

Caracterización en flexión estática de madera plastificada de *Quercus scytophylla*

Javier Ramón Sotomayor Castellanos, Mariana Ramírez Pérez y Joel Benancio Olguín Cerón

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH

Resumen

Con el objetivo de encontrar mejoras tecnológicas para maderas con usos poco diversificados, se estudió el efecto de un tratamiento higro-térmico con vapor a 95 °C durante 60 minutos en madera de *Quercus scytophylla*. Se determinaron la densidad y los módulos de elasticidad y de ruptura en pruebas de flexión estática. Se compararon los resultados entre 30 probetas sin tratamiento, 30 con tratamiento y 35 con tratamiento y curvadas. La densidad de la madera no varió significativamente debido al tratamiento. Sin embargo, los módulos de elasticidad y de ruptura disminuyeron. Este resultado fue más evidente entre las probetas rectas, sin y con tratamiento y las probetas curvas. Se observó igualmente que la configuración de las pruebas de flexión estática influyó de manera importante en los resultados.

Palabras clave: Módulo de elasticidad, Módulo de ruptura, Curvado de madera, Encino.

Abstract

With the objective of finding technological improvements for woods with poorly diversified uses, the effect of a hygro-thermal treatment with steam at 95 °C during 60 minutes was studied for *Quercus scytophylla* wood. The density and the moduli of elasticity and of rupture were determined by static bending tests. The results from 30 speci-

mens without treatment, 30 with treatment and 35 with treatment and curved, were compared. The wood density did not change significantly due to the treatment. However, the moduli of elasticity and of rupture decreased. This result was more evident among the specimens that were straight with and without treatment and curved specimens. Likewise, it was observed that the configuration of static bending tests considerably influenced the results.

Key words: Modulus of elasticity, Modulus of rupture, Wood bending, Oak.

Introducción

La madera sólida es un material natural con el cual se elaboran productos que tienen un empleo restringido como material de ingeniería. Algunas de sus limitantes son: su falta de uniformidad estructural, sus dimensiones establecidas por la morfología del árbol de donde la pieza de madera fue extraída, su variabilidad y heterogeneidad en sus características físicas, y finalmente, su carácter higroscópico (Sandberg y Parviz, 2007). Con el propósito de mejorar la resistencia al Intemperismo, la estabilidad dimensional y la resistencia mecánica en flexión, necesarias para el diseño y el cálculo de productos y estructuras de madera, existen tratamientos para la madera con temperaturas menores a los 190 °C, durante periodos variables de tiempo y en presencia de vapor o de agua líquida. Estas tecnologías son conocidas como tratamientos higro-térmicos (Boonstra, 2008).

La madera es un material termo-elástico: cuando la temperatura de la madera aumenta, su módulo de elasticidad disminuye. Esta manifestación tiene un carácter temporal. Es decir, si la madera recupera su temperatura inicial, el módulo de elasticidad recobra su valor anterior. Este hecho se observa preferentemente en un intervalo de temperaturas de 0 a 120 °C. La madera es también un material higro-elástico: si el contenido de humedad de la madera se incrementa, el módulo de elasticidad disminuye. Este fenómeno es igualmente de efecto momentáneo y temporal. Es decir, si el contenido de humedad disminuye, el valor del módulo de elasticidad se incrementa. Este comportamiento se observa principalmente en la madera, cuando su contenido de humedad varía desde el punto de saturación de la fibra (alrededor de 32%) hasta su estado anhidro. Por otra parte, la madera es un material con comportamiento plástico: si la madera es deformada más allá del límite elástico, la deformación geométrica es permanente. Estas tres propiedades de la madera pueden ser aprovechadas en un mismo procedimiento: el plastificado mecánico, aplicando un ingrediente hídrico combinado con uno térmico. A este proceso se le denomina plastificado higro-térmico de la madera (Olguín-Cerón y Sotomayor-Castellanos, 2013).

Autores como Oltean *et al.* (2007), Estevez y Pereira (2009), Ansell (2012) y Sandberg *et al.* (2013) han discutido ampliamente diferentes tratamientos higro-térmicos, sus ventajas tecnológicas, así como sus efectos en los módulos de elasticidad y de ruptura de la madera. La revisión de estos trabajos sugiere que los resultados y conclusiones son particulares de acuerdo con la madera en estudio, el tiempo, los programas y las magnitudes de las temperaturas aplicadas, así como de la aplicación de vapor y/o presión durante el tratamien-

to. Sin embargo, estos investigadores han demostrado la utilidad de los tratamientos higro-térmicos en la modificación de las características tecnológicas del material, como la disminución de la higocontracción y de la higoexpansión, resultando en una mejora de la estabilidad dimensional de la madera.

Por otra parte, en México existen maderas que tienen pocas aplicaciones industriales. Por ejemplo, la madera de *Quercus scytophylla*, especie endémica del estado de Michoacán, la cual presenta un potencial importante como material para la elaboración de productos de madera (Bello González y Labat, 1987). Sus características anatómicas, físicas y mecánicas, fueron estudiadas por Pérez Olvera y Dávalos Sotelo (2008). Estas investigaciones indican que la madera de *Q. scytophylla* está caracterizada tecnológicamente. Sin embargo, su empleo es limitado. Entre otros usos, este encino es aprovechado como astilla para la fabricación de tableros aglomerados y para la manufactura de cabos de herramientas. De los argumentos anteriores, se plantea la necesidad de un estudio de las características mecánicas de la madera de *Q. scytophylla* cuyos usos actualmente son poco diversificados, para que los resultados puedan contribuir a su mejor aprovechamiento.

En México, el tratamiento de higro-termo plastificado aplicado a la madera, ha sido ensayado anteriormente por Olguín-Cerón y Sotomayor-Castellanos (2013), y el estudio de su módulo de elasticidad por métodos no destructivos por Sotomayor-Castellanos y Olguín-Cerón (2014). La presente investigación es continuación de estos trabajos y se limita específicamente a ensayos de madera plastificada en flexión estática.

La hipótesis de esta investigación es que el tratamiento higro-térmico con vapor a una temperatura de 95 °C aplicado durante 60 minutos, modifica de manera positiva los valores promedio de la densidad, del módulo de elasticidad y del módulo de ruptura de la madera de *Q. scytophylla*.

Con el objeto de comprobar experimentalmente esta hipótesis, se propone como objetivo de investigación determinar y analizar para tres grupos de probetas de madera de *Q. scytophylla*: sin tratamiento higro-térmico, con tratamiento y curvas con tratamiento, los parámetros densidad, módulo de elasticidad y módulo de ruptura en flexión estática.

Materiales y métodos

Diseño experimental

Se diseñó un experimento siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez-Pulido y de la Vara-Salazar (2012), que consistió en la comparación de medias de los tres parámetros medidos: densidad básica (ρ_0), módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) para cada uno de los tres tipos de probetas: madera sin tratamiento (ST), madera con tratamiento (CT) y madera curvada (CU). La Figura 1 presenta el diagrama conceptual del diseño experimental. Para las probetas sin tratamiento y con tratamiento, se efectuaron pruebas con 30 réplicas y para las probetas curvas se ensayaron 35 réplicas.

Materiales

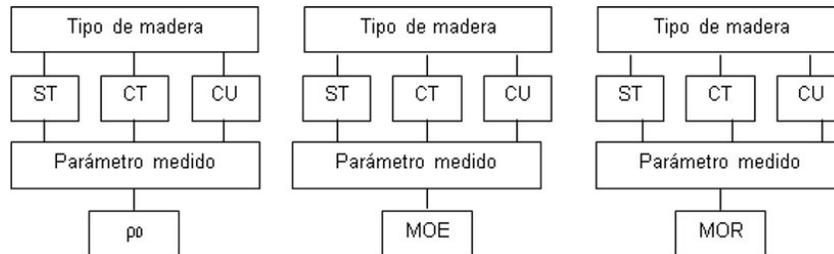


Figura 1. Diagrama del diseño experimental. ST = Probetas sin tratamiento; CT = Probetas con tratamiento; CU = Probetas curvas; ρ_0 = Densidad básica; MOE = Módulo de elasticidad; MOR = Módulo de ruptura.

El material experimental y el proceso de preparación de las probetas se realizaron de acuerdo con lo descrito por Olguín-Cerón y Sotomayor-Castellanos (2013) y Sotomayor-Castellanos y Olguín-Cerón (2014).

Se cortaron 2 trozas de 1.1 m de largo y de 45 cm de diámetro de un árbol de la especie *Q. scytophylla*. De estas trozas, se dimensionaron listones orientados radial, tangencial y longitudinalmente. Las dimensiones de los listones fueron de 1.1 m de largo, y 19 mm por 19 mm en promedio de sección transversal. Un grupo de 20 listones se destinó para las pruebas de rigidez: 10 listones sin tratamiento y 10 listones suavizados con tratamiento.

Plastificado de la madera

El proceso de plastificado de la madera consistió de cinco operaciones: 1) Hidratado: Los listones se mantuvieron en estado de humedad superior al punto de saturación de la fibra (32 %) durante 30 días, con el objeto de uniformizar el contenido de humedad de la madera; 2) Suavizado: este tratamiento constó con tres periodos de temperatura (T): el primero de 15 minutos, para calentar agua en el generador de vapor; el segundo de 30 minutos para elevar la temperatura al interior de la cámara de 23 °C, hasta la temperatura de suavizado de 98 °C, elevando la temperatura de la madera a 92 °C. El tercer periodo, de 50 minutos, mantuvo estables las temperaturas al interior de la cámara de suavizado (98 °C) y al interior de la madera (92 °C). Las temperaturas de esta operación fueron monitoreadas empleando dos termómetros. El primero de ellos, de carátula y de vástago para registrar la temperatura del interior de la cámara. El segundo fue un termómetro digital, que se colocó al interior de una probeta testigo de sección similar a las del listón en proceso. La señal de este termómetro se registró con un sistema de adquisición y tratamiento de datos; 3) Deformado: una vez suavizados los listones, se procedió a curvarlos; 4) Solidificación: los listones curvados fueron colocados en un molde, con un radio de 400 mm, para mantener la deformación de la madera a una temperatura ambiente en laboratorio de 23 °C por 36 horas; 5) Estabilizado y acondicio-

nado: el contenido de humedad de la madera, se uniformizó durante 48 horas en condiciones de laboratorio (Temperatura (T) = 23 °C, humedad relativa del aire (HR) = 36%). El dispositivo de suavizado se presenta en la Figura 2.

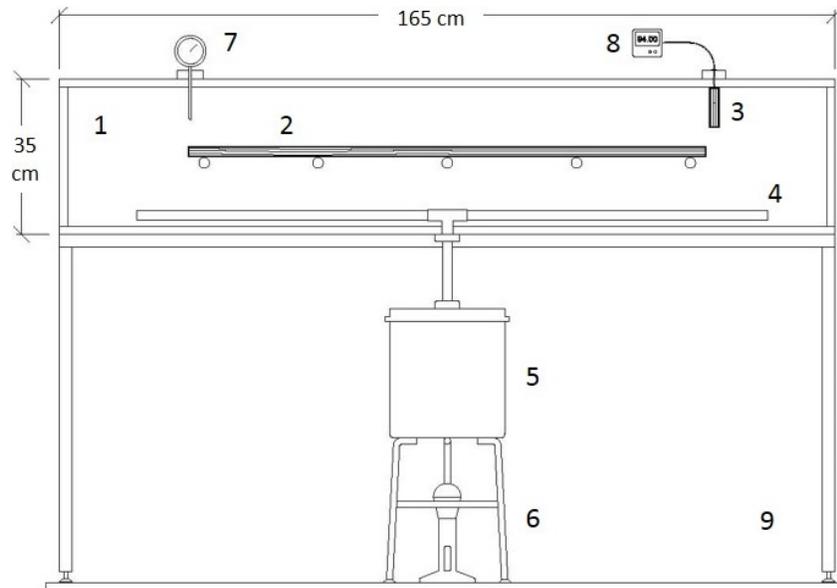


Figura 2. Dispositivo de suavizado. Leyenda: 1 Cámara de vaporización; 2 Listón; 3 Probeta testigo para temperatura interna de la madera; 4 Difusor de vapor; 5 Generador de vapor; 6 Fuente de calor; 7 Termómetro de temperatura de la cámara; 8 Sensor de temperatura al interior de la probeta; 9 Estructura soporte de cámara de vaporización. Adaptado de Olguín-Cerón y Sotomayor-Castellanos (2013).

Preparación de las probetas

Una vez suavizados y curvados los listones, se procedió a elaborar las probetas destinadas para las pruebas de flexión estática. Se recortaron 30 probetas, identificadas como probetas rectas sin tratamiento; 30 probetas identificadas como probetas rectas suavizadas; y 35 probetas identificadas como probetas suavizadas, deformadas y plastificadas, llamadas también probetas curvas.

Las dimensiones de la sección transversal formada por el plano radial-tangencial, de las probetas fueron de 19 mm x 19 mm, en promedio. El largo de las probetas en la dirección longitudinal fue de 320 mm. El largo de las probetas curvas fue considerado en su eje medio geométrico, es decir de 31.74 mm en promedio y fue proporcional a su radio de curvatura de 400 mm.

Caracterización en flexión estática...

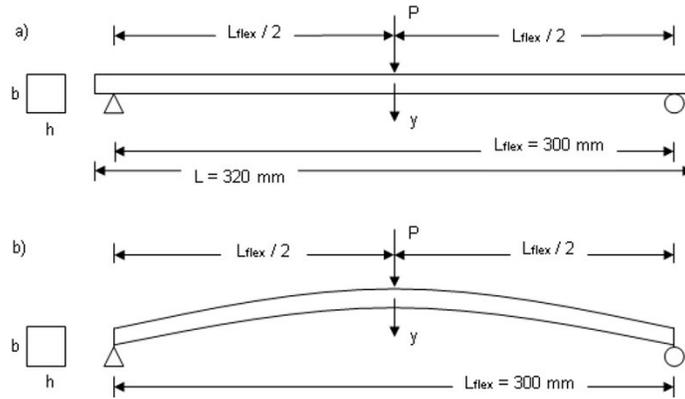


Figura 3. Configuración de las pruebas de flexión estática. a) Probetas rectas; b) Probetas curvas. L = Largo de la probeta; b = Peralte; h = base; L_{flex} = Claro de carga. P = Carga; y = Deformación.

Pruebas de flexión

Las pruebas de flexión fueron en tres puntos aplicando carga con velocidad casi estática (0.020 mm/s) en medio del claro entre apoyos en una máquina universal de pruebas *Tinius-Olsen*®. Se registraron la carga aplicada y la deformación de las probetas, en el centro del claro. A partir del diagrama carga-deformación, se calculó el módulo de elasticidad en el intervalo entre 300 N y 500 N, correspondiente a porcentajes entre 10 % y 20 % de la parte proporcional de la curva y entre 25% y 45% para el caso de las probetas curvas. Las pruebas fueron realizadas hasta lograr la falla total de las probetas, y se registró la carga correspondiente al momento de la ruptura. Las figuras 3 y 4 ilustran respectivamente la configuración y el montaje de las pruebas de flexión.

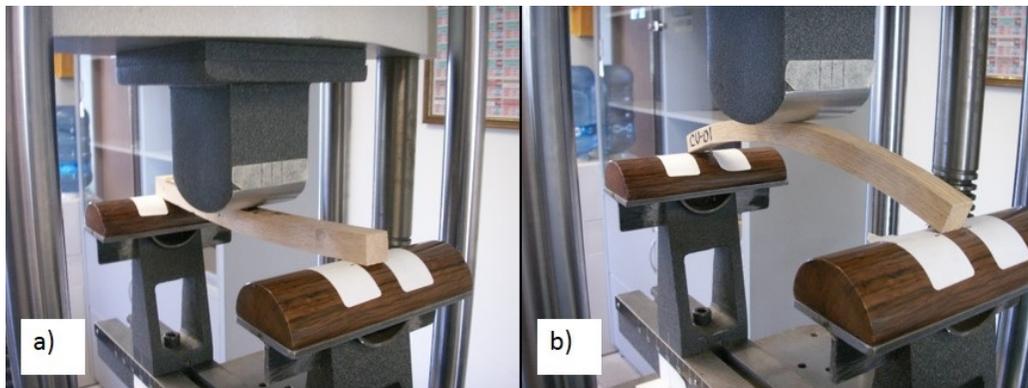


Figura 4. Pruebas de flexión. a) Probetas rectas; b) Probetas curvas.

Una vez realizadas las pruebas de flexión, se recortaron de un extremo de las probetas, porciones complementarias con dimensiones de 19 mm x 19 mm x 60 mm, para calcular la densidad básica y el contenido de humedad de la madera. Para obtener las mediciones en estado saturado, las probetas fueron mantenidas en agua durante 72 horas a una temperatura de 20 °C. Para medir su peso en estado anhidro, fueron secadas en un horno durante 72 horas con una temperatura de 103 °C.

Cálculos

El contenido de humedad de la madera se calculó con la fórmula:

$$CH = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_2} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

CH = Contenido de humedad (%)

W_1 = Peso de la probeta en estado saturado (kg)

W_2 = Peso de la probeta en estado anhidro (kg)

La densidad básica de la madera se calculó con la fórmula:

$$\rho_0 = \left(\frac{W_2}{V_1} \right) \quad (2)$$

Donde:

ρ_0 = Densidad básica (kg/m³)

W_2 = Peso de la probeta en estado anhidro (kg)

V_1 = Volumen de la probeta en estado saturado (m³)

El módulo de elasticidad se calculó con la fórmula:

$$MOE = \frac{P L_{flex}^3}{y 48I} \quad (3)$$

Donde:

MOE = Módulo de elasticidad (Pa)

P = Carga (N)

L_{flex} = Claro de carga (m)

y = Deformación (m)

I = Momento de inercia de la sección transversal (m⁴)

A partir de la ecuación del momento de flexión interno en la probeta:

$$M_{flex} = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (4)$$

Donde:

M_{flex} = Momento de flexión interno (N m)

E = Módulo de elasticidad (N/m²)

I = Momento de inercia de la sección transversal (m⁴)

Considerando el momento flexionante provocado por una carga concentrada en el centro del claro ante una sollicitación de flexión simple como:

$$M_{L_{flex}/2} = \frac{PL_{flex}}{4} \quad (5)$$

Donde:

$M_{L_{flex}/2}$ = Momento de flexión interno en medio del claro entre apoyos (N m)

P = Carga (N)

L_{flex} = Claro de carga (m)

El módulo de ruptura se calculó con la fórmula:

$$MOR = \frac{3 P_{rup} L_{flex}}{2 b h^2} \quad (6)$$

Donde:

MOR = Módulo de ruptura (Pa)

P_{rup} = Carga a la ruptura (N)

L_{flex} = Claro de carga (m)

b = Base de la probeta (m)

h = Altura de la probeta (m)

A partir de la ecuación del esfuerzo interno en la sección de la probeta:

$$\sigma_{flex} = \frac{M_{flex} y_c}{I} \quad (7)$$

Donde:

σ_{flex} = Esfuerzo interno (N/m²)

M_{flex} = Momento de flexión interno (N m)

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

y_c = Distancia del centroide de la sección transversal a la fibra extrema (m)

Análisis estadístico

Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa *Statgraphycs*®. Suponiendo una distribución normal con media cero ($\bar{x} = 0$) y varianza constante (σ^2) e independientes entre sí, se verificó la hipótesis nula $H_0: x_1 - x_2 = 0$, y se contrastó con la hipótesis alterna $H_A: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0$. El método empleado para discriminar entre las medias fue el procedimiento de *Fisher* con una diferencia mínima significativa de 95%.

Resultados y análisis

La Tabla 1 presenta los resultados de la densidad básica, contenido de humedad y módulos de elasticidad y de ruptura para los tres grupos de probetas ensayados. Para fines de análisis, los resultados se agruparon por el tipo de probetas. El anexo presenta los resultados del análisis estadístico.

Estadístico	Probetas sin tratamiento (ST)				Probetas con tratamiento (CT)				Probetas curvas (CU)			
	ρ_0 (kg/m^3)	CH (%)	MOE (MPa)	MOR (Pa)	ρ_0 (kg/m^3)	CH (%)	MOE (MPa)	MOR (Pa)	ρ_0 (kg/m^3)	CH (%)	MOE (MPa)	MOR (Pa)
\bar{x}	722	10.15	21,447	169	697	10.10	19,469	157	697	9.93	11,303	136
σ	25	0.46	2,353	10	35	0.54	2,733	17	27	0.74	1,141	8.81
CV	0.03	0.05	0.11	0.06	0.05	0.05	0.14	0.11	0.04	0.07	0.10	0.06

\bar{x} = Media aritmética; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación; ρ_0 = Densidad básica; CH = Contenido de humedad; MOE = Módulo de elasticidad; MOR = Módulo de ruptura.

Contenido de humedad

Los resultados de las pruebas de comparación de medias demostraron que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95 % de confianza entre el contenido de humedad de los tres grupos. De tal forma, que el contenido de humedad puede ser considerado uniforme y sin influencia en los resultados.

Densidad básica

Las pruebas de diferencias de medias demostraron que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los 3 grupos o variables con un nivel de confianza de 95 %. Los resultados de las pruebas de múltiples rangos, indicaron que los pares de las probetas con tratamiento y las curvas, presentan diferencias estadísticamente significativas con respecto a las probetas sin tratamiento.

En el anexo se presentan los resultados de las pruebas de diferencias de medias y de múltiples rangos, para los tres grupos de probetas estudiadas.

Las densidades para los tres grupos aquí examinados, son menores que las encontradas por Sotomayor-Castellanos y Olguín-Cerón (2014), en promedio 845 kg/m^3 , no obstante que se trata del mismo material experimental. Este resultado se puede explicar por el hecho de que las densidades calculadas por los autores mencionados se refieren a la densidad de la madera con un contenido de humedad al momento de los ensayos, el cual fue en promedio 11.5%, en comparación con el estado anhidro de la madera en el cual se calculó aquí la densidad básica.

De los argumentos anteriores, se deduce que debido al tratamiento higro-térmico aplicado a la madera su densidad disminuyó en 3.5%. Un resultado parecido ha sido encontrado anteriormente por Boonstra *et al.* (2007), quienes reportan una disminución hasta de un 13% en la densidad de *Pinus sylvestris* después de aplicar un tratamiento térmico de 165°C , durante 30 minutos, condiciones similares a las del tratamiento aquí aplicado. De acuerdo con Boonstra (2008), las principales razones por las cuales la densidad disminuye después de un tratamiento térmico son, por una parte, la degradación de los componentes de la madera, principalmente las hemicelulosas, en productos volátiles, los cuales se evaporan durante el tratamiento, así como la evaporación de sustancias extraíbles. Por otra parte, también puede provocar la disminución en el contenido de humedad en equilibrio, dado que la madera tratada térmicamente es menos higroscópica.

Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad obtenido con las probetas rectas, sin y con tratamiento, resultó en valores proporcionales a los presentados por Pérez-Olvera y Dávalos-Sotelo (2008): $12,718 \text{ MPa}$, para una densidad básica de 637 kg/m^3 , esto es 12% menor a la determinada en esta investigación. En contraste, el módulo de elasticidad para las probetas curvas fue más bajo en 47% y 42% comparativamente con las probetas rectas, sin y con tratamiento, respectivamente. Una posible explicación a este resultado es el hecho de que, aunque las configuraciones de los ensayos fueron similares, las geometrías de las probetas no lo fueron. En el caso de las probetas curvas, el plastificado de la madera introdujo esfuerzos internos de flexión, compresión y cortantes que excedieron el límite de proporcionalidad, durante el proceso para curvar las probetas, que pudo debilitar su estructura interna y disminuir su capacidad elástica para soportar cargas en flexión estática.

La Figura 5 ilustra el comportamiento promedio de las probetas durante las pruebas de flexión, son los diagramas carga-deformación de tres probetas con densidad y respuestas mecánicas semejantes, y para fines de análisis, se consideraron equivalentes. Los diagramas carga-deformación de las probetas rectas, sin y con tratamiento, son parecidos. Sin

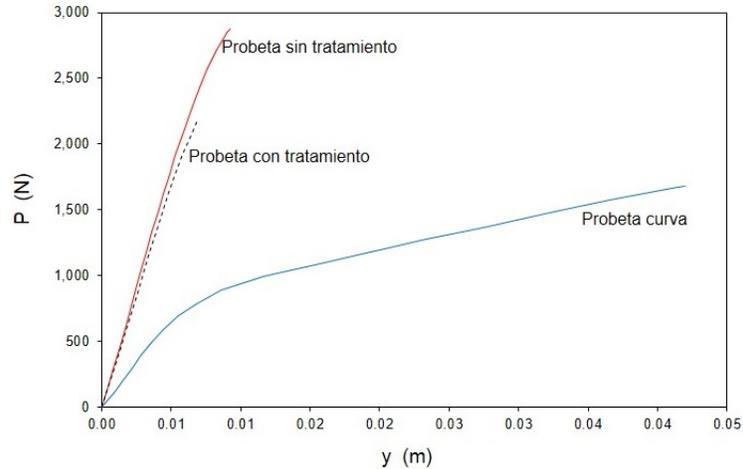


Figura 5. Diagramas carga (P)-deformación (y) de probetas sin tratamiento, con tratamiento y curvas.

embargo, el diagrama correspondiente a las probetas curvas presenta un intervalo lineal menor del campo elástico con diferente pendiente y un dominio plástico que va mucho más allá del de las probetas rectas. En contraste, los resultados obtenidos por Sotomayor-Caste-

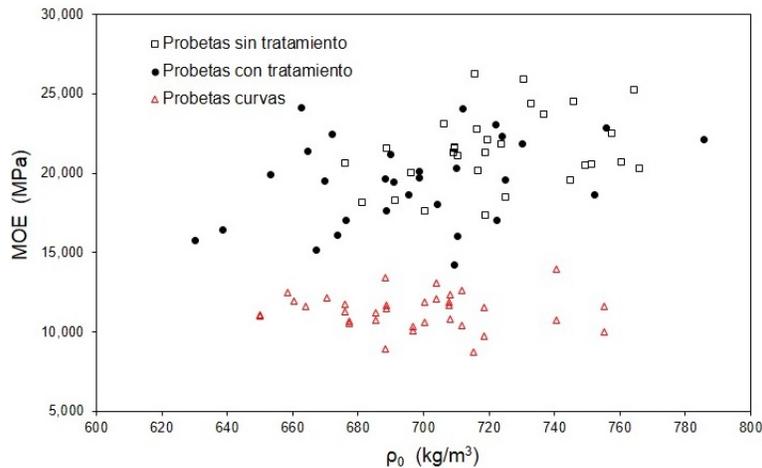


Figura 6. Distribución del módulo de elasticidad (MOE) en función de la densidad básica (ρ_0).

Ilanos y Olguín-Cerón (2014) demostraron que para el fenómeno de transmisión de ondas de esfuerzo, el tratamiento higro-térmico y el curvado de las probetas no influyó en los valo-

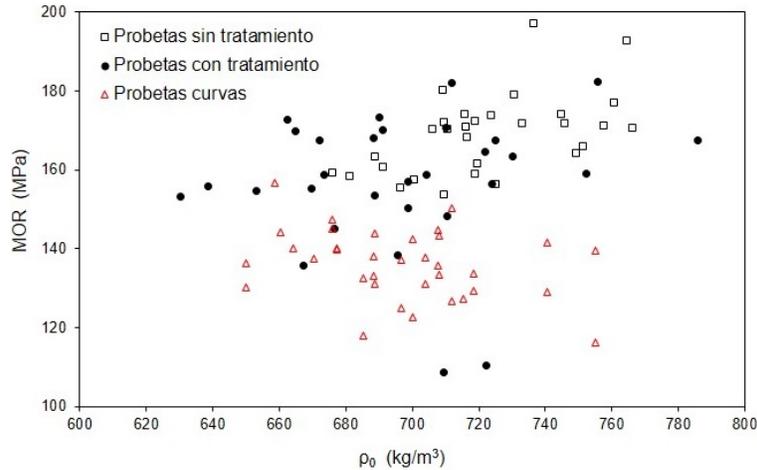


Figura 7. Distribución del módulo de ruptura (MOR) en función de la densidad básica (ρ_0).

res del módulo de elasticidad en la dirección longitudinal, determinado por métodos no destructivos.

La Figura 6 presenta la distribución del módulo de elasticidad en función de la densidad básica. Bien que son notorios los valores bajos de los módulos de elasticidad de las probetas curvas, no es evidente el análisis entre todos los datos. Los resultados de pruebas de comparación de medias entre diferentes grupos de probetas derivaron en los siguientes razonamientos.

El valor- P de la prueba- F , con un nivel del 95% de confianza, resultó ser menor que 0.05, lo que implica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los tres grupos de probetas estudiados. Las pruebas de múltiples rangos indicaron que los pares de las muestras también presentaron diferencias estadísticamente significativas. En el anexo, se identifican los grupos homogéneos CU (probetas curvas) CT (probetas con tratamiento) y SN (probetas sin tratamiento) para las variables de respuesta densidad básica, módulo de elasticidad y módulo de ruptura, todas con diferencias estadísticamente significativas, con excepción de la densidad básica de las probetas sin tratamiento. En consecuencia, hay un riesgo del 5% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Módulo de ruptura

La magnitud de los valores promedio del módulo de ruptura de los tres grupos de probetas, es similar a los encontrados por Korkut *et al.* (2010), quienes sometieron madera de *Quercus petraea* con densidad de 710 kg/m^3 , durante dos horas, a una temperatura de $120 \text{ }^\circ\text{C}$, condiciones similares a las utilizadas en esta investigación. Igualmente, estos investigadores encontraron una reducción ocasionada por el tratamiento higro-térmico de 5.2%, porcentaje similar a la reducción encontrada en esta investigación.

Para el caso de las probetas curvas, la carga a la ruptura promedio fue menor que la obtenida con las probetas rectas (Figura 5). Sin embargo, la deformación presentada para llegar a la ruptura fue más grande. Este comportamiento aparente de carácter plástico es ocasionado por la geometría curva de las probetas. En efecto, durante el proceso de carga, estas probetas plastificadas requirieron ser deformadas en la dirección perpendicular a su arco (Figuras 2 y 3), fenómeno que se traduce en el diagrama carga-deformación en un dominio plástico más amplio en comparación con el de las probetas rectas sin y con tratamiento.

La diferencia porcentual entre los valores promedio del módulo de ruptura es de 19.5% entre el grupo de probetas rectas sin tratamiento y el de probetas con tratamiento, siendo menor para el caso de la madera tratada. Igualmente, el módulo de ruptura fue menor en un 13.4% entre las probetas rectas con tratamiento y las curvas (Tabla 1). Sin embargo, la Figura 7 indica que no hay una diferencia clara entre los valores de cada probeta, para los tres grupos estudiados. Las pruebas de comparación de medias para un nivel de confianza del 95% y las pruebas de múltiples rangos demostraron que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los tres grupos de probetas estudiados.

Conclusiones

El tratamiento higro-térmico con temperatura de $95 \text{ }^\circ\text{C}$, aplicado durante 60 minutos, resultó en la disminución de la densidad de la madera de *Q. scytophylla* en un 3.5%.

El tratamiento aplicado para plastificar la madera de *Q. scytophylla* disminuyó significativamente el módulo de elasticidad, en 47% y 42%, respectivamente para las probetas rectas sin tratamiento y con tratamiento.

Caso particular son las probetas curvas plastificadas, en las cuales el módulo de elasticidad calculado es un parámetro aparente. Pruebas adicionales son necesarias para esclarecer este comportamiento.

El tratamiento higro-térmico disminuyó el módulo de ruptura de la madera de *Q. Scytophylla* en un 19.5% entre el grupo de probetas rectas sin tratamiento y el de las probetas con tratamiento y en un 13.4% entre las probetas rectas con tratamiento y las curvas.

Agradecimientos

La investigación estuvo patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica, UMSNH.

Referencias

- Ansell, M. P. 2012. 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*. 47:583-598.
- Bello González, M. A.; Labat, J. N. 1987. Los encinos (*Quercus*) del Estado de Michoacán, México. Collection Etudes Mésoaméricaines. Centre d'Etudes Mexicaines et Centraméricaines. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. México. 93 p.
- Boonstra, M. J. 2008. A two-stage thermal modification of Wood. Ph.D. Dissertation in supervision. Ghent University and Université Henry Poincaré-Nancy 1. 297 p.
- Boonstra, M. J.; Van Acker, J.; Tjeerdsma, B. F.; Kegel, E. V. 2007. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. *Annals of Forest Science*. 64(7):679-690.
- Estevez, B. M.; Pereira, H. M. 2009. Wood Modification by Heat Treatment: A Review. *Biore-sources*. 4(1): 370-404.
- Gutiérrez Pulido, H.; de la Vara Salazar, R. 2012. 3ª Edición. Análisis y diseño de experimentos. Mc Graw Hill. México. 489 p.
- Korkut, S.; Karayilmazlar, S.; Hiziroglu, S.; Sanli, T. 2010. Some of the Properties of Heat-Treated Sessile Oak (*Quercus petraea*). *Forest Products Journal*. 60(5):473-480.
- Olguín-Cerón, J. B.; Sotomayor-Castellanos, J. R. 2013. Plastificado higro-térmico de madera de *Quercus scytophylla*. *Investigación y Ciencia*. 59:25-33.
- Oltean, L.; Teischinger, A.; Hansmann, C. 2007. Influence of Temperature on Cracking and Mechanical Properties of Wood during Wood Drying – A Review. *BioResources*. 2(4):789-811.
- Pérez Olvera, C. P.; Dávalos Sotelo, R. 2008. Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México. *Madera y Bosques*. 14(3):43-80.
- Sandberg, D.; Haller, P.; Navi, P. 2013. Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science and Engineering*. 8(1):64-88.

Sandberg, D.; Parviz, N. 2007. Introduction to Thermo-hydro-mechanical (THM) Wood Processing. Report No. 30. School of Technology and Design. Växjö University. Sweden. 167 p.

Sotomayor-Castellanos, J. R.; Olgúin-Cerón, J. B. 2014. Caracterización mecánica por ondas de esfuerzo de madera plastificada de *Quercus scytophylla*. *Investigación y Ciencia*. 61:34-42.

Anexo. Resultados del análisis estadístico.

Densidad

Tabla ANOVA					
Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	13,219.7	2	6,609.86	8.00	0.0006
Intra grupos	75,968.1	92	825.74		
Total	89,187.8	94			

Pruebas de múltiple Rangos			
	Casos	Media	Grupos Homogéneos
CU ρ_0	35	696.68	Sí
CT ρ_0	30	697.43	Sí
SN ρ_0	30	722.40	No
Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
SN ρ_0 - CT ρ_0	*	24.97	14.74
SN ρ_0 - CU ρ_0	*	25.71	14.20
CT ρ_0 - CU ρ_0		0.75	14.20

Módulo de elasticidad

Tabla ANOVA					
Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1.91148×10^9	2	9.55738×10^8	208.65	<0.0001
Intra grupos	4.21407×10^8	92	4.58051×10^6		
Total	2.33288×10^9	94			

Pruebas de múltiple Rangos			
	Casos	Media	Grupos Homogéneos
CU MOE	35	11,302.6	No
CT MOE	30	19,469.0	No
SN MOE	30	21,446.6	No
Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
SN MOE - CT MOE	*	1,977.6	1,097.51
SN MOE - CU MOE	*	10,144.0	1,057.59
CT MOE - CU MOE	*	8,166.4	1,057.59

Módulo de ruptura

Tabla ANOVA					
Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	18,524.7	2	9,262.33	60.48	<0.0001
Intra grupos	14,090.0	92	153.15		
Total	32,614.7	94			

Caracterización en flexión estática...

Pruebas de múltiple Rangos			
	Casos	Media	Grupos Homogéneos
CU MOR	35	136.04	No
CT MOR	30	157.30	No
SN MOR	30	169.24	No
Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
SN MOR - CT MOR	*	11.94	6.35
SN MOR - CU MOR	*	33.20	6.12
CT MOR - CU MOR	*	21.25	6.12

* indica una diferencia significativa; GL = Grados de libertad; SN = Probetas sin tratamiento; CT = Probetas con tratamiento; CU = Probetas curvas; ρ_0 = Densidad básica; MOE = Módulo de elasticidad; MOR = Módulo de ruptura.

Fecha de recepción: 13 de marzo de 2014.

Fecha de Aprobación: 9 de junio de 2014.