco especies, se observa que la pérdida de masa es inversa a la densidad aparente de la madera. La velocidad de onda no varía significativamente antes y después del tratamiento; sin embargo, el módulo dinámico disminuye proporcionalmente a la pérdida de masa. Todas las probetas de las cinco especies estudiadas muestran tendencias generales para el conjunto de resultados; a pesar de ello, las magnitudes que resultan de las mediciones son particulares para cada especie.

Palabras clave: *Densidad aparente; Velocidad de onda; Productos de madera.*

Summary.- *Wood is a combustible material. Therefore, architectural design and engineering calculation require experimental information on parameters for the manufacture of products and/or wood structures. The objective of the research was to measure the decrease of the dynamic modulus of the wood, caused by the exposure to the fire of pieces with small dimensions. Wood specimens of *Tabebuia rosea*, *Andira inermis*, *Juglans pyriformis*, *Quercus spp.* and *Cordia elaeagnoides* were studied. The apparent density, the wave velocity, the dynamic modulus and the mass decrease were determined. After the fire reaction tests, in the five species it is observed that the loss of mass is inverse to the apparent density of the wood. The wave velocity does not vary significantly before and after the treatment. However, the dynamic modulus decreases proportionally to the loss of mass. The results show general trends for the set of all the specimens of the five species studied. However, the magnitudes resulting from the measurements are particular for each species.*

Keywords: *Apparent density; Wave speed; Wood products.*

¹Profesor investigador de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, madera999@yahoo.com

1. Introducción

1.1 Reacción al fuego.- La madera es un material combustible que cuando es expuesto al fuego, su masa es carbonizada [1]. La densidad aparente de una pieza de madera se define a partir del peso de la masa más el peso de la masa de agua que contiene, ambos relacionados con su volumen [2]. Dado que este parámetro es un indicador específico del módulo dinámico de una especie [3], resulta que, si se quema una pieza de madera, su densidad aparente se reduce y posiblemente disminuye su módulo dinámico.

La combustión de la madera ocurre de manera diferente dependiendo de la especie y dimensiones de cada pieza [4]; sin embargo, para fines de cálculo y diseño de productos o estructuras de madera, es necesario establecer parámetros que se puedan comparar entre sí [5]. Para obtenerlos de una manera práctica, una estrategia experimental es la comparación de varias especies sometidas a ensayos con configuraciones homólogas [6].

Los parámetros derivados de las pruebas de reacción al fuego se determinan principalmente con tres enfoques. El primero, aplicando pruebas normalizadas con piezas de madera de dimensiones similares a las empleadas en edificaciones [7]. La realización de estas pruebas es complicada, pero proporciona datos que se pueden utilizar como referencia en la reglamentación para el cálculo estructural y de seguridad en la industria con madera [8]. Un segundo enfoque es el modelado numérico del comportamiento en la exposición al fuego de elementos o estructuras de madera [9]. Esta estrategia proporciona información para validar modelos teóricos y mejorar la comprensión del fenómeno de combustión en los productos de madera. Un tercer enfoque radica en estudiar el comportamiento al fuego de pequeñas probetas de madera para estimar la respuesta en la exposición al fuego de una especie o producto compuesto de madera [10]. En cuanto a la conformación de criterios de seguridad en caso de incendio, es difícil aplicar resultados experimentales producidos en condiciones de laboratorio; sin embargo, hay evidencia empírica que, en los incendios de salas, la carbonización de los miembros de madera (que no tienen huecos o juntas), es similar en magnitud a los valores obtenidos en los ensayos de resistencia al fuego [11].

El escenario anterior se acompaña de dos circunstancias: por una parte, las pruebas de resistencia al fuego son onerosas y difíciles de implementar [12]; por otra, es difícil predecir el comportamiento en condiciones reales de incendio a partir de resultados de experimentos realizados en laboratorio. Una alternativa son los estudios comparativos entre las diferentes especies y su respuesta, ensayadas en condiciones controladas de laboratorio. Estos estudios permiten proporcionar información que oriente los criterios de diseño y cálculo ingenieril [13].

La evaluación del efecto del fuego en las características mecánicas en la madera es un tema que ha interesado a diversos investigadores [14,15]. Una perspectiva contemporánea de investigación en tecnología de la madera, es la comparación de la respuesta de varias especies manteniendo la mínima influencia de factores en la variabilidad de los resultados. Así mismo, el diseño de experimentos originales y la configuración de pruebas Ad-hoc son una tendencia actual en ciencias de la madera.

Entre otros procedimientos normalizados para estudiar el comportamiento en la exposición al fuego de productos constituidos de madera se pueden citar: pruebas con horno ISO 834-1 [16] y ASTM 119-14 [17], ensayos con muestras en pequeña escala expuestas a un flujo de calor constante con calorímetro de cono [18,19] y pruebas con especímenes con dimensiones de servicio [20,21]. De estos tres métodos, el flujo de calor impuesto en el primer y tercer método es variable con el tiempo de exposición al fuego; por su parte, en el segundo método de ensayo, el flujo de calor impuesto se mantiene constante en la duración de la prueba.

Respecto al proceso de combustión de la madera y su comportamiento al fuego en edificaciones, se puede encontrar información en: Canadian Wood Council [22], Babu [23], Ansell [24] y Aseeva et al. [25].

1.2 Ondas de esfuerzo.- Los métodos no destructivos para la caracterización mecánica de la madera han ganado importancia. Estos permiten evaluar probetas antes y después de ser sometidas a un tratamiento, en este caso, la exposición al fuego [26]. Las pruebas de ondas de esfuerzo han demostrado su vigencia para evaluar el módulo dinámico en muestras comunes de madera, antes y después de tratamientos [27]. Bajo esta perspectiva, las principales variables a evaluar son: la densidad aparente de la madera, la velocidad de onda y, a partir de estas dos variables, calcular el módulo dinámico [28].

1.3 Especies de madera evaluadas.- Las especies *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC., *Andira inermis* (W. Wright) DC., *Juglans pyriformis* Liebm., *Quercus* spp. y *Cordia elaeagnoides* (Ruiz & Pav.) Oken son endémicas de México y Centroamérica [29]. Sus características físicas y mecánicas están reportadas por Tamarit y López [30], Silva et al. [31] y Sotomayor [32]. El comportamiento de estas especies en su exposición al fuego ha sido estudiado por Sotomayor y Carrillo [26]. No se encontraron antecedentes de otras investigaciones referentes a la respuesta de estas especies en su exposición al fuego, en donde se haya empleado una evaluación con ondas de esfuerzo.

1.4 Problema, hipótesis y objetivo.- La disminución de la masa en un elemento estructural de madera expuesto al fuego, puede servir como indicador de la capacidad de una especie para su empleo en estructuras y productos confeccionados con este material. La literatura sobre el comportamiento de la madera expuesta al fuego, reporta que la disminución de la masa es proporcional a la densidad de la madera [33,34]. Así, se puede plantear la siguiente hipótesis de trabajo de esta investigación: si se queman piezas de maderas con densidades diferentes, se puede observar que su densidad aparente se reduce y posiblemente disminuye su módulo dinámico

La combustión de una pieza de madera reduce su masa, por lo tanto, la merma en su peso; en referencia con su volumen, resulta a su vez en una disminución del módulo dinámico.

El objetivo de la investigación fue medir la disminución del módulo dinámico de la madera ocasionada por la exposición al fuego de pequeñas piezas de este material. Para ello, se determinaron la densidad aparente de la madera y la velocidad de transmisión de ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal.

2. Materiales y métodos

2.1 Diseño experimental.- Se estudiaron cinco especies: *T. rosea*, *A. inermis*, *J. pyriformis*, *Quercus* spp. y *C. elaeagnoides*, y se efectuaron pruebas con 35 réplicas (probetas por especie) seleccionadas al azar de piezas comerciales de madera aserrada, totalizando 175 observaciones para cada una de las variables estudiadas. Para su análisis se aplicaron dos enfoques: 1) la observación de los resultados especie por especie, como muestras independientes, 2) agrupar en una sola muestra los resultados de las 175 probetas de las cinco especies. Con el primer enfoque se diferenció la respuesta entre cada una de las especies, y con el segundo se observaron tendencias generales de estas maderas. La estrategia experimental se presenta en la Figura I.

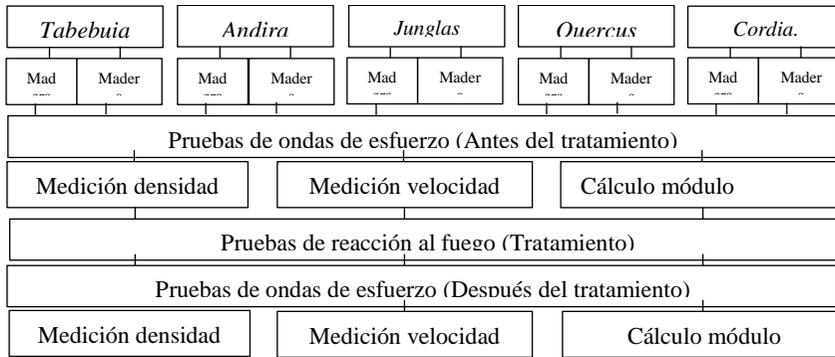


Figura I.- Estrategia experimental.

La prueba de reacción al fuego se consideró como el tratamiento y factor de variación. De esa forma, se definieron dos niveles (estados de la madera): antes del tratamiento (AT) y después del tratamiento (DT). Las variables para AT y DT fueron la velocidad de onda (voe) y el módulo dinámico (Eoe). La variable densidad aparente (ρ_{CH}) se observó solo para antes del tratamiento. La variable disminución de la masa (Δm) se consideró únicamente después del tratamiento. Las dimensiones de las probetas, el contenido de humedad y el tiempo de exposición al fuego, se consideraron factores controlables y con variación mínima, de tal forma que no intervienen en el fenómeno observado. La variabilidad en la estructura anatómica y en la composición química entre especies e intra-especie, así como el flujo calorífico al que estuvo expuesta la madera, supusieron factores que tampoco influyeron en el fenómeno.

Para todas las variables se calcularon la media muestral (\bar{x}), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (CV) (Tabla I). Se realizaron pruebas de normalidad en la distribución de los datos de cada muestra. Se tomó como criterio de demarcación, para las pruebas de normalidad, los valores calculados del sesgo estandarizado (SE) y del apuntamiento estandarizado (AE) al interior del intervalo $[-2, +2]$.

Se realizaron cuatro experimentos. El experimento uno consistió en un análisis de varianza (anova) cuando se confirmó la normalidad. Cuando no se verificó la normalidad de las muestras, se procedió a realizar pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis (K-W) de diferencia de medianas. Todas las pruebas fueron para un nivel del 95% de confianza. El criterio de demarcación para las pruebas anova y K-W, fue aceptar una diferencia estadísticamente significativa para un valor $P \leq 0,05$ (Tabla II). El objetivo particular de este experimento fue identificar si después del tratamiento (DT), la velocidad de onda o el módulo dinámico variaron respecto a los resultados antes del tratamiento (AT); este último considerado grupo de control. El diagrama conceptual del experimento 1 se presenta en la Figura II.

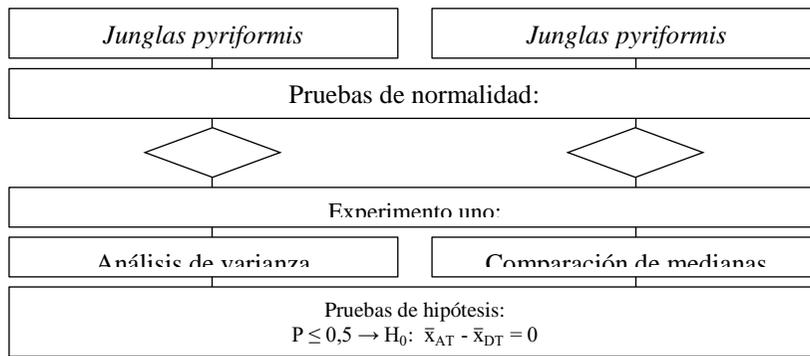


Figura II.- Experimento uno. Ejemplo para *Juglans pyriformis*.

El experimento dos consistió en utilizar los resultados combinados de las 175 probetas de las cinco especies. Se calcularon las regresiones lineales ($y = a x \pm b$) y sus coeficientes de determinación (R^2), para el estado DT en función de AT entre las variables v_{oe} y E_{oe} (Figura III). El objetivo particular de este experimento fue establecer la precisión de los parámetros antes del tratamiento (AT), para explicar los parámetros correspondientes al estado de la madera después del tratamiento (DT).

En el experimento tres igualmente se utilizaron los resultados combinados de las 175 probetas de las cinco especies. Se calcularon las regresiones lineales ($y = a x \pm b$) y sus coeficientes de determinación (R^2) para Δm en función de ρ_{CH} (Figura IV). El objetivo particular de este experimento fue determinar la precisión del parámetro “densidad aparente (ρ_{CH})”, para explicar el parámetro “disminución de la masa (Δm)”, resultado del tratamiento de exposición al fuego.

En el experimento cuatro se utilizaron los resultados combinados de las 175 probetas de las cinco especies. Se calcularon las regresiones lineales ($y = a x \pm b$) y sus coeficientes de determinación (R^2) para v_{oe} DT y E_{oe} DT en función de la disminución de la masa (Δm) (Figura V). El objetivo particular de este experimento fue determinar la precisión del parámetro “disminución de la masa (Δm)”, ocasionada por el tratamiento de exposición al fuego; para explicar los parámetros “velocidad de onda después del tratamiento (v_{oe} DT)” y “módulo dinámico después del tratamiento (E_{oe} DT)”.

La Figura III presenta el diagrama conceptual para los experimentos dos, tres y cuatro.

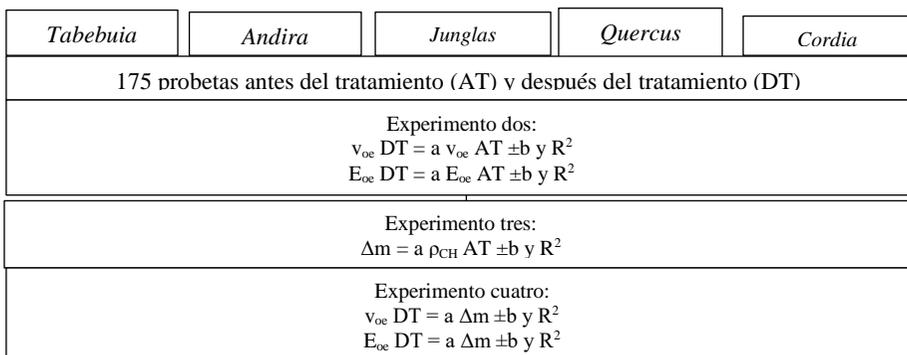


Figura III.- Experimentos dos, tres y cuatro.

2.2 Materiales.- El material se recolectó en piezas comerciales en aserraderos del Estado de Michoacán (19° 10' 07" latitud Norte - 101° 53' 59" longitud Oeste), México. El material es el mismo utilizado para pruebas de ignición por Sotomayor y Carrillo [26]. Para cada especie de madera se prepararon 35 probetas normalizadas adaptando la norma ISO 3129: 2012 [16]. Las dimensiones de las probetas fueron en dirección radial y tangencial 0,02 m, y en la longitudinal 0,40 m. Antes de las pruebas de reacción al fuego, las probetas se secaron durante 90 días en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C (± 2 °C) y una humedad relativa del aire de 65 % (± 2 %), hasta que su peso fue constante. Después de las pruebas de reacción al fuego, las probetas se almacenaron por un periodo y en condiciones similares a las de antes del tratamiento, hasta que su peso fue constante. Se realizaron dos series de pruebas de ondas de esfuerzo. Una primera prueba antes, y una segunda después de la exposición de la madera al fuego.

La densidad aparente de la madera se calculó al momento del ensayo con la relación peso/volumen de las probetas, adaptando la norma ISO 13061-2: 2014 [35]. El contenido de humedad de la madera se calculó con las diferencias entre los pesos de la misma al momento del ensayo, y después de secarla durante 48 horas en un horno con una temperatura de 103 °C. Se realizó esta acción hasta que su peso fue constante y se consideró a la madera en estado seco. Este parámetro se determinó adecuando la norma ISO 13061-1: 2014 [36]. Ambas operaciones se realizaron antes y después de las pruebas de reacción al fuego.

2.3 Pruebas de reacción al fuego.- Las pruebas de reacción al fuego siguieron el protocolo reportado por Sotomayor y Carrillo [26]; y consistió en los siguientes pasos:

1. Se midieron el peso y las dimensiones de la probeta antes del tratamiento.
2. La probeta se posicionó en el dispositivo para las pruebas de reacción al fuego (Figura IV). La orientación fue la dirección radial coincidiendo con el flujo vertical de la flama.
3. La probeta se expuso durante dos minutos al fuego directo de la flama con una altura de 0,09 m de un mechero de laboratorio tipo Meker-Fisher; con regulación de aire y de gas, quemador de 0,03 m de diámetro, y temperatura máxima de 1300 °C.
4. La probeta se retiró de la flama y se paró su combustión en una cama de arena.
5. La masa de la zona carbonizada se retiró y se midió el peso de la probeta después del tratamiento.

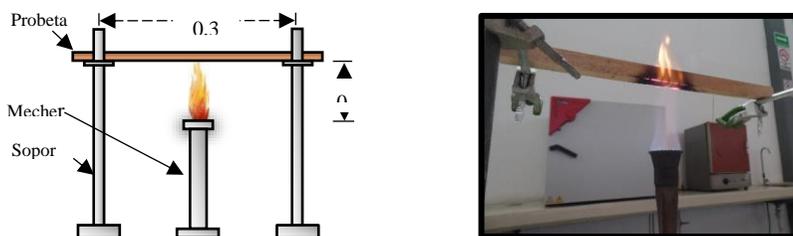


Figura IV.- Dispositivo para las pruebas de reacción al fuego (Sotomayor y Carrillo, 2017).

La disminución de la masa (Δm) de las probetas, así como la variación de v_{oe} y de E_{oe} antes y después del tratamiento, se calcularon con la fórmula (1) [37]:

$$\Delta m = \frac{P_{AT} - P_{DT}}{P_{AT}} \quad (1)$$

Donde:

Δm = Disminución de la masa (%)

PAT = Peso de la probeta medido antes del tratamiento (kg)

PDT = Peso de la probeta medido después del tratamiento (kg)

2.4 Pruebas de ondas de esfuerzo.- Las pruebas de ondas de esfuerzo consistieron en suministrar un impacto en un extremo de la probeta, provocar una onda de esfuerzo a través de la dirección longitudinal y registrar el tiempo de transmisión necesario para que la onda llegue al extremo opuesto de la probeta. En cada probeta se realizaron tres repeticiones y el promedio se consideró como el valor de respuesta. Para tal propósito, se utilizó el aparato Metriguard® posicionado en un dispositivo para pruebas no destructivas diseñado ad-hoc (Figura V). Se calculó su velocidad con la longitud de las probetas y el tiempo de transmisión de las ondas de esfuerzo. El módulo dinámico se calculó con la fórmula (2) [38]:

$$E_{oe} = v_{oe}^2 \rho_{CH} \quad (2)$$

Donde:

Eoe = Módulo dinámico (MN m-2)

voe = Velocidad de onda (m s-1)

ρ_{CH} = Densidad aparente de la madera a un contenido de humedad CH (kg m-3)

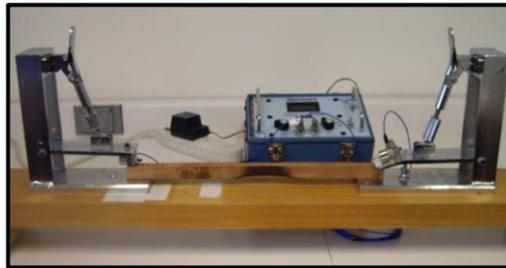


Figura V.- Dispositivo para las pruebas de ondas de esfuerzo.

3. Resultados y análisis.- Antes y después del tratamiento, la madera se acondicionó a un contenido de humedad de 11,4 %, con una desviación estándar de 1,19 y un coeficiente de variación de 10,5 %. Por lo tanto, se consideró que la variación en el contenido de humedad de la madera no intervino de manera significativa en los resultados. Estos datos son similares a los reportados por Sotomayor y Carrillo [26], debido a que se trata del mismo material experimental.

3.1 Densidad aparente.- Los valores promedio de la densidad aparente de la madera se situaron en un intervalo de 613 kg m-3 (T. rosea) a 996 kg m-3 (C. elaeagnoides), y un promedio para las cinco especies de 797 kg m-3. Los coeficientes de variación fueron de un mínimo de 4,96 % (A. inermis) a 9,73 % (C. elaeagnoides), con un promedio general de 18 % para todas las especies (Tabla I). Los resultados para la densidad son de la misma magnitud que la reportada para estas especies por Tamarit y López [30], Silva et al. [31] y Sotomayor [32].

La densidad aparente, después del tratamiento de exposición al fuego, se redujo proporcionalmente con la disminución de la masa. De esta forma, las densidades aparentes después del tratamiento disminuyeron mostrando los siguientes resultados: T. rosea 581 kg m-3; A. inermis 710 kg m-3, J. pyriformis 746 kg m-3, Quercus spp. 843 kg m-3, C. elaeagnoides 976 kg m-3. El promedio para

todas las especies fue de 771 kg m⁻³. Estos resultados permitieron calcular el módulo dinámico después del tratamiento.

Las distribuciones de las muestras para cada especie, señalan que resultaron normales. La excepción fue la madera de *Quercus* spp., la cual estuvo compuesta efectivamente por varias especies, lo que posiblemente aumentó su variabilidad. Sus densidades, para antes y después del tratamiento de exposición al fuego, presentaron diferencias estadísticamente significativas (Tabla II). De igual modo, para *T. rosea* y *A. inermis* se registraron diferencias igualmente significativas.

Estos resultados verifican que la exposición de una pieza de madera al fuego disminuye su masa, y que, al ponderarla por su volumen, disminuye su densidad aparente.

3.2 Velocidad de onda.- La velocidad de onda aumentó para *T. rosea* y *A. inermis*, pero disminuyó para *J. pyriformis*, *Quercus* spp. y *C. elaeagnoides*. La velocidad de onda aumentó muy poco para las cinco especies en conjunto (+0,08 %, Tabla I). Los coeficientes de variación para los casos especie por especie, no se modificaron considerablemente antes y después de la exposición al fuego. Para las cinco especies mezcladas, la magnitud del coeficiente de variación de la velocidad de onda disminuye, pero en relación a cada especie en particular es casi el doble (Tabla I). Las magnitudes de las velocidades de onda, y los coeficientes de variación obtenidos son similares a las reportadas por Ponneth et al. [39], quienes estudiaron siete maderas angiospermas con ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal. Empleando probetas de pequeñas dimensiones de 0,05 m x 0,05 m x 1 m, en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente, y con densidades aparentes de la madera entre 660 kg m⁻³ y 890 kg m⁻³, correspondientes a un contenido de humedad de 12 %.

Las muestras de las distribuciones de la velocidad de ondas antes y después del tratamiento fueron normales para las cinco especies y el conjunto de las 175 probetas (Tabla II). De igual modo, con excepción de *Quercus* spp., no se detectaron diferencias significativas entre estos parámetros, para antes y después de la exposición al fuego de la madera.

Desde la perspectiva del análisis de todas las probetas en conjunto, las velocidades de onda para antes y después del tratamiento presentaron una fuerte correlación (Figura VI). Efecto que sugiere que la velocidad de onda se puede medir con buena precisión en la madera, incluso después de las pruebas de reacción al fuego.

Estos resultados proponen que la exposición de la madera al fuego, con la consecuente disminución en la sección transversal de las probetas, no modifica de manera importante la capacidad de transmisión de una onda mecánica. En este caso, de ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal de la madera.

3.3 Módulo dinámico.- El módulo dinámico disminuyó para cada una de las maderas en estudio, así mismo para el conjunto de las cinco (Tabla I). El fenómeno observado respecto a la disminución en la magnitud de los módulos de elasticidad de la madera, ocasionado por su exposición al fuego en condiciones de laboratorio, esta reportado por Kukay et al. [40]; quienes observaron una disminución en el módulo de elasticidad de *Pseudotsuga menziesii* de 17,3 % ($\rho_{CH} = 540$ kg m⁻³, $CH = 9$ %).

Las distribuciones de las muestras de los módulos dinámicos fueron normales para *A. inermis*, *J. pyriformis*, *Quercus* spp. y *C. elaeagnoides* (Tabla II). Sin embargo, para *T. rosea* y para el conjunto de las cinco especies, los resultados del sesgo estandarizado y del apuntamiento estandarizado, ambos estadísticos fuera del criterio de demarcación, ocasionaron realizar pruebas de comparación de medianas, las cuales resultaron sin diferencias estadísticamente significativas. La prueba de

diferencia de medias para *Quercus* spp., denotó una diferencia estadísticamente significativa entre los módulos dinámicos para antes y después de la exposición al fuego.

Los coeficientes de variación de las especies, con excepción de *T. rosea* y del conjunto de las cinco especies, aumentaron con un máximo de un por ciento. Este resultado sugiere una homogeneidad en los valores de este parámetro, antes y después de que la madera fuera expuesta al fuego.

Los módulos dinámicos de esta investigación son similares a los reportados recientemente en la literatura. Teles et al. [41] determinan un módulo dinámico por ondas de esfuerzo para *Sextonia rubra* de 15861 MN m⁻² ($\rho_{CH} = 682$ kg m⁻³, CH = 12 %). Garcia et al. [42] reportan un módulo dinámico determinado por ondas de esfuerzo para madera de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden de 12735 MN m⁻² ($\rho_{CH} = 636$ kg m⁻³, CH = 15 %). Freitas et al. [38] reportan un módulo dinámico por ondas de esfuerzo para *Simarouba amara* de 5445 kg MN m⁻² ($\rho_{CH} = 500$ kg m⁻³, CH = 12 %). Y por su parte, Yu et al. [43] reportan un módulo dinámico determinado por ondas de esfuerzo 13300 MN m⁻² para *Pinus contorta* var. *latifolia* ($\rho_{CH} = 478$ kg m⁻³, CH = 12 %). Estos estudios fueron realizados para la dirección longitudinal de la madera, ensayando piezas de pequeñas dimensiones y con un aparato similar al empleado en esta investigación. Sintetizando, estas investigaciones muestran la variabilidad de los resultados, que depende entre otros factores, de la especie en observación.

Los módulos dinámicos del conjunto de todas las probetas presentaron una fuerte correlación para antes y después del tratamiento (Figura VI). Consecuentemente, el módulo dinámico por ondas de esfuerzo se puede medir con buena precisión en la madera, una vez realizadas las pruebas de reacción al fuego.

3.4 Disminución de la masa.- Para cada una de las cinco especies en estudio, la disminución de la masa se reduce a medida que la densidad de la madera aumenta (Tabla I). Para el conjunto de las 175 probetas, esta merma presenta una regresión lineal con un fuerte coeficiente de determinación (Figura VII). Respecto a los coeficientes de variación, un caso particular es el de *A. inermis*, el cual es importante en comparación con los de las otras especies en estudio. Estos resultados son similares a los reportados por Sotomayor y Carrillo [26], debido a que se trata del mismo material experimental.

Los resultados de todas las probetas combinadas indican, por una parte, que la velocidad de onda no muestra una correlación con la disminución de la masa (Figura VIII). Por otra parte, que el módulo dinámico después del tratamiento si se correlaciona con la disminución de la masa, pero con un coeficiente de determinación limitado.

Como resultado de la exposición al fuego en el sentido perpendicular a la dimensión longitudinal de las probetas, y concentrada en el centro de la portada (Figura IV), la reducción de la sección transversal fue mínima (Figura IX). En consecuencia, la transmisión de las ondas de esfuerzo no fue frenada por la reducción de la sección transversal de las probetas. Sin embargo, la disminución de la masa y su impacto en la densidad aparente de las probetas después del tratamiento, si provocan una disminución en la magnitud del módulo dinámico. Esto dado que su cálculo se deriva de la fórmula (2) en la cual, la densidad aparente está implícita. Estos resultados confirman que el módulo dinámico de una pieza de madera disminuye cuando esta es expuesta al fuego.

		ρ_{CH} AT (kg m ⁻³)	Δm DT (%)	v_{oe} AT (m s ⁻¹)	v_{oe} DT (m s ⁻¹)	E_{oe} AT (MN m ⁻²)	E_{oe} DT (MN m ⁻²)
1 <i>T. rosea</i>	\bar{x}	613	5,3	3780	3861	8751	8636
	σ	59	0,8	200	161	1028	825
	CV	9,62	14,8	5,29	4,16	11,75	9,55
	Δ				+2,14		-1,31
2 <i>A. inermis</i>	\bar{x}	737	3,6	3263	3318	7862	7836
	σ	37	1,9	178	185	826	902
	CV	4,96	52,4	5,44	5,57	10,50	11,51
	Δ				+1,69		-0,33
3 <i>J. pyriformis</i>	\bar{x}	773	3,5	3561	3559	9854	9501
	σ	60	0,5	191	193	1457	1437
	CV	7,73	15,0	5,37	5,43	14,78	15,13
	Δ				-0,06		-3,58
4 <i>Quercus</i> spp.	\bar{x}	866	2,6	4174	4077	15130	14062
	σ	54	0,4	203	199	1822	1734
	CV	6,28	15,0	4,87	4,89	12,04	12,33
	Δ				-2,32		-7,06
5 <i>C. elaeagnoides</i>	\bar{x}	996	2,0	3788	3763	14280	13826
	σ	97	0,5	187	184	1704	1715
	CV	9,73	23,5	4,94	4,89	11,93	12,41
	Δ				-0,66		-3,18
Cinco especies	\bar{x}	797	3,4	3713	3716	11175	10772
	σ	144	1,3	355	318	3286	2981
	CV	18,0	36,8	9,6	8,6	29,4	27,7
	Δ				+0,08		-3,61

ρ_{CH} = Densidad aparente; v_{oe} = Velocidad de onda; E_{oe} = Módulo dinámico; AT = Antes del tratamiento; DT = Después del tratamiento; \bar{x} = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación porcentual; Δm = Disminución de la masa porcentual; Δ = Variación de la velocidad de onda o del módulo de elasticidad porcentual.

Tabla I.- Resultados de las pruebas de reacción al fuego.

	SE	AE	SE	AE	P
ρ_{CH}	Antes del tratamiento				
<i>T. rosea</i>	-0,6286	-0,2683	-	-	0,0269*
<i>A. inermis</i>	-0,0980	-1,0218	-	-	0,0061*
<i>J. pyriformis</i>	-0,6014	-0,4579	-	-	0,0682
<i>Quercus</i> spp.	-4,5992†	6,2573†	-	-	0,0188*††
<i>C. elaeagnoides</i>	-1,3709	-0,9560	-	-	0,4082
Cinco especies	1,6854	-0,8123	-	-	0,1024
v_{oe}	Antes del tratamiento		Después del tratamiento		
<i>T. rosea</i>	0,0952	1,2311	-1,5579	-0,1798	0,0674
<i>A. inermis</i>	-1,4285	-0,6172	-1,9479	-0,6948	0,2093
<i>J. pyriformis</i>	0,0019	-0,8661	0,6468	-0,9343	0,9536
<i>Quercus</i> spp.	-1,5202	0,0267	-1,8999	0,5991	0,0483*
<i>C. elaeagnoides</i>	-1,8131	-0,4012	-1,7807	-0,4732	0,5775
Cinco especies	0,1269	-1,3281	-1,0427	-1,3310	0,9510
E_{oe}	Antes del tratamiento		Después del tratamiento		
<i>T. rosea</i>	2,2219†	3,1806†	0,4169	1,4011	0,8052††
<i>A. inermis</i>	-1,2486	-0,8449	-0,9146	-1,1643	0,8982
<i>J. pyriformis</i>	0,3661	-0,8206	0,6108	-0,7857	0,3103
<i>Quercus</i> spp.	-0,8646	0,2479	-1,5596	0,7010	0,0144*
<i>C. elaeagnoides</i>	0,6140	-1,2071	0,5927	-1,4438	0,2707
Cinco especies	2,5202†	-2,9328†	2,5543†	-2,8493†	0,2960††

ρ_{CH} = Densidad aparente; v_{oe} = Velocidad de onda; E_{oe} = Módulo dinámico; SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; P = Valor calculado; * $P < 0,05$ existe una diferencia estadísticamente significativa con un nivel del 95% de confianza; † = Valor fuera del intervalo [-2, +2], indica desviación significativa de la normalidad; †† = Prueba de *Kruskal-Wallis* de diferencia de medianas.

Tabla II.- Resultados del experimento 1: pruebas de normalidad, anova y *Kruskal-Wallis*.

4. Conclusiones.- Los resultados muestran tendencias generales para el conjunto de todas las probetas de las especies *T. rosea*, *A. inermis*, *J. pyriformis*, *Quercus* spp. y *C. elaeagnoides*. Sin embargo, las magnitudes de las mediciones son particulares para cada especie.

Las magnitudes de la velocidad de onda y del módulo dinámico, después de su exposición al fuego, disminuyen respecto a las correspondientes a antes del tratamiento.

Los parámetros velocidad de onda y módulo dinámico de la madera, antes de ser expuesta al fuego, pueden predecir estos mismos parámetros después del tratamiento.

La masa de una pequeña pieza de madera expuesta al fuego, disminuye proporcionalmente a la magnitud de su densidad aparente.

La velocidad de onda y el módulo dinámico disminuyen proporcionalmente si la masa de las probetas se reduce como consecuencia de su exposición al fuego.

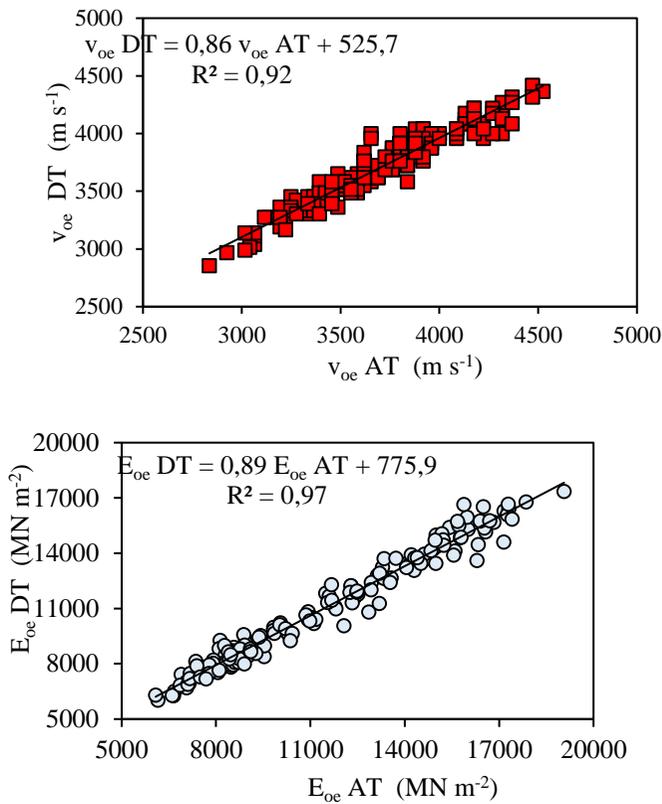


Figura VI.- Resultados del experimento 2: regresiones lineales ($y = a x \pm b$) y sus coeficientes de determinación (R^2), entre: la densidad aparente (ρ_{CH}), la velocidad de onda (v_{oe}) y el módulo dinámico (E_{oe}); antes del tratamiento (AT) y después del tratamiento (DT), para 175 probetas de las cinco especies estudiadas. Por razones de escala, no se visualizan los 175 puntos experimentales.

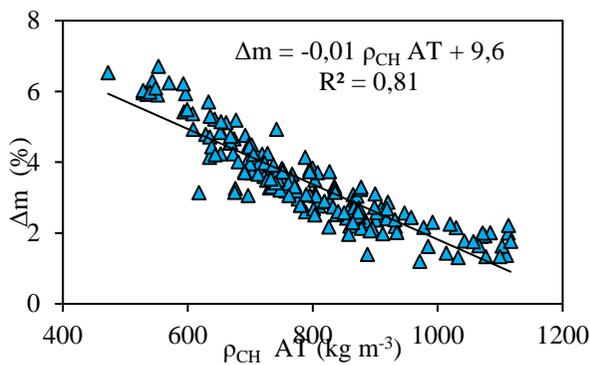


Figura VII.- Resultados del experimento tres: regresión lineal ($y = a x \pm b$) y su coeficiente de determinación (R^2), entre la disminución de la masa (Δm) y la densidad aparente antes del tratamiento ($\rho_{CH} AT$), para 175 probetas de las cinco especies estudiadas. Por razones de escala, no se visualizan los 175 puntos experimentales.

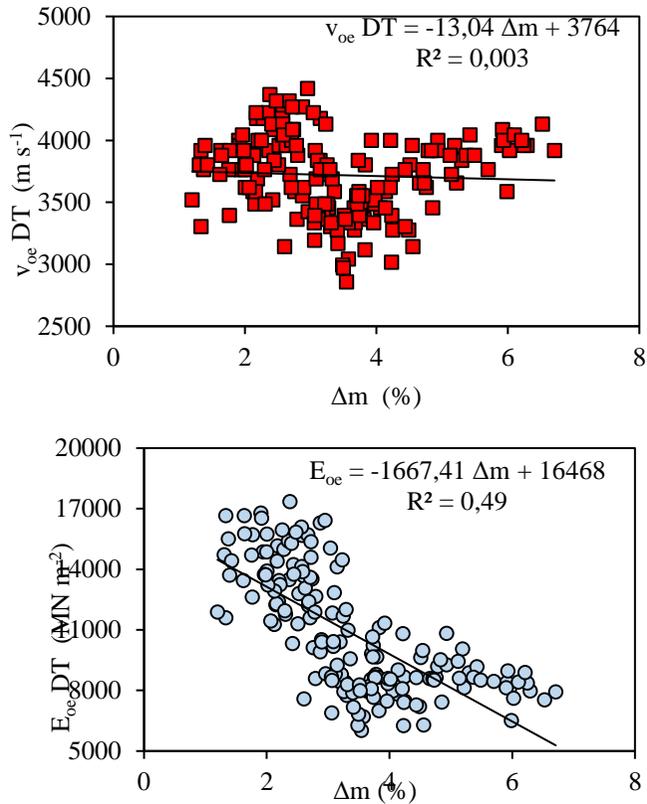


Figura VIII.- Resultados del experimento cuatro: regresiones lineales ($y = a x \pm b$) y sus coeficientes de determinación (R^2), entre la velocidad de onda después del tratamiento ($v_{oe} DT$), el módulo dinámico después del tratamiento ($E_{oe} DT$) y la variación la de masa (Δm); para las 175 probetas de las cinco especies estudiadas. Por razones de escala, no se visualizan los 175 puntos experimentales.



Figura IX.- Probetas después de su exposición al fuego. La posición de las especies de abajo hacia arriba corresponde a la numeración de la Tabla I.

Agradecimientos

A los alumnos de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, por su participación en los trabajos de laboratorio. La investigación estuvo patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica de la misma Universidad.

Referencias

- [1] Lowden, L. A., y Hull, T. R. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews*. 2013. 2(1), 1-19.
- [2] Williamson, G. B., y Wiemann, M. C. Measuring wood specific gravity. *American Journal of Botany*. 2010. 97(3), 519-524.
- [3] Molinski, W., Roszyk, E., y Puszyński, J. Variation in Mechanical Properties within Individual Annual Rings of the Resonance Spruce Wood [*Picea abies* (L.) Karst.]. *Drvna Industrija*. 2014. 65(3), 215-223.
- [4] Hugi, E., Wuersch, M., Risi, W., y Wakili, K. G. Correlation between charring rate and oxygen permeability for 12 different wood species. *Journal of Wood Science*. 2007. 53(1), 71-75.
- [5] Král, P., Klímek, P., Mishra, P. K., Wimmer, R., y Děcký, D. Specific modulus and density profile as characterization criteria of prefabricated wood composite materials. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2015. 63(2), 433-438.
- [6] De Cademartori, P. H. G., Missio, A. L., Gatto, D. A., y Beltrame, R. Prediction of the modulus of elasticity of *Eucalyptus grandis* through two nondestructive techniques. *Floresta e Ambiente*. 2014. 21(3), 369-375.
- [7] Stapel, P., y van de Kuilen, J. G. Efficiency of visual strength grading of timber with respect to origin, species, cross section, and grading rules: a critical evaluation of the common standards. *Holzforschung*. 2014. 68(2), 203-2016.
- [8] Clancy, P., y Young, S. A. Full scale experiments for evaluating theoretical fire wall models. *Fire and Materials*. 2004. 28(6), 431-458.
- [9] Cai, N. y Chow, W. Numerical studies on heat release rate in a room fire burning wood and liquid fuel. *Building Simulation*. 2014. 7(5), 511-524.
- [10] Njankouo, J. M., Dotreppe, J. C., y Franssen, J. M. Fire resistance of timbers from tropical countries and comparison of experimental charring rates with various models. *Construction and Building Materials*. 2005. 19(5), 376-386.
- [11] Babrauskas, V. Charring rate of wood as a tool for fire investigations. *Fire Safety Journal*. 2005. 40(6), 528-554.
- [12] White, H. R. Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Timber Members. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 2008. Society of Fire Protection Engineers.
- [13] Young, S. A., y Clancy, P. Compression mechanical properties of wood at temperatures simulating fire conditions. *Fire and Materials*. 2001. 25(3), 83-93.
- [14] Chung, Y. Comparison of combustion properties of native wood species used for fire pots in Korea. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2010. 16(1), 15-19.
- [15] Xu, Q. F., Chen, L. Z., Harries, K. A., Zhang, F. W., Liu, Q., y Feng, J. H. Combustion and charring properties of five common constructional wood species from cone calorimeter tests. *Construction and Building Materials*. 2015. 96, 416-427.
- [16] International Organization for Standardization. ISO 3129:2012. Wood. Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens. 2012. International Organization for Standardization.
- [17] American Society for Testing and Materials International. ASTM E119-14 Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. 2014. American Society for Testing and Materials International.
- [18] Nussbaum, R. M. The effect of low concentration fire retardant impregnations on wood charring rate and char yield. *Journal of Fire Sciences*. 1988. 6(4), 290-307.
- [19] Tran, H., y White, R. Burning rate of solid wood measured in a heat release rate calorimeter. *Fire and Materials*. 1992. 16(4), 197-206.
- [20] Walton, W., Putorti Jr., A. D., y Twilley, W. Santa Ana Fire Department Experiments at South Bristol Street. 1996. National Institute of Standards and Technology.

- [21] Lennon, T., Bullock, M., y Enjily, V. The Fire Resistance of Medium-Rise Timber Frame Buildings. BRE Report No. 79485-1. 2000. BRE.
- [22] Canadian Wood Council. Fire Safety Design in Buildings. 1996. Canadian Wood Council.
- [23] Babu, B. V. Biomass pyrolysis: a state of the art review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2008. 2(5), 393-414.
- [24] Ansell, M. P. Wood: A 45th anniversary review of JMS papers. Part 2. Wood modification, fire resistance, carbonization, wood–cement and wood–polymer composites. *Journal of Materials Science*. 2012. 47(2), 583-598.
- [25] Aseeva, R., Serkov, B., y Sivenkov, A. Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings. 2014. Springer.
- [26] Sotomayor Castellanos, J. R., y Carrillo Gómez, M. I. Comportamiento al fuego de cinco especies mexicanas. Estudio comparativo. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 2017. 13(2), 4-38.
- [27] Senalik, C. A., Schueneman, G. y Ross, R. J. Ultrasonic-based nondestructive evaluation methods for wood: a primer and historical review. 2014. Forest Products Laboratory.
- [28] Ross, R. J. Nondestructive Evaluation of Wood. 2015. Forest Products Society.
- [29] Cordero, J., y Boshier, D. H. Árboles de Centroamérica. 2003. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- [30] Tamarit Urias, J. C., y López Torres, J. L. Xilotecología de los principales árboles tropicales de México. 2007. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- [31] 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 se México e importadas. 2010. Comisión Nacional Forestal.
- [32] Sotomayor Castellanos, J. R. Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. 2015. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- [33] Friquin, K. Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber. *Fire and Materials*. 2011. 35(5), 303-327.
- [34] Rocha, M. A., y Landesmann, A. Combustion properties of Brazilian natural wood species. *Fire and Materials*. 2016. 40(2), 219-228.
- [35] International Organization for Standardization. ISO 13061-2:2014. Wood. Determination of density for physical and mechanical tests. 2014b. International Organization for Standardization.
- [36] International Organization for Standardization. ISO 13061-1:2014. Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests. 2014a. International Organization for Standardization.
- [37] Osvaldová, L. M., Gašpercová, S., Mitrenga, P., y Osvald, A. The influence of density of test specimens on the quality assessment of retarding effects of fire retardants. *Wood research*. 2016. 61(1), 35-42.
- [38] Freitas, A. S., Gonçalves, J. C. y Del Menezzi, C. H. Tratamento Termomecânico e seus Efeitos nas Propriedades da Simarouba amara (Aubl.). *Floresta e Ambiente*. 2016. 23(4), 565-572.
- [39] Ponneth, D., Vasu, A. E., Easwaran, J. C., Mohandass, A., y Chauhan, S. S. Destructive and non-destructive evaluation of seven hardwoods and analysis of data correlation. *Holzforschung*. 2014. 68(8), 951-956.
- [40] Kukay, B., Barr, P. J., Friel, L., Coster, D. C., y Halling, M. W. Post-fire assessments, methodology, and equations for directly determining wood's residual flexural properties. *Forest Products Journal*. 2008. 58(1), 40-46.
- [41] Teles, R. F., Soares Del Menezzi, C., de Souza, F., y Rabelo de Souza, M. Nondestructive evaluation of a tropical hardwood: interrelationship between methods and physical-acoustical variables. *Ciência da Madeira*. 2011. 2(1), 1-14.

- [42] Garcia, R. A., Monteiro de Carvalho, A., de Figueiredo Latorraca, J. V., Monteiro de Matos, J. L., Santos, W. A., y de Medeiros Silva, R. F. Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. *Wood Science and Technology*. 2012. 46(1), 41-52.
- [43] Yu, Y., Liu, Y., Gong, M., Xu, Z., y Fang, Y. R&R study of using a stress wave timer to measure the elastic modulus of structural dimension lumber. 2017. *Measurement*. 95, 293-296.