

## Plastificado higro-térmico de madera de *Quercus scytophylla*

Higro-thermal plasticized of *Quercus scytophylla* wood

Joel Benancio Olguín Cerón<sup>1</sup>  
Javier Ramón Sotomayor Castellanos<sup>1\*</sup>

Olguín Cerón, J. B.; Sotomayor Castellanos, J. R., Plastificado higro-térmico de madera de *Quercus scytophylla*. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. 59, 24-32, 2013.

### RESUMEN

Se plastificó madera de *Quercus scytophylla* empleando calor transmitido por vapor a baja temperatura y baja presión en condición higro-saturada de la madera. La estrategia experimental demostró que la madera sólida de *Q. scytophylla* puede ser plastificada con un tratamiento higro-térmico. Se determinaron densidad, contenido de humedad y módulos de elasticidad en flexión para listones de madera sin tratamiento y con tratamiento. La rigidez en flexión de listones de madera sólida de *Q. scytophylla* disminuyó 48% por el efecto del tratamiento higro-térmico.

### ABSTRACT

*Quercus scytophylla* wood was plasticized with heat transmitted by low temperature and pressure steam for an higro-thermal state of wood. The experimental strategy showed that *Q. scytophylla* solid wood can be plasticized by higro-thermal treatment. Density, moisture content and bending modules of elasticity were determined for wooden bars with and without treatment. Ben-

**Palabras clave:** Densidad, contenido de humedad, calor, flexión, módulo de elasticidad, madera de *Quercus scytophylla*.

**Keywords:** Density, moisture content, heat, bending, modulus of elasticity, *Quercus scytophylla* wood.

Recibido: 16 de Enero de 2013, aceptado: 4 de Octubre de 2013

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

\* Autor para correspondencia: madera999@yahoo.com

ding rigidity of *Q. scytophylla* wood bars decreased in 48% by the higro-thermal treatment effect.

### INTRODUCCIÓN

La madera del género *Quercus*, endémica del Estado de Michoacán, presenta un potencial importante como material para la elaboración de productos de madera. Los resultados de estudios tecnológicos de estas maderas pueden proporcionar a la industria de la transformación, alternativas para su aprovechamiento racional. Igualmente, la caracterización mecánica de la madera de *Quercus* spp. aporta datos tecnológicos para su empleo adecuado como material de Ingeniería.

La madera es un material termo-elástico: cuando la temperatura interna de la madera aumenta, su módulo de elasticidad disminuye. Esta manifestación tiene un carácter instantáneo y temporal; es decir, si la madera recobra su temperatura inicial, el módulo de elasticidad recobra su valor anterior. Este hecho se observa preferentemente en un rango 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 decrece.

Este fenómeno es igualmente de efecto momentáneo y temporal; es decir, cuando la madera recobra su contenido de humedad inicial, el valor del módulo de elasticidad se recupera. Este síntoma se verifica principalmente en el dominio higroscópico de la madera, que va de su esta-

do anhidro a 32% en su contenido de humedad. Por otra parte, la madera es un material plástico: si la madera es deformada más allá del dominio elástico, se observa en ella una condición de deformación geométrica permanente, es decir, un estado plástico. Estas tres propiedades de la madera pueden ser incorporadas en un mismo procedimiento: el plastificado mecánico, en presencia de un ingrediente hídrico, combinado con uno térmico. A este proceso se le denomina plastificado higró-térmico de la madera.

Este trabajo parte de la siguiente hipótesis: Si durante un periodo de tiempo, se incrementa la temperatura en la madera con un contenido de humedad superior al punto de saturación de la fibra, la madera puede deformarse empleando un agente mecánico. Para que esta geometría sea de carácter permanente, es necesario, posteriormente, estabilizar la madera a una temperatura ambiente y a un contenido de humedad de 12%. El objetivo de la investigación es plastificar madera sólida de *Quercus scytophylla*, con un tratamiento higró-térmico, curvar listones de este material y determinar sus módulos de elasticidad.

### Curvado de la madera

La tecnología de plastificado de la madera, como práctica industrial, es conocida como curvado. En comparación con otras tecnologías de maquinado, el curvado de la madera presenta un ahorro considerable en material y energía. Además, el curvado de la madera significa ventajas para el diseño de productos y formas. Por ejemplo, la elaboración de curvas ergonómicas con secciones esbeltas y de geometrías curvas, las cuales favorecen estructuras simples.

El curvado de la madera minimiza el desperdicio de material, el proceso es rápido y puede realizarse con herramientas simples. En consecuencia, la inversión en tecnología y gastos de energía para curvar madera son bajos, en comparación con otros procesos de maquinado. Además, la resistencia mecánica y elástica de la madera curvada es mayor comparativamente a las propiedades de la madera aserrada o torneada.

Kollmann y Côté (1968) presentan criterios y parámetros para depurar la técnica de curvado. Por ejemplo, los investigadores proponen intervalos para los valores de la relación radio de curvatura versus espesor de las piezas a tratar, según la

especie. Igualmente, proponen valores para las tasas de compresión y extensión, que resultan del grado de curvado de las piezas de madera. Asimismo, recomiendan que las maderas de especies angiospermas son preferentes para procesos de curvados en comparación con las especies gimnospermas. Entre las principales características tecnológicas de la madera deseables para la fabricación de piezas curvadas se citan: una alta densidad y piezas de madera sin crecimientos irregulares, nudos y fisuras. En el mismo contexto, Kollmann y Côté (1968) recomiendan temperaturas máximas de 100 °C y tiempos de exposición de 1 hora por cada 25 milímetros de espesor de las piezas. En principio, estos parámetros no modifican la constitución química de la madera.

Recientemente, Hwang y col. (2002) estudiaron la calidad de curvado en diferentes especies angiospermas y gimnospermas, empleando un proceso de carácter higró-térmico. Los investigadores concluyeron que la densidad de la madera es uno de los factores principales para determinar la vocación de una especie para tratamientos de curvado. A fin de definir la calidad de curvado de una especie de madera, estos investigadores midieron el radio de curvatura y la tasa de deformación de las piezas flexionadas. Entre sus conclusiones proponen que especies de madera con densidad mayor a 600 kg/m<sup>3</sup> son excelentes candidatos para su deformación. Igualmente, Hwang y col. (2002) hacen notar que el espesor de las piezas a deformar, el radio de curvatura de las formas y la orientación de los anillos de crecimiento de la madera son factores importantes a tomar en cuenta.

Norimoto y col. (1993) estudiaron la deformación permanente de madera suavizada en flexión, empleando el calor como agente suavizante. Los autores proponen parámetros para analizar la influencia del radio de curvatura, las deformaciones de superficie y los factores de recuperación. En el mismo contexto, los investigadores explican los diferentes cambios sufridos por la aplicación de calor en la madera, para deformarla de manera permanente; es decir, para plastificarla.

Makinaga y col. (1997) detallan un procedimiento higró-térmico para plastificar madera de *Celtis occidentalis*. Sus resultados muestran que un proceso de suavizado higró-térmico, empleando temperaturas de 100 °C y madera con contenidos

de humedad superiores al punto de saturación de la fibra, es eficiente para mejorar la calidad de curvado de una especie determinada.

Murakami y col. (2002) estudiaron el curvado higro-térmico de varias especies. Los autores constataron la importancia de la estructura de la madera en la calidad del curvado; y de esta manera, proponen una clasificación de maderas con vocación para ser plastificadas higro-térmicamente. El orden de preferencia es el siguiente: angiospermas de clima templado, angiospermas de clima tropical, y finalmente, especies gimnospermas.

Katsuragi (2005) presenta un panorama de las diferentes técnicas empleadas actualmente para el curvado de la madera en la industria, puntualizando que el curvado de madera sólida, plastificada con vapor de baja presión, es una práctica barata y eficiente para procesos en escala semi-industrial.

Araya López (2005) y Shirazinia Riggioni (2007) determinaron características de curvado de madera sólida para las especies *Nothofagus pumilio* y *Laurelia philipiana*, así como para especies de plantación de rápido crecimiento. Ambos autores obtuvieron resultados satisfactorios, aplicando tratamientos de curvado con dispositivos y variables de proceso similares a las propuestas por Katsuragi (2005).

### Tratamientos térmicos

Oltean y col. (2010) estudian programas de secado de madera con temperaturas bajas y moderadas, y su influencia en características mecánicas de la madera de *Picea abies*. Las temperaturas estudiadas van de 45 a 80 °C. Oltean y col. (2010) resaltan la problemática para comparar los datos disponibles en la literatura. La dificultad radica en las diferentes condiciones experimentales que se emplean en cada investigación. Thompson (1969) encuentra una reducción en el módulo de elasticidad de 1.6% en madera de *Pinus palustris*, tratada a una temperatura de 83.3 °C. Terziev y Daniel (2002) ven reducido el módulo de elasticidad para esta misma especie hasta en 12.8%, para una temperatura de 60 °C. Finalmente, Graham (1957) observó una reducción en el módulo de elasticidad de 1% en madera de *Pseudotsuga menziesii*, tratada a 94 °C.

Estas temperaturas corresponden a rangos bajos y moderados de secado. Por lo tanto, y de acuerdo con Green y col. (1999), la disminución en la resistencia mecánica de la madera ocasionada por el calor a temperaturas menores de 100 °C, debería ser reversible e inmediata.

Estevez y Pereira (2009) revisan las modificaciones sufridas por la madera, ocasionadas por tratamientos térmicos. Entre otros tópicos, los autores discuten las transformaciones en la estructura química y anatómica de la madera; además, tratan el efecto del calor en la alteración de las características mecánicas del material. Por ejemplo, el módulo de elasticidad de la madera se incrementa con el aumento de la cristalinidad de la celulosa. Este fenómeno predomina al principio de un tratamiento térmico, pero si continúa el aumento de la temperatura, la degradación de la madera resulta en la disminución del módulo de elasticidad.

Oltean y col. (2007) hacen notar que la resistencia mecánica de la madera no es afectada de manera permanente si ésta es expuesta por periodos cortos y a temperaturas menores a 100 °C. Sin embargo, la resistencia puede disminuir de manera permanente si la madera se expone a una temperatura mayor de 65 °C, durante periodos de tiempo prolongado. Estos investigadores indican como factores principales en la modificación de la resistencia de la madera la temperatura del tratamiento, el medio de transferencia de calor, el contenido de humedad de la madera, la especie y el volumen de la madera a tratar.

### MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de un árbol de la especie *Q. scytophylla*, se cortaron 2 trozas de 1.1 m de largo y de 45 cm de diámetro. De estas trozas, se dimensionaron listones según la orientación radial, tangencial y longitudinal en el plano leñoso. Las dimensiones de los listones fueron: 1.1 m de largo, con sección transversal de 19 mm por 19 mm en promedio. Un grupo de 20 listones se destinó a las pruebas de rigidez: 10 listones sin tratamiento (LPST) y 10 listones suavizados con el tratamiento (LPS).

### Plastificado de la madera

El proceso de plastificado de la madera consistió en cinco operaciones:

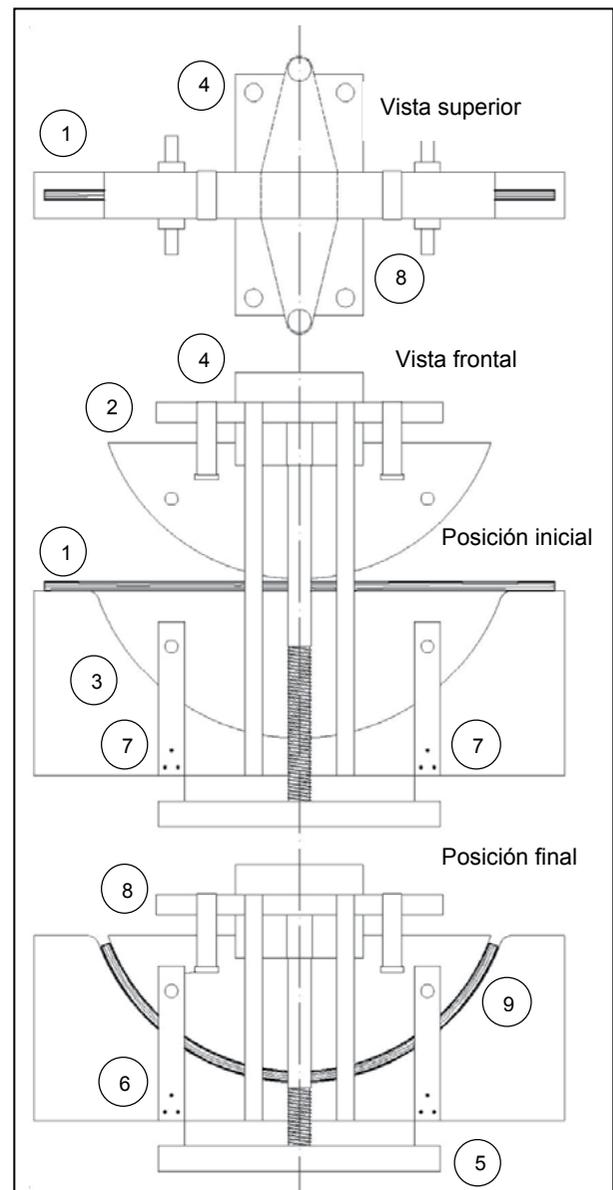
- 1) Hidratado: los listones se mantuvieron en estado húmedo y saturado durante 30 días, con el objeto de uniformizar el contenido de humedad de la madera.
- 2) Suavizado: este tratamiento cuenta con tres periodos de temperatura: el primero de 15 minutos, necesario para generar vapor al calentar 5 litros de agua en el generador de vapor. El segundo de 30 minutos permite elevar la temperatura ambiente en el interior de la cámara desde 23 °C, hasta la temperatura de suavizado de 98 °C. Al mismo tiempo, la temperatura interna de la madera alcanza los 92 °C. El tercer periodo de 50 minutos de duración mantiene estables las temperaturas en el interior de la cámara de suavizado y en el interior de la madera. Las temperaturas de esta operación fueron monitorizadas empleando dos termómetros. El primero de ellos, de carátula y de vástago, registró la temperatura en el interior de la cámara. El segundo fue un termómetro digital, que se colocó en el 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 solicitarlos en flexión curva.
- 4) Solidificación: la consolidación de la curvatura del listón se alcanza después de 36 horas en un molde que estabiliza la deformación de la madera a una temperatura de laboratorio de 23 °C.
- 5) Estabilizado y acondicionado: el contenido de humedad de la madera se uniformizó durante 36 horas en un dispositivo de acondicionamiento ( $T = 23\text{ °C}$ ,  $HR = 36\%$ ).

### Pruebas de rigidez

Los listones LPST se curvaron directamente en el dispositivo para deformación de tipo flexión curva, colocado en una máquina universal de ensayos mecánicos (Figura 1). Los listones LPS se trataron previamente en el dispositivo de suavizado (Figura 2) y posteriormente se curvaron en el dispositivo de flexión curva. Los listones LPST se solicitaron con una velocidad de 3 mm por minuto. Al momento del ensayo, su temperatura fue de 23 °C y su contenido de humedad fue de 67% en promedio. Los listones LPS se solicitaron inmediatamente después del tratamiento de suavizado, con una velocidad de solicitud de 6 mm por minuto. Al momento del ensayo,

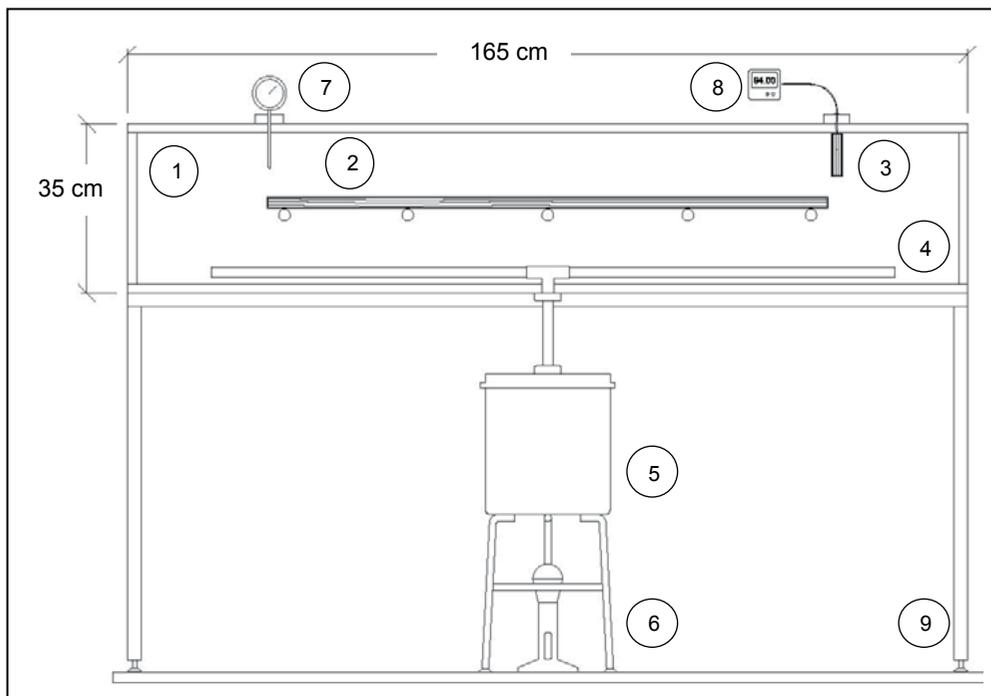
su temperatura fue de 92 °C y su contenido de humedad fue de 57% en promedio. El tiempo necesario para deformar el listón con una altura de cuerda de 28 cm es de 32 s. La carga ( $P$ ) necesaria para deformar los listones suavizados fue de 1000 N.

El módulo aparente en flexión ( $E_f$  en MPa) de la madera de los listones, se determinó



**Figura 1.** Dispositivo para deformación de flexión curva.

Leyenda: 1. Listón recto, 2. Molde superior, 3. Molde inferior, 4. Cabeza móvil de la prensa, 5. Base fija de la prensa, 6. Guías de la prensa, 7. Seguros del molde, 8. Amarres del molde superior, 9. Listón curvo.



**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.

**Tabla 1.** Resultados de las pruebas de rigidez

| Estadígrafo               | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Listones sin tratamiento<br>(LPST) |              |             | Listones suavizados<br>(LPS) |              |             |
|---------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------|-------------|------------------------------|--------------|-------------|
|                           |                                | H<br>(%)                           | P/y<br>(N/m) | Ef<br>(MPa) | H<br>(%)                     | P/y<br>(N/m) | Ef<br>(MPa) |
| Media aritmética          | 700                            | 67                                 | 11435        | 10410       | 57                           | 5853         | 5329        |
| Desviación estándar       | 17.13                          | 5.44                               | 2206         | 2008        | 5.44                         | 1060         | 965         |
| Coefficiente de variación | 2.45                           | 8.08                               | 19.29        | 19.29       | 8.08                         | 18.11        | 18.11       |

empleando la pendiente formada entre la carga (P en N) y la deflexión (y en m), ambas evaluadas a 1/2 de la portada de flexión (L en m) y en el dominio elástico de la relación carga-deflexión, la portada entre apoyos del dispositivo para deformación de flexión curva y el momento de inercia (I en m<sup>4</sup>) de la sección transversal de los listones, con la fórmula:

$$E_f = \frac{P}{y} \frac{L^3}{48I} \quad (1)$$

## RESULTADOS

La Tabla 1 muestra los valores de las pendientes (P/y) y los de los módulos de elasticidad en flexión (Ef). Además, se indican los resultados de la densidad ( $\rho$ ) y del contenido de humedad (H), correspondientes a la madera de los dos grupos de listones estudiados. La Figura 3 muestra una fotografía de un listón recto y sin tratamiento, y un segundo curvado después del tratamiento.



**Figura 3.** Fotografía de listones rectos y curvos.

## DISCUSIÓN

Al principio del tratamiento, el valor del módulo de elasticidad de la madera, ( $H = 67\%$ ;  $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), mantiene un valor de referencia durante el dominio elástico:  $E_f = 10410\text{ MPa}$ . Una vez que la temperatura aumenta, la resistencia elástica de la madera disminuye, en este caso, el dominio térmico-elástico comprende un incremento de la temperatura de  $23$  a  $92\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con una velocidad de  $4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  por minuto. En este mismo dominio, el hecho de mantener durante 50 minutos a la madera a una temperatura de  $92\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ocasiona un decremento en su módulo de elasticidad en  $48.81\%$ , es decir, el valor de  $E_f$  se reduce a  $5329\text{ MPa}$ . En el mismo dominio, el contenido de humedad de la madera disminuye de  $67\%$  a  $57\%$ , con una velocidad de deshidratación de  $0.2\%$  por minuto. Estos dos fenómenos se desarrollan manteniendo siempre la madera en estado saturado, es decir, con un contenido de humedad superior al punto de saturación de la fibra ( $H \geq 32\%$ ).

Una vez la madera suavizada, es en esta condición que la deformación en flexión curva actúa como agente mecánico, el cual permite a la madera una deformación material llevada hasta el dominio plástico del proceso carga-deflexión, pero evitando la ruptura del listón. Siempre bajo el efecto del calor, el proceso de deformado plástico en flexión curva se desarrolla durante 30 segundos, en el dominio higró-térmico plástico de acuerdo a la siguiente fenomenología:

Al inicio de la flexión, el listón se encuentra libre de deformaciones. En efecto, una temperatura de  $92\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la madera, asociada a un contenido de humedad superior al punto de saturación de la fibra ( $H = 57\%$ ), no ocasiona esfuerzos internos de secado, ni aparición de higró-contracciones. De tal forma, que el listón se considera libre de deformaciones al inicio de la flexión.

Una vez iniciado el proceso de flexión, la carga puntual  $P$  aplicada en  $L/2$  del listón apoyado en sus extremos, provoca un momento de flexión  $M_f$  al interior de la portada  $L$ . A medida que el proceso de flexión se desarrolla y debido a la geometría del molde superior, el cual aplica la carga sobre el listón, la sollicitación de flexión tres puntos se transforma gradualmente en una carga uniformemente repartida siguiendo la curvatura del molde superior. La distribución de esta carga sigue el desarrollo longitudinal del molde superior, de tal forma que al final del proceso de flexión, el listón es sollicitado por una carga uniformemente repartida radialmente y siguiendo la geometría de la curva del molde superior.

Al final del proceso de flexión curva, el listón está apoyado sobre los dos soportes en los extremos del molde inferior y flexionado por el efecto de la carga repartida. Dado que la cara cóncava del molde inferior del dispositivo no ejerce presión sobre la cara convexa del listón, la madera se encuentra en estado libre de esfuerzos de compresión transversal. En este estado de la madera, y debido al momento de flexión sobre el sistema, en las secciones transversales aparece una zona de esfuerzos de compresión que va del eje neutro hacia la cara cóncava de la curva del listón. Igualmente aparece una zona de esfuerzos de tensión, que va del eje neutro hacia la cara convexa del listón. La desproporción en la magnitud de los esfuerzos, entre las zonas de compresión y de tensión, ocasiona que el eje neutro se desplace en relación al eje neutro de una sección transversal de un listón libre de flexión. Es en este eje desplazado que aparecen los esfuerzos cortantes de flexión. En el caso de listones de madera, la amplia relación de la longitud del listón versus su espesor ( $1100/17.53$ ), permite considerar la deformación ocasionada por este esfuerzo como no significativa.

Las tasas de deformación en compresión ( $\epsilon_c$ ) y en tensión ( $\epsilon_t$ ), calculadas con las fórmulas

propuestas por Hwang y col. (2002), son respectivamente para el caso que nos ocupa de:  $\epsilon_t = 1.28\%$  y  $\epsilon_c = 2.93\%$ . Estos resultados están dentro de los límites recomendables de 3%, para curvado de madera, propuestos por el Manual No. 125 del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (Peck, 1957). Dado que la deformación en tensión es el parámetro crítico y a minimizar para evitar ruptura en la cara convexa de la madera, Kollmann y Côté (1968) recomiendan para curvado de maderas europeas del género *Quercus*, tasas de deformación en tensión inferiores a 2.14%, valor mayor al obtenido en esta investigación.

Manteniendo la geometría de la flexión curva, este resultado implica que el radio de curvatura al arco central puede ser disminuido de 408.76 mm hasta un valor de 298 mm, para un espesor particular de 17.53 mm en listones de madera de *Q. scytophylla*. Esta diferencia entre el radio mínimo recomendable y el empleado en el proceso, sugiere que la deformación interna de la sección de los listones alteró de manera mínima la estructura del material.

Una vez que el agente mecánico actúa en el proceso de flexión curva, siempre en el dominio higro-térmo plástico, la geometría curva del listón se mantiene en la forma predeterminada para una relación Espesor-Radio de curvatura de 0.0428. Este resultado específico es para el caso de estudio de madera de *Q. scytophylla*.

A partir de este momento, el efecto de la disminución del contenido de humedad se combina para rigidizar el listón y mantener su curvatura durante las últimas etapas de solidificado, estabilizado y acondicionado.

El proceso de plastificado de la madera se termina por el efecto de la disminución en su contenido de humedad. En efecto, la disminución del contenido de humedad en la madera, resulta en el incremento de la rigidez del material, manteniendo siempre su geometría, en este caso, un listón de radio de curvatura al arco central de 408.76 mm y una relación radio/espesor de 22.81.

Como resultado del proceso de plastificado, donde el contenido de humedad de la madera disminuye desde valores superiores al punto de saturación de la fibra ( $H = 67\%$ ), hasta un contenido de humedad de la madera acondicionada

al 12%, el módulo de elasticidad determinado al principio del proceso higro-térmo resulta en un incremento a una tasa de 2 000 MPa/%.

Este parámetro representa el coeficiente de higro-elasticidad en flexión estática, propuesto por Villaseñor Aguilar (2007) para madera de *Pinus douglasiana* y empleado con reserva en esta investigación, de tal forma que el valor inicial de  $E_f$  de la madera de *Q. scytophylla*, a un contenido de humedad de 12%, al final del tratamiento higro-térmo, se estima en 14410 MPa.

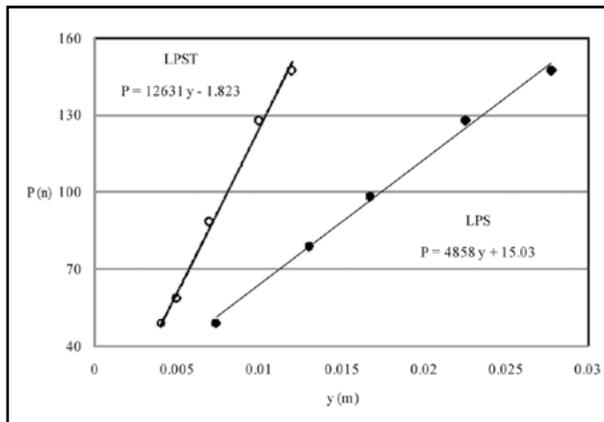
Durante esta etapa experimental se observó que la correcta orientación del listón en el sistema de coordenadas radial, tangencial y longitudinal, favorece la deformación mecánica. Igualmente, se advirtió que la variación a nivel local en el acomodo del tejido leñoso desfavoreció el proceso, de tal forma que una tercera parte de los listones flexionados presentaron fisuras locales. Como consecuencia, el recorte y la selección de probetas para las pruebas de ondas de esfuerzo favorecieron los listones y segmentos sin daños aparentes.

#### Rigidez de los listones

El efecto de la temperatura en la disminución de la rigidez de la madera, se explica por el siguiente argumento: En una relación carga-deflexión, el incremento de la temperatura permite disminuir la carga ( $P$ ), requerida originalmente para lograr una misma deformación ( $y$ ), de tal forma que la pendiente  $P/y$ , la cual indica la rigidez del material en cuestión, se ve disminuida. La Figura 4 muestra las diferencias entre las pendientes  $P/y$  de un listón sin tratamiento (LPST) y de un listón suavizado (LPS) con tratamiento higro-térmo.

El suavizado de la madera es el efecto de someter durante 50 minutos los listones a una temperatura de 92 °C, con un contenido de humedad superior al punto de saturación de la fibra. De acuerdo con Oltean y col. (2007), estos parámetros, similares a los empleados en el proceso convencional de secado de madera sólida, permiten suavizarla, sin modificar su estructura material, de tal forma que se puede decir que el proceso de suavizado utilizado en esta investigación es de carácter no destructivo.

Esta combinación de temperatura y contenido de humedad controlados, permitió realizar una deformación, con un medio mecánico, requiriendo menos esfuerzo, en este caso, de fle-



**Figura 4.** Pendientes  $P/y$  de un listón sin tratamiento (LPST) y de un listón suavizado (LPS) con tratamiento higro-térmico.

ción. Por su parte, el alto contenido de humedad de la madera, contribuyó a mantener la resistencia mecánica de la madera en su expresión mínima.

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 1, la rigidez aparente  $P/y$  de los listones suavizados disminuyó en 48.81%, en comparación con los listones sin tratamiento. En el mismo contexto, el módulo de elasticidad  $E_f$  calculado con la ecuación (1), se redujo en una proporción similar. La Figura 4 explica la diferencia entre las pendientes  $P/y$  de los listones LPST versus LPS.

Este valor es válido para la madera de *Q. scytophylla* con un contenido de humedad para los listones LPS de 67% y para los listones suavizados de 57%. Es decir, ambos grupos de listones se encontraban en estado saturado. En contraste, la temperatura de los listones sin tratamiento fue de 23 °C, mientras que la temperatura al momento del ensayo en los listones LPS fue de 92 °C. En efecto, el único parámetro que varió considerablemente entre las dos pruebas fue la temperatura.

Los resultados de esta investigación coinciden con los de Widmann y col. (2007). Estos investigadores encontraron que la resistencia a la flexión de la madera de *Fagus sylvatica*, con una densidad promedio de 700 kg/m<sup>3</sup>, después de haber sido sometida a tratamiento térmico, se redujo hasta 40% en comparación con madera sin tratamiento.

El valor de  $E_f$  de los listones sin tratamiento puede ser comparable con valores de la madera de la misma especie y con densidad pro-

porcional. Pérez Olvera y Dávalos Sotelo (2008) proponen un valor para el módulo de elasticidad en flexión para la madera de *Q. scytophylla*, con densidad de 637 kg/m<sup>3</sup> y con un contenido de humedad superior al punto de saturación de la fibra, de 12 718 MPa.

De acuerdo a la Tabla FITECMA (Sotomayor Castellanos, 2008), la madera de *Q. scytophylla*, clasifica como de módulo de elasticidad de magnitud media.

La diferencia entre los valores de Pérez Olvera y Dávalos Sotelo (2008), de Sotomayor Castellanos (2005) y los resultados de esta investigación, se pueden explicar entre otros argumentos, por las siguientes razones: por una parte, la variabilidad natural de los valores de las características tecnológicas entre individuos de una misma especie, y por otra, las diferentes configuraciones entre los ensayos. Los valores reportados en la literatura fueron determinados empleando métodos de prueba estandarizados, en cambio, los valores referidos en esta investigación emplearon un dispositivo *ad hoc*, en el cual, entre otras particularidades de su configuración, la portada de flexión es muy larga en proporción a la altura de la probeta.

## CONCLUSIONES

La estrategia experimental propuesta en esta investigación demostró que la madera sólida de *Q. scytophylla*, puede ser plastificada con un tratamiento higro-térmico.

Los dispositivos fabricados específicamente para las experiencias resultaron adecuados para plastificar listones de *Q. scytophylla*, de tal forma, que se pueden manufacturar curvas regulares de secciones esbeltas, sin dañar las propiedades mecánicas del material.

En contraste, la rigidez en flexión curva, de listones de madera sólida de *Q. scytophylla*, disminuyó en 48%, por el efecto del tratamiento higro-térmico de baja presión. Esto respecto a los listones de madera sin tratamiento de la misma especie.

Es importante no confundir el efecto permanente del tratamiento higro-térmico sobre la madera, con el efecto inmediato y temporal de la variación de la temperatura y del

contenido de humedad en la madera, cuando estos parámetros varían al momento del ensayo, o en condiciones de servicio.

Argumentando que la madera de *Q. scytophylla* es una especie que pertenece

a la familia botánica de las angiospermas, y que de acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación denota una densidad alta, la especie estudiada puede ser técnicamente apta para procesos de plastificado.

## LITERATURA CITADA

- ARAYA LÓPEZ, C. M., Determinación de características de curvado de madera sólida para las especies *Nothofagus pumilio* (Lenga) y *Laurelia philipiana* (Tepa). Memoria para optar al Título de Ingeniero en Industria de la Madera. Universidad Tecnológica Metropolitana. Facultad de Ingeniería. Escuela de Industria de la Madera. Chile, 2005.
  - ESTEVEZ, B. M.; PEREIRA, H. M. Wood, Modification by Heat Treatment: A Review. *Bioresources*, 4(1): 370-404, 2009.
  - GRAHAM, R. D., Effect of several drying conditions on strength of coast-type Douglas-fir timbers. *Forest Products Journal*, 7(7): 228-233, 1957.
  - HWANG, K.; JUNG, I.; LEE, W.; JANG, J.; BAE, H.; NORIMOTO, M., Bending Quality of Main Korean Wood Species. *Wood Research*, 89: 6-10, 2002.
  - KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A., *Principles of Wood Science and Technology*, Volume I: Solid Wood, Springer-Verlag. Germany, 1968.
  - MAKINAGA, M.; NORIMOTO, M.; INOUE, M., Permanent Fixation of Bending Deformation in Wood by Steam Treatment. *Wood Research*, 84: 39-41, 1997.
  - MURAKAMI, R.; TANAKA, F.; NORIMOTO, M., Relationship between Bending Quality and Wood Species. *Wood Research*, 89: 21-22, 2002.
  - NORIMOTO, M.; OTA, C.; AKITSU, H.; YAMADA, T., Permanent Fixation of Bending Deformation in Wood by Heat Treatment. *Wood Research*, 79: 23-33, 1993.
  - OLTEAN, L.; TEISCHINGER, A.; HANSMANN, C., Influence of Temperature on Cracking and Mechanical Properties of Wood During Wood Drying – A Review. *BioResources*, 2(4): 789-811, 2007.
  - OLTEAN, L.; TEISCHINGER, A.; HANSMANN, C., Influence of low and moderate temperature kiln drying schedules on specific mechanical properties of Norway spruce wood. *European Journal of Wood Products*, 69(3): 451-457, 2010.
  - PECK, E. C., *Bending Solid Wood to Form*. Agriculture Handbook, No. 125, U. S. Department of Agriculture. Forest Service. USA, 1957.
  - PÉREZ OLVERA, C. P.; DÁVALOS SOTELO, R., Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México. *Madera y Bosques*, 14(3): 43-80, 2008.
  - SHIRAZINIA RIGGIONI, M. M., Desarrollo de curvas laminadas-vaporizadas con especies de plantación de rápido crecimiento en Costa Rica. Informe de Práctica de especialidad para optar por el grado de bachiller en Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Costa Rica, 2007.
  - SOTOMAYOR CASTELLANOS, J. R., Características mecánicas y clasificación de 150 especies de maderas Mexicanas, *Investigación e Ingeniería de la Madera*. UMSNH, 1(1): 3-22, 2005.
  - SOTOMAYOR CASTELLANOS, J. R., TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. FITECMA. UMSNH. Formato: 60 x 30 x 60 cm, 2008.
  - TERZIEV, N.; DANIEL, G., Industrial kiln drying and its effect on microstructure, impregnation and properties of Scots pine timber impregnated for above ground use. *Holzforchung*, 56: 434-439, 2002.
  - THOMPSON, W. S., Effect of steaming and kiln drying on the properties of Southern pine poles. *Forest Products Journal*, 19(1): 21-28, 1969.
  - 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, 2007.
  - WIDMANN, R.; BEKIRCHER, W.; FISHER, A., Mechanical Properties of Thermal Treated Hardwood (Beech): Bending and Tension Strength and Stiffness of Boards. In: Proceedings of the Third European Conference on Wood Modification. United Kingdom, pp. 187-190, 2007.
- De páginas electrónicas**
- KATSURAGI, K., Furniture Maker Tai-Workshop, Japan. En: <http://www.tai-workshop.com/english/index-e.html>. Junio, 2012.