

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera

División de Estudios de Posgrado

Plastificado higro-térmico de la madera de *Quercus scytophylla*  
Estudio por ondas de esfuerzo.

Tesis de Maestría en  
Ciencias y Tecnología de la Madera

Joel Benancio Olguín Cerón

Director de Tesis

M.C. Roberto Calderón Muñoz  
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera

Morelia, Michoacán. Agosto 2011

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	7
2.1. Características tecnológicas de la madera de <i>Quercus scytophylla</i> .....	7
2.2. Curvado de la madera.....	10
2.3. Métodos no destructivos.....	13
2.4. Tratamientos térmicos.....	14
3. HIPÓTESIS.....	18
4. OBJETIVOS.....	19
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
5.1. Materiales.....	20
5.2. Métodos.....	24
6. RESULTADOS.....	40
7. ANÁLISIS.....	43
7.1. Tratamiento higro-térmico.....	44
7.2. Rigidez de los listones.....	52
7.3. Parámetros tecnológicos.....	54
7.4. Velocidad de las ondas de esfuerzo.....	58
7.5. Módulo de elasticidad.....	61
8. CONCLUSIONES.....	63
REFERENCIAS.....	64
Anexo A. Desarrollo fórmula de flexión.....	70
Anexo B. Desarrollo fórmula de velocidad de onda.....	85
Índice de Cuadros.....	97
Índice de Figuras.....	98
Lista de Símbolos.....	100

Julio 5, 2011

## 1 INTRODUCCIÓN

La madera es un material termoelástico: 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 higroelástico: 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 estado anhidro al 32% en su contenido de humedad.

El efecto combinado en la madera, de los parámetros temperatura y contenido de humedad, se relaciona de tal forma, que el incremento de la temperatura puede ocasionar una disminución en el contenido de humedad, pero no viceversa.

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. En esta investigación, a este proceso se le denomina plastificado higro-térmico de la madera.

La madera tiene la capacidad de almacenar y disipar energía. Derivado de este principio, se puede teorizar con su aptitud para transmitir ondas mecánicas a través de ella. Por ejemplo, el estudio de la transmisión de ondas de esfuerzo en el plano leñoso, permite caracterizar mecánicamente al material, sin alterar su constitución física. Este enfoque permite además, mantener íntegra la estructura anatómica de la madera en estudio.

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.

Esta investigación estudia el curvado de la madera de *Quercus scytophylla*.

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 sobre la trabajabilidad 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*, aporta datos tecnológicos para su empleo adecuado como material de Ingeniería y Diseño.

Con el objeto de minimizar las variables experimentales que intervienen de manera considerable en el fenómeno a estudiar, y con el propósito de simplificar el análisis y orientarlo al efecto del tratamiento de plastificado sobre la madera, es interesante emplear una tecnología de carácter no destructivo, como lo son las ondas de esfuerzo,

De los argumentos anteriores, surge la motivación por estudiar los posibles cambios en el estado mecánico de la madera, después de ser plastificada con un proceso higo-térmico de baja presión, de tal forma que no se altere su estado original. Concretamente, estudiar las características mecánicas de la madera de *Quercus scytophylla* empleando métodos no destructivos.

Esta investigación propone a manera de tesis el argumento siguiente:

“El efecto del plastificado higo-térmico de la madera de *Quercus scytophylla*, sobre la calidad de curvado, puede ser estimado por una técnica de carácter no destructivo, como lo son las ondas de esfuerzo”.

En esta investigación, se entiende como calidad de curvado, el mantener la estructura del tejido leñoso sin modificaciones, de tal forma que no se altere la capacidad de la madera para transmitir ondas de esfuerzo. Esta deformación permanente de la madera sólida, corresponde a una forma con curvatura regular.

La investigación, preconiza el desarrollo experimental de una técnica para curvar madera sólida:

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 a la madera a una temperatura ambiente y a un contenido de humedad del 12%.

Los trabajos de laboratorio estuvieron estructurados en dos bloques experimentales: el primero es el desarrollo del método de plastificado de madera sólida, con el objeto de producir listones y probetas con tres tratamientos: madera sin tratamiento, madera suavizada y madera plastificada. El segundo bloque comprende la evaluación no destructiva de la calidad de curvado en los diferentes tratamientos.

Este proceso higro-térmico requiere la combinación y el control de las variables siguientes: La temperatura de curvado es de 92 °C; El contenido de humedad de la madera es de 67%; El tiempo de suavizado es de 50 minutos; Y el agente mecánico es la sollicitación de flexión hasta el dominio plástico.

Estas variables actuando simultáneamente, son identificadas durante el proceso, con los siguientes estados de la madera: hidratado, suavizado, deformado, solidificado, estabilizado y acondicionado.

Y desde una perspectiva teórica, la geometría de las formas, la rigidez de la madera y su capacidad para transmitir ondas de esfuerzos, pueden ser comprendidas a partir de argumentos de la Ciencias de materiales, con conceptos aplicados a las Ciencias, Tecnología e Ingeniería de la madera.

Estos conceptos son: La geometría de curvado, la cual es explicada a partir de sus relaciones de esbeltez de su sección transversal y de la longitud de listones y probetas de madera, así como sus radios de curvatura; La rigidez de la madera, representada por el módulo de elasticidad, es desarrollada a partir de la ecuación constitutiva de la deflexión de una viga; La velocidad de las ondas de esfuerzo, la cual es explicada a partir de la ecuación de movimiento de una barra elástica.

La tesis está organizada de la manera siguiente:

A partir del capítulo 1, el cual sugiere la introducción al tema de investigación, en el capítulo 2 de antecedentes, se presenta una síntesis de los trabajos anteriores, particularmente sobre cuatro tópicos: las características tecnológicas de la madera de *Quercus scytophylla*, las diferentes técnicas de curvado de la madera, el empleo de métodos no destructivos en el estudio de madera tratada en procesos térmicos, y finalmente, sobre los trabajos recientes acerca de los tratamientos térmicos y su efecto en las propiedades mecánicas de la madera.

Esta revisión de trabajos permitió plantear las preguntas de investigación siguientes:

¿A nivel de metodología experimental, es posible plastificar madera sólida de *Quercus scytophylla*, para arcos y secciones esbeltas, empleando la técnica de curvado para madera, con un tratamiento higro-térmico de baja presión?

¿Es adecuada la técnica de ondas de esfuerzo, para caracterizar la calidad de curvado de madera sólida, plastificada con un tratamiento higo-térmico de baja presión?

¿Se puede observar un efecto permanente en la rigidez de la madera sólida de *Quercus scytophylla*, al suavizarla con temperatura y humedad, y al deformarla plásticamente?

Para contestar a estas preguntas, el capítulo 3 argumenta las siguientes hipótesis de trabajo:

- La madera sólida de *Quercus scytophylla*, puede ser plastificada con un tratamiento higo-térmico.
- El tratamiento higo-térmico y el deformado plástico, no modifican su capacidad para transmitir ondas de esfuerzo.

Con el objeto de verificar estas hipótesis, el capítulo 4 propone los siguientes objetivos generales:

1. Plastificar madera sólida de *Quercus scytophylla*, con un tratamiento higo-térmico.
2. Evaluar la calidad de curvado, empleando la técnica de ondas de esfuerzo.

Para alcanzar los objetivos, el capítulo 5 materiales y métodos, presenta las características del material y su preparación. Igualmente, en este capítulo se detallan los dispositivos experimentales que se implementaron para realizar las pruebas de rigidez y de transmisión de ondas de esfuerzo, particularmente para tres grupos experimentales con diferentes tratamientos: madera sin suavizar, madera suavizada y madera plastificada.

La investigación tiene una orientación empírica pertinente a una fenomenología particular del comportamiento material de la madera. Esta peculiaridad es el plastificado de la madera.

Sin embargo, las fórmulas empleadas para calcular el efecto del fenómeno sobre la rigidez de los listones de madera y para estimar el módulo de elasticidad de las probetas, encuentran su fundamento teórico a partir de ecuaciones constitutivas. Desde un punto de vista mecanicista, este es el soporte teórico de la investigación.

El desarrollo de la fórmula de flexión utilizada para calcular la rigidez de la madera, se presenta en el anexo A. Igualmente, el desarrollo de la fórmula de velocidad de ondas de esfuerzo, se presenta en el anexo B.

Los resultados de los trabajos de laboratorio se presentan en el capítulo 6. Particularmente se determinan los estadígrafos media aritmética, desviación estándar y coeficiente de elasticidad, calculados para los parámetros de referencia: densidad y contenido de humedad. Igualmente se detallan los valores del módulo de elasticidad en flexión para listones madera sin tratamiento y suavizados, para una muestra representativa de madera de *Quercus scytophylla*.

En este mismo capítulo se detallan los mismos estadígrafos para los parámetros velocidad de ondas de esfuerzo y módulo de elasticidad. Estas dos mediciones están referenciadas para la densidad de la madera y el contenido de humedad, ambos factores en el momento del ensayo. Estos datos se especifican para las probetas agrupadas según los tres tratamientos observados: probetas rectas sin tratamiento, probetas rectas suavizadas, y probetas suavizadas, deformadas y plastificadas.

Durante los trabajos de laboratorio, especialmente en las etapas de plastificación higro-térmica de la madera y de las pruebas de flexión, se tuvo la oportunidad de instrumentar los dispositivos desarrollados *ad hoc*. De esta manera, se monitorearon las principales variables de estos procesos. Como corolario, esta estrategia resultó en un tratamiento rigorista de las condiciones experimentales de la investigación, lo que permitirá su repetición idéntica en otros proyectos de investigación.

El capítulo 7 presenta el análisis de los resultados de la investigación. Este análisis se entiende a partir de los siguientes apartados:

Primeramente se trata de explicar el proceso de plastificado higro-térmico en la rigidez de la madera, y su repercusión en algunos parámetros mecánicos y de geometría obtenidos en las formas curvas.

Posteriormente, se examina la disminución en la rigidez de listones, resultado del tratamiento higro-térmico aplicado al material.

A continuación se discute sobre la variación en los parámetros tecnológicos de densidad y contenido de humedad de la madera.

Finalmente, se considera el efecto del plastificado higro-térmico en la madera, sobre la velocidad de las ondas de esfuerzo en probetas rectas *versus* curvas, y probetas tratadas *versus* sin tratamiento.

El capítulo 8 presenta las conclusiones de la investigación. Entre las principales, se citan las siguientes:

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

De manera no destructiva, se confirmó empíricamente que el tratamiento higro-térmico en combinación con el deformado plástico, no modifican la capacidad de la madera para transmitir ondas de esfuerzo.

En contraste, la rigidez en flexión de listones de madera sólida de *Quercus scytophylla*, disminuyó un 48% por el efecto del tratamiento higro-térmico de baja presión.

Desde otra perspectiva, la investigación proporciona de manera sistematizada, datos específicos de temperaturas, contenidos de humedad, tiempos y dimensiones de especímenes de madera que funcionaron para curvar madera. Esta aportación original para

la caracterización de un proceso de maquinado, intenta establecer una metodología, la cual sea útil como guía en el proceso de curvado de madera sólida.

Por otra parte, los resultados pretenden ser una contribución original a la caracterización tecnológica de la especie. Particularmente en datos empíricos de características físicas de la madera: módulo de elasticidad estática, velocidad de transmisión de ondas de esfuerzo y el módulo dinámico.

Los resultados de esta investigación son una aportación acotada a las Ciencias y Tecnología de la madera, concretamente para la Concepción y para el Cálculo de Estructuras de madera, y como criterio para el Diseño de objetos y formas elaborados con madera sólida plastificada. Y desde el punto de vista práctico, la investigación permitió de manera concreta, la comprensión del proceso de curvado.

Al final del documento, se presentan las referencias empleadas en la investigación, los anexos y los índices de cuadros y figuras, así como la lista de símbolos y abreviaturas.

La investigación se realizó en el Laboratorio de Mecánica de la madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Los trabajos estuvieron supervisados por el Doctor Javier Ramón Sotomayor Castellanos.

La investigación llegó a buen término gracias al apoyo de los Profesores de la Facultad. Además, la reconocida calidad académica del Programa de la Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera, permitió al autor de esta tesis, obtener una beca académica por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, para realizar sus estudios de Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera, en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.



Julio 5, 2011

## 2 ANTECEDENTES

El capítulo antecedentes tiene por objetivo poner en contexto los conceptos básicos que involucran a la investigación. A saber, las características tecnológicas de la madera de *Quercus scytophylla* y particularidades de los parámetros que se modifican por el tratamiento de plastificado higro-térmico de la madera.

Por otra parte, este capítulo pretende igualmente revisar los trabajos anteriores acerca del curvado de la madera, los métodos no destructivos y los tratamientos térmicos que cambian las propiedades mecánicas de la madera.

### 2.1. Características tecnológicas de la madera de *Quercus scytophylla*

Respecto a las características del arbolado de *Quercus scytophylla*, Bello González y Labat (1987) y Arizaga y col. (2009), presentan la descripción de la especie, los usos de la madera, el hábitat y la distribución geográfica.

En cuanto a las particulares anatómicas de la especie, Pérez Olvera y Dávalos Sotelo (2008), estudiaron las características macro y micro anatómicas de la madera de *Quercus scytophylla*.

En relación a las características físicas de la madera, Pérez Olvera y Dávalos Sotelo (2008), estudiaron las características físicas y mecánicas de la madera de *Quercus scytophylla*.

Por su parte, Sotomayor Castellanos y col. (2010), empleando la técnica de ultrasonido, determinaron entre otros parámetros tecnológicos, las velocidades del ultrasonido y los módulos de elasticidad para las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera en estudio.

Recientemente, Hernández Maldonado (2010), estimó para la madera de *Quercus scytophylla*, empleando modelos de predicción a partir de la densidad de la madera, las características elásticas relacionadas con el modelo general de comportamiento elástico de la madera.

Estas investigaciones, indican que la madera de *Quercus scythopylla*, está caracterizada tecnológicamente como materia prima. Sin embargo, en el Estado de Michoacán, su empleo racional 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.

Parece conveniente que para diversificar sus usos, se efectúen estudios intensivos de maquinado de esta especie. Por ejemplo, desarrollar una técnica de curvado específica para esta madera.

Respecto al comportamiento elástico de la madera, cuando su temperatura y su contenido de humedad varían, tomando información presentada por Hernández Maldonado (2010):

*“El valor de las características elásticas de la madera disminuye proporcionalmente al contenido de humedad de ésta. Es decir, el contenido de humedad de la madera plastifica al material. Esta proporcionalidad depende entre otros parámetros de la especie de madera y de la característica que se trate. El fenómeno se observa preferentemente en el dominio higroscópico de la madera, es decir, en el intervalo que va del estado anhidro del material ( $H = 0\%$ ) al punto de saturación de la fibra (PSF:  $28\% < H < 32\%$ )”.*

La fenomenología del carácter higroelástico de la madera se ilustra en la Figura 2.1.

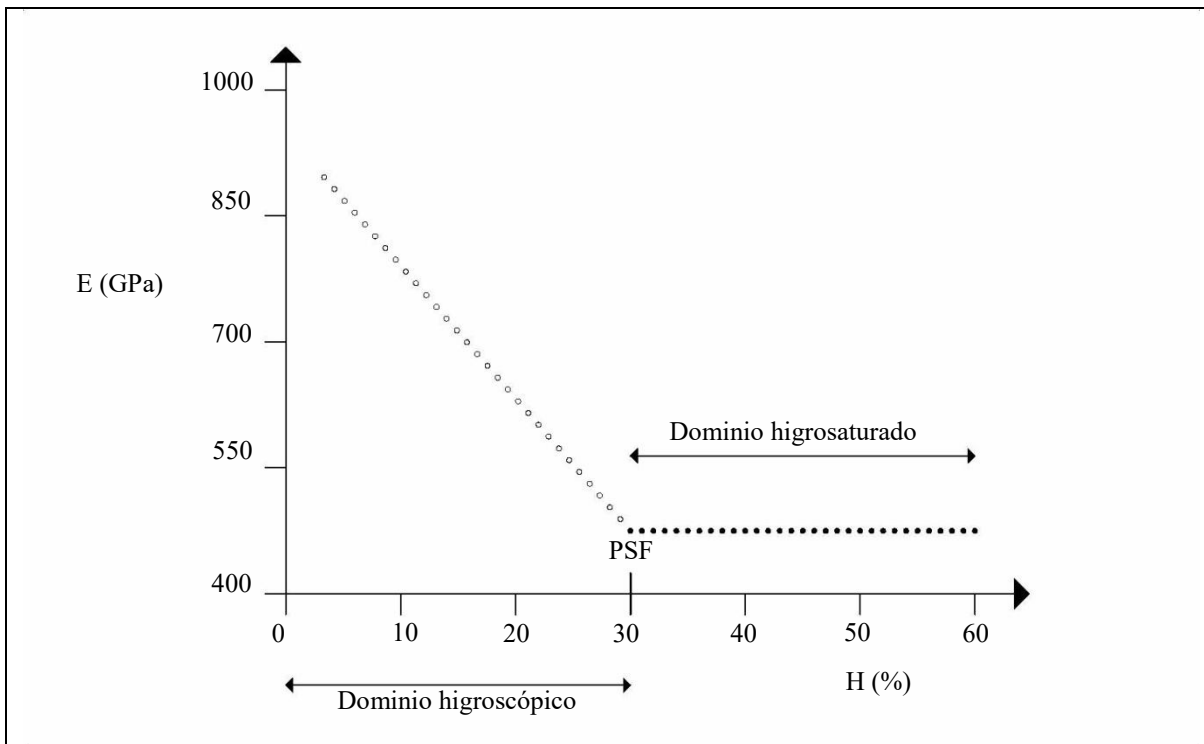


Figura 2.1. Comportamiento higroelástico de la madera (Fuente: Hernández Maldonado, 2010).

En cuanto a la temperatura y citando siempre a Hernández Maldonado (2010):

*“El valor de las características elásticas de la madera disminuye proporcionalmente a la temperatura ( $T$ ) y está relacionado con el contenido de humedad ( $H$ ) del material. Es decir, la temperatura y el contenido de humedad de la madera plastifican al material. Esta proporcionalidad depende igualmente entre otros parámetros de la especie de madera y de la característica elástica de que se trate. El fenómeno se observa preferentemente en dos dominios de temperatura. Un primer intervalo que va de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y un segundo intervalo que va más allá de una temperatura de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ”.*

Este comportamiento del carácter termoelástico de la madera se ilustra en la Figura 2.2.

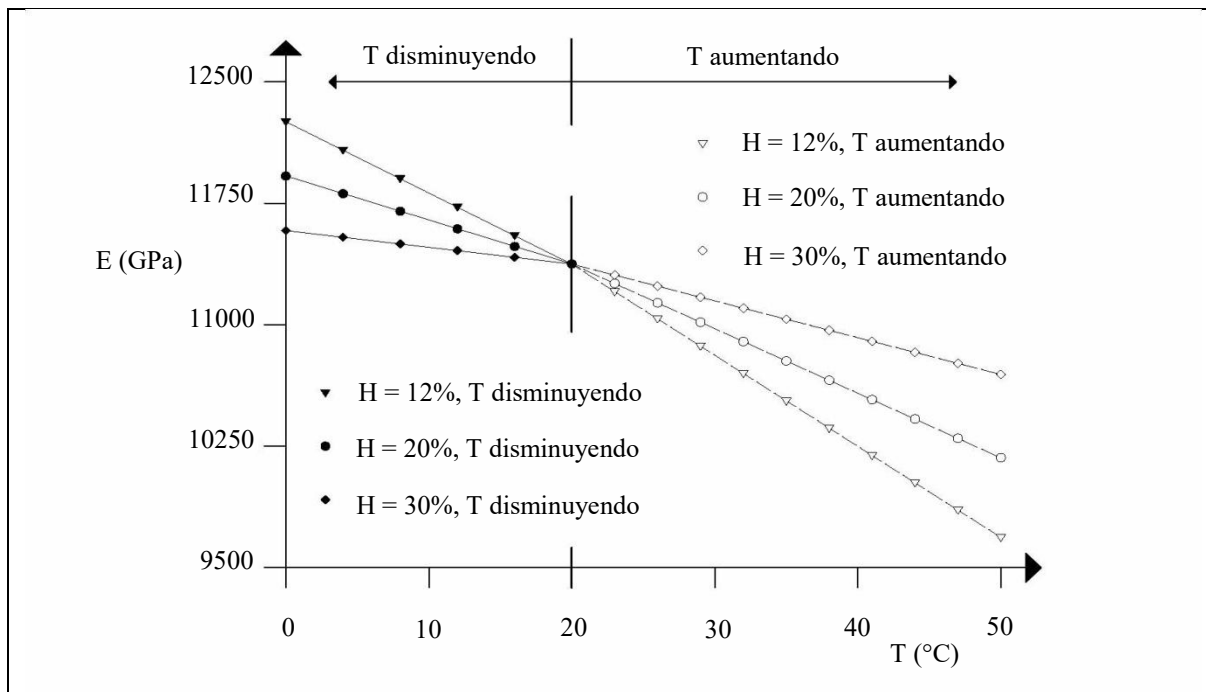


Figura 2.2. Comportamiento higrotermoelástico de la madera (Fuente: Hernández Maldonado, 2010).

Sintetizando los argumentos de Hernández Maldonado (2010), se entiende que:

La madera es un material higroelástico: si el contenido de humedad de la madera se incrementa, el módulo de elasticidad decrece. Este fenómeno tiene un efecto momentáneo y temporal. Es decir, cuando la madera recobra su contenido de humedad inicial, el valor del módulo de elasticidad se recupera.

La madera es un material termoelástico: 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.

Estas dos propiedades permiten tratar a la madera con calor y un contenido de humedad, de tal forma que se pueda alterar su capacidad elástica para fines de maquinado, en el caso que nos ocupa, el curvado de madera.

## 2.2. Curvado de la madera

El tema de curvado de la madera como técnica de maquinado, ha sido tratado por cuatro autores, cuyos trabajos han servido como referencia en Tecnología e Ingeniería de la madera. La información presentada por Wilson (1933), por el Manual No. 125 del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (Peck, 1957) y por Kollmann y Côté (1968), ha sido citada durante 80 años. Este conocimiento fue válido en su momento y en su contexto. En la actualidad, la información sobre el tema de curvado y plastificado de la madera sólida no está sistematizada ni actualizada. Para fines de la revisión de trabajos anteriores referidos al tema de esta investigación, se presentan las principales ideas de estos autores.

Wilson (1933), presenta sugerencias de carácter general para la selección de madera destinada al curvado con vapor. Igualmente el investigador propone astucias para optimizar el acondicionamiento y el suavizado de la madera. Además, Wilson describe algunos métodos de curvado y las características de la madera curvada.

Peck (1957), explica que cuando una pieza de madera es curvada, su lado convexo es tensionado y su lado cóncavo es comprimido. Como resultado, el lado convexo es más largo que su lado cóncavo, esto en relación a las dimensiones previas al curvado. Este estado de deformación es acompañado con un estado de esfuerzo que tiende a regresar a la pieza curvada en su forma recta original. Dado que la madera plastificada puede ser comprimida considerablemente pero estirada muy poco, un objetivo importante en un proceso de curvado es minimizar el tensionado de la madera.

El propósito de suavizar o plastificar a la madera con agentes químicos, de calor y de humedad pretende restringir el estado de estos esfuerzos.

Si el estado de deformación alcanza el dominio plástico, esta deformación deviene permanente.

Peck (1957), recomienda que el propósito del tratamiento de suavizado previo al curvado, es el de calentar la madera, la cual es más plástica en este estado y a la vez humedecerla, lo cual favorece igualmente al curvado. Sin embargo un excesivo suavizado de la madera puede ocasionar ruptura de esta. Por esta razón este autor recomienda para suavizar madera, una temperatura de vapor saturado en presión atmosférica de alrededor de 100 °C. Igualmente, a partir de resultados experimentales, Peck recomienda que el curvado por flexión sea realizable para curvaturas ligeras, donde la tasa de deformación en las dimensiones de las caras exteriores e interiores de la curva no sobrepase el 3%.

Kollmann y Côté (1968), exponen las cualidades que ofrece el curvado de la madera, como técnica de transformación del material. Entre otras ventajas, los autores indican que el curvado de la madera minimiza el desperdicio de material, que 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.

Finalmente, Kollmann y Côté 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. Así mismo recomiendan que las maderas de especies angiospermas son recomendables para procesos de curvados en comparación con las especies gimnospermas.

Entre las principales características tecnológicas de la madera deseable 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 recomiendan temperaturas máximas de 100 °C y tiempos de exposición de 1 hora por cada 25 milímetros de espesor de las piezas. Estos parámetros en principio 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 higro-térmico. Los investigadores concluyen que la densidad de la madera es uno de los factores principales para determinar la vocación de una especie para tratamientos de curvado. Para determinar 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., 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.

Los parámetros necesarios al curvado de madera y medidos por los autores anteriores, serán empleados como referencia para el desarrollo de la metodología de esta investigación.

Makinaga y col. (1997), detallan un procedimiento higro-térmico para plastificar madera de *Celtis occidentalis*. Empleando un rango de temperatura de vapor entre 150 y 220 °C, los autores encontraron que los radios de curvatura se pueden disminuir de manera significativa. Además, sus resultados muestran que un proceso de suavizado higro-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. Estas condiciones son semejantes a las empleadas en esta investigación.

Por su parte, 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 graduación 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. De aquí, la idea de trabajar en esta investigación con la especie *Quercus scytophylla*, la cual es una madera angiosperma de clima templado.

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, utilizando vapor de baja presión, es una práctica barata y eficiente para procesos en escala semi-industrial. Un resumen de la tecnología de curvado, se puede explicar en el Cuadro sinóptico 2.1, adaptado de Katsuragi (2005).

Cuadro 2.1. Métodos para curvado de madera, adaptado de Katsuragi (2005).

<i>Curvado de madera</i>	Curvado de madera laminada			
	<i>Curvado de madera sólida</i>	Curvado por cortes de sierra		
		Proceso de curvado por tratamiento químico	Tratamiento con amonía	
			Tratamiento alcalí	
		Curvado por compresión		
		Curvado en frío		
		<i>Curvado caliente</i>	Calentamiento interno (microondas)	
	<i>Curvado externo</i>		Método de calentamiento directo	
			Método por plato caliente	
			Método de cocimiento	
<i>Métodos con vapor</i>			Método a alta presión	
	<i>Método de baja presión</i>			

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.

Siguiendo al Cuadro 2.1, se pueden citar, de manera no exhaustiva, trabajos anteriores sobre las diferentes técnicas de curvado, en el siguiente orden:

El curvado de madera laminada ha sido estudiado entre otros por Hernández Santiago y col. (2008); Detalles sobre la técnica de curvado por cortes de sierra, puede ser consultada en Katsuragi (2005); La fenomenología de la modificación de la madera por tratamientos químicos y su influencia en el proceso de curvado, puede ser examinada, entre otros en Weigl y col. (2011) y Rowell y col. (2002); La tecnología de la densificación de la madera

y sus implicaciones en la técnica del curvado por compresión, puede ser revisada, entre otros autores en Kutnar y Šernek (2007).

Respecto a las técnicas de curvado en frío, se puede obtener información en el sitio de la red de la compañía *Pure Bending: the Extreme Wood Bending Company*, en: <http://www.flutedbeams.com/home.html>; En relación al método de curvado por calentamiento interno, Norimoto y Gril (1993) y Makinaga y col. (1997), presentan sus resultados empleando una técnica de microondas.

Por otra parte, información sobre el curvado externo con métodos de calentamiento directo, de plato caliente y por cocimiento, puede ser consultada en Peck (1957), Rowell (2002) y Hwang y col. (2002).

Finalmente, la tecnología de curvado por métodos con vapor, esta detallada entre otros autores por Kollmann y Côté (1968) y Niemiec y Brown (1995). En general, información comercial y sobre técnicas de curvado de madera, puede ser consultada en el sitio de la compañía *Finewoodworking*, en: <http://www.finewoodworking.com/>.

A manera de síntesis de los trabajos revisados sobre las técnicas empleadas para el curvado de la madera, y considerando el contexto propuesto por Katsuragi (2005), referido en el Cuadro 2.1, esta investigación se orienta hacia la técnica de curvado de madera sólida, con un tratamiento higro-térmico de baja presión.

De tal forma, surge la pregunta de investigación siguiente:

¿A nivel de metodología experimental, es posible plastificar madera sólida de *Quercus scytophylla*, para arcos y secciones esbeltas, empleando la técnica de curvado para madera, con un tratamiento higro-térmico de baja presión?

### 2.3. Métodos no destructivos

Garcia y col. (2010), evaluaron el efecto del tratamiento térmico sobre la madera de *Eucalyptus grandis*, con temperaturas que van de 180 a 230 °C y por periodos de 15 minutos, 2 horas y 4 horas. Estos investigadores calcularon el módulo de elasticidad de la madera empleando un aparato de tecnología *Metriguard*®. Entre sus principales resultados, Garcia y col. observaron que el módulo de elasticidad medido por ondas de esfuerzo disminuyó hasta un 13%. Este resultado fue observado para tratamientos térmicos de 4 horas y a una temperatura de 230 °C. Igualmente los autores sugieren que el fenómeno está relacionado con modificaciones en la estructura química de la madera sufridas por el material durante el procedimiento experimental. En el marco experimental de esta investigación, se empleará un aparato similar al utilizado por estos autores.

Miettinen y col. (2005), estudiaron el efecto de tratamiento térmico sobre la velocidad de ultrasonido en piezas de madera del género *Pinus*. Entre sus diferentes tratamientos térmicos, los investigadores midieron la velocidad de ultrasonido a temperatura de 70 °C. Sus resultados indican una velocidad del ultrasonido en la dirección longitudinal de la madera en un intervalo de 5420 m/s a 5520 m/s. Estas velocidades de referencia se refieren

a madera con un contenido de humedad de alrededor del 12%. Además, los investigadores encontraron que la velocidad del ultrasonido aumenta a partir de una temperatura de 185 °C. De esta forma, Miettinen y col., confirmaron la utilidad de los métodos no destructivos en la evaluación del efecto de tratamientos térmicos en la madera.

Mohebbi y col. (2007), estudiaron el efecto del tratamiento térmico en madera de *Morus alba*. Sus temperaturas observadas fueron 100, 120 y 140 °C, por periodos de 1 y 5 horas. El método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad de la madera fue el de vibraciones transversales libres. Sus resultados indican que el tratamiento térmico aplicado por más de una hora incrementa ligeramente los valores del módulo de elasticidad.

Widmann y col. (2007), estudiaron madera de *Fagus sylvatica*, sometida a tratamiento térmico con una temperatura de 180 °C, con tiempos de tratamiento de 4, 8 y 16 horas. Los autores emplearon la tecnología *Grindosonic*®, para evaluar el módulo de elasticidad en vibraciones libres y la tecnología *Sylvatest*®, para estimar el módulo de elasticidad por ultrasonido. Además, Widmann y col. realizaron pruebas de flexión estática para contrastación de resultados con los métodos dinámicos. Estos parámetros dinámicos fueron correlacionados con la resistencia de la madera a la flexión. Sus datos indican que los módulos de elasticidad dinámicos correlacionan bien con el módulo de elasticidad estático.

Estos resultados sugieren que los métodos no destructivos pueden ser empleados para el estudio y la predicción de parámetros mecánicos de la madera, cuando ha sido sometida a tratamientos térmicos. Un resultado importante de estos investigadores, aplicado para la presente investigación, es que la resistencia a la flexión de la madera de *Fagus sylvatica*, después de haber sido sometida a tratamiento térmico, se redujo hasta un 30% en comparación con madera sin tratamiento.

Por su parte, Cornejo Troncoso y Beattig Palma (2009), estudiaron el módulo de elasticidad de la madera de *Pinus radiata* en vibraciones transversales y su variación cuando la temperatura aumenta de 0 a 100 °C. Los autores observaron que a medida que la temperatura aumenta, el módulo de elasticidad disminuye, con una tasa de -0.2 % por °C.

De acuerdo a los autores citados en los párrafos precedentes, los métodos no destructivos han demostrado su utilidad en la caracterización mecánica de madera tratada térmicamente. Sin embargo, no se encontraron antecedentes de la aplicación de estas técnicas en estudios donde la madera sea modificada con calor y deformada geométricamente, como es el caso que nos ocupa de curvado de la madera. De tal forma, surge la pregunta de investigación siguiente:

¿Es adecuada la técnica de ondas de esfuerzo, para caracterizar la calidad de curvado de madera sólida, plastificada con un tratamiento higró-térmico de baja presión?

#### 2.4. 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. 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, por ejemplo el tipo, forma y dimensiones de las probetas, así como los métodos experimentales.

A manera de ejemplo, Oltean y col. presentan resultados de varios investigadores: Thompson (1969), encuentra una reducción en el módulo de elasticidad de 1.6% en madera *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 un 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 de secados bajos y moderados. 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. Las contradicciones entre los resultados de los párrafos anteriores, ponen en evidencia la dificultad para interpretar resultados del efecto de tratamientos térmicos de baja y mediana intensidad.

Por otra parte, resultados analizados por Salamon (1969), mostraron que temperaturas altas de secado (90 °C a 130 °C) reducen de manera permanente la resistencia de la madera. Sin embargo estos resultados son ambiguos y dependen de la especie en estudio.

Otros resultados de investigaciones citados por Estevez y Pereira (2009) y Oltean y col. (2007), demuestran que el calor reduce las propiedades elásticas y de resistencia de la madera. Este fenómeno se observó generalmente para temperaturas superiores a los 100 °C.

De acuerdo con estos autores, parece ser que en tratamientos térmicos comprendidos en el intervalo que va de 0 a 100 °C, la madera sólida no presenta una influencia permanente en lo que respecta a sus propiedades mecánicas.

Parece entonces interesante investigar el efecto de la temperatura en un rango medio de 60 a 95 °C, empleando un método no destructivo, con el objeto de aislar otros agentes que intervengan en la variación de la resistencia mecánica de la madera.

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, Estevez y Pereira 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.

Siguiendo siempre a Estevez y Pereira, la temperatura necesaria para iniciar este incremento en el módulo de elasticidad de la madera es de alrededor de 120 °C, y para iniciar el proceso de degradación de la celulosa es necesaria una temperatura del alrededor de 160 °C. Por otra parte, los investigadores reportan que la madera se fragiliza

mecánicamente por el deterioro de las hemicelulosas. De esta forma Estevez y Pereira identifican temperaturas críticas y componentes químicos cuyo deterioro implica una alteración en las propiedades mecánicas de la madera.

Por su parte, 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 variables tales como 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.

Respecto a la transformación de la constitución química de la madera, ocasionada por tratamientos térmicos, se pueden consultar entre otros, a los siguientes autores: Rowell y col. (2002), Abe y Yamamoto (2006), Boonstra y col. (2007), Kocaefe y col. (2008), Esteves y Pereira (2009) y Tumen y col. (2010).

Información sobre la temperatura y la humedad, como variables que intervienen en el proceso de plastificado higro-térmico, puede ser consultada entre otras referencias en: Brown y col. (1952), Fengel y Wegener (2003), Forest Products Laboratory (1999), Hon y Shiraishi (2001), Kollmann y Côté (1968), Kollmann y col. (1975), Panshin y de Zeeuw (1964), Siau (1984), Siau (1995), Stamm (1964) y Walker (2006).

En otra escala de observación, y con el objeto de mejorar las características tecnológicas de la madera y de satisfacer requerimientos de calidad de productos derivados de madera, se han desarrollado tratamientos térmicos a la madera a nivel industrial. Información sobre estas tecnologías, puede ser consultada entre otros en Boonstra y col. (2007), Rowell y col. (2002) y en el manual *Thermo-Treated Wood Research* (Westwood Timber Group, 2010).

A manera de síntesis de la revisión de antecedentes sobre el tema de plastificado higro-térmico de la madera de *Quercus scytophylla*, se puede concluir que:

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

En general, cuando los valores de las propiedades mecánicas de la madera se ven disminuidos por el efecto de tratamientos térmicos, la temperatura en la cual empieza a observarse este fenómeno es de 160 °C. Un tratamiento de menos de 100 °C, no deberá modificar las características mecánicas de la madera.

No obstante que hay innumerables estudios que relacionan las propiedades tecnológicas de la madera a tratamientos térmicos, los resultados son comparados entre diferentes especies, tipos y estados de madera, lo cual redundando en resultados difíciles de contrastar debido a la gran diversidad de especies, procesos experimentales y enfoque analíticos.

Las investigaciones sobre el efecto del calor en la madera, combinan frecuentemente la temperatura del procedimiento con el contenido de humedad de la madera, de tal forma, que el tratamiento tiene un carácter higro-térmico.

De los argumentos anteriores surge la pregunta de investigación siguiente:

¿Se puede observar un efecto permanente en la rigidez de la madera sólida de *Quercus scytophylla*, al suavizarla con temperatura y humedad, y al deformarla plásticamente?

A manera de síntesis del capítulo, la revisión de los trabajos anteriores permitió advertir las dimensiones de los parámetros requeridos para el proceso de curvado de la madera, e igualmente, plantear las preguntas de investigación.

Julio 5, 2011

### 3 HIPÓTESIS

Las hipótesis de trabajo para la investigación son las siguientes:

- La madera sólida de *Quercus scytophylla*, puede ser plastificada con un tratamiento higr-térmico.
- El tratamiento higr-térmico y el deformado plástico, no modifican su capacidad para transmitir ondas de esfuerzo.

Con las siguientes restricciones:

Estas hipótesis se enmarcan para el caso de estudio de madera sólida de *Quercus scytophylla*.

En este contexto, la madera está representada por una muestra de listones y de probetas de pequeñas dimensiones, libres de irregularidades de crecimiento y sin imperfecciones de maquinado.

El tratamiento higr-térmico se restringe a la temperatura de 92 °C, vapor saturado de baja presión y por un periodo de 50 minutos.

Para el plastificado de los listones, el contenido de humedad de la madera es superior al punto de saturación de la fibra.

Para el estudio de la capacidad de la madera para transmitir ondas de esfuerzo, el contenido de humedad de las probetas es de alrededor de 12%.

La medición de la transmisión de ondas de esfuerzo se limita a la dirección longitudinal de las probetas y para una curva de radio de 40 cm.

Julio 5, 2011

## 4 OBJETIVOS

Los objetivos de la tesis son:

### *Generales*

1. Plastificar madera sólida de *Quercus scytophylla*, con un tratamiento higro-térmico.
2. Evaluar la calidad de curvado, empleando la técnica de ondas de esfuerzo.

### *Particulares*

1. Fabricar un dispositivo para suavizar madera.
2. Implementar un dispositivo de flexión curva.
3. Elaborar 3 grupos de probetas: sin tratamiento, suavizadas y plastificadas.
4. Determinar la velocidad de las ondas de esfuerzo en los 3 grupos de probetas.

Julio 5, 2011

## 5 MATERIALES Y MÉTODOS

El capítulo materiales y métodos tiene por objetivo describir el material experimental utilizado, así como detallar los diferentes procedimientos de laboratorio, llevados a cabo con la finalidad de plastificar listones de madera de *Quercus scytophylla*, y realizar posteriormente pruebas de flexión estática. Como corolario, se realizaron ensayos de ondas de esfuerzo con probetas recortadas de los diferentes grupos de listones tratados.

La preparación del material experimental consistió en elaborar listones y probetas, ambos con geometrías rectas y curvas, los cuales fueron destinados a las diferentes pruebas de laboratorio. La etapa experimental tuvo como finalidad obtener datos sobre la rigidez aparente y la velocidad de ondas de esfuerzo en la madera, sometida ésta a tres tratamientos: madera suavizada con vapor, madera suavizada con vapor y deformada mecánicamente, y madera sin tratamientos de suavizado y/o deformado.

El plastificado de la madera es el resultado de dos procesos. Por una parte el material se suaviza por el efecto del calor, el cual se trasmite por medio de vapor de agua, y por el efecto de la humedad contenida en la madera. Por otra parte, una vez suavizada la madera, se somete a un tratamiento de deformado mecánico de carácter permanente.

En el cuadro de esta investigación, al tratamiento de suavizado térmico de la madera en estado de humedad saturado, combinado con el deformado mecánico en el dominio plástico del material, se le denomina tratamiento plastificado higro-térmico de la madera.

### 5.1. Materiales

El material experimental consistió en madera de la especie *Quercus scytophylla*, proveniente de un árbol colectado en el municipio de Morelia, Michoacán. La especie del árbol fue identificada por personal de la empresa concesionada para cosechar arbolado en esta región, de acuerdo a la ficha técnica de *Quercus scytophylla* Liebm., del Manual de la biodiversidad de encinos michoacanos (Arizaga, 2009).

A partir del árbol, se recortaron 2 trozas de 1.1 m de largo y de 45 cm de diámetro. De estas trozas, se aserraron tablonces de corte radial, de 50 mm por 125 mm de sección transversal.

Finalmente, se dimensionaron 4 grupos de listones para las experiencias preliminares, de referencia, de suavizado y de deformado. Estos listones se recortaron 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 (ver Figura 5.1).

### *Listones*

Un primer grupo de 20 listones, se destinó a las pruebas preliminares de rigidez aparente (ver Figura 5.2): 10 listones preliminares sin tratamiento (LPST) y 10 listones preliminares suavizados (LPS).

Un segundo grupo de 12 listones, no fue suavizado ni deformado, se escogió como grupo de referencia y se identificó como listones rectos sin tratamiento (LRST).

Un tercer grupo de 12 listones, se destinó al proceso de suavizado y se identificó como listones rectos suavizados (LRS).

Un cuarto grupo de 12 listones, se eligió para los procesos de suavizado y deformado (LSDP).

Los listones se mantuvieron hasta el momento de las experiencias preliminares, de referencia, de suavizado y de deformado, con un contenido de humedad saturado de 67% en promedio y a una temperatura de laboratorio de 23 °C. Esta estrategia, tuvo como objetivo, por una parte, uniformizar el contenido de humedad inicial de los listones y por otra, eliminar sustancias extraíbles de la madera que pudieran influir en las experiencias.

### *Probetas*

Una vez suavizados los listones y/o deformados, se procedió a elaborar con ellos las probetas destinadas a las pruebas de ondas de esfuerzo.

Del conjunto total de listones para las pruebas de ondas de esfuerzo, se recortaron 35 probetas, identificadas como probetas rectas sin tratamiento (PRST); además, se elaboraron 35 probetas, identificadas como probetas rectas suavizadas (PRS); y finalmente, se prepararon 35 probetas, identificadas como probetas suavizadas, deformadas y plastificadas (PSDP), llamadas también probetas curvas (ver Figura 5.2).

El contenido de humedad promedio de las probetas para las pruebas de ondas de esfuerzo, fue:

- Probetas rectas sin tratamiento (PRST): 11.96%.
- Probetas rectas suavizadas (PRS): 11.70%.
- Probetas suavizadas, deformadas y plastificadas (PSDP): 10.83%.

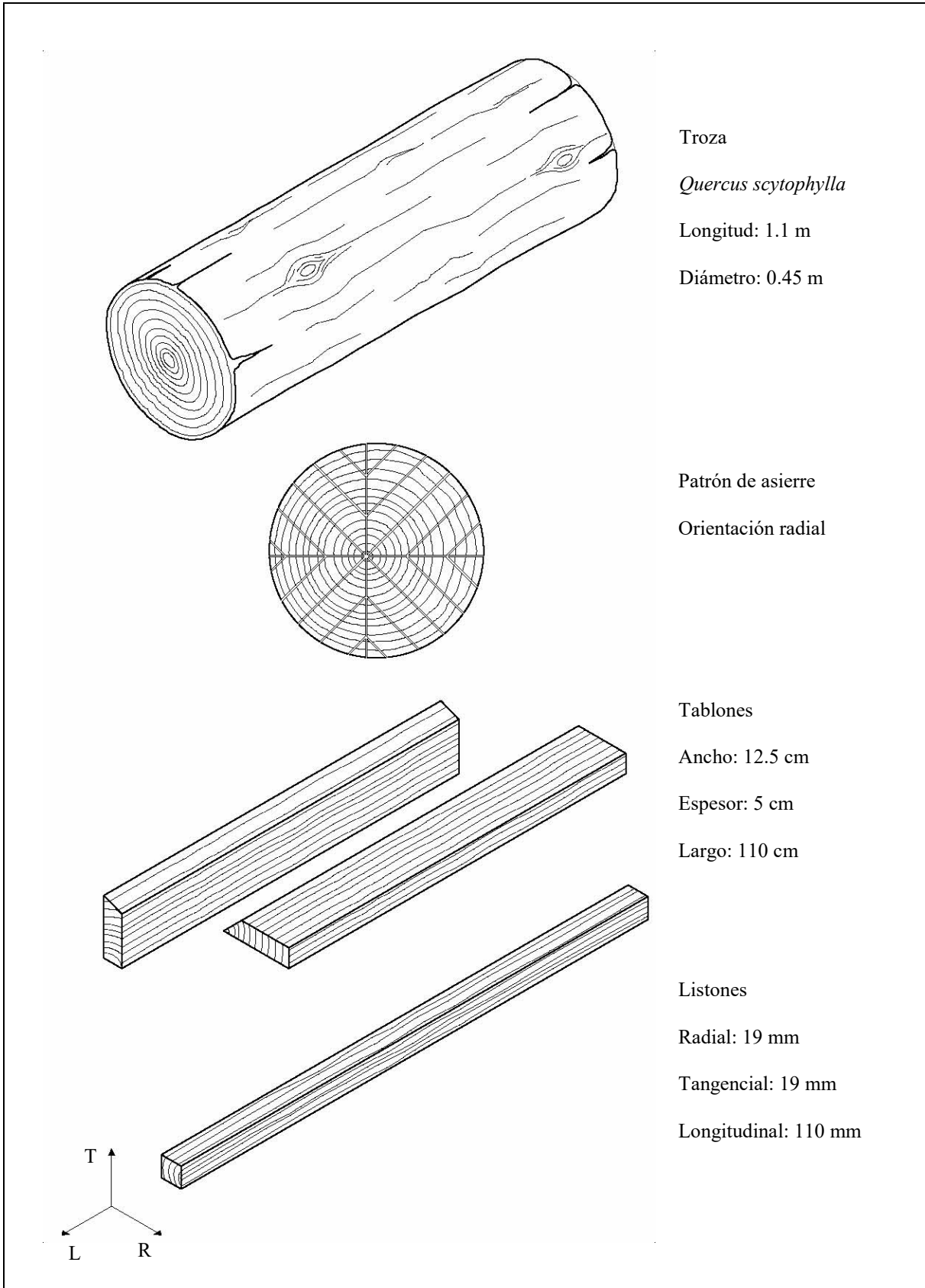


Figura 5.1. Elaboración de listones.



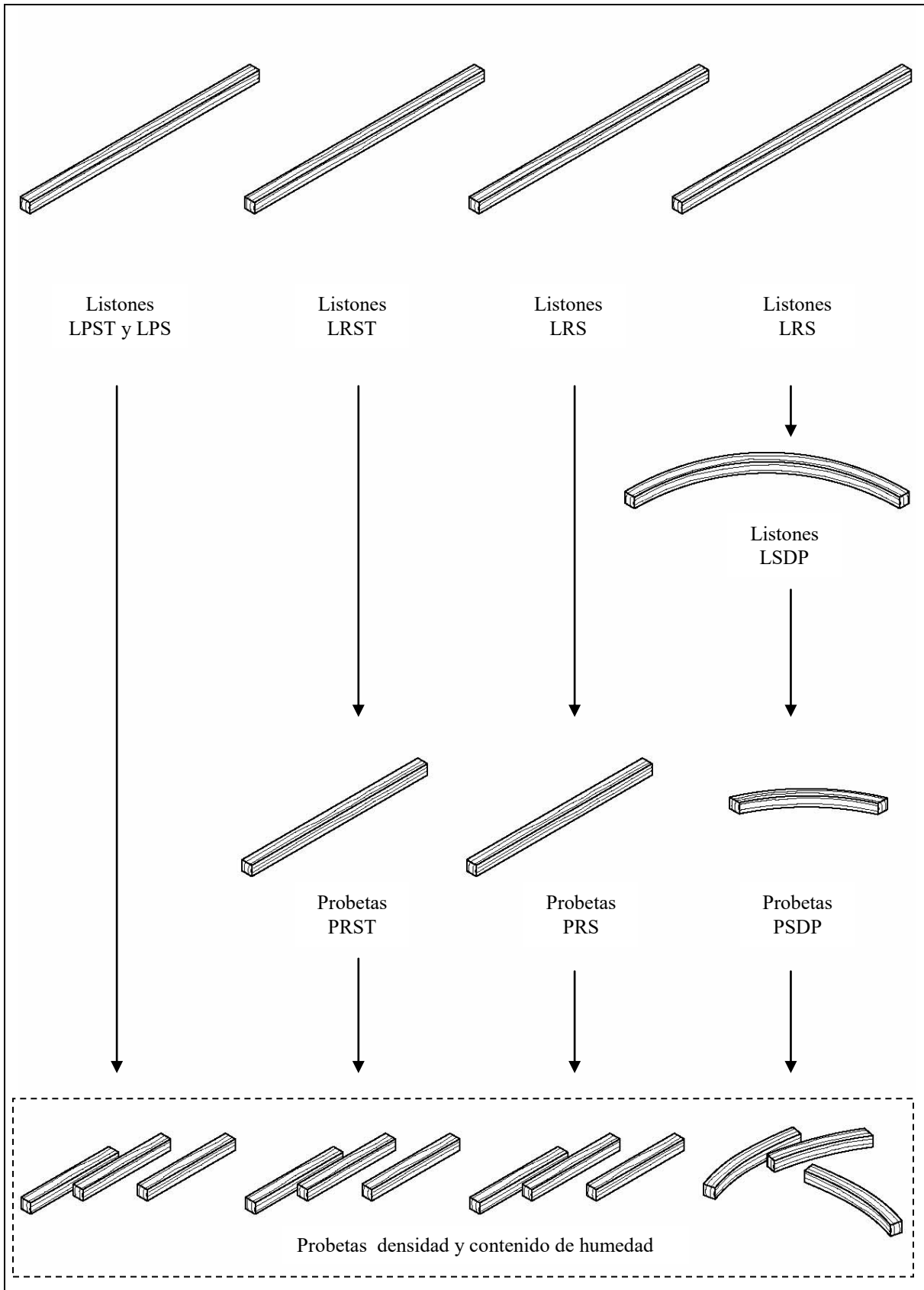


Figura 5.2. Clasificación de listones y probetas.

Las dimensiones de la sección transversal formada por el plano radial-tangencial, de las probetas PRST, PRS y PSDP, fueron las correspondientes a las de los listones de donde se recortaron. El largo de las probetas PRST y PRS en la dirección longitudinal fue de 320 mm. El largo de las probetas PSDP fue considerado en su eje medio geométrico, es decir de 31.74 mm en promedio y fue proporcional a su radio de curvatura de 40 cm.

Para las pruebas complementarias, se elaboraron 2 grupos más de probetas cortas:

Un quinto grupo de 20 probetas cortas, se destinó a las pruebas de densidad. Estas probetas se recortaron de los 10 listones sin tratamiento (LPST) de las pruebas preliminares de rigidez. Las dimensiones de la sección transversal formada por el plano radial-tangencial, fueron las correspondientes a los listones LPPR, de donde se recortaron. El largo de estas probetas en la dirección longitudinal fue de 100 mm.

Un sexto grupo de 45 probetas cortas, fue destinado a las pruebas de contenido de humedad, y se integró con: 15 probetas cortas, recortadas a partir de 5 probetas PRST; 15 probetas cortas, recortadas de 5 probetas PRS y 15 probetas cortas, recortadas de 5 probetas PRP.

Este último grupo de probetas cortas se preparó después de realizar las pruebas de ondas de esfuerzo. Las dimensiones de la sección transversal formada por el plano radial-tangencial, fueron las correspondientes a las probetas de donde se recortaron. El largo de estas probetas en la dirección longitudinal fue de 100 mm.

Esta estrategia de elaboración y clasificación de listones y probetas, se detalla en las Figuras 5.1 y 5.2.

## 5.2. Métodos

La etapa experimental se organizó en 4 ejercicios.

La primera modalidad fue de carácter preliminar y tuvo como objetivos por una parte, definir las variables del proceso de suavizado y ajustar el dispositivo empleado en este proceso. Por otra, las experiencias preliminares permitieron cuantificar el efecto del tratamiento higro-térmico en los listones de madera de *Quercus scytophylla*.

Un segundo experimento consistió en plastificar la madera. Primero, los listones se suavizaron aplicando vapor de agua, posteriormente, los listones se deformaron mecánicamente.

La tercera etapa complementaria, consistió en la determinación de la densidad aparente de la madera y del contenido de humedad de las diferentes probetas empleadas.

La cuarta serie de pruebas consistió en el estudio de la transmisión de ondas de esfuerzo en los tres grupos de probetas evaluadas: probetas rectas sin tratamiento (PRST), probetas rectas suavizadas (PRS), y probetas suavizadas, deformadas y plastificadas (PSDP).

### *Pruebas preliminares*

Las pruebas preliminares consistieron en ensayar 10 listones sin tratamiento (LPST) y 10 listones suavizados (LPS). Las dimensiones promedio fueron: 19 mm por 19 mm por 1.1 m, según las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L). El contenido de humedad de la madera (H) fue en promedio 67%.

Los listones LPST, se curvaron directamente en el dispositivo para deformación de tipo flexión curva, colocado en una maquina universal de ensayos mecánicos (ver Figura 5.3). En cambio, los listones LPS se trataron previamente en el dispositivo de suavizado (ver Figura 5.4) 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 sollicitación 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.

Los ensayos de flexión curva consistieron en sollicitar los listones en flexión transversal tres puntos, con una portada de flexión entre apoyos de 78 cm. A medida que la deformación del listón aumenta, paulatinamente la carga puntual aplicada a la mitad de la portada, se transforma en una carga uniformemente repartida y radial con respecto al centro geométrico del molde superior.

Una vez que la cara superior del listón copia la curvatura del molde superior de 40 cm de radio, la carga se detiene. El tiempo necesario para deformar el listón con una altura de cuerda de 28 cm es de 32 segundos. La carga (P) necesaria para deformar los listones suavizados fue de 1000 N. Este tiempo, carga y deflexión (y) del listón, son suficientes para curvar el listón con un radio de curvatura de 40 cm.

Como resultado de estas pruebas, se determinó la pendiente P/y en el dominio elástico para cada listón. De esta forma se pudieron comparar los valores estadísticos de 10 listones de los dos grupos ensayados: listones sin tratamiento y listones con tratamiento higro-térmico de suavizado.

La Figura 5.5 explica la diferencia entre las pendientes P/y de los listones LPST *versus* LPS. La pendiente P/y representa la rigidez aparente de un listón, y su diferencia explica el efecto del tratamiento higro-térmico de suavizado. Esta proporción fue de alrededor de 48%.

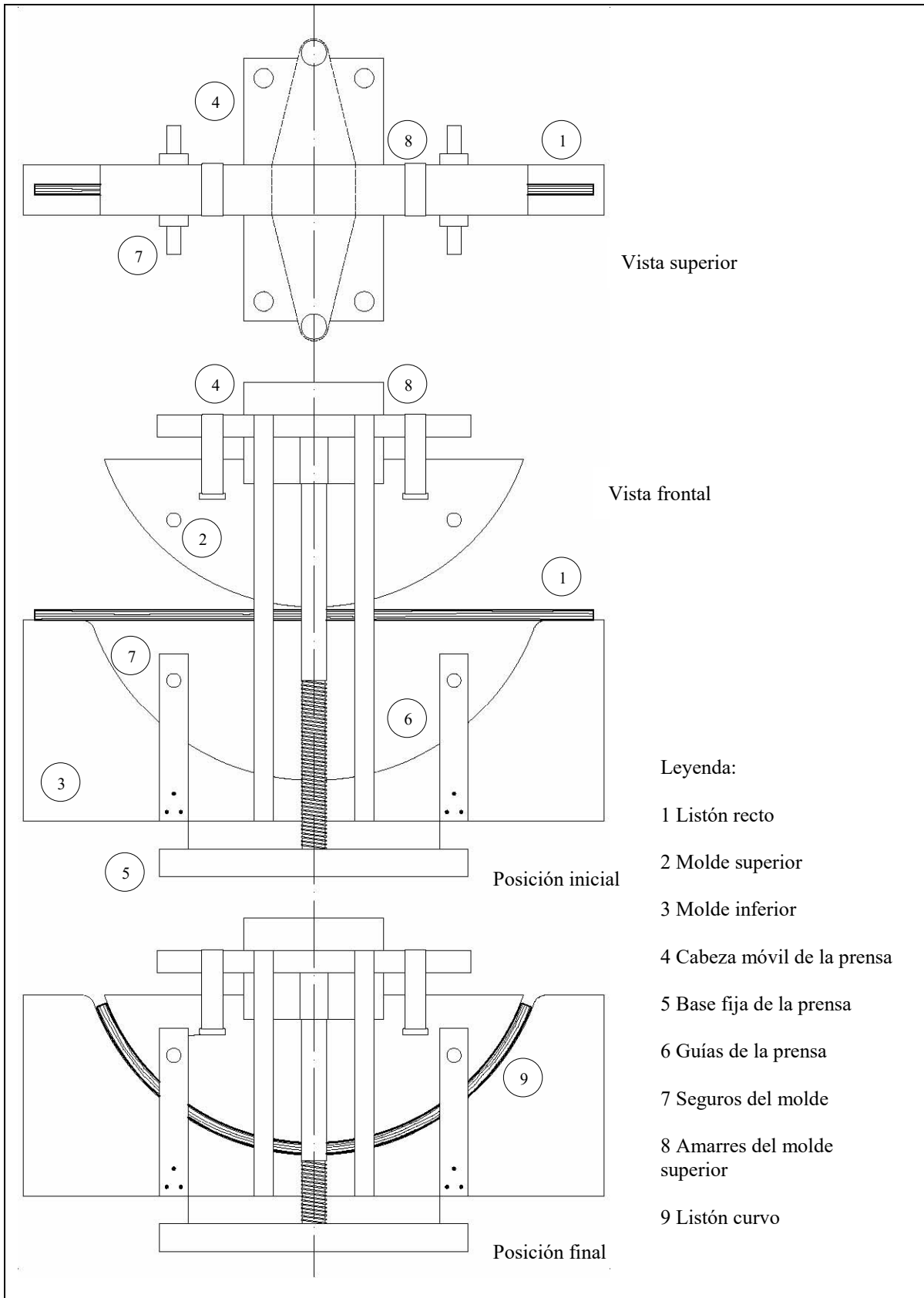


Figura 5.3. Dispositivo para deformación de flexión curva.

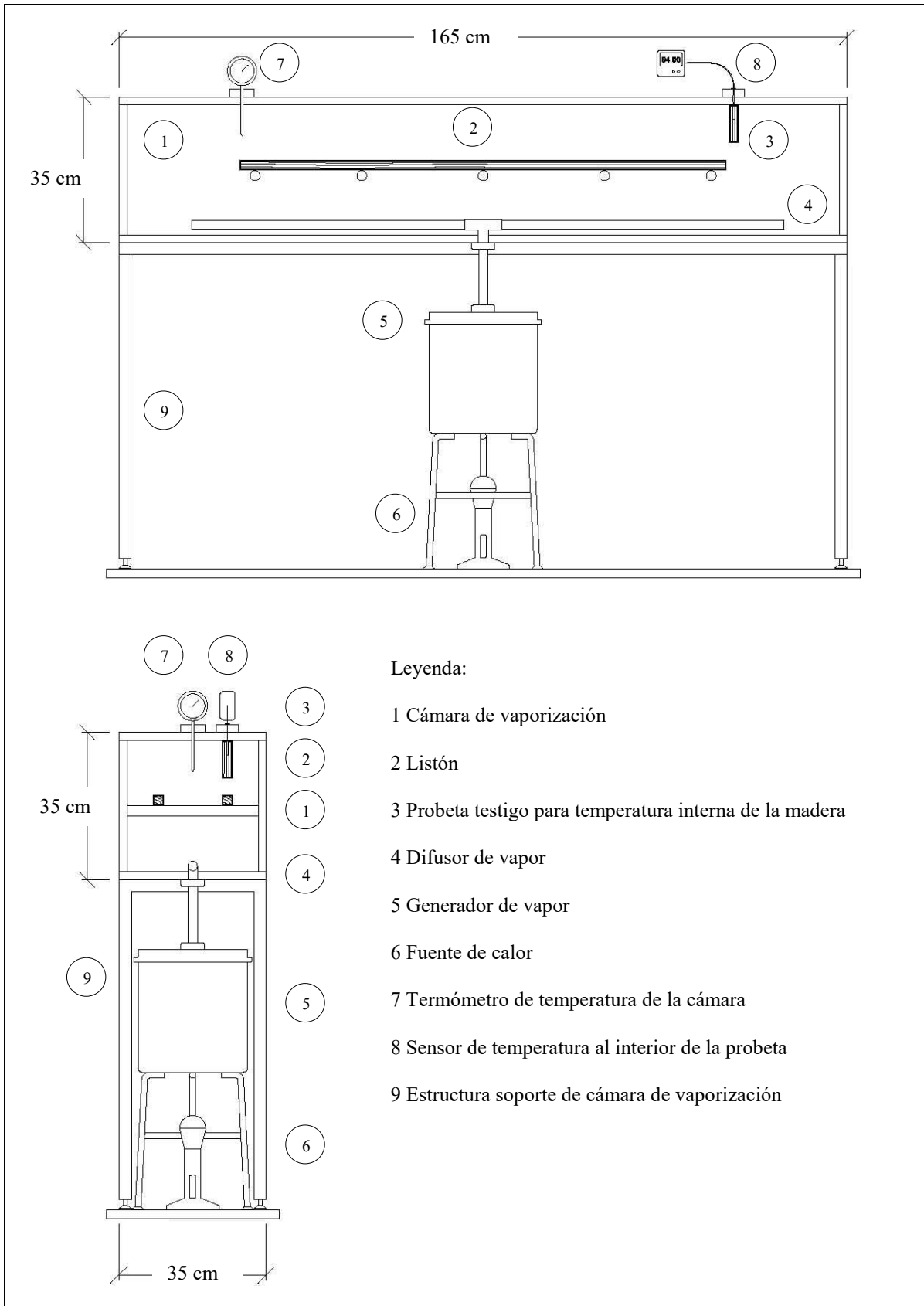


Figura 5.4. Dispositivo de suavizado.

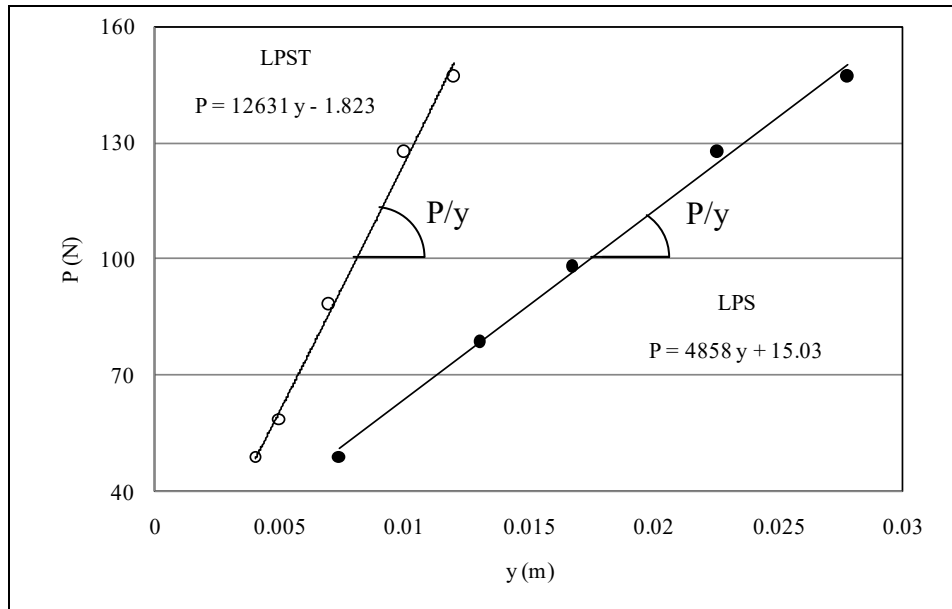


Figura 5.5. Pendientes  $P/y$  de un listón sin tratamiento (LPST) y de un listón suavizado (LPS) con tratamiento higro-térmico.

El módulo aparente en flexión ( $E_f$ ) de la madera de los listones, se determinó empleando la pendiente formada entre la carga ( $P$ ) y la deflexión ( $y$ ), ambas evaluadas a  $1/2$  de la portada de flexión ( $L$ ) y en el dominio elástico de la relación carga-deflexión, la portada entre apoyos del dispositivo para deformación de flexión curva (ver Figura 5.3) y el momento de inercia ( $I$ ) de la sección transversal de los listones, con la fórmula (Ashby, 2003):

$$E_f = \frac{P}{y} \frac{L^3}{48 I} \quad (5.1)$$

El desarrollo de la fórmula (5.1), se presenta en el anexo A.

### *Plastificado de la madera*

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

#### 1) Hidratado

Los listones se mantuvieron inmersos en agua, es decir, en estado húmedo y saturado durante 30 días, con el objeto de uniformizar el contenido de humedad de la madera.

#### 2) Suavizado

Los listones destinados a plastificado se trataron en el dispositivo de suavizado (Ver Figura 5.4) con la secuela de temperatura y contenido de humedad de la madera, presentada en la Figura 5.6.

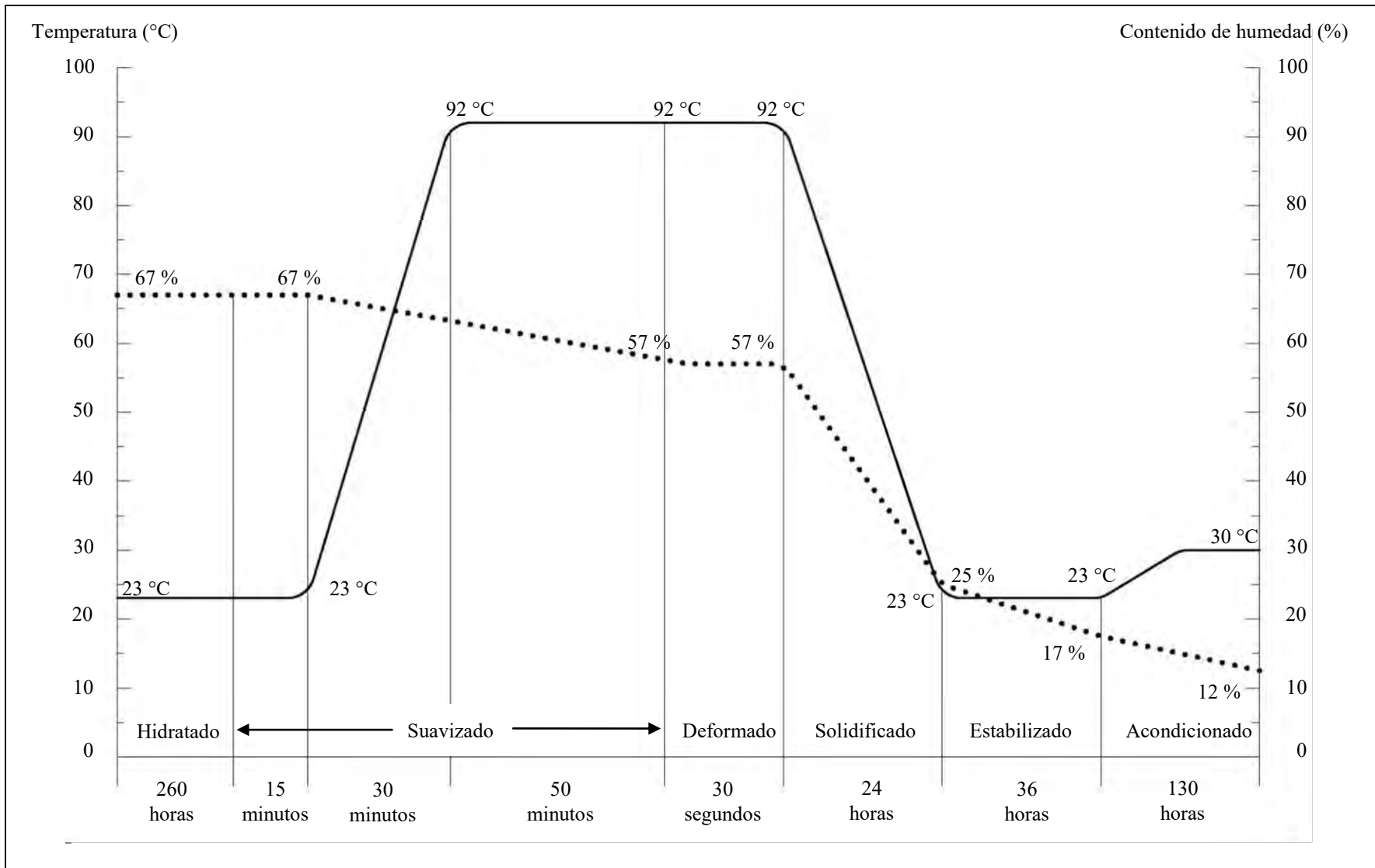


Figura 5.6. Temperatura y contenido de humedad de la madera durante el proceso de plastificado higro-térmico.

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 periodo de 30 minutos permite elevar la temperatura ambiente al 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 al interior de la cámara de suavizado y al interior de la madera.

Las temperaturas de esta operación fueron monitoreadas empleando dos termómetros. El primero de ellos, de carátula y de vástago registró la temperatura al interior de la cámara. El segundo fue un termómetro digital, que se colocó al interior de una probeta 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. Los detalles de la colocación de los termómetros se presentan en la Figura 5.7.

### 3) Deformado

Una vez suavizados los listones, con un contenido de humedad de 57% y a una temperatura de 92 °C, se procedió a colocarlos en el dispositivo para deformación de flexión curva presentado en la Figura 5.3, y se procedió a solicitarlos en flexión curva. La configuración y las variables del ensayo de flexión curva, fueron las mismas que las de las pruebas preliminares.

El deformado inicial de los listones se logra por el efecto de la sollicitación en flexión curva durante 32 segundos, hasta alcanzar la curvatura de los moldes de deformación del dispositivo de deformación curva. La curvatura final, se alcanza después de la permanencia del listón por un periodo de 24 horas en este dispositivo.

Los valores de la temperatura y del contenido de humedad de la madera durante las diferentes operaciones del proceso de plastificado higro-térmico, se esquematizan en la Figura 5.6.

### 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.

Una vez consolidada la madera, se procedió a dimensionar las probetas para las pruebas de ondas de esfuerzo (ver Figura 5.8).



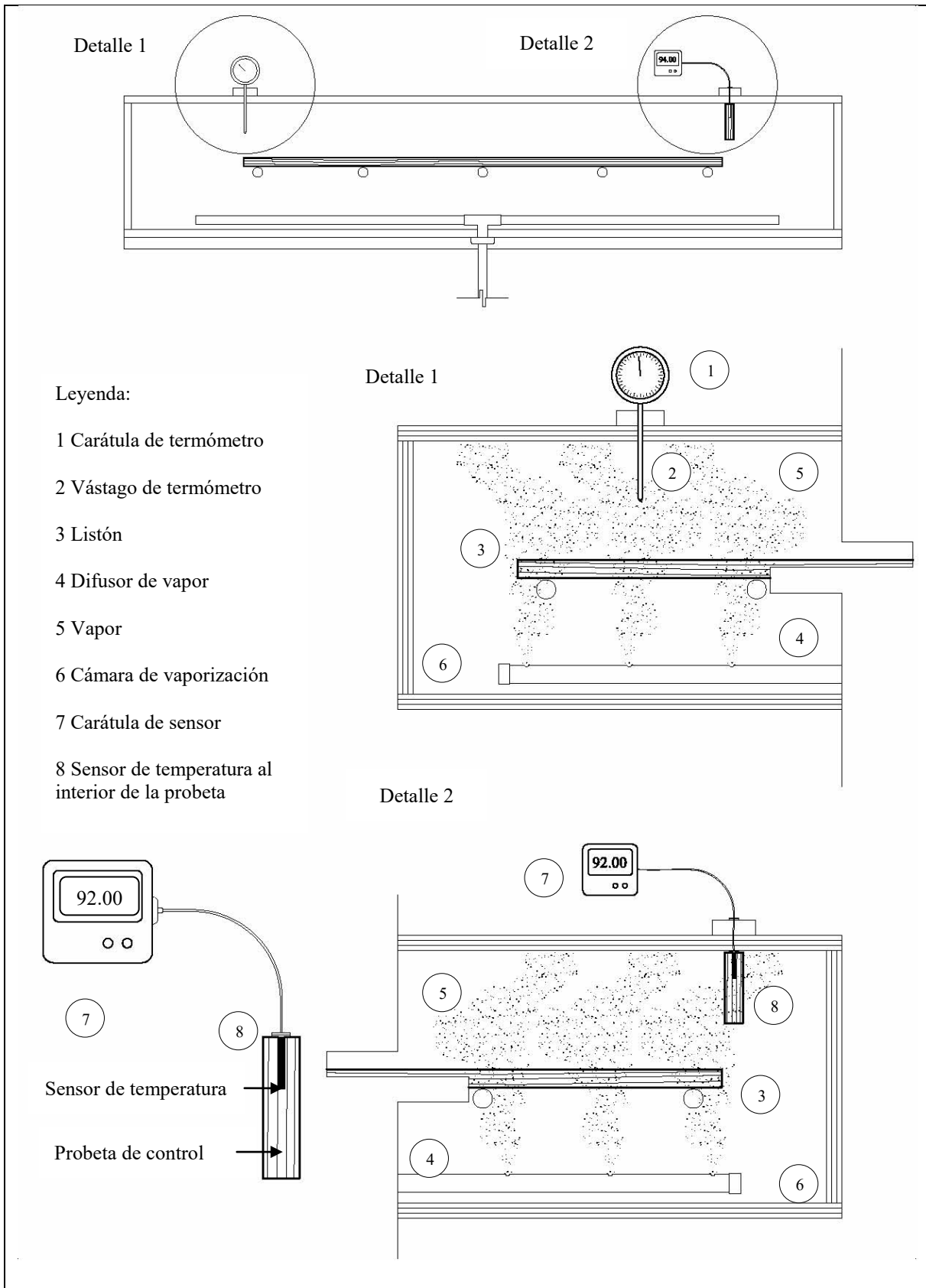


Figura 5.7. Detalles de la colocación de los termómetros.

Cuadro 5.1. Leyenda y simbología de la geometría y de las dimensiones de las probetas y de los segmentos de ondas de esfuerzo, presentados en la Figura 5.8.

Legenda	Símbolo y unidades	Probeta recta	Probeta (PSDP)	Segmento de ondas de esfuerzo
Longitud de arco exterior	Lext (mm)	-	32.4211	30.33
Longitud de arco eje al centro	Lcen (mm)	-	31.7405	29.70
Longitud de arco interior	Lint (mm)	-	31.0599	29.06
Longitud del eje al centro	L (mm)	320	-	300
Radio al arco exterior	Rext (mm)	-	417.53	417.53
Radio al arco central	Rcen (mm)	-	408.76	408.76
Radio al arco interior	Rint (mm)	-	400.00	400.00
Ángulo	( $\theta$ ) °	-	44.49	41.63
Área (R x L)	A (mm <sup>2</sup> )	-	556.41	520.58
Espesor dirección radial	R (mm)	17.53	17.53	17.53
Espesor dirección tangencial	T (mm)	18.67	18.67	18.67

### 5) Estabilizado y acondicionado

El contenido de humedad de la madera, se uniformizó durante 36 horas en condiciones de laboratorio (T = 23°C, HR = 36%). Finalmente los listones destinados a la elaboración de probetas, se colocaron en una cámara de acondicionamiento durante 130 horas, hasta alcanzar un contenido de humedad de alrededor del 12%.

En la Figura 5.8, se presentan dos geometrías: la longitud Lcen de la probeta, representa la distancia entre los extremos de la probeta, es decir, la dimensión L original antes del procedimiento de deformado, tal como se explica en la Figura 5.9. En cambio, la longitud Lext, al centro del segmento de ondas de esfuerzo, se refiere a la distancia entre soportes del equipo de medición de ondas de esfuerzo, es decir, la portada de ondas de esfuerzo.

La configuración del proceso higro-térmico de plastificado de la madera, esquematizado en la Figura 5.6, resultó en la geometría de los listones y de las probetas presentadas en las Figuras 5.8 y 5.9.

Los parámetros materiales de las probetas PSDP, a saber: las tasas de deformación en compresión ( $\epsilon_c$ ) y en tensión ( $\epsilon_t$ ), y la relación Radio/Espesor (RE), dimensiones derivadas del proceso de plastificado, fueron calculadas con las relaciones propuestas por Hwang y col. (2002):

$$\epsilon_t = \frac{L_{ext} - L}{L} \quad (5.2)$$

$$\epsilon_c = \frac{L_{int} - L}{L} \quad (5.3)$$

$$RE = \frac{R_{int}}{R} \quad (5.4)$$

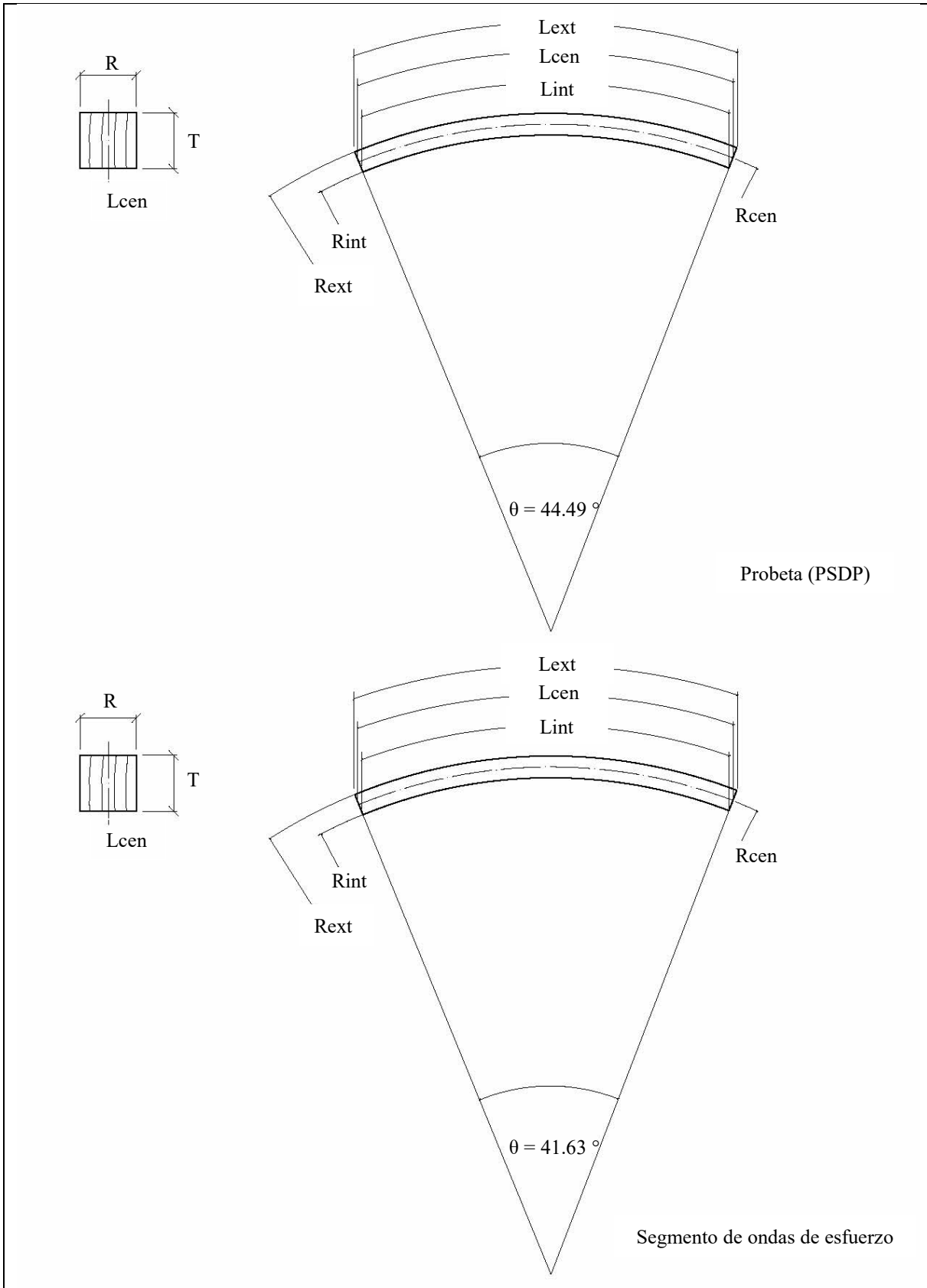


Figura 5.8. Geometría de las probetas. Ver leyenda en Cuadro 5.1.

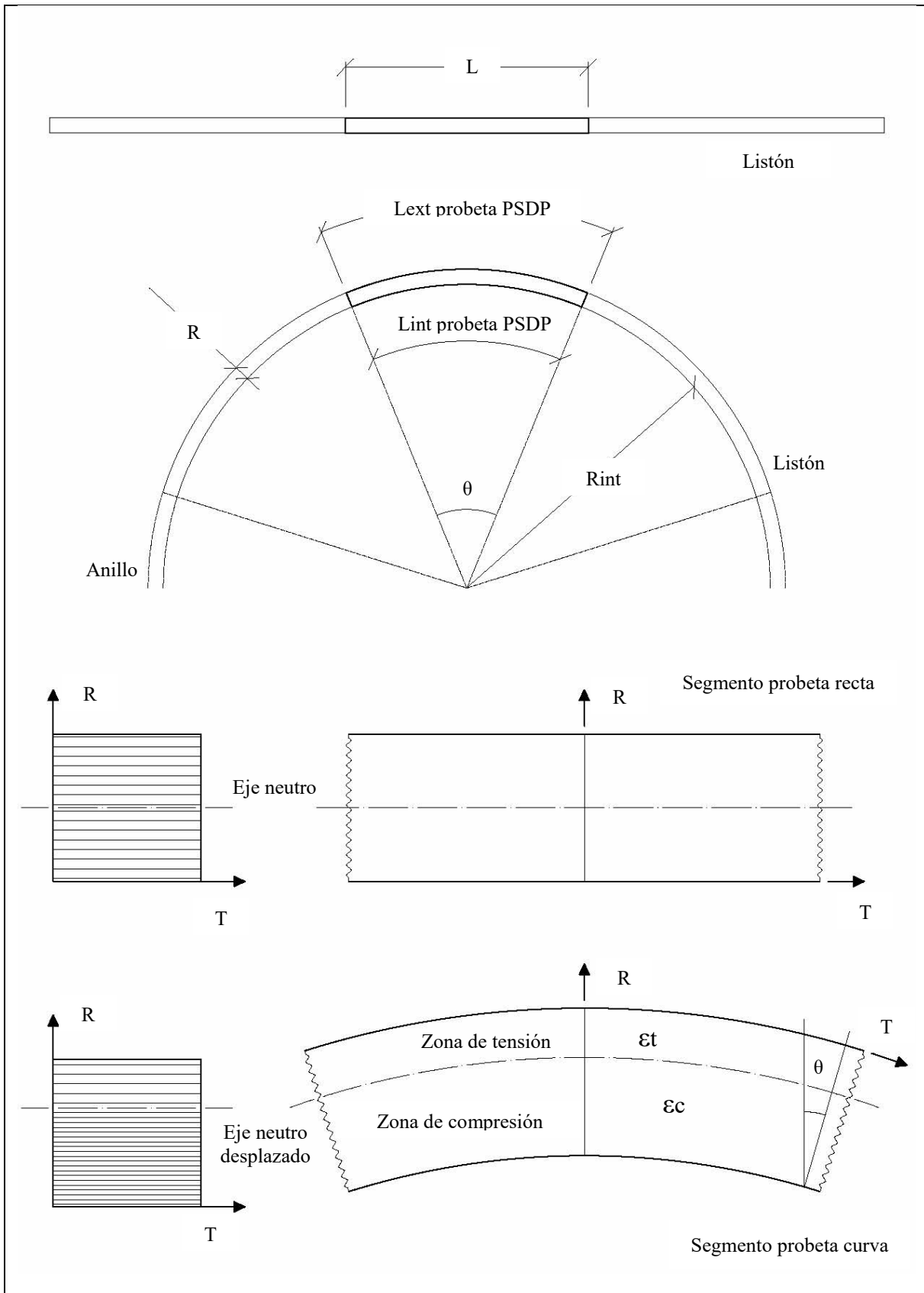


Figura 5.9. Geometría para el cálculo de tasas de compresión y relación Radio/Espesor.

## *Pruebas complementarias*

### *Densidad*

La densidad aparente ( $\rho$ ) de la madera representa la relación entre el peso de la probeta en estado anhidro ( $W_{H=0\%}$ ) y el volumen de la probeta con un contenido de humedad superior al punto de saturación de la fibra (PSF) ( $V_{H>PSF}$ ). Esta densidad aparente de la madera se determinó empleando probetas de cortas dimensiones recortadas de los listones correspondientes a los ensayos preliminares (ver Figura 5.2), con la relación:

$$\rho = \frac{W_{H=0\%}}{V_{H>PSF}} \quad (5.5)$$

### *Contenido de humedad*

El contenido de humedad (H) representa la proporción del peso de la masa de agua contenida en un volumen determinado de madera, en relación al peso de su masa del material en estado anhidro ( $W_{H=0\%}$ ). El porcentaje del contenido de humedad en la madera se calculó con la fórmula:

$$H = \frac{W - W_{H=0\%}}{W_{H=0\%}} \times 100 \quad (5.6)$$

### *Pruebas de ondas de esfuerzo*

Las pruebas de ondas de esfuerzo consistieron en medir el tiempo de recorrido de las ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal de tres tipos de probetas: 35 probetas rectas sin tratamiento (PRST); 35 probetas rectas suavizadas (PRS); y 35 probetas deformadas y plastificadas (PSDP).

El tiempo de recorrido de las ondas en la madera se midió empleando un cronómetro de marca *Metriguard*®. El tiempo empleado para cálculo y análisis subsecuentes, fue el tiempo promedio de tres solicitaciones en cada probeta. El dispositivo empleado para estas pruebas, se muestra en las Figuras 5.10 y 5.11.

La velocidad (Voe) de recorrido de las ondas de esfuerzo a lo largo de las probetas fue determinada por la relación entre la distancia de los apoyos de la probeta ( $L_p = 300$  mm), es decir, la portada de ondas de esfuerzo y el tiempo (t) de recorrido de la onda entre apoyos (ver Figuras 5.10 y 5.11).

La velocidad Voe en las probetas rectas fue determinada con la relación:

$$V_{oe} = \frac{L_p}{t} \quad (5.7)$$

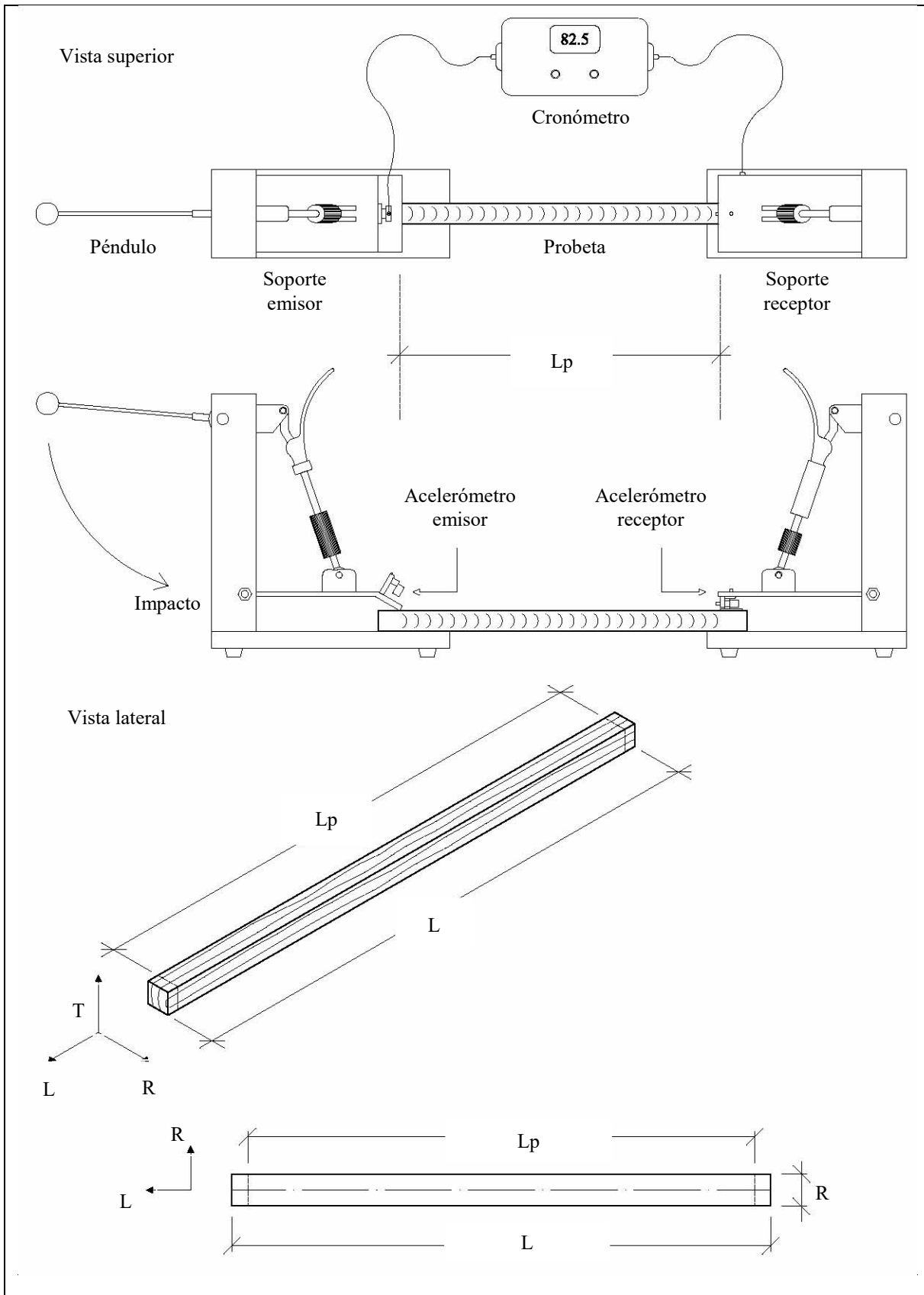


Figura 5.10. Dispositivo para pruebas de ondas de esfuerzo en las probetas rectas.

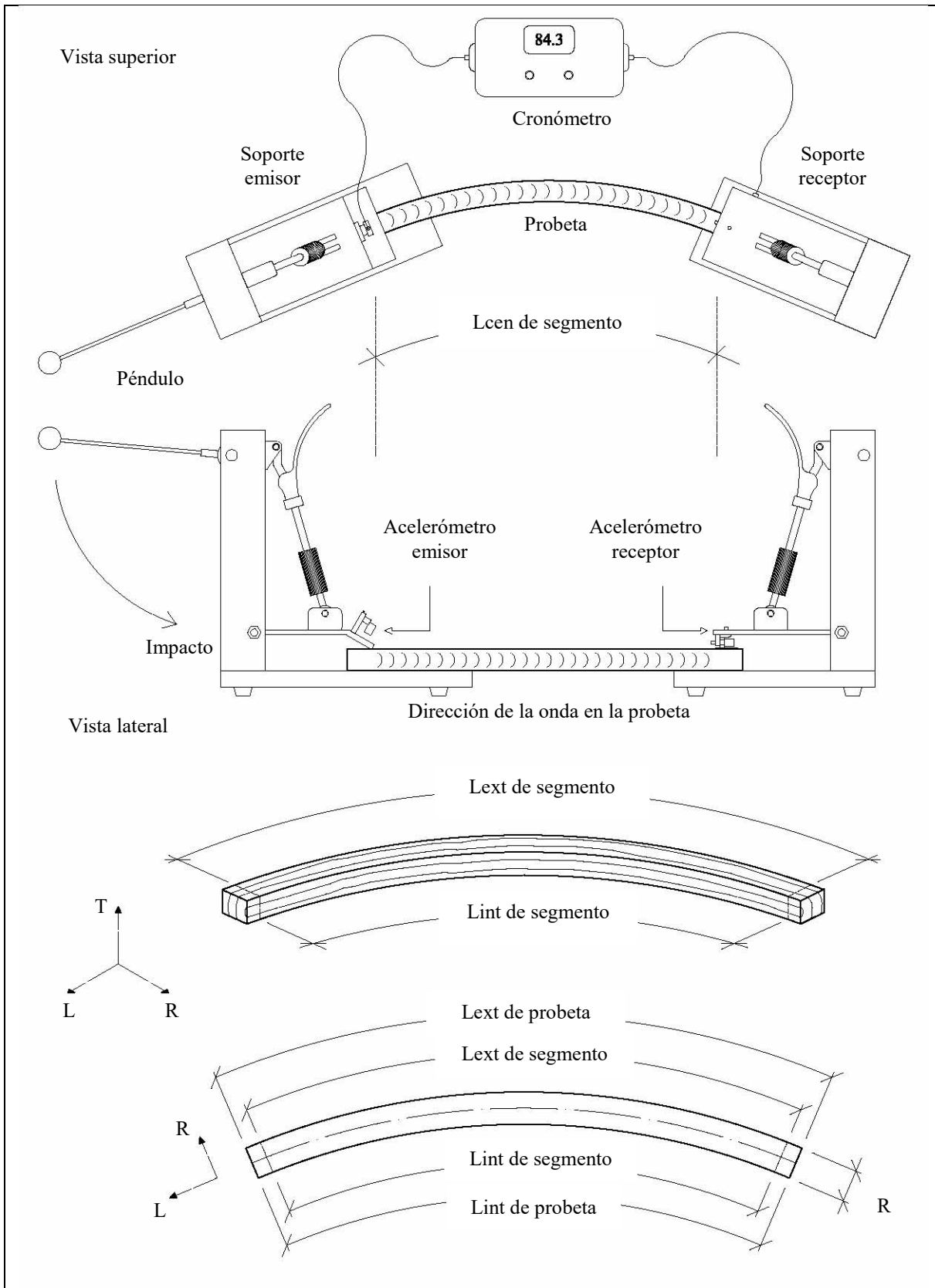


Figura 5.11. Dispositivo para pruebas de ondas de esfuerzo en las probetas curvas.

La velocidad  $V_{oe}$  en las probetas curvas fue determinada con la relación:

$$V_{oe} = \frac{L_{cen}}{t} \quad (5.8)$$

Donde  $L_{cen}$  es la longitud al centro geométrico en la dirección de las probetas curvas (ver Figura 5.8), calculado con la fórmula (Perré, 2007):

$$L_{cen} = 2 \theta R_{cen} \quad (5.9)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo formado por el centro de curvatura y los extremos de la probeta, y/o el segmento de ondas de esfuerzo (ver Figuras 5.8 y 5.9)

El módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo ( $E_{oe}$ ) en la dirección longitudinal de las probetas se calculó con la fórmula (Pellerin y Ross, 2002):

$$E_{oe} = \rho_{H=12\%} V_{oe}^2 \quad (5.10)$$

El desarrollo de la fórmula (5.10), se presenta en el anexo B.

Para el caso de las probetas curvas, el área del segmento del anillo formado por las longitudes  $L_{ext}$ ,  $L_{int}$  y  $R$  (ver Figura 5.9), se ajustó para el cálculo de la densidad  $\rho_{H=12\%}$ . Esta densidad se calculó con la fórmula (Young y Budynas, 2002):

$$\rho_{H=12\%} = \frac{2 W_{H=0}}{\theta R (2 R_{ext} - R) T} \quad (5.11)$$

A manera de síntesis, se puede decir que el capítulo materiales y métodos propone una metodología práctica, la cual permite plastificar listones de madera de *Quercus scytophylla*, de manera rápida y económica.

La implementación del procedimiento de plastificado permitió igualmente, identificar y cuantificar los principales parámetros necesarios para la deformación geométrica de los listones, empleando un método higro-térmico.

Por otra parte, la metodología permitió estudiar tres tratamientos aplicados a probetas de madera, para estudiarlas con un método de carácter no destructivo, como lo son las ondas de esfuerzo.

A manera de resumen la Figura 5.12, esquematiza la estrategia experimental que se detalla en este capítulo.



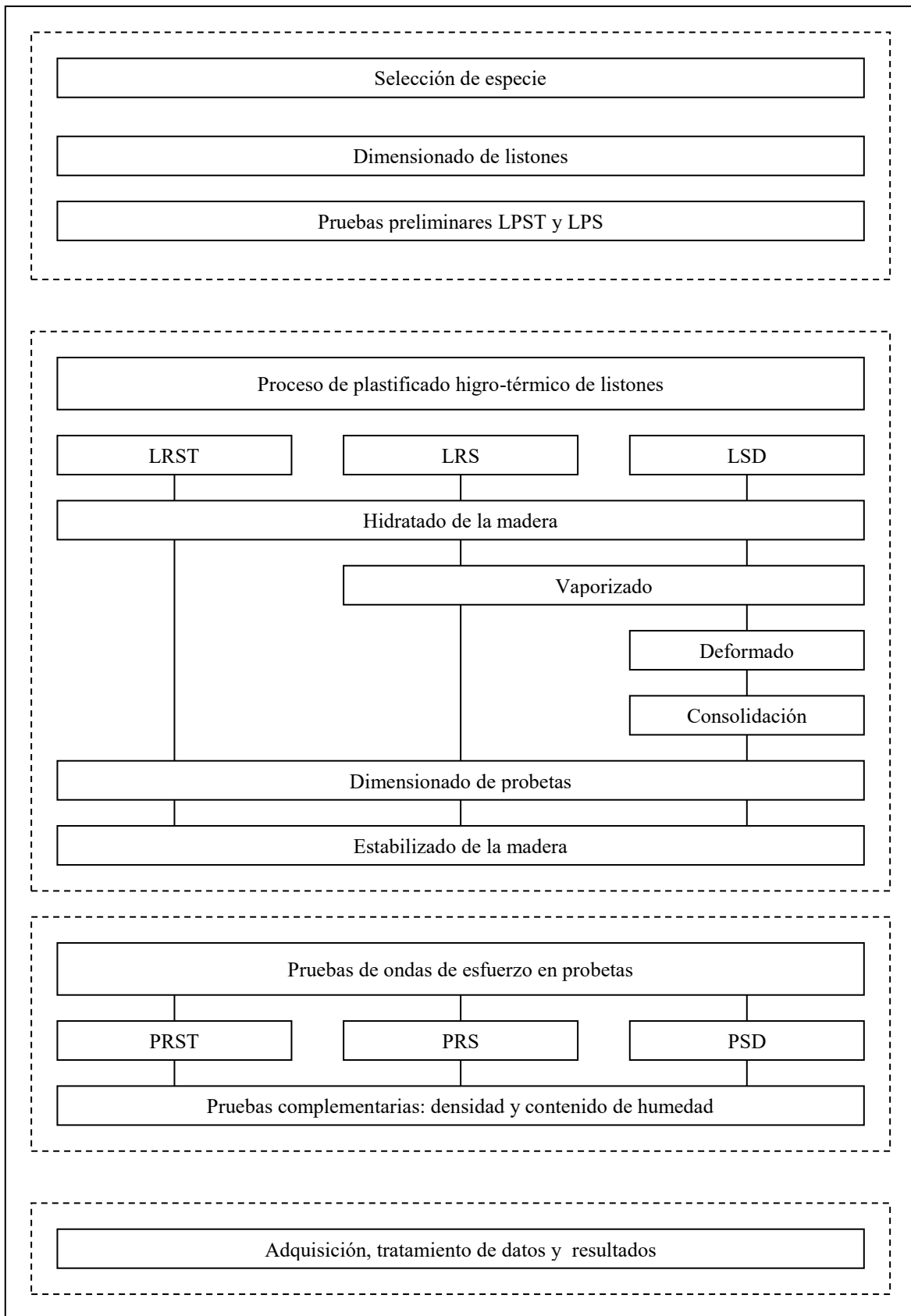


Figura 5.12. Estrategia experimental.

Julio 5, 2011

## 6 RESULTADOS

Los resultados de las pruebas de rigidez practicadas en los listones de madera de *Quercus scytophylla* se presentan en el cuadro 6.1. En este cuadro se indican los valores de las pendientes (P/y) y los de los módulos de elasticidad en flexión (Ef), ambos parámetros determinados en el intervalo elástico de las pruebas de flexión. Los grupos a comparar son los listones sin tratamiento (LPST), *versus* los listones suavizados (LPS).

En el Cuadro 6.1, se indican también los resultados de la densidad ( $\rho$ ) y del contenido de humedad (H), correspondientes a la madera de los dos grupos de listones estudiados.

Los estadígrafos que ahí se presentan son: la media aritmética de los valores determinados (Med. Arit.), su desviación estándar (Desv. Est.) y el coeficiente de variación (C.V.), estimación que representa el cociente entre los valores anteriores.

Cuadro 6.1. Resultados de las pruebas de rigidez de los listones de madera de *Quercus scytophylla*.

Estadígrafo	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	H (%)	Listones sin tratamiento (LPST)		H (%)	Listones suavizados (LPS)	
			P/y (N/m)	Ef (MPa)		P/y (N/m)	Ef (MPa)
Med. Arit.	700	67	11435	10410	57	5853	5329
Desv. Est.	17.13	5.44	2206	2008	5.44	1060	965
C.V. (%)	2.45	8.08	19.29	19.29	8.08	18.11	18.11

En el Cuadro 6.1, los estadígrafos desviación estándar y coeficiente de variación, correspondientes a los listones suavizados (LPS), son similares a los estadígrafos de los listones sin tratamiento (LPST). Este resultado es originado porque el contenido de humedad de los listones LPS, fue determinado empleando los listones LPST, una vez que el tratamiento higro-térmico terminó la etapa de suavizado.

En el cuadro 6.2, se presentan los resultados de las pruebas de ondas de esfuerzo realizadas en tres grupos de probetas: probetas rectas sin tratamiento (PRST), probetas rectas suavizadas (PRS) y probetas suavizadas, deformadas y plastificadas (PSDP).

Cuadro 6.2. Resultados de las pruebas de ondas de esfuerzo en las probetas de la madera de *Quercus scytophylla*.

Estadígrafo	Probetas rectas sin tratamiento (PRST)				
	$\rho_{H=12\%}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{V=12\%H}$ (kg/m <sup>3</sup> )	H (%)	Voe (m/s)	Eoe (MPa)
Med. Arit.	857	788	11.96	3642	11385
Desv. Est.	16.53	18.83	0.3524	150.46	1007.30
C.V. (%)	1.93	2.39	2.95	4.13	8.85
Estadígrafo	Probetas rectas suavizadas (PRS)				
	$\rho_{H=12\%}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{V=12\%H}$ (kg/m <sup>3</sup> )	H (%)	Voe (m/s)	Eoe (MPa)
Med. Arit.	840	744	11.70	3700	11515
Desv. Est.	35.59	18.63	0.9462	114.38	912.16
C.V. (%)	4.24	2.51	8.09	3.09	7.92
Estadígrafo	Probetas suavizadas, deformadas y plastificadas (PSDP)				
	$\rho_{H=12\%}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{V=12\%H}$ (kg/m <sup>3</sup> )	H (%)	Voe (m/s)	Eoe (MPa)
Med. Arit.	839	747	10.83	3638	11358
Desv. Est.	23.69	23.15	0.3274	72.82	477.03
C.V. (%)	2.76	3.10	3.02	02.00	4.20

Los datos que se presentan en este cuadro son: la velocidad de las ondas de esfuerzo (Voe) en la dirección longitudinal de las probetas y el módulo de elasticidad (Eoe) correspondiente.

Igualmente, en el Cuadro 6.2, se presentan los valores de la densidad ( $\rho_{H=12\%}$ ), la densidad ( $\rho_{V=12\%H}$ ), así como los datos correspondientes al contenido de humedad (H) de las probetas al momento del ensayo.

Los estadígrafos que se presentan en este cuadro son: la media aritmética de los valores determinados (Med. Arit.), su desviación estándar (Desv. Est.) y el coeficiente de variación (C.V.), parámetro que representa el cociente entre los valores anteriores.

Estos resultados están relacionados con los valores de la densidad de la madera de *Quercus scytophylla* con un contenido de humedad de 12% ( $\rho_{H=12\%}$ ) y con la densidad ponderada por el contenido de humedad de las probetas al momento del ensayo ( $\rho_{V=12\%H}$ ), ambos parámetros correspondientes a cada grupo de tratamientos y probetas estudiados.

Los resultados del tratamiento higr-térmico y de plastificado, se presentan de manera gráfica en la Figura 6.1. En esta Figura se muestran fotografías de listones y probetas producidos para los ensayos de rigidez y ondas de esfuerzo.

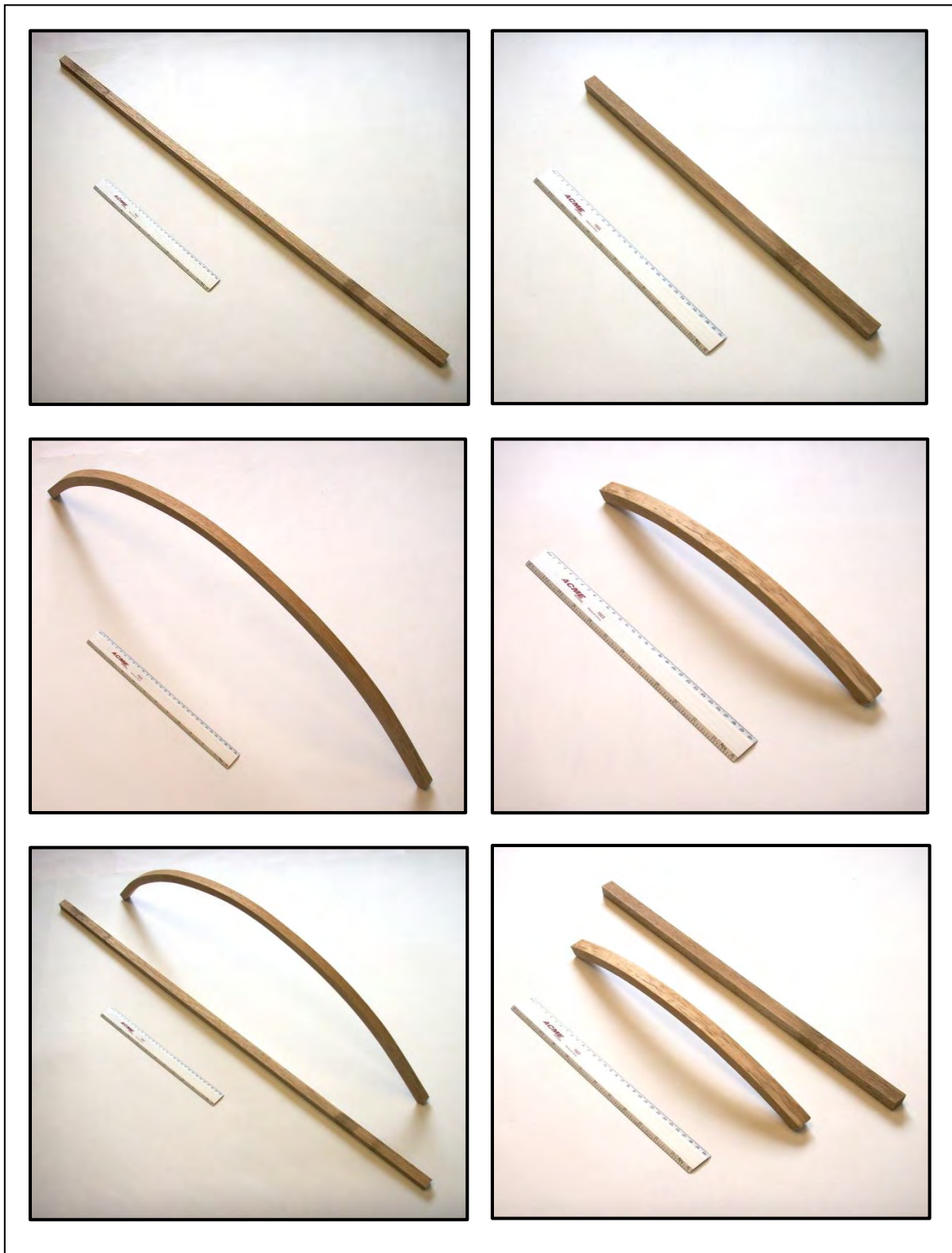


Figura 6.1. Fotografías de listones y probetas.

Julio 5, 2011

## 7 ANÁLISIS

El análisis de resultados examina primeramente, el efecto del tratamiento higro-térmico y de la deformación plástica sobre la madera de *Quercus scytophylla*. Asociado a este examen, se profundiza en lo referente a la variación de la rigidez de los listones de madera, ocasionada por el proceso de plastificado.

Por otra parte, se analiza el comportamiento, durante la etapa experimental, de las variables tecnológicas de la madera: la densidad y el contenido de humedad.

Igualmente, se estudia el efecto de los tres tratamientos aplicados a la madera sobre su capacidad para transmitir ondas de esfuerzo. Particularmente, se comparan los resultados entre los tres grupos de probetas correspondientes a los tratamientos empíricos. En esta misma perspectiva, se analizan los resultados de los módulos de elasticidad, los cuales resultan de la ponderación de la velocidad de ondas de esfuerzo, por la densidad de la madera.

Los resultados presentados en los Cuadros 6.1 y 6.2, denotan diferencias y variaciones según el tratamiento aplicado a cada grupo específico de listones o de probetas. Bien que las características tecnológicas de la madera varían entre especies, individuos y al interior del árbol, para fines de análisis subsecuente, se considera que la variabilidad natural en las características tecnológicas de la madera, no influye de manera explicativa en los resultados de esta investigación.

En el caso de estudio que se analiza, se parte desde la perspectiva de que el tratamiento higro-térmico, modifica de manera temporal la rigidez de los listones, permitiendo en este estado de la madera, su curvado.

En contraste, el tratamiento integral de plastificado higro-térmico de la madera de *Quercus scytophylla*, no altera su capacidad para transmitir ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal.

Como consecuencia, la velocidad de las ondas de esfuerzo y el módulo de elasticidad de la madera, parámetros medidos en probetas, no serán alterados por el tratamiento de manera significativa, ni en las probetas rectas, ni en las curvas.

Con el objetivo de explicar la influencia de los tratamientos sobre el estado físico y mecánico de la madera de *Quercus scytophylla*, se procedió a un examen de inferencia estadística. Este análisis consiste en una prueba de diferencias entre los valores de las medias aritméticas de las probetas rectas sin tratamiento (PRST), en comparación con las probetas rectas suavizadas (PRS) y con las probetas suavizadas, deformadas y plastificadas (PSDP).

La prueba de diferencias de medias se diseñó para contrastar la hipótesis nula  $H_0$ , que propone que la diferencia entre las dos medias  $\bar{x}_1$  y  $\bar{x}_2$ , es igual a cero:

$$H_0: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0 \quad (7.1)$$

versus la hipótesis alterna  $H_1$ , la cual plantea que la diferencia entre las dos medias es diferente a cero:

$$H_1: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0 \quad (7.1)$$

Cuando el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias no contiene el valor 0, o el valor  $p$  calculado para las pruebas fue menor que 0.05, se rechazó la hipótesis nula en favor de la alterna. Es decir, para un nivel de confianza del 95%, existe una diferencia significativa entre los valores de las medias aritméticas de los diferentes grupos de probetas observadas. Los resultados de la prueba de hipótesis se presentan en el Cuadro 7.1.

Cuadro 7.1. Comparación de medias.

	$\rho_{H=12\%}$ (kg/m <sup>3</sup> )		$\rho_{V=12\%H}$ (kg/m <sup>3</sup> )		H (%)		Voe (m/s)		Eoe (MPa)	
	PRS	PSDP	PRS	PSDP	PRS	PSDP	PRS	PSDP	PRS	PSDP
PRST	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No
PRS	-	No	-	Sí	-	No	-	No	-	No

Sí: Existe una diferencia estadísticamente significativa al nivel de confianza del 95%.  
 No: No existe una diferencia estadísticamente significativa al nivel de confianza del 95%.  
 PRST: Probetas rectas sin tratamiento.  
 PRS: Probetas rectas suavizadas.  
 PSDP: Probetas suavizadas, deformadas y plastificadas.

### 7.1. Tratamiento higo-térmico

La apreciación frecuente en investigación en Ciencias y Tecnología de la madera, respecto al efecto de la temperatura y el contenido de humedad de la madera, sobre su resistencia mecánica, es que el incremento de estos parámetros durante el desarrollo de un ensayo, reduce su resistencia de manera inmediata y temporal (Bodig y Jane, 1982).

Por ejemplo, Popović y col (2006), proponen una variación inmediata en el módulo de elasticidad para la madera de *Fagus sylvatica*, de 0.17 a 0.59%, por cada incremento de un grado centígrado en la temperatura.

Y por su parte, Villaseñor Aguilar (2007), deduce un coeficiente de higr elasticidad para la madera de *Pinus douglasiana* de 2000 MPa/%, medido con la técnica de ondas de esfuerzo.

Desde la perspectiva de esta investigación, el análisis del tratamiento higr-térmico y su resultado en la madera, se refiere al efecto de suavizado, resultado de su exposición durante 50 minutos, a una temperatura de 92°C, en presencia de vapor saturado a baja presión.

La Figura 7.1, explica el efecto del tratamiento higr-térmico en la rigidez de la madera.

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:  $E_f = 10\ 410\ \text{MPa}$ . 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 °C, con una velocidad de 4.6 °C por minuto.

En este mismo dominio, el hecho de mantener durante 50 minutos a la madera, a una temperatura de 92 °C, ocasiona un decremento en su módulo de elasticidad en un 48.81%, es decir, el valor de  $E_f$  se reduce a 5 329 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 a la madera en estado saturado, es decir, con un contenido de humedad superior al punto de saturación de la fibra ( $H \geq 32\%$ ).

Siguiendo a Hill (2006), para que un tratamiento de modificación a la madera sea considerado o tenga el carácter térmico, el rango de temperatura va de 160 a 260 °C. Por otra parte, de acuerdo con Brunner (1987), la temperatura aplicada a la madera en esta investigación corresponde a un rango aceptable de temperatura de secado (90 - 130 °C). De aquí, la temperatura empleada en esta investigación en el proceso de plastificado, puede ser considerada como de rango medio y no afecta de manera importante la descomposición de los componentes primarios químicos de la madera.

Además, de acuerdo con los estudios de Rowell y col. (2002), Abe y Yamamoto (2006), Boonstra y col. (2007), Kocaefe y col. (2008), Esteves y Pereira (2009) y Tumen y col. (2010), sobre el efecto del calor en la composición química en la madera, los valores máximos de temperatura y tiempo de exposición, empleados en este tratamiento, no implican un efecto apreciable sobre la composición química de la madera.

De acuerdo a los argumentos ahí presentados, se deduce que, para análisis posteriores, se considera que no existió descomposición química de la madera, la cual pudiera intervenir en los resultados.

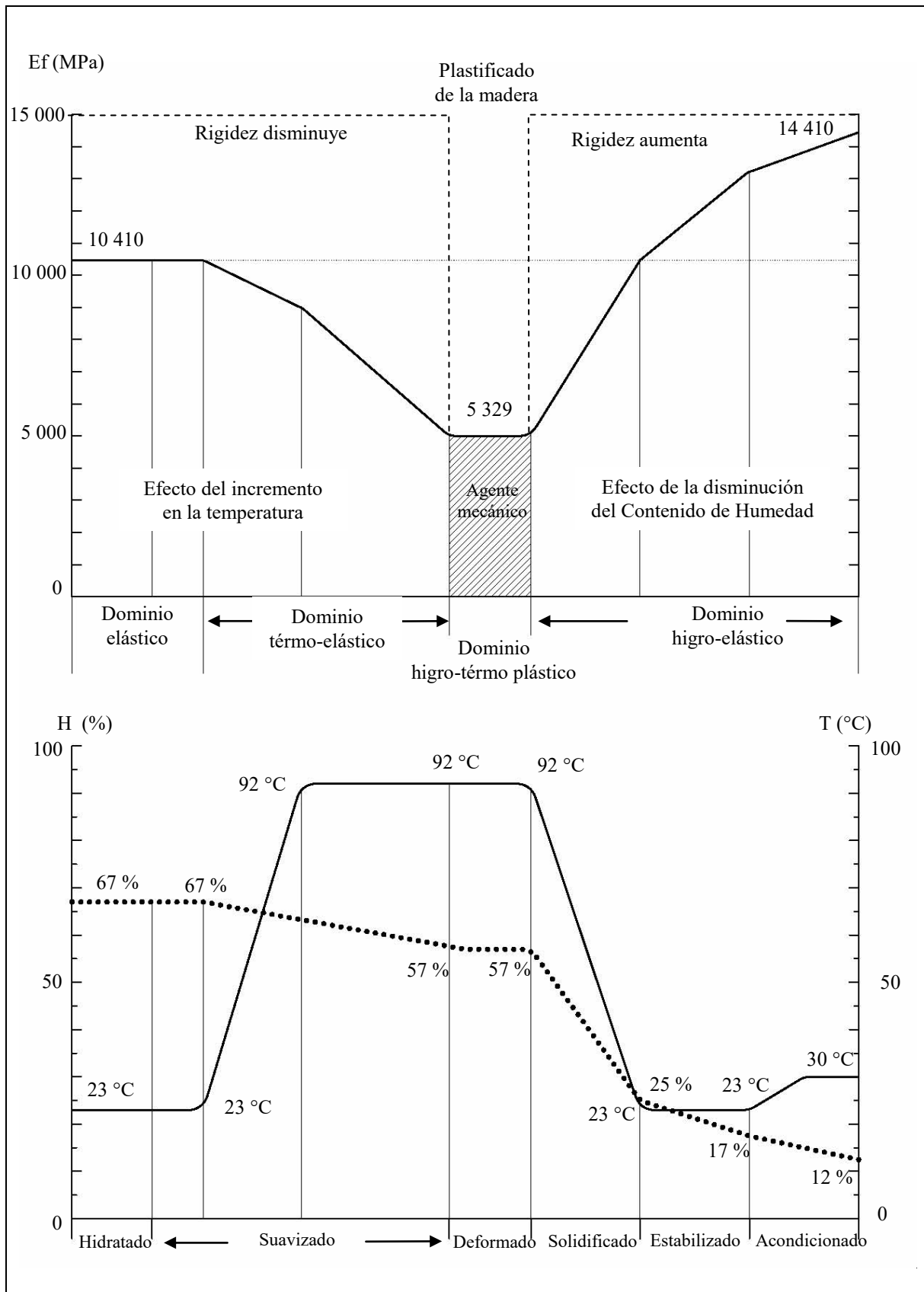


Figura 7.1. Efecto del tratamiento higo-térmico en la rigidez de la madera.



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, tal como se explica en las Figuras 7.2 y 7.3.

Siempre bajo el efecto del calor, el proceso de deformado plástico en flexión curva se desarrolla, durante 30 segundos, en el dominio higo-térmo 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 °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 higo-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  $L$  (ver Figura 7.2).

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 (ver Figura 7.3), la sollicitación de flexión tres puntos, se transforma gradualmente en una carga uniformemente repartida  $P(x)$  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  $P(x)$ . 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 distribución de estos esfuerzos internos en la sección transversal del listón, los cuales resultan únicamente de la sollicitación de flexión, se esquematizan en la Figura 7.4.

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.

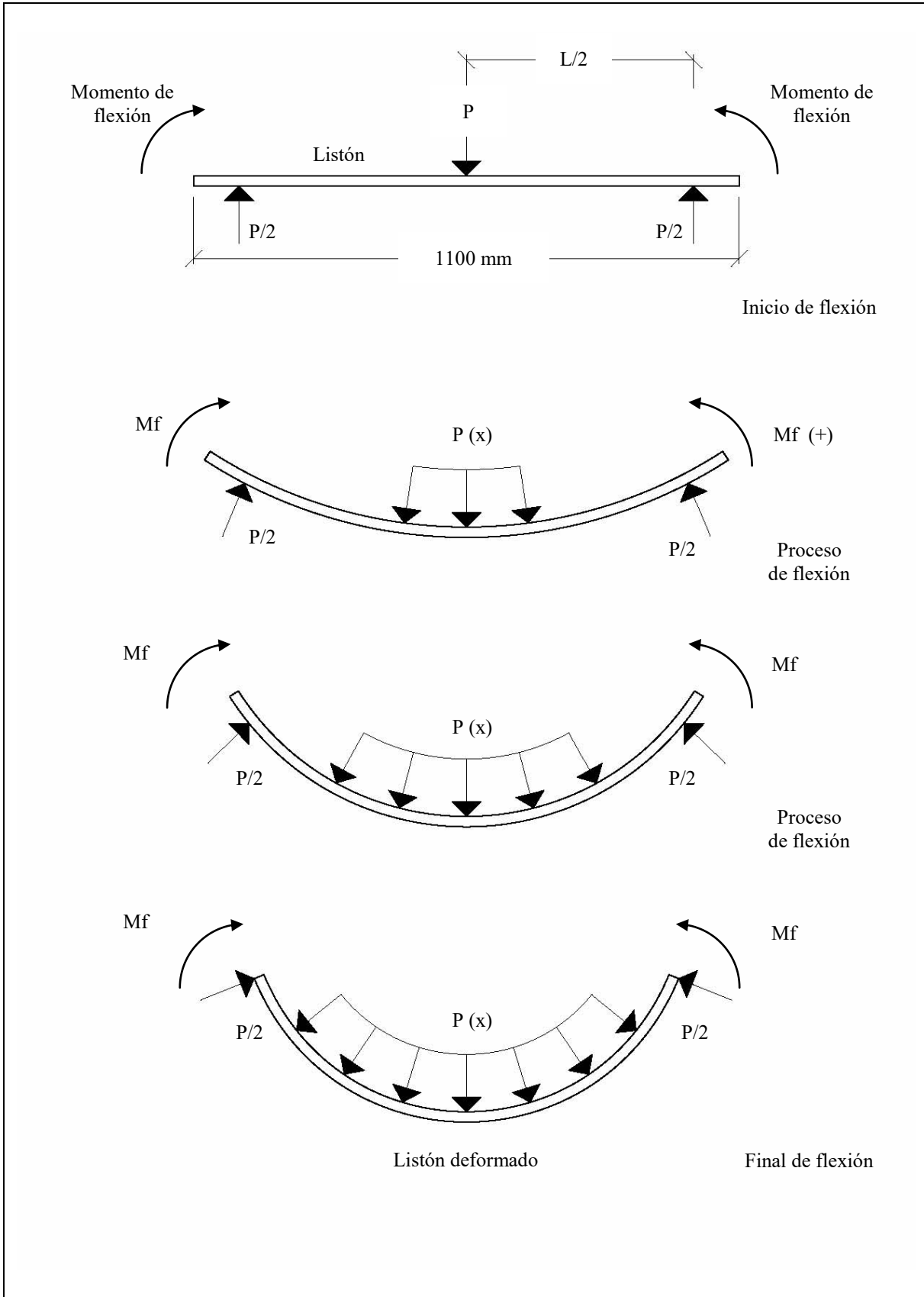


Figura 7.2. Diagrama de cuerpo libre, proceso y cargas de flexión curva en listones.

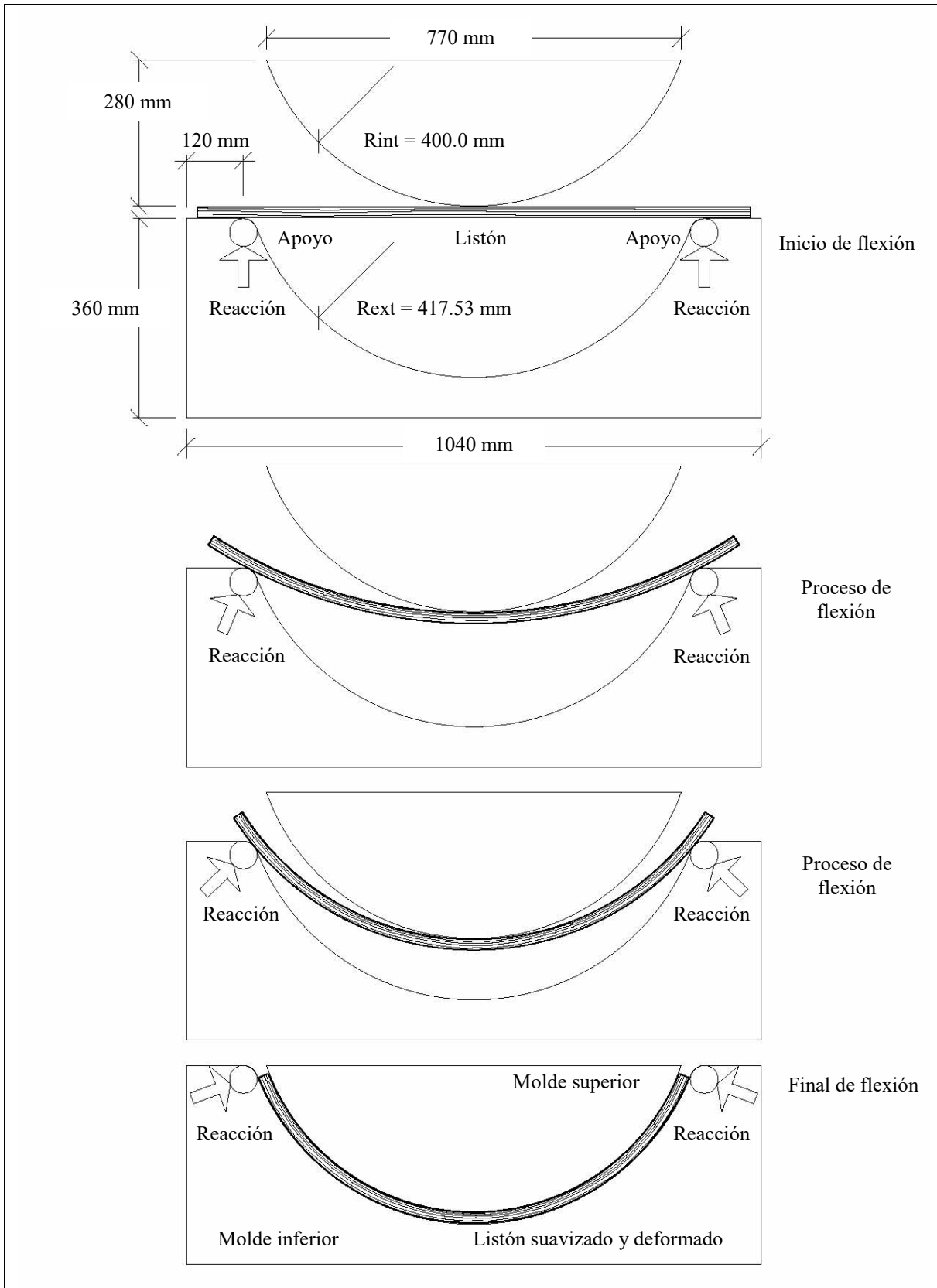


Figura 7.3. Proceso de flexión curva en listones.

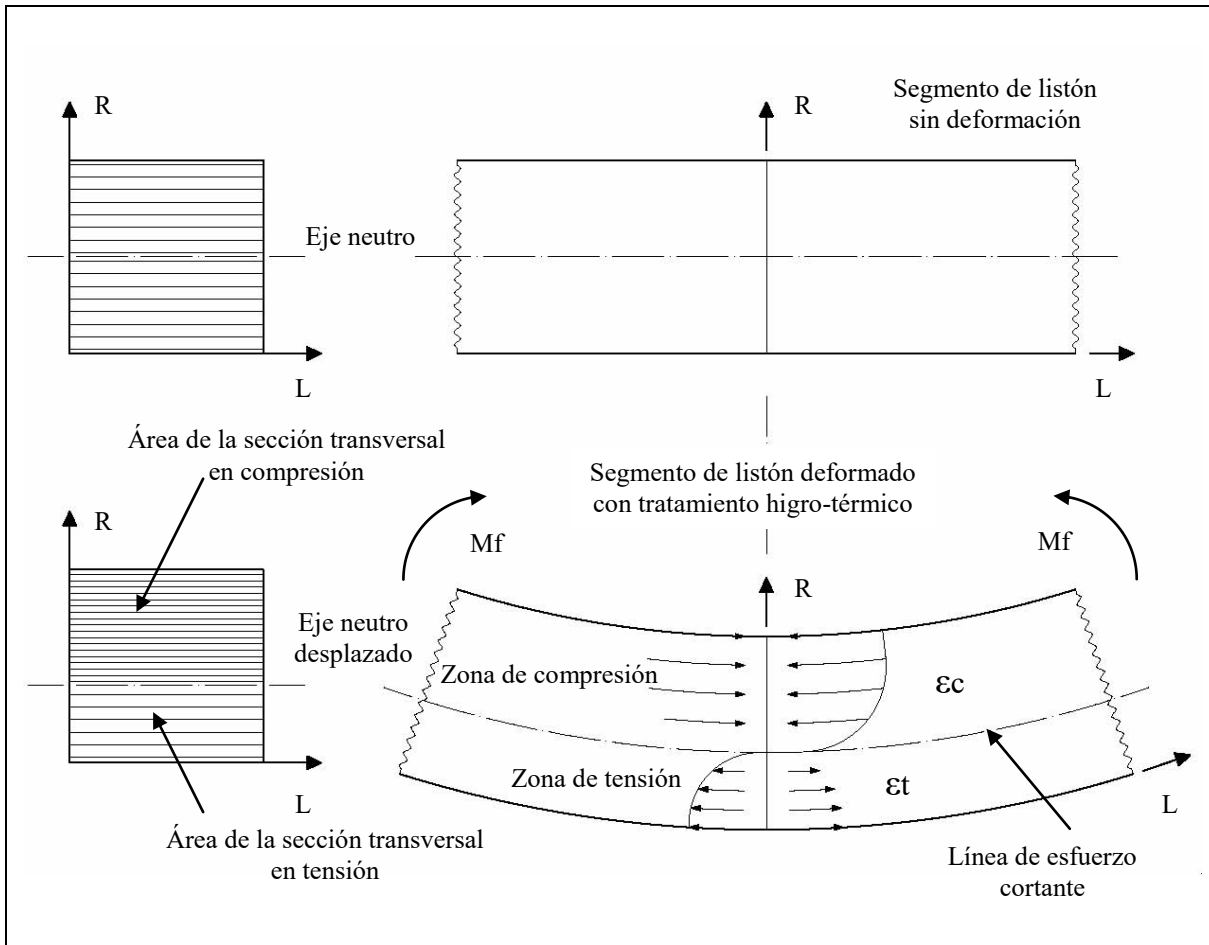


Figura 7.4. Distribución de esfuerzos internos de flexión curva en listones.

Es en este eje desplazado que aparecen los esfuerzos cortantes en 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 (ver Anexo A).

La tasas de deformación en compresión y en tensión, 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 ( $\epsilon_t$ ) 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.

Para el caso que nos ocupa, y 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

*Quercus 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 ( $R_{int}/R$ ) de 0.0428. Este resultado específico es para el caso de estudio de madera de *Quercus 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.

Como conclusión, 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.

Un resultado asociado a todo el tratamiento higro-térmico, es que este disminuyó la variación de la velocidad de ondas de esfuerzo, entre los diferentes grupos de probetas observadas. Esta reducción, es representada por la desviación estándar correspondiente a cada grupo (ver el Cuadro 6.2) y es de la siguiente proporción:

$$\text{Voe (PRTS): } 1.00; \text{ Voe (PRS): } 0.76; \text{ Voe (PSDP): } 0.48.$$

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-térmico, 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 *Quercus scytophylla*, a un contenido de humedad de 12%, al final del tratamiento higro-térmico, se estima en 14 410 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 al proceso, del tal forma que una tercera parte de los listones flexionados, presentaron fisuras locales. Como consecuencia, el recorte y la selección de probetas para la pruebas de ondas de esfuerzo favorecieron los listones y segmentos sin daños aparentes (ver Figura 6.1).

Los resultados y parámetros medidos en el tratamiento higro-térmico, proporcionaron de manera sistematizada, datos específicos de temperaturas, contenidos de humedad, tiempos y dimensiones de especímenes de madera que funcionaron para curvar madera.

## 7.2. Rigidez de los listones

En el ensayo de flexión curva, la rigidez aparente de los listones está representada por la capacidad que tiene la madera para resistir a una deflexión. Este parámetro es expresado por la pendiente entre la carga de flexión ( $P$ ) y la deflexión del listón ( $y$ ). Una vez este valor ponderado con los parámetros de las pruebas de flexión curva, tales como el momento de inercia ( $I$ ) de la sección transversal del listón y la portada ( $L$ ) de flexión, el módulo aparente de flexión ( $E_f$ ) representa la rigidez de los listones (ver Figuras 7.2 y 7.3).

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 ( $P/y$ ), 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, tal como se ilustra en la Figura 5.5.

Los valores promedio de las pendientes  $P/y$  y de los módulos  $E_f$  mostraron amplios coeficientes de variación. Este resultado puede ser explicado por la heterogeneidad en la estructura anatómica de cada uno de los listones, e igualmente, a posibles variaciones en su geometría y orientación respecto al plano leñoso.

El suavizado de la madera es el efecto de someter durante 50 minutos, a 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 flexión. 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 el Cuadro 6.1, la rigidez aparente  $P/y$ , de los listones suavizados (LPS) disminuyó en un 48.81%, en comparación con los listones sin tratamiento (LPST). En el mismo contexto, el módulo de elasticidad  $E_f$  calculado con la ecuación (5.1), se redujo en una proporción similar. Este valor es válido para la madera de *Quercus scytophilla* 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 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  $700 \text{ kg/m}^3$ , después de haber sido sometida a tratamiento térmico, se redujo hasta un 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 proporcional. Pérez Olvera y Dávalos Sotelo (2008), proponen un valor para el módulo de elasticidad en flexión para la madera de *Quercus scytophylla*, con densidad de  $637 \text{ kg/m}^3$  y con un contenido de humedad superior al punto de saturación de la fibra, de 12 718 MPa.

Este valor es 11.2% mayor al determinado en esta investigación, para madera de la misma especie, pero con densidad de  $700 \text{ kg/m}^3$ . Por su parte, Sotomayor Castellanos (2005), propone un modelo de predicción del módulo de elasticidad ( $E_f$ ) para maderas mexicanas, a partir de la densidad de la madera ( $\rho$ ):

$$E_f = 191\,045 \rho^{1.02} \quad (7.1)$$

En la ecuación (7.1), el valor del módulo  $E_f$  está calculado en  $\text{kg/cm}^2$ , para madera con un contenido de humedad superior al punto de saturación de la fibra, a partir de valores de  $\rho$  en  $\text{g/cm}^3$ . En MPa este valor es de: 13 115 MPa. Este resultado es 14.7% mayor al determinado en este estudio (10 410 MPa), al principio del tratamiento.

De acuerdo a la Tabla FITECMA (Sotomayor Castellanos, 2008), la madera de *Quercus scytophylla*, clasifica como de módulo de elasticidad  $E_f$  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.

En el mismo contexto, el coeficiente de variación de las mediciones presentadas en el cuadro 6.1, varía entre 18.11% y 19.29%. Estos valores son razonables en Ciencias y Tecnología de la Madera. Sin embargo, estos coeficientes de variación, pueden ser explicados por la geometría de las probetas y la configuración particular del ensayo de flexión curva.

Sotomayor Castellanos (2009), argumenta que la variación del módulo de elasticidad en flexión para madera de especies mexicanas del género *Quercus*, es de 16%. Por su parte, el Laboratorio de Productos Forestales de los Estados Unidos (Forest Products Laboratory,

1999), propone una variación de 22% para el módulo de elasticidad en flexión para maderas estadounidenses.

Estas proporciones, sugieren que la variación de los resultados, así como las diferencias entre los valores reportados en México por otros investigadores y los resultados de este estudio, son razonablemente aceptables.

La disminución instantánea de casi la mitad de la rigidez de los listones, como consecuencia del calor en la madera, durante un periodo de tiempo y en presencia de un agente mecánico, permitió medir el fenómeno del curvado de madera sólida.

### 7.3. Parámetros tecnológicos

#### *Densidad*

La densidad ( $\rho$ ) de la madera de *Quercus scytophylla* (ver Cuadro 6.1), califica como de densidad alta, de acuerdo a la TABLA FITECMA (Sotomayor Castellanos, 2008). A manera de comparación, Pérez Olvera y Dávalos Sotelo (2008), reportan una densidad de la madera de *Quercus scytophylla* de 637 kg/m<sup>3</sup>. Por su parte, Sotomayor Castellanos y col. (2010) presentan valores de densidad para la madera de esta especie de 813 kg/m<sup>3</sup>. El resultado de esta investigación, indica que el valor promedio obtenido de la densidad de la especie estudiada, se encuentra dentro del rango de los valores obtenidos por los trabajos citados. Lo que permite admitir este valor de densidad.

La datos de la densidad revelan un coeficiente de variación de 2.45%. Esta variación se refiere a la variabilidad medida al interior de un solo individuo, del cual se extrajo la muestra de madera con que se elaboraron las probetas de esta investigación. A manera de referencia, Sotomayor Castellanos (2009) propone un coeficiente de variación de 9%. Este valor, se puntualiza para valores de densidad de la madera entre especies angiospermas mexicanas, particularmente de 23 maderas del género *Quercus*. De aquí, el valor estimado del coeficiente de variación, se encuentra dentro del rango aceptable de variación de la densidad de la madera al interior de un mismo árbol.

En esta investigación el valor promedio obtenido de densidad es de 700 kg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, para fines de diseño de productos y cálculo de estructuras de madera, es necesario tomar en cuenta la variación intrínseca de esta característica tecnológica. Para fines prácticos, se recomienda ampliar el intervalo de valores promedio en más/menos 2 veces el valor de la desviación estándar. En el caso que nos ocupa, el rango de densidad para esta especie va de 666 a 734 kg/m<sup>3</sup>.

Kollmann y Côté (1968), observan que valores altos de la densidad de la madera favorecen el tratamiento de flexión aplicado en madera sólida. Por otra parte, Peck (1957) y Rowell y col. (2002), entre otros autores, recomiendan madera de especies angiospermas para tratamientos de curvado de madera sólida.

Argumentando que la madera de *Quercus 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.

*Densidad  $\rho_{H=12H}$*

El Cuadro 6.2 presenta dos densidades de la madera, las cuales resultan de las pruebas complementarias: primeramente la densidad aparente de la madera al contenido de humedad al momento del ensayo ( $\rho_{H=12\%}$ ), que representa la relación entre el peso de la probeta al 12% de contenido de humedad ( $w_{H=12\%}$ ) y el volumen de la probeta al mismo contenido de humedad ( $v_{H=12\%}$ ).

Esta densidad aparente de la madera  $\rho_{H=12\%}$  se determinó empleando probetas de cortas dimensiones recortadas de las probetas correspondientes a los ensayos de ondas de esfuerzo (ver Figura 3.2) con la relación:

$$\rho_{H=12\%} = \frac{w_{H=12\%}}{v_{H=12\%}} \quad (7.2)$$

La densidad aparente de la madera  $\rho_{H=12\%}$  se utilizó para el cálculo del módulo de elasticidad Eoe, empleando la fórmula (5.10):

$$Eoe = \rho_{H=12\%} Voe^2 \quad (5.10)$$

*Densidad  $\rho_{V=12\%H}$*

Por otra parte, en el Cuadro 6.2, se presenta la densidad aparente  $\rho_{V=12\%H}$ , la cual representa la relación entre el peso seco de la probeta ( $w_{H=0\%}$ ) y el volumen de la probeta al contenido de humedad al momento del ensayo ( $H = 12\%$ ).

Esta densidad aparente de la madera  $\rho_{V=12\%H}$  se determinó empleando probetas de cortas dimensiones recortadas de las probetas correspondientes a los ensayos de ondas de esfuerzo (ver Figura 3.2) con la relación:

$$\rho_{V=12\%H} = \frac{w_{H=0\%}}{v_{H=12\%}} \quad (7.3)$$

La densidad aparente de la madera  $\rho_{V=12\%H}$  se empleó para analizar si existen diferencias significativas entre las densidades al momento de las pruebas de los 3 grupos de probetas estudiados: probetas rectas sin tratamiento (PRST), probetas rectas suavizadas (PRS) y probetas suavizadas, deformadas y plastificadas (PSDP).

La prueba de hipótesis, cuyos resultados se presentan en el Cuadro 7.1, verifica la diferenciación de los valores promedio de la densidad de la madera para los tres tratamientos. Este resultado puede ser consecuencia, de la variación en la distribución de la masa de agua en cada probeta y al interior de cada grupo de probetas. Esta humedad, es en

realidad el peso del agua que se adiciona a la masa propia de la madera, para un volumen dado.

Esta idea indica que la diferencia entre las densidades  $\rho_{H=12H}$  y  $\rho_{V=12\%H}$ , es debido a que la primera de ellas contiene una masa adicional, ocasionada por el 12% de contenido de humedad de la madera al momento de las pruebas, como explican las fórmulas 7.2 y 7.3. En consecuencia, estas densidades determinadas en los ensayos de ondas de esfuerzo son superiores a la densidad de la madera  $\rho$  determinada durante las pruebas preliminares.

Respecto a la variación entre las densidades de las probetas utilizadas en las pruebas de ondas de esfuerzo, ésta se sitúa al interior del intervalo:  $1.93 < C.V. < 4.24$ . Este rango de variación es comparable al coeficiente de variación de la densidad  $\rho$  ( $C.V. = 2.45$ ). La diferencia puede ser explicada igualmente por la variación de la masa de agua y del volumen contraído de las probetas con diferentes contenidos de humedad.

Particularmente, la densidad  $\rho_{H=12\%}$  reveló diferencias significativas entre los grupos de probetas rectas sin tratamiento *versus* las probetas rectas suavizadas y las probetas suavizadas deformadas y plastificadas. En los tres tratamientos, el volumen de las probetas se midió en estado húmedo de la madera, por lo tanto, no se registraron higrone contracciones. Igualmente, para los tres tratamientos, la masa de las probetas se midió en estado seco de la madera.

De acuerdo con Estevez y Pereira (2009), la pérdida de masa en la madera es observada como efecto del tratamiento de calor. Este fenómeno depende de la especie, el medio de calentado, el tiempo y la temperatura. Igualmente los autores hacen notar que los datos experimentales en la literatura son difíciles de comparar por las diferentes características de tratamientos y procesos.

De acuerdo con Boonstra y col. (2007), la principal razón para la reducción de la densidad de la madera, después de ser sometida a un tratamiento térmico, es por un lado, la degradación de las hemicelulosas en productos volátiles, los cuales se evaporan durante el tratamiento. Por otra parte, la densidad se ve disminuida por la evaporación de extractivos y por la reducción en el contenido de humedad de equilibrio, dado que la madera tratada con calor es menos higroscópica.

Sin embargo, Estevez y Pereira (2009), hacen notar que la temperatura mínima para observar el fenómeno de pérdida de masa en la madera es de 160 °C, y un tiempo de exposición de al menos 4 horas. En esta investigación la temperatura fue de 92 °C y un tiempo de exposición de 50 minutos.

Por su parte el reporte de Westwood Timber Group (2010), propone que la densidad de la madera después de ser sometida a un proceso térmico, con temperatura superior a 160 °C, se ve reducida de un 10 a un 15%. No obstante, para tratamientos con temperaturas de 70 a 140 °C, se ha observado que la densidad de la madera se incrementa ligeramente, fenómeno que coincide con los resultados de esta investigación.

A partir de los argumentos anteriores, se deriva que el tratamiento higró-térmico aplicado a la madera de *Quercus scytophylla*, es el principio del fenómeno de disminución de la densidad de la madera por procesos que impliquen temperaturas más altas.

Para el caso de esta investigación y para fines de análisis posterior, se considera que la variación de la densidad de la madera al momento del ensayo, no interviene de manera explicativa en el fenómeno de transmisión de ondas de esfuerzo.

### *Contenido de humedad*

El valor promedio del contenido de humedad de la madera de *Quercus scytophylla* de 67% (ver Cuadro 6.1), denota el estado saturado de la madera en condiciones de laboratorio. El coeficiente de variación de 8.08%, sugiere la distribución del contenido de humedad en la geometría de las trozas, puesto que las probetas fueron seleccionadas al azar en el plano leñoso. Además, la estructura anatómica particular de cada probeta influye en la capacidad de retención de masa de agua. Por consiguiente, los resultados variaron.

Este alto contenido de humedad ayudó al proceso de plastificación de la madera. En efecto, de acuerdo con Bodig y Jayne (1982), la resistencia mecánica de la madera disminuye proporcionalmente al aumento de su contenido de humedad. Este fenómeno se da preferencialmente en el dominio higroscópico de la madera ( $0 \leq H \leq \text{PSF}$ ). Para valores de contenido de humedad mayores al punto de saturación de la fibra, la resistencia mecánica de la madera es mínima.

El valor promedio del contenido de humedad de las probetas rectas suavizadas varió *versus* las probetas rectas sin tratamiento y probetas suavizadas, deformadas y plastificadas.

Este resultado explica la influencia del proceso de suavizado en el contenido de humedad en la madera. Los tres grupos de probetas fueron estabilizados durante 36 horas, periodo durante el cual se redujo su contenido de humedad del 25 al 17%. Posteriormente, las probetas fueron preparadas durante 130 horas en una cámara de acondicionamiento, donde se redujo su contenido de humedad desde 17%, hasta el contenido de humedad al momento del ensayo. Este contenido de humedad varió desde 11.96%, para las probetas sin tratamiento, hasta 10.83% en las probetas suavizadas, deformadas y plastificadas.

De acuerdo a los resultados de Villaseñor Aguilar, (2007), esta diferencia aritmética de 1.13% en estos valores promedio, puede influir en la velocidad de ondas de esfuerzo en la madera. Sin embargo, en el caso de esta investigación, es necesario considerar el coeficiente de variación para este parámetro de alrededor de 3%, particularmente para estudiar la diferencia entre los valores promedio de las probetas rectas sin tratamiento y las probetas suavizadas, deformadas y plastificadas.

En el mismo contexto, de la observación del Cuadro 7.1, se infiere que no existió variación significativa entre el grupo de probetas rectas suavizadas y el de las probetas suavizadas, deformadas y plastificadas. Lo que implica que, una vez que la madera es sometida al tratamiento higró-térmico y a continuación estabilizada, su contenido de humedad puede ser estadísticamente considerado uniforme.

Por lo tanto, para fines de análisis posterior, se considera que la variación en el contenido de humedad en la madera, de los tres grupos de probetas estudiadas, no interviene de manera explicativa en posibles variaciones de la velocidad de ondas de esfuerzo, ni en el parámetro derivado, como es el módulo de elasticidad.

#### 7.4. Velocidad de las ondas de esfuerzo

La velocidad de transmisión de las ondas de esfuerzo (3642 m/s), en las probetas rectas sin tratamiento (PRST), evaluadas con un contenido de humedad de la madera de 11.96% (ver Cuadro 6.2), es ligeramente mayor que el rango de velocidades reportado por Pellerin y Ross (2002) (1770 a 2260 m/s), para madera de especies del género *Quercus*. Estos valores de comparación, corresponden a la velocidad de ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal de la madera, con un contenido de humedad del 12% y para densidades similares a la de *Quercus scytophylla* (700 kg/m<sup>3</sup>, ver Cuadro 6.1).

La estructura material de las probetas (PRST) fue homogénea y bien orientada en las direcciones radial, tangencial y longitudinal. Las dimensiones de la sección transversal de estas probetas (R: 17.53 mm; T: 18.67 mm) fueron similares a la de los listones sin tratamiento (LPST). Sin embargo su longitud fue más corta (320 mm). Del mismo modo, el coeficiente de variación del contenido de humedad de la madera fue menor al 3% (ver Cuadro 6.2). Durante las pruebas se observó, asimismo, que las 3 mediciones realizadas en cada probeta, fueron repetitivas y confiables.

Estos detalles de las probetas y de los ensayos, resultaron en un coeficiente de variación de la velocidad de las ondas de esfuerzo de 4.13%, valor aceptable en investigación en Ciencias y Tecnología de la Madera. Estos resultados confirman que los ensayos de ondas de esfuerzos son confiables para evaluar las características tecnológicas de la madera sometida a tratamiento higro-térmico, de manera no destructiva.

La prueba de diferencias entre los valores de las medias aritméticas de la velocidad de las ondas de esfuerzo entre los tres grupos de probetas, correspondientes a los tratamientos: probetas rectas sin tratamiento (PRST), probetas rectas suavizadas (PRS) y probetas suavizadas, deformadas y plastificadas (PSDP), dio como resultado que no existe una diferencia estadísticamente significativa al nivel de confianza del 95% entre ninguno de los tratamientos.

Este resultado propone que el tratamiento higro-térmico y la deformación plástica, a los cuales fue sometida la madera de *Quercus scytophylla*, no modificaron la capacidad del material para transmitir ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal con respecto al plano leñoso.

Desde una perspectiva material, la estructura a nivel local de las probetas curvas, es modificada por el agente mecánico expresado en la relación radio/espesor (RE: 22.81), y resultando en las tasas de deformación en compresión ( $\epsilon_c$ : 2.93%) y en tensión ( $\epsilon_t$ : 1.28%), tal como se esquematiza en la Figura 7.4. Una vez la madera en el dominio higro-térmo

plástico, las zonas de compresión y de tensión, se transforman en deformaciones permanentes.

Esta alteración en la estructura interna de la probeta modifica la homogeneidad de la densidad a nivel local de la madera. Sin embargo, el fenómeno de transmisión de ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal de la madera, representa únicamente la vibración de la sección transversal de la probeta, en la dirección longitudinal, tal como se explica en la Figura 7.5. En consecuencia, cada sección transversal compuesta por dos sectores con densidades diferentes, se desplaza de manera uniforme y relativamente paralela unas a otras. De tal forma, que esta estructura compuesta de dos densidades no se expresa en el fenómeno de transmisión de ondas de esfuerzo.

De acuerdo a los resultados de esta investigación, este fenómeno es válido tanto para la geometría de las probetas rectas, como para la de las probetas curvas. La simplificación de este efecto se ilustra en la Figura 7.5., y se puede interpretar hipotéticamente de la manera siguiente:

- Convertido en esfuerzo, el impacto en la primera sección de la probeta es transmitido a la sección contigua de la probeta, en la dirección normal al plano radial-tangencial,
- Este esfuerzo se transmite de sección en sección de manera continua y uniforme a lo largo de la dirección longitudinal de la probeta.
- Esta transmisión de esfuerzos genera una vibración de la masa de cada sección solicitada de la probeta.
- Esta vibración origina a su vez, una onda de esfuerzo.
- La onda tiene un tiempo característico de transmisión a lo largo de la probeta.
- Por lo tanto, se puede estimar la velocidad de las ondas de esfuerzo, a partir del tiempo de transmisión, ponderado por la distancia del recorrido de la onda, tal como se explica en el anexo B.
- Para mantener el principio de continuidad del fenómeno, la onda debe transmitirse en cualquier dirección y/o geometría recta o curva.
- Por lo tanto, la velocidad de onda de esfuerzo en una probeta con geometría recta o curva, puede ser calculada ajustando la distancia de traslación de la onda, tal como se interpreta en la fórmula (5.9).

Esta simplificación en la concepción del fenómeno de la transmisión de las ondas de esfuerzo a través de las probetas rectas y curvas, permitió comparar los valores de la velocidad de onda entre tratamientos y geometrías.

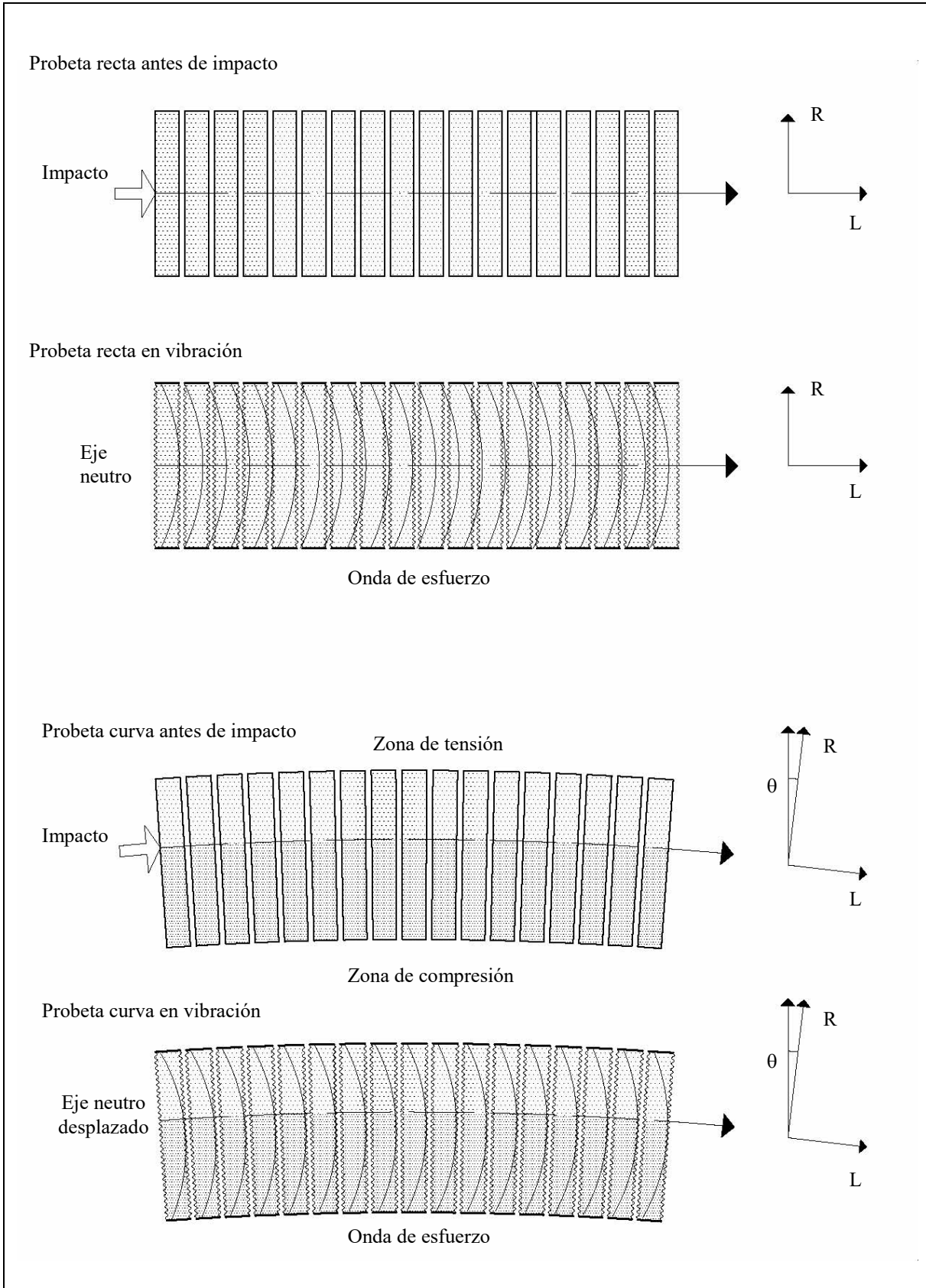


Figura 7.5. Transmisión de ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal de la madera.

Por otra parte, se observó que después del tratamiento de plastificado higro-térmico de la madera, un porcentaje de alrededor del 5% de las probetas, presentaron modificaciones en su geometría y cambios en su estructura material.

Respecto a su geometría, durante las etapas de solidificado, estabilizado y acondicionado (ver Figura 7.1), ocasionado por el efecto de la disminución del contenido de humedad en la madera de 57% a 12%, el fenómeno de higro-contracción en el dominio higro-elástico, se reflejó en la variación dimensional de la sección transversal de la probeta.

Este efecto se minimizó ajustando el volumen de las probetas, necesario para el cálculo de la densidad de la madera, con mediciones promedio de sus dimensiones. De esta manera la higro-contracción de la madera no influyó para análisis posteriores.

Respecto a su estructura material, las probetas presentaron sectores de alrededor de 1 mm de espesor, con ruptura por compresión del tipo pliegues estrujados (ver Bodig y Jayne, 1982), siempre a nivel local y en la cara cóncava de las probetas, es decir en la zona de compresión. Durante esta investigación, se considera que estas alteraciones no influyeron en la transmisión de ondas de esfuerzo en la madera.

Igualmente, en la cara convexa de las probetas, se presentaron separaciones de segmentos de fibras de alrededor de 1 mm de longitud, similares a desprendimientos por cepillado. Parece ser que la tasa de deformación en tensión aplicada en la fibra extrema de la probeta excedió el límite elástico en tensión, en la dirección longitudinal de la madera de *Quercus scytophylla*. De aquí, la aparición de fisuras locales. No obstante, para fines prácticos en la determinación de la velocidad de ondas de esfuerzos en la dirección longitudinal, ésta anomalía no influyó de manera significativa.

Los resultados anteriores verifican experimentalmente la hipótesis de trabajo de esta investigación.

En efecto, una temperatura de 92 °C, aplicada durante un periodo de 50 minutos en una probeta de madera de sección esbelta, independientemente de que su geometría sea recta o curva, con o sin tratamiento, mantiene, desde el punto de vista mecánico, inalterable su estructura material. Y en consecuencia, no se modifica su capacidad para transmitir ondas de esfuerzo.

#### 7.5. Módulo de elasticidad

Los valores de los módulos de elasticidad calculados por ondas de esfuerzo ( $E_{oe}$ ), correspondientes a los tres grupos ordenados de acuerdo a los tres tratamientos aplicados a la madera (ver Cuadro 6.2), no presentaron diferencias estadísticas significativas al nivel de confianza del 95%, en una prueba de comparación de medias, tal como se describe en el Cuadro 7.1.

Este resultado coincide con los datos de Oltean y col. (2010), Teischinger (1992) y Thiam y col. (2002). Estos investigadores no encontraron una diferencia estadísticamente significativa para el módulo de elasticidad de la madera, evaluado en flexión tres puntos,

cuando el material fue sometido a tratamientos térmicos que van de 50 a 116 °C. Estos resultados son específicos para las especies *Picea* spp. y *Tsuga heterophylla*.

Este resultado es similar al obtenido para las velocidades de ondas de esfuerzo. Esto es consecuencia, por una parte, del hecho que el módulo Eoe, es calculado empleando la fórmula (5.10):

$$Eoe = \rho_{H=12\%} Voe^2 \quad (5.10)$$

Donde  $\rho_{H=12\%}$  es la densidad de la madera, explicada por la masa de la materia leñosa, más la masa del agua contenida en la madera en un 12%, ponderada ésta, por el volumen de la probeta, y  $Voe^2$  es la velocidad de las ondas en la dirección longitudinal de la madera.

En otras palabras, el módulo de elasticidad que depende de un parámetro material, como lo es la densidad, y de un parámetro mecánico, como lo es la capacidad de transmisión de ondas de esfuerzo, no varía en correspondencia a la no alteración de estos parámetros.

En consecuencia, este argumento de la no influencia de estas variaciones en el cálculo de un parámetro de segundo orden como lo es el módulo de elasticidad, respalda estos resultados.

De lo anterior, y desde el punto de vista de la respuesta elástica de la madera modificada, se confirma la hipótesis de trabajo sobre la inalterabilidad de la estructura material de la madera, originada por el tratamiento higró-térmico de plastificado.

Este corolario se restringe para el tratamiento higró-térmico y de plastificación realizado con listones y probetas preparados específicamente para esta investigación, con madera de *Quercus scytophylla*, del Estado de Michoacán.

A manera de síntesis del capítulo, se concluye parcialmente, que el tratamiento de plastificado higró-térmico de la madera de *Quercus scytophylla*, se realizó y se documentó de forma adecuada.

Además, derivado del análisis de resultados, se comprendió el mecanismo que causa la disminución de la rigidez de los listones de madera, ocasionada por el proceso de plastificado.

Finalmente, las pruebas sobre la capacidad de la madera para transmitir ondas de esfuerzo, proporcionaron resultados que verificaron experimentalmente la hipótesis propuesta en esta investigación.



Julio 5, 2011

## 8 CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación sugieren las siguientes conclusiones:

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

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

De manera no destructiva, se confirmó empíricamente que el tratamiento higro-térmico en combinación con el deformado plástico, no modifican la capacidad de la madera para transmitir ondas de esfuerzo.

En efecto, se demostró estadísticamente que la velocidad de ondas de esfuerzo y el módulo de elasticidad de las probetas, no varían como resultado de los tratamientos de suavizado, plastificado y deformado.

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

A partir de estas conclusiones, se puede establecer que se verificaron experimentalmente las hipótesis planteadas en esta investigación.

Los resultados pretenden ser una contribución a la caracterización tecnológica de la especie. Particularmente en las características físicas de la madera: módulo de elasticidad estático, velocidad de transmisión de ondas de esfuerzo y módulo de elasticidad dinámico.

Los corolarios de esta investigación son una aportación en Ciencias y Tecnología de la madera, concretamente para la Concepción y el Cálculo de Estructuras de madera, e igualmente como criterio para el Diseño de objetos y formas elaborados con madera sólida plastificada.

## REFERENCIAS

Julio 5, 2011

Abe, K.; Yamamoto, H. 2006. Change in mechanical interaction between cellulose microfibril and matrix substance in wood cell wall induced by hygrothermal treatment. *Journal of Wood Science*. 52:107-110.

Araya López, C.M. 2005. 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. Carrera de Ingeniería en Industria de la Madera. Chile.

Arizaga, S. y col. 2009. Manual de la biodiversidad de encinos michoacanos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. México.

Ashby, M.F. 2003. Second Edition. Reprinted. Materials Selection in Mechanical Design. Butterworth-Heinemann. England.

Bello González, M.A.; Labat, J.N. 1987. Los encinos (*Quercus*) del Estado de Michoacán, México. Collection Etudes Mesoaméricaines. Centre d'Etudes Mexicaines et Centraméricaines. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. México.

Biblis, E.J. 1965. Shear deflection of wood beams. *Forests Products Journal*. 15(11): 492-498.

Bodig, J.; Jayne, B.A. 1982. Mechanics of Wood Composites. Van Nostrand Reinhold. USA.

Boonstra, M.J.; Acker, J.V.; Pizzi, A. 2007. Anatomical and Molecular Reasons for Property Changes of Wood after Full-scale Industrial Heat Treatment. In: Proceedings of The Third European Conference on Wood Modification. United Kingdom. pp: 343-358.

Brown, H.P.; Panshin, A.J.; Forsaith, C.C. 1952. Textbook of Wood Technology. Volume II. McGraw-Hill. USA.

Brunner, R. 1987. *Die Schnittholztrocknung*. Buchdruckwerkstätten Hannover GmbH, Germany.

Cornejo Troncoso, J.; Baettig Palma, R. 2009. Evolución del módulo de elasticidad longitudinal entre 10 °C y 100 °C en piezas de *Pinus radiata* usando una técnica de evaluación no destructiva. *Maderas, Ciencia y Tecnología*. 11(2):153-160.

Estevez, B.M.; Pereira, H.M. 2009. Wood Modification by Heat Treatment: A Review. *Bioresources*. 4(1):370-404.

Fengel, D.; Wegener, G. 2003. Wood. Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Kessel Verlag. Germany.

Finewoodworking. Publicado en línea: <http://www.finewoodworking.com/>.

Forest Products Laboratory. 1999. Wood handbook. Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA.

García, R.A. *et al.* 2010. Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. *Wood Science and Technology*. Published online: 21 October 2010.

Görlacher, R. 1984. Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des E-modulus von Holz. *Holz als Roh-und Werkstoff*. (42): 212-222.

Graham, R.D. 1957. Effect of several drying conditions on strength of coast-type Douglas-fir timbers. *Forest Products Journal*. 7(7):228-233.

Green, D.W.; Winandy, J.E.; Krestschmann, D.E. 1999. In: Forest Products Laboratory. 1999. Wood Handbook: Wood As An Engineering Material, Revised. Chapter 4. FPL-GTR-113. U. S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA.

Hernández Maldonado, S.A. 2010. Comportamiento elástico de la madera. Teoría y aplicaciones. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Hernández Santiago, A.; Dávalos Sotelo, R.; Salomón Quintana, I. 2008. Resistencia mecánica de pequeños arcos de madera laminada. *Ingeniería*. 12(3):43-52.

Hill, C. 2006. Wood Modification-Chemical, Thermal and Other Processes. Wiley Series in Renewable Resources. John Wiley & Sons. England.

Hon, D.N.S; Shiraishi, N. 2001. Wood and Cellulosic Chemistry. 2<sup>nd</sup> edition. Marcel Dekker. USA.

Hwang, K. *et al.* 2002. Bending Quality of Main Korean Wood Species. *Wood Research*. 89:6-10.

Jayne, B.A. 1959. Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*. 9(11):413-416.

Kaiserlik, J.H.; Pellerin, R.F. 1977. Stress wave attenuation as an indicator of lumber strength. *Forest Products Journal*. 27(6):39-43.

Katsuragi, K. 2005. Furniture Maker Tai-Workshop. Japan. Publicado en línea: <http://www.tai-workshop.com/english/index-e.html>.

Kocaefe, D.; Poncsak, S.; Boluk, Y. 2008. Effect of Thermal Treatment on the Chemical Composition and Mechanical Properties of Birch and Aspen. *Bioresources*. 3(2):517:537.

Kollmann, F.F.P.; Côté, W.A. 1968. Principles of Wood Science and Technology. Volume I: Solid Wood. Springer-Verlag. Germany.

Kollmann, F.F.P.; Kuenzi, E.W.; Stamm, A.J. 1975. Principles of Wood Science and Technology. Volume II: Wood Based Materials. Springer-Verlag. Germany.

Kutnar, A.; Šernek, M.; 2007. Densification of Wood. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*. 82: 53-62.

Makinaga, M. *et al.* 1997. Permanent Fixation of Bending Deformation in Wood by Steam Treatment. *Wood Research*. 84:39-41.

Meyer, R.W.; Kellogg, R.M. Editors. 1982. Structural Use of Wood in Adverse Environments. Society of Wood Science and Technology. Van Nostrand Reinhold. USA.

Miettinen, P.; Titta, M.; Lappalainen, R. 2005. Electrical and Ultrasonic Analysis of Heat-Treated Wood. In: Proceedings of The 14<sup>th</sup> Symposium on NDT of Wood. University of Evesrwalde. Germany. pp:265-274.

Mohebbi, B.; Kamran, Y.; Roohinia, M. 2007. Acoustic Properties of Hydrothermally Modified Mulberry (*Morus alba* L.) Wood. In: Proceedings of The Third European Conference on Wood Modification. United Kingdom. pp: 283-286.

Murakami, R. *et al.* 2002. Relationship between Bending Quality and Wood Species. *Wood Research*. 89:21-22.

Newlin, J.A.; Trayer, G.W. 1956. Deflection of beams with special reference to shear deformations. Information reviewed and reaffirmed in 1956, reprinted from National Advisory Committee for Aeronautics Report 180, 1924. Forest Products Laboratory. U.S. Department of agriculture. Forest Service. USA.

Niemiec, S.S.; Brown, T.D. 1995. Steam Bending Red Alder. In: Western Hardwoods. Value-Added Research and Demonstration Program. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-85. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA.

Norimoto, M. *et al.* 1993. Permanent Fixation of Bending Deformation in Wood by Heat Treatment. *Wood Research*. 79:23-33.

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.

Oltean, L.; Teischinger, A.; Hansmann, C. 2010. Influence of low and moderate temperature kiln drying schedules on specific mechanical properties of Norway spruce wood. *European Journal of Wood Products*. Publicado en línea: Julio 2010.

Panshin, A.J.; de Zeeuw, C. 1964. Textbook of Wood Technology. Volume I. McGraw-Hill. USA.

Peck, E.C. 1957. Bending Solid Wood to Form. Agriculture Handbook No. 125. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. USA.

Pellerin, R.F. 1965. A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. *Forest Products Journal*. 15(3):93-101.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA.

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.

Perré, P. 2007. Experimental device for the accurate determination of wood-water relations on micro-samples. *Holzforschung*. 61:419-429.

Popović, Z.; Šoškić, B.; Mirić, M. 2006. Effect of moisture and temperature on some mechanical properties of beechwood. In Proceedings of: Conference of Wood Structure and Properties. Slovakia, pp:349-344.

Pure Bending: the Extreme Wood Bending Company. Publicado en línea: <http://www.flutedbeams.com/home.html>.

Ross, R.J. *et al.* 1997. Relationship between log and lumber modulus of elasticity. *Forest Products Journal*. 47(2):89-92.

Ross, R.J.; Pellerin, R.F. 1988. NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves. *Forest Products Journal*. 38(5):39-45.

Rowell, R. *et al.* 2002. Modification of Wood Fiber Using Steam. In Proceedings of: The 6<sup>th</sup> Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium & Workshop on The Chemical Modification of Cellulosics. USA. pp:606-615.

Salamon, M. 1969. High temperature and its effect on Wood properties. *Forest Products Journal*. 19(3):27-34.

Sandoz, J.L. 2000. Wood Testing Using Acousto-Ultrasonic. Publication IBOIS 00:23, Institut de Statique et Structures IBOIS. Construction en Bois. In: Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2000). Whistler Resort, British Columbia, Canada.

Sandoz, J.L. 2002. High Performance Timber by Ultrasonic Grading. Publication IBOIS 00:20, Institut de Statique et Structures IBOIS. Construction en Bois. In: Proceedings of the 7th World Conference on Timber Engineering (WCTE 2002). MARA University of Technology. Malaysia.

Shirazinia Riggioni, M.M. 2007. 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.

Siau, J.F. 1984. Transport Processes in Wood. Springer-Verlag. Germany.

Siau, J.F. 1995. Wood: Influence of Moisture on Physical Properties. Department of Wood Science and Forest Products. Virginia Polytechnic Institute and State University. USA.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2003. Caracterización Mecánica de madera reconstituida: Módulo de Elasticidad de Tableros de Partículas de Madera evaluado con métodos no destructivos. Revista Maderas: Ciencia y Tecnología. (5)1:20-43. Chile.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2005. Características mecánicas y clasificación de 150 especies de maderas Mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. UMSNH. 1(1):3-22. México.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2008. TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. FITECMA. UMSNH. Formato: 60 x 90 y 30 x 60 cm. 1 p. México.

Sotomayor Castellanos, J.R. 2009. Variabilidad de la densidad y de las características mecánicas de 150 maderas mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 5(1):23-32. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Bernabé Santiago, R.; Hernández Maldonado, S.A.; Sarmiento Bustos, D.; Fernández García, G.; Alfaro Trujillo, I. 2009. Caracterización no destructiva de vigas de madera de *Pinus* spp. utilizando ultrasonido y ondas de esfuerzo. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 5(1):3-22. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Guridi Gómez, L.I.; García Moreno, T. 2010. Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 6(1):3-32. México.

Stamm, A.J. 1964. Wood and Cellulose Science. The Ronald Press Company. USA.

Teischinger, A. 1992. Effect of different drying temperatures on selected physical wood properties. In: Proceedings 3<sup>rd</sup> IUFRO international wood drying conference. Austria.

Terziev, N.; Daniel, G. 2002. Industrial kiln drying and its effect on microstructure, impregnation and properties of Scots pine timber impregnated for above ground use. *Holzforschung*. 56:434-439.

Thiam, M.; Milota, M.R.; Leichti, R.J. 2002. Effect of high-temperature drying on bending and shear strengths of western hemlock lumber. *Forest Products Journal*. 52(4):64-68.

Thompson, W.S. 1969. Effect of steaming and kiln drying on the properties of Southern pine poles. *Forest Products Journal*. 19(1):21-28.

Timoshenko, S. 1955. *Strength of Materials*. 3<sup>rd</sup> Edition. Van Nostrand Reinhold. USA.

Timoshenko, S.P.; Goodier, J.N. 1970. *Theory of Elasticity*. 3<sup>rd</sup> edition. Engineering Societies Monographs. McGraw-Hill. USA.

Tumen, I. *et al.* 2010. Changes in the chemical structure of thermally treated wood. *BioResources*. 5(3):1936-1944.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2005. Comportamiento mecánico de la madera de *Prosopis sp.* en relación con la variación de su masa. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. 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.

Walker, J.C.F. 2006. Second Edition. *Primary Wood Processing. Principles and Practice*. Springer. The Netherlands.

Weigl, M. *et al.* 2011. Ammonia vs. Thermally Modified Timber – Comparison of Physical and Mechanical Properties. *European Journal of Wood Products*. Published online: March, 2011.

Westwood Timber Group. 2010. *Thermo-Treated Wood Research*. USA.

Widmann, R.; Beikircher, W.; Fisher, A. 2007. 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.

Wilson, T.R.C. 1933. *The Bending of Wood*. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA.

Young, W.C.; Budynas, R.G. 2002. 7<sup>th</sup> edition. *Roark's Formulas for Stress and Strain*. McGraw-Hill. USA.

## Anexo A. Desarrollo fórmula de flexión

Julio 5, 2011

El Anexo A tiene por objetivo presentar los fundamentos teóricos del estudio del comportamiento en flexión de vigas de *Euler-Bernoulli*. Este enfoque se emplea para el análisis de vigas de madera solicitadas en flexión simple, es decir, cuando no se desarrollan esfuerzos cortantes al interior de la viga.

Como complemento, y particularmente para esta investigación, los listones de madera de *Quercus scytophylla*, en este caso modelados como vigas, se utiliza enfoque del análisis de vigas de *Timoshenko*, donde se consideran los esfuerzos cortantes que aparecen en una viga solicitada en flexión tres puntos.

Para la determinación del módulo de elasticidad de la madera, se parte de las ecuaciones constitutivas y del análisis de equilibrio de momentos y fuerzas presentes en el listón, el cual es modelado como una viga continua, de geometría uniforme y estructuralmente homogénea, sometida a flexión transversal sobre apoyos simples, e idealizando a la madera como un material elástico.

Para el desarrollo de las ecuaciones constitutivas y el establecimiento de las fórmulas de aplicación práctica, se sintetizó la información de los siguientes autores: Biblis (1965), Bodig y Jayne (1982), Görlacher (1984), Hernández Maldonado (2010), Newlin y Trayer (1956), Timoshenko (1955) y Villaseñor Aguilar (2007).

### *Ecuación constitutiva*

El desplazamiento transversal (deflexión)  $w(x)$  bajo cargas estáticas en una viga uniforme de *Euler-Bernoulli*, es presentado en la Figura A.1a. Este sistema está regido por la ecuación:

$$EI \frac{d}{dx} w(x) = f(x) \quad 0 \leq x \leq L \quad (\text{A.1})$$

Donde:

$E$  = Módulo de elasticidad.

$I$  = Momento de inercia de la sección transversal de la viga.

$L$  = Portada de flexión de la viga.

La función fuerza  $f(x)$  para las cargas aplicadas sobre la viga, mostradas en la Figura A.1a, es de la forma:

$$f(x) = q(x) + f_0 \delta(x - x_f) - \varphi \frac{d}{dx} \delta(x - x_\varphi) \quad (\text{A.2})$$



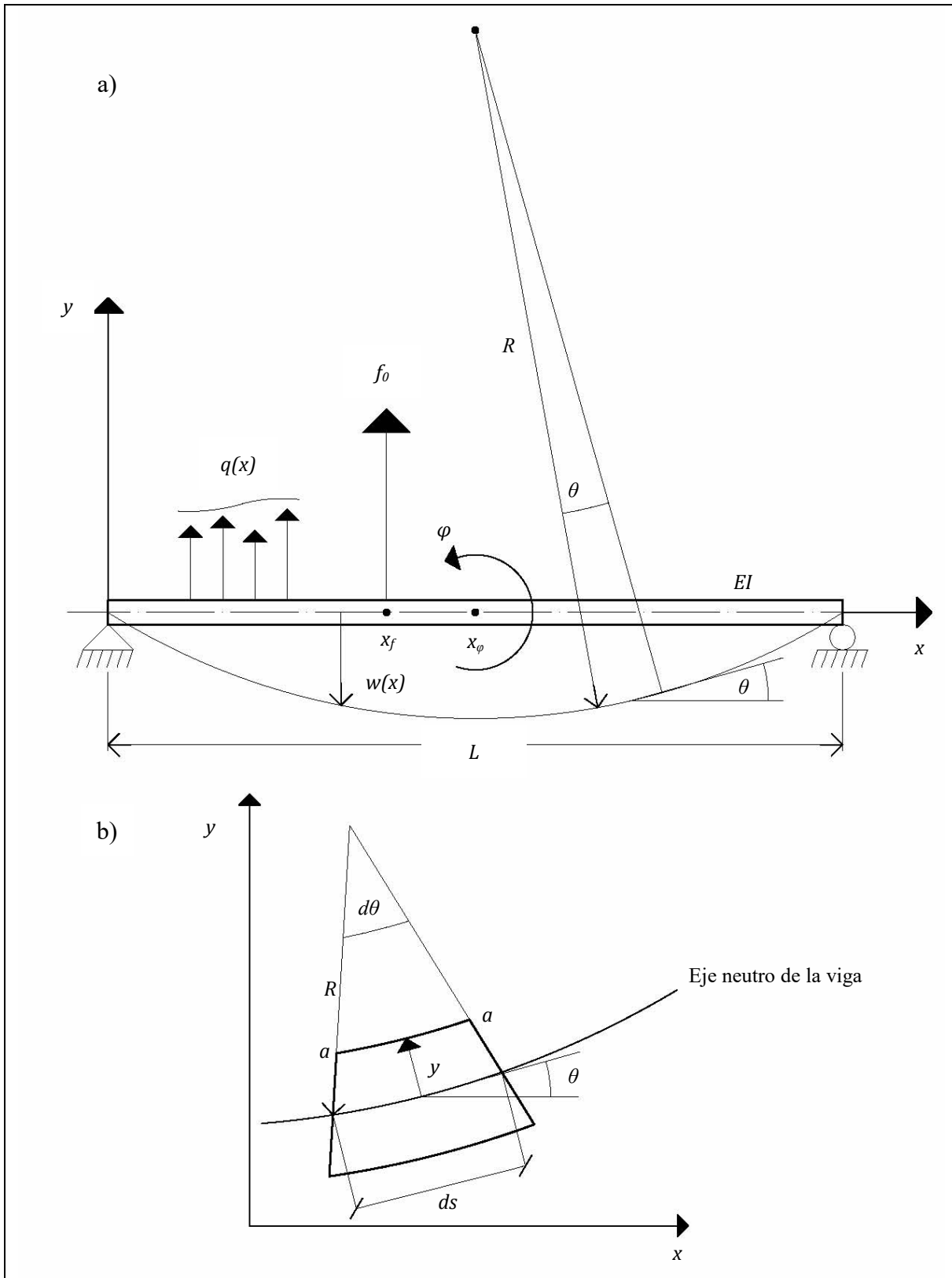


Figura A.1. a) Diagrama de cargas y deflexión de una viga en flexión. b) Segmento infinitesimal de la viga.

Donde:

$q(x)$  = Carga externa distribuida.

$f_0$  = Fuerza puntual aplicada en  $x_f$ .

$\varphi$  = Momento aplicado en  $x_\varphi$ .

$w(x)$  = Deflexión del eje neutro de la viga.

$\delta$  = Función delta de *Dirac*: 
$$\delta = \begin{cases} \infty, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases}$$

En la ecuación (A.2), en la Figura A.1 y en adelante, el desplazamiento de la viga y las fuerzas transversales puntuales o distribuidas son positivos cuando su dirección es hacia arriba. Igualmente, el momento aplicado es positivo cuando va en dirección contraria a las manecillas del reloj.

### *Condiciones de frontera*

Las condiciones de frontera de la viga son:

En el extremo izquierdo:

$$B_{01} [w(x)]_{x=0} = \alpha_1 \qquad B_{02} [w(x)]_{x=0} = \alpha_2 \qquad (\text{A.3})$$

En el extremo derecho:

$$B_{L1} [w(x)]_{x=L} = \beta_1 \qquad B_{L2} [w(x)]_{x=L} = \beta_2 \qquad (\text{A.4})$$

Donde  $B_{01}$ ,  $B_{02}$ ,  $B_{L1}$  y  $B_{L2}$  son operadores espaciales diferenciales, y  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  representan perturbaciones asociadas a las condiciones de frontera:  $x = 0$  y  $x = L$ .

### *Caracterización de la viga*

La respuesta estática de la viga se define por:

$$\text{Desplazamiento (deflexión transversal):} \qquad w(x) \qquad (\text{A.5})$$

$$\text{Rotación (pendiente):} \qquad \theta(x) = \frac{d}{dx} w(x) \qquad (\text{A.6})$$

Momento de flexión: 
$$M(x) = EI \frac{d^2}{dx^2} w(x) \quad (A.7)$$

Cortante: 
$$Q(x) = EI \frac{d^3}{dx^3} w(x) \quad (A.8)$$

En las relaciones (A.7) y (A.8), el momento de flexión  $M(x)$  y la cortante  $Q(x)$ , son fuerzas internas en la viga.

### *Reacciones en los soportes*

En las fronteras del dominio  $0 \leq x \leq L$  de la portada de la viga, se ejercen momentos y fuerzas de reacción a la viga cuando está sujeta a momentos y fuerzas externas (ver Figuras A.1a y A.2). Estas reacciones soportan a la viga y de esta forma, la equilibran con respecto a las fuerzas externas aplicadas. Por esta razón, estas condiciones de frontera son también llamadas soportes.

Estas reacciones están representadas por:

$$M_c = -EI \frac{d^2}{dx^2} (0) \quad R_c = EI \frac{d^3}{dx^3} (0) \quad \text{En el apoyo izquierdo } (x = 0) \quad (A.9)$$

$$M_c = EI \frac{d^2}{dx^2} (L) \quad R_c = -EI \frac{d^3}{dx^3} (L) \quad \text{En el apoyo derecho } (x = L) \quad (A.10)$$

El problema fundamental en el análisis estático de una viga de *Euler-Bernoulli*, es el siguiente: Dadas las fuerzas externas sobre una viga y sus condiciones de frontera, determinar la respuesta de la viga en términos de desplazamiento, rotación, momento de flexión y cortante. Esta respuesta es gobernada por la ecuación (A.1) y las condiciones de frontera señaladas por las relaciones (A.3) y (A.4).

### *Hipótesis de las vigas de Euler-Bernoulli.*

Las hipótesis simplificadoras para el estudio de una viga de *Euler-Bernoulli* son:

- a) Hipótesis cinemática: las secciones planas de la viga, normales a su eje neutro, permanecen planas después de que la viga es deformada en flexión.
- b) Hipótesis de elasticidad lineal: en estado de deformación, el esfuerzo normal y la deformación de la viga en su dirección longitudinal, satisfacen la ley de *Hooke*:

$$\sigma_x = E \epsilon_x \quad (A.11)$$

Donde:

$\sigma_x$  = Esfuerzo normal a la dirección  $x$ .

$\epsilon_x$  = Deformación unitaria en la dirección  $x$ .

c) Hipótesis de las pequeñas deflexiones: la viga es sometida a pequeñas deformaciones, de tal forma que su rotación (ecuación A.6):

$$\theta(x) = \frac{d}{dx} w(x) \quad (\text{A.6})$$

Es una cantidad insignificante en comparación con la unidad.

d) Hipótesis de la flexión simple: la viga es solicitada en flexión simple. Dado que el momento de flexión es constante a lo largo de la portada de la viga, no se generan esfuerzos internos cortantes en ningún segmento de la viga.

#### *Curvatura del eje de la viga*

De acuerdo a la hipótesis cinemática a), la deformación normal  $\epsilon_x$ , en un segmento infinitesimal de fibra  $a-a$  de la viga, esquematizado en la Figura A.1b, que se encuentra a una distancia  $y$  del eje de la viga es expresada por:

$$\epsilon_x = -\kappa y \quad (\text{A.12})$$

Donde  $\kappa$ , es la curvatura del eje de la viga y está dada por:

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{d\theta}{ds} = \frac{\frac{d^2}{dx^2} w(x)}{\left[1 + \left(\frac{d}{dx} w(x)\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{A.13})$$

Donde  $R$  es el radio de curvatura del eje neutro de la viga (ver Figura A.1b).

De acuerdo a la hipótesis c), de las pequeñas deflexiones:

$$\left|\frac{d}{dx} w(x)\right| \ll 1 \quad (\text{A.14})$$

La ecuación (A.13) se reduce a:

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{d^2}{dx^2} w(x) \quad (\text{A.15})$$

*Relación Momento-Curvatura*

De acuerdo a la hipótesis b), de la elasticidad lineal y empleando las ecuaciones (A.12) y (A.15), el esfuerzo normal se define por:

$$\sigma_x = -E y \varepsilon_x \frac{d^2}{dx^2} w(x) \quad (\text{A.16})$$

Por otra parte, de acuerdo a la hipótesis d), de la flexión simple, el momento de flexión de la viga es:

$$M(x) = - \int_A \sigma_x y dA = E \frac{d^2}{dx^2} w(x) \int_A y^2 dA = EI \frac{d^2}{dx^2} w(x) \quad (\text{A.17})$$

Donde:  $EI$  es la rigidez a la flexión de la viga, e  $I$  es el momento de inercia de la sección transversal de la viga, en relación al eje  $z$ , de la Figura (A.2), y es equivalente a:

$$I = \int_A y^2 dA \quad (\text{A.18})$$

De acuerdo a la Figura A.2, el área  $A$  de la sección transversal de la viga, es definida por su base  $b$  multiplicada por su altura  $h$ , es decir:

$$A = b h \quad (\text{A.19})$$

Con:  $h = 2y$

Empleando la expresión (A.19), e integrando la ecuación (A.18) en función de  $y$ , el momento de inercia  $I$  de la sección es:

$$I = 2 \int_A b y^2 dy = 2 \left[ \frac{b y^3}{3} \right]_0^{\frac{h}{2}} = \frac{b h^3}{12} \quad (\text{A.20})$$

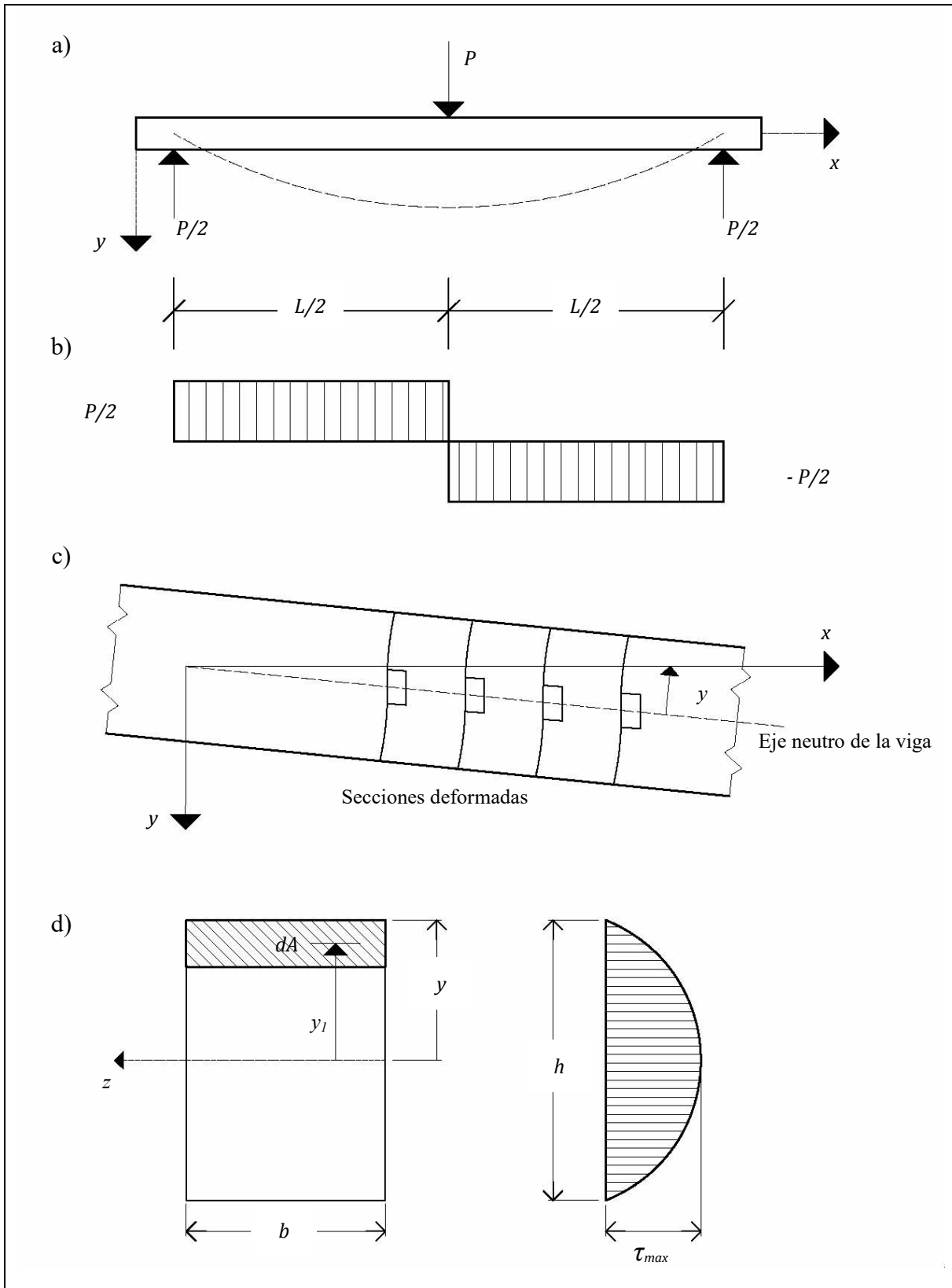


Figura A.2. a) Diagrama de cuerpo libre de la viga. b) Diagrama de cortante. c) Secciones deformadas. d) Distribución de esfuerzo corte.

Como corolario, y de acuerdo con las ecuaciones (A.15) y (A.16), la curvatura de la viga y el esfuerzo normal están relacionados al momento de flexión  $M$  por las relaciones:

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{M}{EI} \quad (\text{A.21})$$

y

$$\sigma_x = -\frac{M}{I} y \quad (\text{A.22})$$

### *Ecuaciones de equilibrio*

Considerando un segmento infinitesimal  $dx$ , de la viga mostrada en la Figura A.3, las ecuaciones de balance de las fuerzas y los momentos aplicados al segmento son:

$$Q + qdx - (Q + dQ) = 0 \quad (\text{A.23})$$

$$-M - Qdx - qdx \left(\frac{dx}{2}\right) + M + dM = 0 \quad (\text{A.24})$$

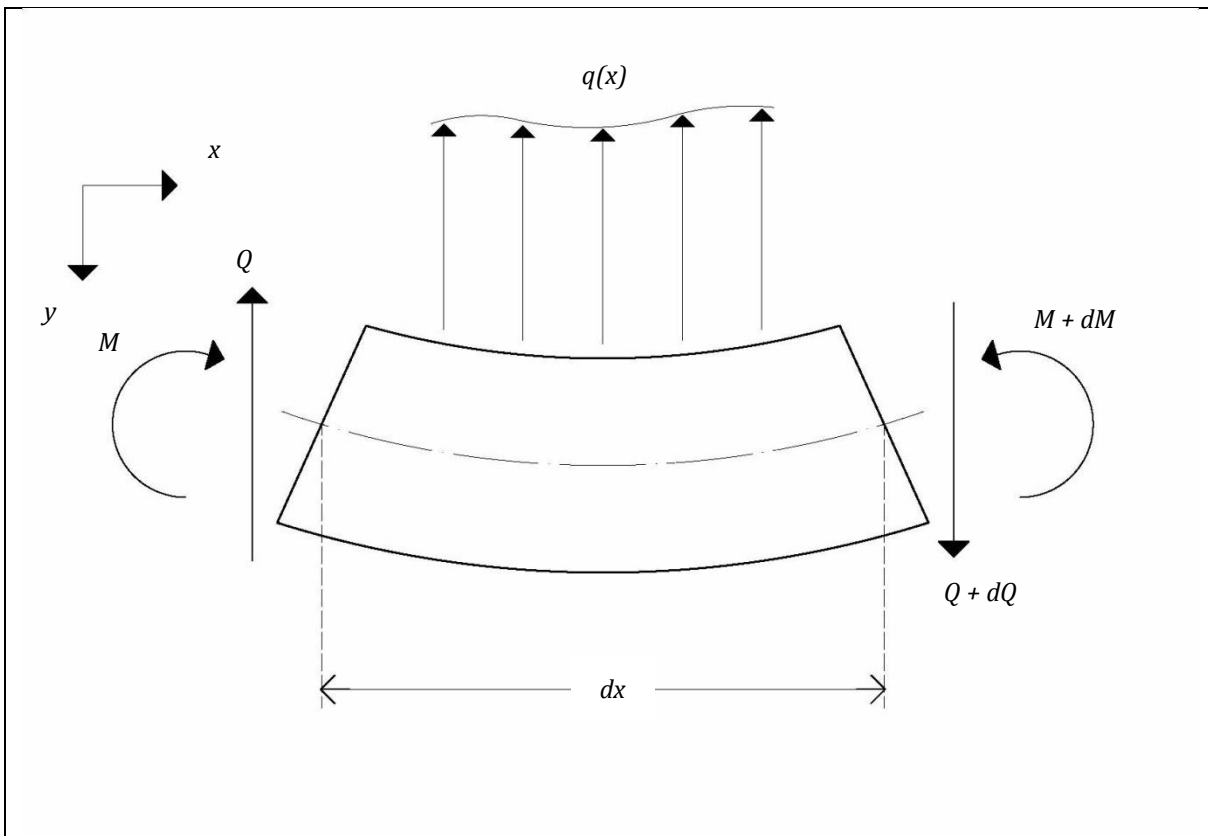


Figura A.3. Segmento infinitesimal de la viga.

Considerando que  $dx \rightarrow 0$ , la ecuación (A.24) se reduce a:

$$\frac{dQ(x)}{dx} = f(x) \quad (\text{A.25})$$

y

$$\frac{dM(x)}{dx} = Q(x) \quad (\text{A.26})$$

Combinando las ecuaciones (A.17), (A.25) y (A.26), se tiene:

$$f(x) = \frac{dQ}{dx} = \frac{d^2M}{dx^2} = EI \frac{d^4y}{dx^4} \quad (\text{A.27})$$

Identificando el desplazamiento  $w(x)$  con la deflexión de la viga  $y$ , la ecuación (A.27) es equivalente a la ecuación (A.1), por lo tanto:

$$M = EI \frac{d^2y}{dx^2} \quad (\text{A.28a})$$

$$Q = EI \frac{d^3y}{dx^3} \quad (\text{A.28b})$$

Como corolario, las igualdades (A.28a) y (A.28b), se identifican a las ecuaciones (A.7) y (A.8).

### *Flexión tres puntos*

Para el caso particular de una viga en flexión solicitada por una carga puntual a mitad de su portada, es decir en flexión tres puntos, la deflexión total de la viga es ocasionada por la fuerza del momento de flexión, combinada con la fuerza cortante. Este enfoque es conocido como análisis de vigas de *Timoshenko*:

$$y_{flex} = y_M + y_Q \quad (\text{A.29})$$

Donde:

$y_{flex}$  = Deflexión total de la viga solicitada en medio de la portada.

$y_M$  = Deflexión de la viga ocasionada por el momento de flexión.

$y_Q$  = Deflexión de la viga ocasionada por la fuerza cortante.



La deflexión  $y_M$  se puede calcular a partir de la ecuación (A.28a):

$$M = EI \frac{d^2y}{dx^2} \quad (\text{A.28a})$$

De acuerdo con el diagrama de cortante presentado en la Figura (A.2b), la ecuación (A.28a), se puede escribir:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (\text{A.30})$$

Con

$$M = -\frac{Px}{2} \quad (\text{A.31})$$

Sustituyendo la ecuación (A.31) en la ecuación (A.30), se obtiene:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{Px}{2EI} \quad (\text{A.32})$$

E integrando la ecuación (A.32) se llega a:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{Px^2}{4EI} + C_1 \quad (\text{A.33})$$

Donde:

$C_1$  = Constante de integración.

Integrando la ecuación (A.33), se obtiene:

$$y = -\frac{Px^3}{12EI} + C_1x + C_2 \quad \text{A.34}$$

Donde:

$C_2$  = Constante de integración.

De acuerdo a la ecuación (A.6):

$$\theta(x) = \frac{d}{dx} w(x) \quad (\text{A.6})$$

Y de conformidad a la Figura (A.2a), la pendiente de la viga es igual a:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{Px^2}{4EI} + C_1 \quad (\text{A.33})$$

Al mismo tiempo, empleando la ecuación (A.33), para  $x = L/2$ , donde la pendiente es nula, se obtiene:

$$C_1 = \frac{PL^2}{16EI} \quad (\text{A.35})$$

De acuerdo a la ecuación (A.1), la deflexión  $y$  de la viga en  $x = 0$ , es igualmente nula, y recurriendo a la ecuación (A.34), se obtiene:

$$C_2 = 0 \quad (\text{A.36})$$

De tal forma que la deflexión total de la viga a la mitad de su portada es:

$$y = -\frac{Px^3}{12EI} + \frac{PL^2x}{16EI} \quad (\text{A.37})$$

Sustituyendo en la ecuación (A.37),  $x$  por  $L/2$ , se llega a:

$$y = -\frac{PL^3}{48EI} + \frac{2PL^3}{482EI} \quad (\text{A.38})$$

Simplificando, se obtiene:

$$y = \frac{PL^3}{48EI} \quad (\text{A.39})$$

La deflexión  $y$  en la fórmula (A.39), equivale a la deflexión de la viga  $y_M$ , en la ecuación (A.29), ocasionada por el momento de flexión  $M$ .

Respecto a la deflexión de la viga ocasionada por la cortante, la deflexión  $y_Q$  de la ecuación (A.29), se puede calcular a partir de la ecuación (A.8):

$$Q(x) = EI \frac{d^3}{dx^3} w(x) \quad (\text{A.8})$$

Identificando  $w(x)$  con la deflexión, la ecuación (A.8), se puede expresar igualmente como:

$$Q(x) = EI \frac{d}{dx} \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right) \quad (\text{A.40})$$

En la ecuación (A.40),  $\left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)$  representa el momento de flexión  $M(x)$  de la ecuación (A.7).

Por otra parte, y de acuerdo con Timoshenko (1955), la deflexión ocasionada únicamente por el esfuerzo cortante, se expresa como el deslizamiento entre las secciones transversales y adyacentes de la viga, tal como se ilustra en la Figura A.2c, la cual esquematiza la curvatura del eje de la viga producida únicamente por la deformación cortante.

Dado que los esfuerzos no están distribuidos de manera constante a lo largo de la sección transversal de la viga, la sección plana se flexiona localmente. Es decir, la hipótesis cinemática de una viga de *Euler-Bernoulli* no se verifica. Como resultado, las secciones planas de la viga, normales a su eje neutro, no permanecen planas después de que la viga es deformada en flexión (ver Figura A.2c).

Tal como se esquematiza en la Figura A.2c, los pequeños elementos rectangulares alineados al eje neutral se deforman en rombos. En consecuencia, la pendiente de la curva de la deflexión de la viga  $\left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)$ , debida únicamente al esfuerzo cortante  $\tau$ , es igual -en cada sección transversal-, a la deformación angular con respecto al centroide de la sección transversal de la viga.

Si se define  $y_\tau$ , como la deflexión del eje neutro de la viga, ocasionada únicamente por el esfuerzo cortante, se obtiene la siguiente expresión para la pendiente de la curva en cualquier sección transversal:

$$\frac{dy_\tau}{dx} = \frac{\tau}{G} = \frac{KV}{AG} \quad (\text{A.41})$$

Donde:

$\tau$  = Esfuerzo cortante.

$V$  = Fuerza cortante.

$A$  = Sección resistente.

$\frac{V}{A}$  = Esfuerzo cortante promedio equivalente a  $\tau$ .

$G$  = Módulo de rigidez.

$K$  = Factor numérico por el cual el esfuerzo cortante promedio se multiplica para obtener el esfuerzo cortante en el centroide de la sección transversal. El factor  $K$  depende de la geometría de la sección transversal de la viga.

Para el caso de la madera, modelada como un sólido elástico, de medio continuo, macroscópicamente homogéneo y con simetrías materiales y elásticas de carácter ortotrópico, las características elásticas  $E$ ,  $G$  y los parámetros  $\sigma$  y  $\tau$ , son definidos de acuerdo con el modelo elástico general para la madera solida propuesto por Hernández Maldonado (2011).

Conforme a la Figura A.2d, el esfuerzo cortante en cualquier punto a una distancia  $y_1$  del eje neutral de la sección transversal, es definido por:

$$\tau = \frac{V}{bI} \int_{y_1}^{\frac{h}{2}} y dA \quad (\text{A.42})$$

Para el caso de una sección transversal como la mostrada en la Figura A.2d, el segmento diferencial de la sección  $dA$  es igual a  $b dy$ . Por lo tanto, la integral de la ecuación (A.42) es:

$$\int_{y_1}^{\frac{h}{2}} y dA = \int_{y_1}^{\frac{h}{2}} b y dy = \left| \frac{b y^2}{2} \right|_{y_1}^{\frac{h}{2}} = \frac{b}{2} \left( \frac{h^2}{4} - y_1^2 \right) \quad (\text{A.43})$$

Como consecuencia de las relaciones en (A.43), se observa que el esfuerzo cortante  $\tau$ , no está distribuido uniformemente a través de la sección de la viga. El máximo valor  $\tau_{max}$  es cuando  $y_1 = 0$ , posición que corresponde al eje neutral. De aquí, que la ecuación (A.42) se simplifica en:

$$\tau = \frac{V h^2}{8I} \quad (\text{A.44})$$

Dado que:

$$I = \frac{b h^3}{12} \quad (\text{A.45})$$

La ecuación (A.44) es:

$$\tau = \frac{3V}{2bh} = \frac{3V}{2A} \quad (\text{A.46})$$

Con  $A = bh$

De la ecuación (A.46) se deriva que el factor  $K$  en la ecuación (A.41) equivale a  $3/2$ , como es el caso en vigas de sección transversal rectangular.

Para el caso de una viga solicitada en flexión tres puntos (ver Figura A.2) la fuerza cortante  $V$  es igual a  $P/2$ , y es constante a lo largo de la portada  $L$  de la viga, pero cambia de signo en  $x = L/2$ . De tal forma que la pendiente definida en la ecuación (A.41), se simplifica en:

$$\frac{dy_{\tau}}{dx} = \frac{3P}{4AG} \quad (\text{A.47})$$

Integrando la ecuación (A.47), se obtiene la deflexión ocasionada por el esfuerzo cortante en cualquier punto a lo largo de la portada  $L$  de la viga:

$$y_{\tau} = \frac{3Px}{4AG} + C_3 \quad (\text{A.48})$$

Donde  $C_3$  es una constante de integración.

De acuerdo a la Figura A.2a, cuando  $x = 0$ ,  $y$  es igual a 0. Por lo tanto:

$$C_3 = 0 \quad (\text{A.49})$$

Finalmente, la ecuación (A.48) se simplifica a:

$$y_{\tau} = \frac{3Px}{4AG} \quad (\text{A.50})$$

Dado que la máxima deflexión en una viga solicitada en tres puntos, ocurre a la mitad de la portada de flexión  $L/2$ , la deflexión máxima de la viga debida a la fuerza cortante para  $x = L/2$ , es:

$$y_{\tau} = \frac{3PL}{8AG} \quad (\text{A.51})$$

El término  $y_{\tau}$  en la ecuación (A.51), es el equivalente a  $y_Q$  de la ecuación (A.29). En el mismo contexto, el término  $y$  en la ecuación (A.39), equivale a  $y_M$  en la misma ecuación (A.29):

$$y_{flex} = y_M + y_Q \quad (\text{A.29})$$

Sustituyendo las ecuaciones (A.39) y (A.51), en la ecuación (A.29), e identificando términos, la deflexión de una viga solicitada en flexión transversal en tres puntos, -como es el caso del estudio de la rigidez de los listones de madera de *Quercus scytophylla*, estudiados en esta investigación-, la deflexión total de un listón es:

$$y_{flex} = \frac{PL^3}{48EI} + \frac{3PL}{8AG} \quad (A.52)$$

El primer término del lado derecho de la fórmula (A.52), representa la deformación en la probeta debida al momento de flexión. El segundo término, es resultado de la deformación ocasionada por el esfuerzo cortante.

Para el caso de esta investigación, y de acuerdo con Görlacher (1984) y Newlin y Trayer (1956), en el estudio de probetas de madera con relaciones de portada/grueso ( $L/h$ ) mayores a 15, como es el caso de los listones, la deformación causada por el esfuerzo cortante puede ser ignorada en la determinación del módulo aparente de elasticidad en tres puntos.

En el contexto de esta investigación, se aceptó este argumento que es empleado usualmente en Ciencias, Tecnología e Ingeniería de la Madera, entre otros autores por Bodig y Jane (1982) y Villaseñor Aguilar (2007).

De aquí que la ecuación completa (A.52) de la deflexión de una viga de madera, en flexión tres puntos se simplifica en:

$$y_{flex} = \frac{PL^3}{48EI} \quad (A.53)$$

De esta forma, la ecuación (A.53) es equivalente a la ecuación (5.1), empleada en esta investigación para estudiar la rigidez de los listones de madera:

$$E = \frac{P}{y} \frac{L^3}{48I} \quad (5.1)$$

## Anexo B. Desarrollo fórmula de velocidad de onda

Julio 5, 2011

El anexo B tiene por objetivo presentar los fundamentos teóricos del estudio del movimiento de una probeta de madera en vibración, idealizada como una barra delgada e infinitamente larga de un material visco-elástico.

Primeramente se estudia el movimiento de un segmento de una barra, seguido del estudio de la barra modelada como un oscilador simple y finalmente, la barra se modela como un material visco-elástico.

La fórmula general utilizada para el cálculo del módulo de elasticidad en la madera que utiliza la velocidad de transmisión de una onda mecánica ponderada por la densidad del material, se fundamenta en la teoría de la Resistencia de materiales y en la Teoría de vibraciones para sólidos elásticos. Este estudio parte de las siguientes consideraciones:

De acuerdo con Sotomayor Castellanos (2003) y Villaseñor Aguilar (2005), la caracterización del comportamiento de la madera en condiciones dinámicas y los métodos de laboratorio recientemente desarrollados, han sido de carácter no destructivo y han utilizado la hipótesis fundamental en mecánica de la madera, propuesta por Jayne en 1959:

La madera y los materiales fabricados con ella pueden almacenar y disipar energía, por ejemplo, la propiedad de la madera de almacenar energía es manifestada por la velocidad a la cual una onda mecánica viaja a través de ella. En contraste, la capacidad de la madera para atenuar una onda de vibración, denota su capacidad para disipar energía. Jayne propuso así la hipótesis fundamental de que estas propiedades de la madera para almacenar y disipar energía, están controladas por los mismos mecanismos que determinan su comportamiento mecánico en condiciones estáticas. Es decir, la estructura molecular y anatómica del material es la base del comportamiento mecánico de la madera. Como consecuencia, es posible relacionar estadísticamente estas propiedades utilizando métodos de análisis numéricos tales como las correlaciones estadísticas.

Esta proposición ha sido verificada experimentalmente por los trabajos de Jayne (1959), Pellerin (1965), Kaiserlik y Pellerin (1977), Ross y Pellerin (1988), Ross y col. (1997) y más recientemente por: Sandoz (2000 y 2002).

La idealización de una barra delgada e infinitamente larga de un material visco-elástico se limita a volúmenes de probetas de madera sólida, cuyo contenido de humedad permanece constante y distribuido de manera uniforme en las probetas.

En una escala de observación macroscópica, la madera es un material homogéneo y lignocelulósico que admite simetrías materiales cartesianas y cilíndricas (Villaseñor Aguilar, 2007). Esta proposición facilita el estudio de la madera independiente del tipo, tamaño y acomodo de sus componentes estructurales moleculares y anatómicos. Además, este concepto permite idealizar a la madera como un material que admite referenciales materiales y de geometría, compatibles entre sí con coordenadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso.

Desde el punto de vista mecánico, la madera es un sólido de medio continuo con propiedades visco-elásticas. Este enfoque considera a la madera como un sólido elástico y admite la teoría matemática propia al estudio de los medios continuos. Este punto de vista permite igualmente emplear las leyes de la resistencia de materiales en el análisis del comportamiento mecánico de la madera. Conjuntamente, este criterio considera que las propiedades elásticas del material están relacionadas con su comportamiento higroscópico.

A una escala de observación de un volumen elemental de materia, la representación reológica de la madera es un sistema a un grado de libertad, caracterizado por la respuesta de una masa que representa la probeta de estudio, la cual está unida a cuerpos de *Kelvin* y de *Voigt*, compuestos éstos por elementos elásticos y viscosos.

En una escala celular o de tejido leñoso, esta misma idea se aplica, pero modelando sistemas a varios grados de libertad, donde cada uno de éstos puede ser una célula o un tejido en particular. De esta manera, se transfieren resultados de una probeta en particular o de una muestra de material en estudio, como características generales de una especie de madera (Villaseñor Aguilar, 2007).

La teoría de la elasticidad permite la representación matemática del comportamiento de probetas de madera, durante los ensayos que pretenden determinar sus características mecánicas. En la práctica de laboratorio, los resultados entre representaciones completas del fenómeno y su simplificación para fines del cálculo de parámetros de ingeniería son casi iguales, lo que permite que los métodos experimentales se faciliten, ignorando los fenómenos puntuales y locales ocasionados por las condiciones particulares a la configuración del ensayo respectivo (Villaseñor Aguilar, 2007).

Respecto al efecto del tiempo, el carácter viscoso de la madera modifica su respuesta elástica, particularmente en las pruebas donde las sollicitaciones son mantenidas constantes durante periodos temporales largos. Por ejemplo durante los ensayos de relajación de esfuerzos y flujo de deformaciones. Adicionalmente, las propiedades viscoelásticas de la madera pueden ser observadas en ensayos dinámicos, donde la velocidad de carga es muy alta. Por ejemplo, los ensayos mecánicos por impacto y en vibraciones (Villaseñor Aguilar, 2007).

Los fenómenos ocasionados por fuerzas y deformaciones a través del tiempo son estudiados idealizando al material con modelos reológicos, compuestos de elementos elásticos y viscosos, sujetos a una masa representativa de la madera. Este estudio hace uso de ese tipo de modelos para anticipar la respuesta del material.

El desarrollo de la ecuación de onda y los parámetros derivados que caracterizan al movimiento de una barra están basados en Meyers (1982) y Timoshenko y Goodier (1970), y adaptado de Sotomayor Castellanos y col. (2009).



*Estudio del movimiento de una barra delgada e infinitamente larga de un material visco-elástico.*

La ecuación de movimiento de un elemento diferencial de la barra mostrada en la Figura B.1, es:

$$-\sigma A + \left(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx\right) A = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{B.1})$$

Donde:

$u$  = Desplazamiento desde la posición de equilibrio.

$x$  = Coordenada espacial.

$A$  = Área de la sección transversal de la barra.

$\sigma$  = Esfuerzo normal a la sección transversal.

$\rho$  = Densidad del material.

$t$  = Tiempo.

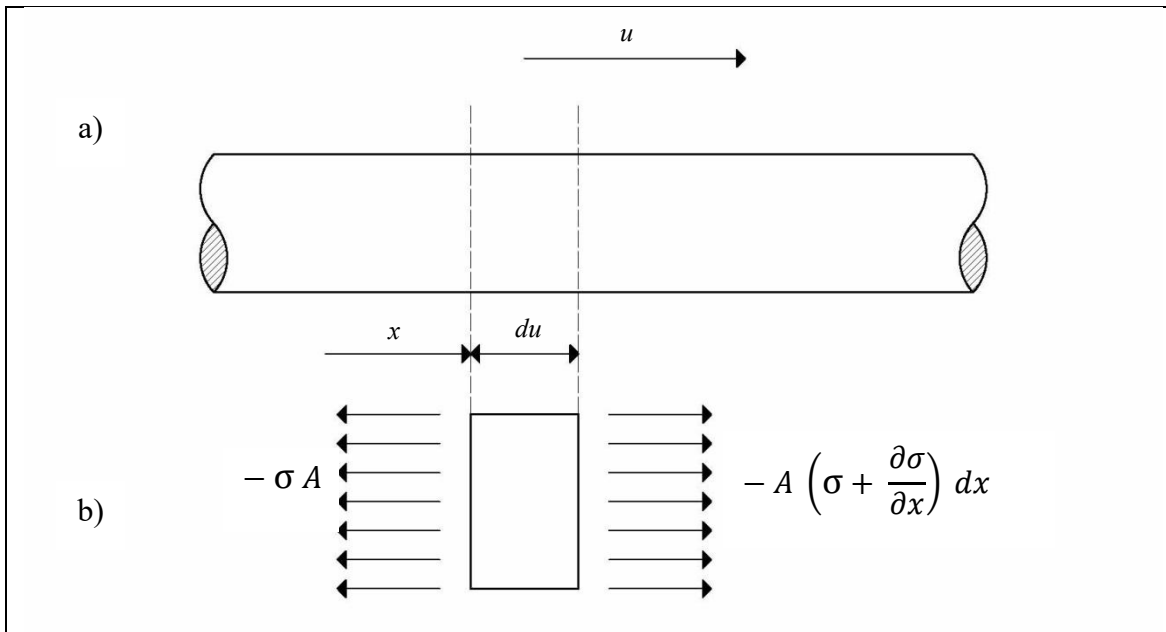


Figura B.1. a) Esquema de un segmento de barra delgada con coordenadas  $x$  y desplazamiento  $u$  de una sección transversal. b) Diagrama del cuerpo libre de una sección transversal infinitesimal con los esfuerzos  $\sigma$  actuando en un elemento diferencial  $dx$  de la barra.

La ecuación (B.1) se puede reducir a:

$$\frac{d\sigma}{dx} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{B.2})$$

Para el caso de un material elástico se puede proponer:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (\text{B.3})$$

Donde:

$E$  = Módulo de elasticidad del material.

$\varepsilon$  = Deformación en el material.

La deformación material  $\varepsilon$  puede ser definida por:

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (\text{B.4})$$

Substituyendo la ecuación (B.4) en la ecuación (B.3) y procediendo igualmente en la ecuación simplificada (B.2), se puede establecer:

$$E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{B.5})$$

La ecuación (B.5) puede ser transformada en la forma:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{B.6})$$

Donde:

$$c_0^2 = \frac{E}{\rho} \quad (\text{B.7})$$

La ecuación (B.6) explica la propagación de una onda elástica, longitudinal y unidimensional en una barra delgada. Esta ecuación es llamada usualmente ecuación de onda.

Una solución para la ecuación de onda puede ser una onda armónica cuya propagación puede ser definida por:

$$u = A \sin[k(x - ct)] \quad (\text{B.8})$$

Substituyendo la ecuación (B.8) en la ecuación (B.7) se llega a:

$$c = c_0 \quad (\text{B.9})$$

Es decir, la velocidad de propagación de la onda debe ser  $c_0$ .

Para el caso de vibraciones en una barra de largo finito, la cual es sometida a una vibración libre definida por:

$$u(x, t) = u(x) \sin(\omega t) \quad (\text{B.10})$$

Con:

$\omega$  = Frecuencia de vibración de la barra.

Remplazando la función (B.10) en la ecuación (B.6), se obtiene:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k^2 u = 0 \quad (\text{B.11})$$

Con:

$$k = \frac{\omega}{c_0} \quad (\text{B.12})$$

La ecuación (B.11) tiene como solución:

$$u(x) = C \sin(kx) + D \cos(kx) \quad (\text{B.13})$$

Para determinar las constantes  $C$  y  $D$ , se puede suponer que se trata de una barra sobre apoyos de tipo libre-libre. Las condiciones de frontera son:

$$\text{Para: } x = 0 \quad \text{y} \quad x = l: \quad \sigma = 0$$

con:  $l$  = Largo de la barra.

Es decir, no existen esfuerzos en las extremidades de la barra.

Y combinando las ecuaciones (B.3) y (B.4), se obtiene:

Para:  $x = 0$  y  $x = l$ :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

Es decir, no hay deformaciones en los extremos de la barra.

Derivando la ecuación (B.13) se obtiene:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = k (C \cos k x - D \sin k x) \quad (\text{B.14})$$

Donde  $C$  y  $D$  son constantes.

Resolviendo para:  $x = 0$ :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

y se obtiene:  $C = 0$

Igualmente para:  $x = l$ :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

Se encuentra:

$$D \sin (k l) = 0$$

Lo que implica:

$$k l = n \pi$$

Con:  $n = (1, 2, \dots)$

Es decir:

$$\omega_n = \frac{n \pi c_0}{l} \quad (\text{B.15})$$

ó:

$$f_n = \frac{n c_0}{2l} \quad (\text{B.16})$$

Donde:

$\omega_n, f_n$  = Frecuencias naturales de vibración de la barra.

Lo cual lleva a definir los siguientes modos de vibración:

$$u(x, t) = D \cos\left(\frac{n \pi}{l} x\right) \quad (\text{B.17})$$

Con:  $n = (1, 2, \dots)$

La ecuación de movimiento (B.6) puede generalizarse para cualquier tipo de polarización de onda en un medio elástico:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{l}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{B.18})$$

Donde:

$$c = \sqrt{\frac{\text{Rigidez}}{\text{Densidad}}} \quad (\text{B.19})$$

Con:  $c$  = Velocidad de onda.

Las ecuaciones (B.18) y (B.19) predicen igualmente la propagación de ondas unidireccionales.

Para el caso de una barra de un material sólido y elástico de módulo de Young  $E$ , y de densidad  $\rho$ , la velocidad de onda  $c$  puede entonces ser definida por:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{B.20})$$

La ecuación (B.20) es la relación usada comúnmente en Ciencias e Ingeniería de la madera para calcular el módulo de elasticidad de una probeta de madera.

De esta forma, la ecuación (B.20) es equivalente a la ecuación (5.10), empleada en esta investigación para estudiar la velocidad de las ondas de esfuerzo en las probetas de madera:

$$E_{oe} = \rho_{H=12\%} V_{oe}^2 \quad (5.10)$$

Donde  $V_{oe}$ , es la velocidad de las ondas de esfuerzo equivalente a  $c$ ,  $E_{oe}$  es equivalente a la rigidez y  $\rho_{H=12\%}$  es la densidad.

Desde otro punto de vista, la barra esquematizada en la Figura B.1, puede ser modelada como un oscilador simple, esquematizado en la Figura B.2.

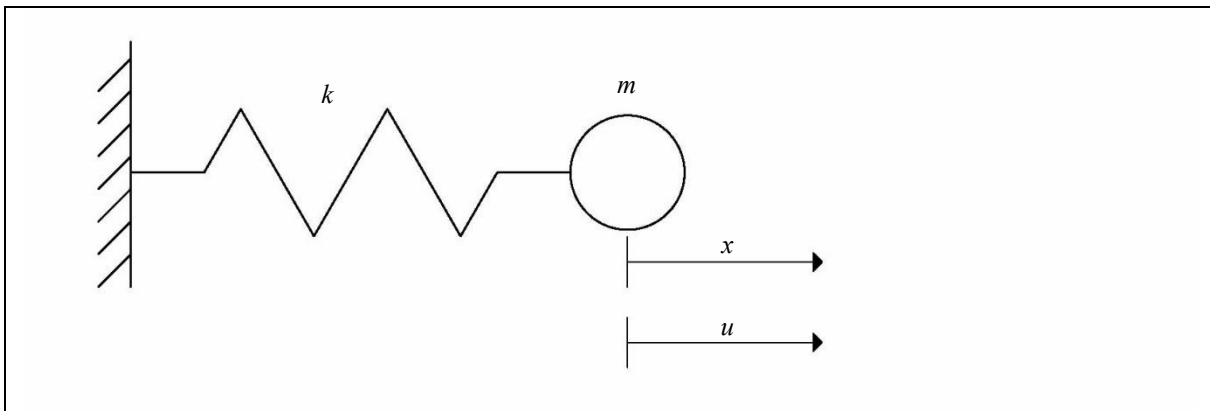


Figura B.2. Modelo conceptual de una barra sólida y elástica como un oscilador simple compuesto de un resorte elástico de rigidez  $k$  y una masa sólida  $m$ .

La ecuación de movimiento del sistema representado en la Figura B.2 es:

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + k u = 0 \quad (B.21)$$

Donde:

$m$  = Masa del sistema (material).

$k$  = Rigidez del sistema (material).

Acomodando la ecuación (B.21), resulta:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \omega_0^2 \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (B.22)$$

Con:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{B.23})$$

Donde:

$\omega_0$  = Frecuencia angular natural del sistema en vibraciones libres

Una solución para la ecuación (B.22) es:

$$u = C \cos \omega_0 t + D \sin \omega_0 t \quad (\text{B.24})$$

La ecuación (B.24) puede ser formulada en términos de la amplitud  $A$  y del ángulo de fase  $\varphi$ :

$$u = A \cos (\omega_0 t - \varphi) \quad (\text{B.25})$$

Con:

$$A = \sqrt{C^2 + D^2} \quad (\text{B.26})$$

y

$$\tan \varphi = \frac{D}{C} \quad (\text{B.27})$$

Si al sistema representado en la Figura B.2 se le agrega un elemento amortiguador  $c$ , se forma un sistema mecánico visco-elástico (también llamado Modelo de Kelvin), tal como se muestra en la Figura B.3, la ecuación de movimiento para el sistema mostrado en la Figura B.3 es:

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial u}{\partial t} + k u = 0 \quad (\text{B.28})$$

Donde:

$\mu$  = Constante de amortiguamiento del sistema (material).

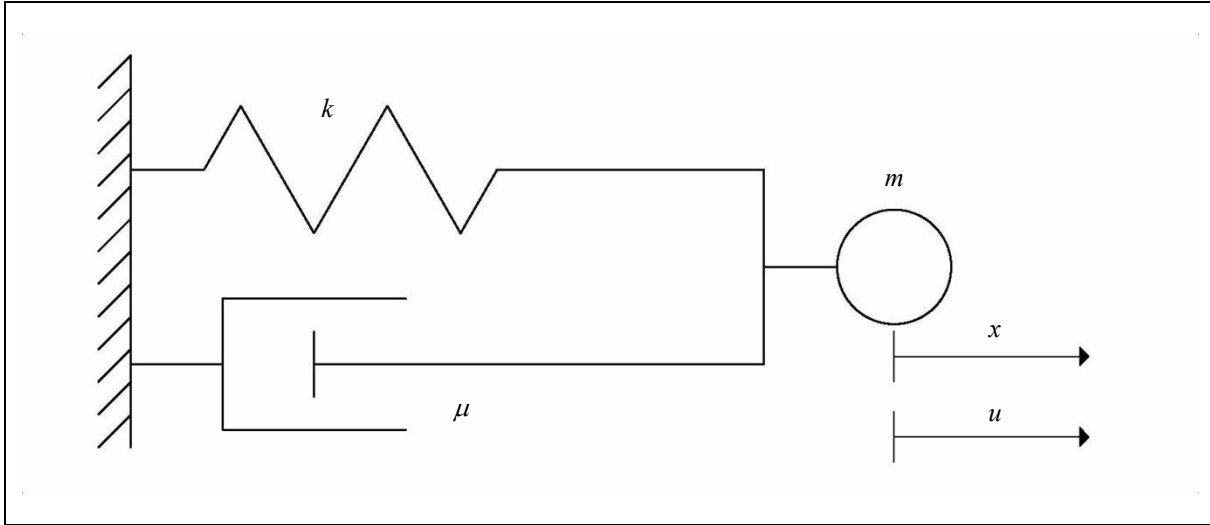


Figura B.3. Modelo conceptual de una barra sólida y elástica como un sistema visco-elástico compuesto de un resorte elástico de rigidez  $k$ , un amortiguador viscoso  $\mu$  y una masa sólida  $m$ .

La ecuación (B.28) se puede acomodar de la manera siguiente:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{\partial u}{\partial t} + \omega_0^2 u = 0 \quad (\text{B.29})$$

Donde:

$Q$  = Factor de calidad del sistema (material).

Con:

$$Q = \frac{\sqrt{m k}}{\mu} \quad (\text{B.30})$$

La solución de la ecuación (B.29) puede tomar varias formas dependiendo del valor de  $Q$ .

Para el caso donde  $Q \geq 0.5$ , llamado sistema con periodo amortiguado (y que es el caso que se aplica al estudio del ultrasonido y a la mayoría de sistemas simples en vibración), la solución es:

$$u = e^{-\xi t} (A_1 e^{i \Omega t} + A_2 e^{-i \Omega t}) \quad (\text{B.31})$$

Donde:

$A_1$  y  $A_2$  = Constantes.



$\Omega$  = Frecuencia natural angular de un sistema visco elástico en vibraciones libres.

$\xi$  = Constante de disminución de la vibración del sistema (ver Figura B.4).

Con:

$$\Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} \quad (\text{B.32})$$

y

$$\xi = \frac{\omega_0}{2Q} \quad (\text{B.33})$$

La ecuación (B.31) puede expresarse en términos de una función compuesta de senos y cosenos:

$$u = e^{-\xi t} (C \cos \Omega + D \sin \Omega) \quad (\text{B.34})$$

La función (B.34) representa la curva característica de las vibraciones libres de un oscilador amortiguado y puede esquematizarse con la Figura B.4:

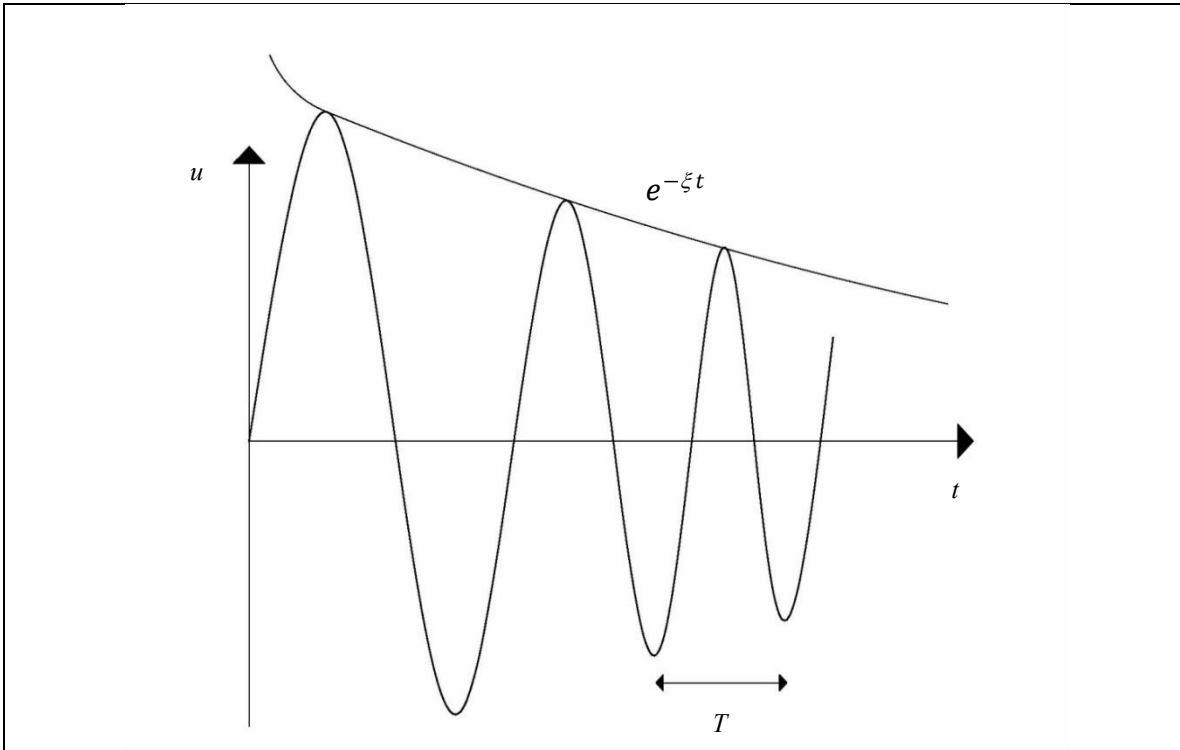


Figura B.4. Disminución exponencial de las vibraciones libres de un sistema amortiguado.

Para un periodo  $T$  (ver Figura B.4), se puede demostrar que:

$$\frac{u(t)}{u(t+T)} = e^{-\xi t} \approx e^{\frac{\pi}{Q}} \quad (\text{B.35})$$

Lo que implica una nueva definición del factor de calidad del sistema:

$$\Delta = \ln \frac{u(t)}{u(t+T)} = \xi t = \frac{\pi}{Q} \quad (\text{B.36})$$

Donde:

$\Delta$  = Decremento logarítmico de las vibraciones del sistema (material).

## Índice de Cuadros

Julio 5, 2011

Cuadro 2.1. Métodos para curvado de madera .....	12
Cuadro 5.1. Leyenda y simbología de la geometría y de las dimensiones de las probetas y de los segmentos de ondas de esfuerzo .....	32
Cuadro 6.1. Resultados de las pruebas de rigidez de los listones de madera de <i>Quercus scytophylla</i> .....	40
Cuadro 6.2. Resultados de las pruebas de ondas de esfuerzo en las probetas de la madera de <i>Quercus scytophylla</i> .....	41
Cuadro 7.1. Comparación de medias.....	44

## Índice de Figuras

Julio 5, 2011

Figura 2.1. Comportamiento higroelástico de la madera.....	8
Figura 2.2. Comportamiento higrotermoelástico de la madera .....	9
Figura 5.1. Elaboración de listones .....	22
Figura 5.2. Clasificación de listones y probetas .....	23
Figura 5.3. Dispositivo para deformación de flexión curva .....	26
Figura 5.4. Dispositivo de suavizado.....	27
Figura 5.5. Pendientes P/y de un listón sin tratamiento y de un listón suavizado .....	28
Figura 5.6. Temperatura y contenido de humedad de la madera durante el proceso de plastificado higro-térmico .....	29
Figura 5.7. Detalles de la colocación de los termómetros .....	31
Figura 5.8. Geometría de las probetas .....	33
Figura 5.9. Geometría para el cálculo de tasas de compresión y relación Radio/Espesor .....	34
Figura 5.10. Dispositivo para pruebas de ondas de esfuerzo en las probetas rectas .....	36
Figura 5.11. Dispositivo para pruebas de ondas de esfuerzo en las probetas curvas .....	37
Figura 5.12. Estrategia experimental.....	39
Figura 6.1. Fotografías de listones y probetas .....	42
Figura 7.1. Efecto del tratamiento higro-térmico en la rigidez de la madera .....	46
Figura 7.2. Diagrama de cuerpo libre, proceso y cargas de flexión curva en listones ..	48
Figura 7.3. Proceso de flexión curva en listones .....	49
Figura 7.4. Distribución de esfuerzos internos de flexión curva en listones .....	50
Figura 7.5. Transmisión de ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal de la madera.....	60

Figura A.1. a) Diagrama de cargas y deflexión de una viga en flexión.	
b) Segmento infinitesimal de la viga .....	71
Figura A.2. a) Diagrama de cuerpo libre de la viga. b) Diagrama de cortante.	
c) Secciones deformadas. d) Distribución de esfuerzo corte.....	76
Figura A.3. Segmento infinitesimal de la viga .....	77
Figura B.1. Esquema de un segmento de barra delgada. ....	87
Figura B.2. Modelo conceptual de una barra sólida y elástica como un oscilador simple.....	92
Figura B.3. Modelo conceptual de una barra sólida y elástica como un sistema visco-elástico .....	94
Figura B.4. Disminución exponencial de las vibraciones libres de un sistema amortiguado .....	95

## Lista de Símbolos

Julio 5, 2011

Símbolo	Descripción	Unidades
PSF	Punto de saturación de la fibra	%
E	Módulo de elasticidad	Pa
Eoe	Módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo	%
H	Contenido de humedad	
T	Temperatura	°C
P	Carga	N
y	Deflexión	m
L	Portada de flexión	m
Ef	Módulo en flexión	Pa
I	Momento de inercia	m <sup>4</sup>
Mf	Momento de flexión	kg/m
Lext	Longitud de arco exterior	mm
Lcen	Longitud de arco eje al centro	mm
Lint	Longitud de arco interior	mm
L	Longitud del eje al centro	mm
Rext	Radio al arco exterior	mm
Rcen	Radio al arco central	mm
Rint	Radio al arco interior	mm
θ	Ángulo	°
A	Área (R x L)	mm <sup>2</sup>
R	Espesor dirección radial	mm
T	Espesor dirección tangencial	mm
εc	Deformación en compresión	m/m
εt	Deformación en tensión	m/m
RE	Relación Radio/Espesor	m/m
ρ	Densidad	kg/m <sup>3</sup>
ρ <sub>H=12%</sub>	Densidad a un H = 12%	kg/m <sup>3</sup>
ρ <sub>V=12%H</sub>	Densidad a un volumen con H = 12%	
w <sub>H=0%</sub>	Peso de la probeta en estado anhidro	kg
v <sub>H&gt;PSF</sub>	Volumen de la probeta con H > PSF	m <sup>3</sup>
Voe	Velocidad de las ondas de esfuerzo	m/s
Lp	Distancia entre apoyos de la probeta	s
t	Tiempo	s
H <sub>0</sub>	Hipótesis nula	-
H <sub>1</sub>	hipótesis alterna	-
$\bar{x}_1$	Media aritmética	-
p	Valor calculado para un nivel de confianza del 95%	-

Abreviaciones	Descripción
LPST	Listones preliminares sin tratamiento
LPS	Listones preliminares suavizados
LRST	Listones rectos sin tratamiento
LSDP	Listones suavizados, deformados y plastificados
PRST	Probetas rectas sin tratamiento
PRS	Probetas rectas suavizadas
PSDP	Probetas suavizadas, deformadas y plastificadas
R	Radial
T	Tangencial
L	Longitudinal
Med. Arit.	Media aritmética
Desv. Est.	Desviación estándar
C.V.	Coefficiente de variación