



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera
División de Estudios de Posgrado



Doblado de madera de *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb por el método de vaporizado

Tesis que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias y Tecnología de la Madera

Presenta

Miguel Ángel Cárdenas Gutiérrez

Director de tesis

Dr. En Ciencias en Químico Biológicas

David Raya González

Codirector de tesis:

Dr. En Ciencias de la Madera

Javier Ramón Sotomayor Castellanos

Morelia, Michoacán, Marzo 2017

CONTENIDO

Índice de tablas	4
Índice de figuras	4
1. Introducción	6
2. Antecedentes	12
2.1 Generalidades de la especie.....	12
2.2 Procesos de plastificado	13
2.3 Métodos de evaluación no destructivos	15
3. Planteamiento del problema	16
4. Justificación.....	17
5. Hipótesis	18
6. Objetivos	19
6.1 Objetivo general.....	19
6.2 Objetivos particulares.....	19
7. Materiales y métodos	20
7.1 Materiales	20
7.1.1 Madera de <i>E. cyclocarpum</i> , listones y probetas	22
7.1.2 Recipiente para hidratación de los listones	23
7.1.3 Dispositivo de suavizado de los listones	24
7.1.4 Dispositivo semicircular fijo y dispositivo móvil	24
7.1.5 Dispositivo mecánico para aplicar la fuerza para la deformación	24

7.1.6 Dispositivo para secado de los listones de formados	25
7.1.7 Dispositivo de medición de tiempo de paso de onda	25
7.2 Métodos	26
7.2.1 Ensayos preliminares	26
7.2.2 Fase experimental	26
7.2.3 Fase de evaluación del doblado	27
8. Resultados	34
8.1. Doblado de madera de <i>E. cyclocarpum</i> , cámara de vaporizado, moldes y dispositivo de deformado.....	34
8.2. Evaluación del curvado.....	38
9. Análisis y Discusión.....	39
9.1 Contenido de humedad	39
9.1.1 Coeficiente de variación del contenido de humedad.....	39
9.2 Densidad	39
9.2.1 Coeficiente de variación de la densidad.....	40
9.3 Velocidad de paso de onda.....	40
9.3.1 Coeficiente de variación de la velocidad de paso de onda	41
10. Conclusiones	42
11. Recomendaciones.....	43
Referencias	44
Anexo 1. Fase preliminar	47
Anexo 2. Fase experimental.....	48
Anexo 3. Concentrado de información.....	49

Índice de tablas

Tabla 1. Determinación de tiempo de vaporizado adecuado.....	34
Tabla 2. Contenido de humedad, densidad, velocidad de onda y módulo dinámico de <i>E. cyclocarpum</i>	38

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de la estrategia experimental.....	21
Figura 2. Adquisición de la madera en Pátzcuaro Michoacán.....	22
Figura 3. Trazo de los anillos de crecimiento	23
Figura 4. Aserrío de la madera.....	23
Figura 5. Medidor de tiempo de paso de onda y accesorios.....	25
Figura 6. Listones y probetas	28
Figura 7. Recipiente para hidratación de los listones.....	28
Figura 8. Listón humectado preparado para entrar a la cámara.....	29
Figura 9. Dispositivo de suavizado	29
Figura 10. A) Dispositivo semicircular fijo B) Dispositivo móvil.....	30
Figura 11. Moldes, dispositivo mecánico para deформado, fleje metálico y listón.....	30
Figura 12. Dispositivo para secado de listones deформados	31
Figura 13. Ángulo calculado para las probetas curvas.....	31
Figura 14. Medición de la longitud de las probetas deформadas.....	32
Figura 15. Dispositivo de medición de tiempo de paso de onda.....	33
Figura 16. Listón doblado	35

Figura 17. 1) Cámara de vaporizado 2) Entrada de vapor 3) Vista frontal 4) Soporte para listón..... 36

Figura 18. Moldes y dispositivo de de formado..... 37

1. Introducción

El proceso de doblado de madera para la elaboración de mobiliario, artículos deportivos, barricas, piezas de decoración ha sido utilizado y perfeccionado desde tiempos antiguos. A mediados del siglo XLIII en Alemania Michael Thonet diseño técnicas de curvado de la madera para la elaboración de muebles a nivel industrial y es considerado el pionero de las técnicas del curvado de la madera (Michael Thonet, 2017).

Actualmente los países que tienen desarrollado este tipo de técnicas son Alemania, Estados Unidos, Italia y España entre otros. En nuestro país no abundan los trabajos, tesis o artículos de divulgación que estén relacionados con el tema de nuestro trabajo de investigación.

Al tener nuestro país y particularmente el estado de Michoacán una vocación forestal se considera importante el estudio del comportamiento de las diversas especies maderables al ser sometidas al proceso de vaporización y doblado mecánico. Ya que al obtenerse los estudios y caracterizaciones de las principales especies, es posible sugerir el uso de madera curvada en la elaboración de muebles y otros artículos.

Existen diferentes tipos de procedimientos para lograr el suavizado de la madera. Lo cual es indispensable para el proceso de doblado de la madera. Algunos son:

Suavizado utilizando amoníaco

El principio de fondo de este método no es difícil de comprender. El solvente aplicado a la madera se esparce dentro de la estructura de la pared celular. Las cadenas que unen los componentes microscópicos de la madera son separadas. La madera se vuelve flexible y cuando la fuerza de doblado es aplicada los componentes están físicamente desplazados. Cuando el

solvente sale de la madera los componentes microscópicos de las células se unen tomando su nueva forma. Este proceso plastifica más rápido y homogéneamente la madera. Uno de sus inconvenientes es que los vapores de amoníaco que se liberan durante este método son extremadamente dañinos para los ojos y los pulmones (Keenan, 1985). Este es un proceso patentado.

Suavizado mediante el uso de microondas

Este método se utiliza para piezas de dimensiones pequeñas. La técnica logra que el calentamiento y suavizado de la madera se realice homogéneamente. Implica poco tiempo (Ibach, 2010).

Suavizado con vapor aplicando presión

Es un método que requiere de la instalación de autoclaves para la aplicación de presión. Haciéndolo un método que implica una inversión financiera alta en comparación con el que se realiza a presión atmosférica (Ibach 2010).

Suavizado con vapor a presión atmosférica

Para la realización de investigación se seleccionó el método de vaporizado a presión atmosférica. Este procedimiento se menciona en la literatura como el menor costo, de mayor uso, no contaminante y que ofrece los mejores resultados al momento de realizar el doblado comparado con los otros. Se requiere un generador de vapor, una cámara de vaporizado y los moldes (Ibach, 2010, Jorgensen,1968). La cámara y los moldes se fabricaron en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera.

Las maderas de densidades de media a alta son consideradas como las más adecuadas para lograr doblados exitosos. También se considera la presencia de hilo recto en la especie como un factor que contribuye a obtener mejores resultados al aplicar la fuerza que dobla la madera.

La densidad de la madera de *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb se encuentra clasificada como baja a media o como madera ligera. Al ser una especie de clima tropical presenta hilo entrecruzado.

Se seleccionó la madera de esta especie debido a que su madera es utilizada en regiones de tierra caliente del estado de Michoacán como materia prima en la fabricación de ebanistería fina. Se considera importante el estudio y caracterización de su comportamiento al ser sometida a un proceso de suavizado y doblado mecánico para obtener información que permita proponer el uso de la técnica de vaporizado a baja presión para la obtención de piezas curvas y su uso en la elaboración de nuevos artículos. Realzando con el uso de este tipo de piezas el valor estético y comercial de la especie. Optimizando también el aprovechamiento y rendimiento de la madera.

Para el establecimiento de la hipótesis de investigación hubo necesidad de conocer las principales propiedades físico-mecánicas de la especie. Así mismo determinar las variables que serían medibles después de lograr su doblado

Para el proyecto se eligió un espesor de la madera de 19 mm y una longitud de 1100 mm. Un tiempo de vaporizado de 180 minutos. Y un radio de curvatura de 400 mm.

La evaluación de la calidad del curvado se realizó utilizando la técnica no destructiva de ondas de esfuerzo en el eje longitudinal.

La estructura del trabajo es el siguiente:

En el capítulo 1 Introducción se hace mención de manera general del uso de los métodos de doblado de la madera, de quien es considerado a nivel mundial como el precursor de las técnicas actuales para el doblado de la madera. Así mismo se mencionan los procedimientos para el suavizado de la madera más comunes. También se hace referencia de las características reportadas que deben tener las maderas de las diferentes especies para su doblado adecuado.

El capítulo 2 abarca una recopilación de información reciente que tiene que ver en primer término con la especie *Enterolobium cyclocarpum*. En segundo lugar conceptos relacionados con lo que es el plastificado de la madera como proceso previo al doblado. Y en tercer lugar que son los métodos de evaluación no destructivos. Se menciona el método a utilizar para evaluar la influencia del suavizado con vapor y el doblado mecánico.

El capítulo 3 hace referencia al planteamiento del problema, mencionándose como una opción el método de vaporizado para doblar la madera de la especie en estudio. La madera en estudio presenta hilo entrecruzado y se considera como una madera ligera. Estas características la colocan en teoría como una especie no apta para ser sometida al proceso de doblado.

La justificación se plantea en el capítulo 4. Mencionándose la necesidad de realizar un estudio acerca de la plasticidad que presenta la especie. Buscándose las condiciones óptimas que requiere la madera para dar los mejores resultados al ser doblada.

En el capítulo 5 se menciona la hipótesis en torno a la cual se desarrolla todo el trabajo de investigación y que fue planteada en función de las propias características anatómicas, físicas y mecánicas de la madera y al no encontrarse reportes sobre la aplicación del proceso utilizado

El objetivo general de la investigación se menciona en el capítulo 6. Fue planteado de manera clara y considerándose que la especie *Enterolobium cyclocarpum* es endémica del estado de Michoacán se consideró muy importante su sometimiento al proceso, caracterización y obtención de información para su uso en las regiones en las cuales la especie es la materia prima principal para la elaboración de muebles de alto valor comercial.

En el capítulo 7 se menciona los materiales y equipo necesario para la comprobación experimental de la hipótesis. Se muestran los diagramas de la cámara de vaporizado, los moldes y el mecanismo para aplicar la fuerza de deformación. Los cuales fueron elaborados en las instalaciones del laboratorio de mecánica de la madera. En este mismo capítulo se describe paso a paso cada parte del proceso. Se habla también de lo que fueron las pruebas preliminares necesarias para encontrar las condiciones óptimas para el proceso.

Los resultados obtenidos durante la realización de la investigación, incluyéndose los obtenidos en la primera fase de la etapa experimental se reportan en el capítulo 8. Se muestran mediante fotografías y una tabla general de los resultados de las variables que fueron medidas y analizadas estadísticamente.

El análisis y discusión de los resultados que arrojó la investigación se desarrolla en el capítulo 9 tomándose como base para este apartado las variables de la densidad, la velocidad de paso de onda y el módulo de elasticidad de la madera para cada uno de los tratamientos evaluados.

Finalmente en el capítulo 10 se hace referencia a las conclusiones que llevo la fase experimental y el análisis de los datos. Llegándose a la conclusión principal de que el método de vaporizado funciona adecuadamente para suavizar la madera de *Enterolobium cyclocarpum* y lograr su doblado.

El presente trabajo de investigación aportó un cuantioso aprendizaje para el autor en el sentido teórico y práctico. Se trabajó haciendo uso de las instalaciones que ofrece la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera y el Laboratorio de Mecánica de la Madera bajo la dirección del Dr. Javier Ramón Sotomayor Castellanos. Así mismo agradezco al CONACYT por el apoyo otorgado mediante la beca recibida durante los cuatro semestres del programa de la Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

2. Antecedentes

2.1 Generalidades de la especie

El árbol de *Enterolobium cyclocarpum* es endémico de México, se encuentra en bosques de clima tropical subcaducifolio (Pennington y Sarukan, 2005).

La madera de esta especie presenta un duramen de color café oscuro y la albura de color amarillo claro. El duramen tiene una durabilidad natural alta y es resistente al ataque de insectos. Presenta una densidad promedio de 440 kg/m³. Es fácil de trabajar y aserrar cuando su contenido se encuentra entre un 12% y un 18% (Meier, 2015).

Ávila y Herrera (2012) sometieron madera de esta especie a un proceso secuencial de extracción con acetona y etanol-agua. Evaluaron si hubo variación en los valores calculados. Uno de ellos fue la densidad de la madera, siendo la variación no significativa entre la madera que no fue sometida al proceso de extracción y la madera a la cual le fueron retirados los extraíbles.

Así mismo, Martínez *et al*, (2012) desarrollaron un estudio de las características biotecnológicas del árbol de *E. cyclocarpum*. Reportaron para la densidad un valor de 450 kg/m³.

Muchos científicos forestales consideran la densidad de la madera y la longitud de la fibra como el primer indicador. Así mismo, la perciben como un atributo de la calidad de la madera, independientemente de su uso final.

La densidad de la madera ha sido durante mucho tiempo el principal indicador calidad de la madera (Zhang, 2003).

Tenorio *et al*, (2016) reportan un contenido de lignina de 26.7 % y de 80 % de holocelulosa en la composición química de la madera de esta especie.

2.2 Procesos de plastificado

Es un proceso a través del cual se incrementa la plasticidad de la madera al aumentar su temperatura y su contenido de humedad o mediante la adición de sustancias químicas. El principal objetivo es modificar temporalmente las propiedades mecánicas y físicas de la madera (Gasparik y Barčík, 2014).

Dimitar (2014) menciona *“La plastificación de la madera es el principal proceso tecnológico en la producción de piezas curvadas para la producción de muebles”* También afirma *“La madera en su condición natural a temperatura y humedad natural tiene plasticidad pero en una cantidad que no es suficiente para propósitos de deformado”* (pág. 1). Una etapa del experimento implica aumentar el contenido de humedad de la madera por encima del punto de saturación de la fibra (PSF) e incrementar la temperatura interna dentro del dispositivo de suavizado con el fin de reducir su rigidez y facilitar su proceso de deformado. Básicamente son tres los tipos de métodos para la plastificación de la madera: Plastificación higr-térmica, Plastificación térmica o método seco y la Plastificación por métodos químicos.

Se ha encontrado que durante el vaporizado hay una reducción de todas las propiedades de resistencia de la madera. El vapor actúa disolviendo o modificando los extractivos y otros constituyentes químicos de la madera (Varga, 2007).

Ibach (2010) afirma que el principio que se encuentra detrás del proceso de curvado de la madera consiste en lograr reblandecer la matriz de lignina que mantiene unidas a la celulosa y hemicelulosas. También menciona que da mejores resultados en este proceso el vaporizado a baja presión. Con base en esta afirmación sugiere que la madera de latifoliadas es mejor que la de las coníferas debido a que estas contienen menor cantidad de lignina. La presencia de grano entrecruzado en la madera se presenta como un posible inconveniente para lograr un curvado exitoso. Por último explica que una pieza de madera curvada tiene menos resistencia que una pieza similar sin curvar, pero aclara que esta disminución en la resistencia rara vez logra afectar el valor útil de la pieza curvada.

El vaporizado de la madera mejora algunas propiedades físicas como lo son: la estabilidad dimensional; reduce la higroscopicidad e incrementa su durabilidad biológica. Aunque disminuye algunas propiedades mecánicas especialmente la resistencia o rigidez (Boonstra *et al*, 2007).

El vaporizado bajo condiciones de alta presión produce que la madera se vuelva plástica, aun con esto es más exitoso el deformado cuando la madera es vaporizada a baja presión (Ibach, 2010).

Vignote y Martínez (2006) mencionan que al aumentar la temperatura de la madera ésta pasa de ser un material elástico a ser un material plástico. Así mismo menciona un tiempo de 1.8 minutos

por cada milímetro de espesor de la pieza como el tiempo recomendable para la vaporización de la madera.

2.3 Métodos de evaluación no destructivos

White y Ross (2014) enseñan que los métodos de evaluación no destructivos son utilizados en la detección de posible deterioro de piezas de madera en uso, llevando esto a una pérdida de resistencia del elemento y provocar una falla estructural. Los ensayos no destructivos para la madera son diferentes que para los materiales homogéneos tales como metales, plásticos y cerámicas. Este tipo de ensayos son utilizados para la determinación de sus propiedades mecánicas. Son, así mismo, de gran utilidad y prácticos ya que permite la evaluación *in situ* del material

Hellier (2003) conceptualmente refiere como definición de las técnicas de evaluación no destructivas, que son un examen, prueba o evaluación que se realiza a cualquier tipo de objeto sin necesidad de alterar dicho objeto, y que tiene la finalidad de determinar la ausencia o presencia de discontinuidades que puedan tener un efecto sobre la vida útil o servicio de ese objeto. Los factores que afectan la velocidad de una onda son la densidad y la elasticidad del material.

3. Planteamiento del problema

La revisión de la literatura y artículos científicos colocó a la madera de la especie en estudio en la categoría de no apta para ser sometida a este proceso. Sin embargo al reportar Ibach (2010) dentro de un listado de maderas óptimas para ser dobladas, principalmente de hilo recto, la madera de la *Swietenia macrophylla* (Caoba) y analizar algunas semejanzas con la madera de *Enterolobium cyclocarpum* como lo son: que ambas son de clima tropical y presentan hilo entrecruzado. Siendo la madera de la caoba catalogada como de densidad media a alta a diferencia de la madera de la parota que es de densidad baja a media. Se hizo el planteamiento siguiente:

Dada la densidad y estructura anatómica de la madera de *Enterolobium cyclocarpum* ¿Es recomendable el vaporizado a baja presión para elaborar elementos curvos que conserven la resistencia de la madera en su estado original?

4. Justificación

La especie *Enterolobium cyclocarpum* tiene presencia en la región de clima tropical del Estado de Michoacán. Es utilizada como materia prima en la elaboración de ebanistería. No existen reportes acerca de su comportamiento al ser sometida a un proceso de vaporizado y curvado. Debido a esto se realizó esta investigación, con el propósito de caracterizar la especie en cuanto a su comportamiento al ser sometida al proceso de vaporizado y curvado. Con el fin de sugerir el empleo de estas técnicas en la elaboración y uso de piezas curvas en la ebanistería elaborada en la región.

Martínez *et al.* (2012) sugieren que es necesario el estudio y evaluación de la plasticidad de la madera en presencia de humedad y temperatura. Tomando en cuenta el espesor de la pieza, el radio de curvatura y la orientación de los anillos de crecimiento.

5. Hipótesis

La hipótesis planteada en esta investigación es:

“La madera de *Enterolobium cyclocarpum* puede ser doblada mediante la aplicación de vapor, sin que se modifique su módulo de elasticidad”

6. Objetivos

6.1 Objetivo General

Doblar madera de la especie *Enterolobium cyclocarpum*

6.2 Objetivos particulares

Diseñar y fabricar una cámara de vaporizado

Fabricar los moldes y el dispositivo mecánico de doblado

Evaluar la calidad del doblado mediante ondas de esfuerzo

7. Materiales y métodos

7.1 Materiales

Los materiales y equipos utilizados durante la investigación fueron:

Madera de *E. cyclocarpum*

Listones y probetas

Recipiente para hidratación de los listones

Dispositivo de suavizado de la madera

Dispositivo semicircular fijo, y dispositivo móvil

Dispositivo mecánico para aplicar la fuerza para la deformación

Dispositivo para secado de los listones deformados

Dispositivo de medición de tiempo de paso de onda

Estrategia experimental para doblar madera de *E. cyclocarpum*

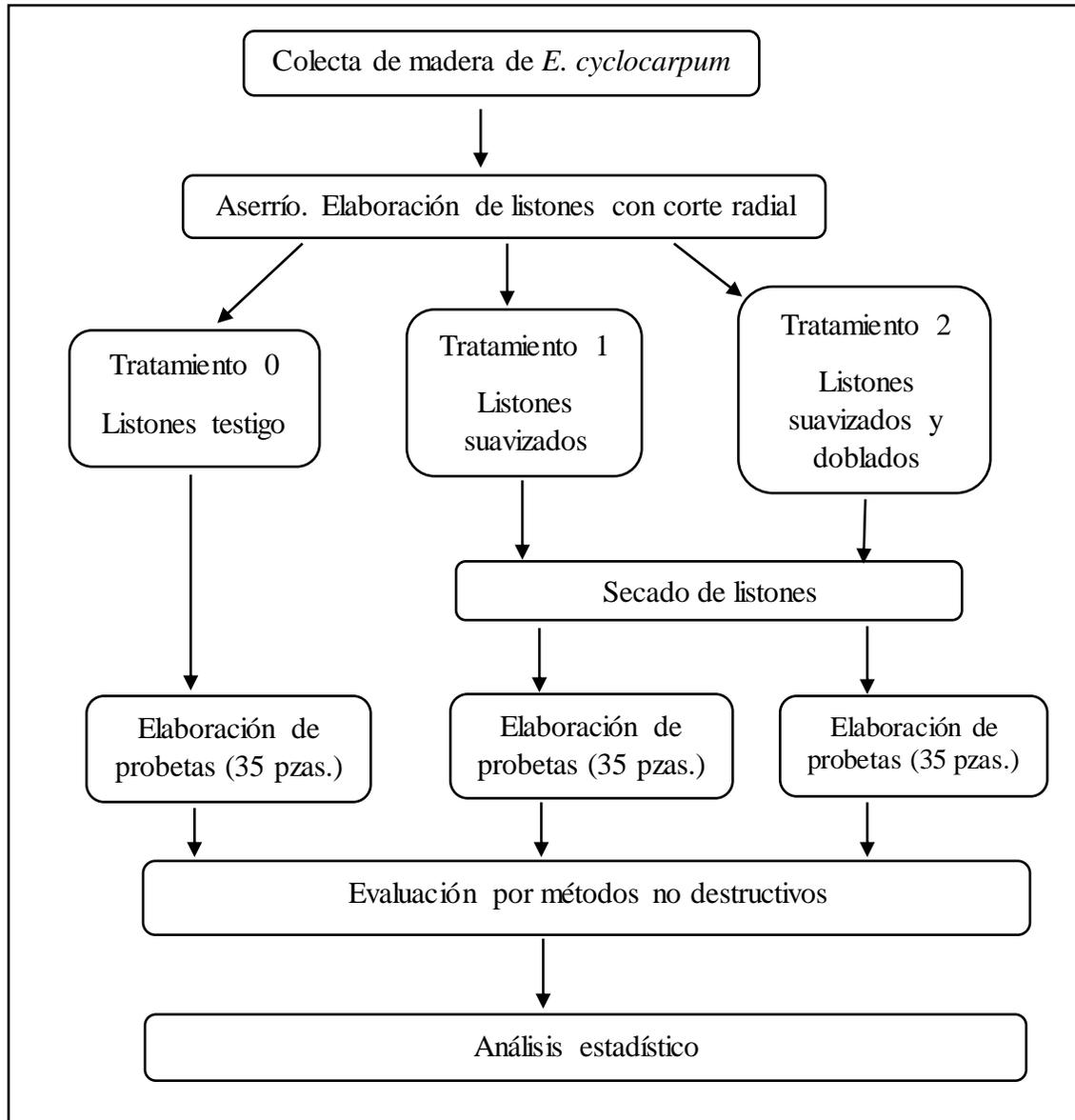


Figura 1. Diagrama de la estrategia experimental

7.1.1 Madera de *E. cyclocarpum*, listones y probetas

Se elaboraron 42 listones de madera de *E. cyclocarpum* proveniente de Tepic, Nayarit, México y adquirida en la ciudad de Pátzcuaro Michoacán con dimensiones de 19 mm x 19 mm x 1100 mm (*Figura 6*). La madera fue aserrada en el laboratorio de Física y Mecánica de la Madera de la Facultad. Obteniéndose listones con corte radial. De este grupo se utilizaron 6 listones para realizar pruebas preliminares y determinar el tiempo adecuado de suavizado para la realización del deformado. En el Anexo 1 se muestran fotografías de los resultados obtenidos en esta fase de la investigación.



Figura 2. Adquisición de la madera en Pátzcuaro Michoacán.



Figura 3. Trazo de los anillos de crecimiento



Figura 4. Aserrío de la madera

Para la evaluación de la calidad del curvado se recortaron 35 probetas de dimensiones 19 mm x 19 mm x 320 mm de acuerdo a la norma ISO 3129:2012 (ISO, 2012) para cada uno de los tres tratamientos.

El tiempo de paso de la onda en el eje longitudinal fue medido utilizando la tecnología Metriguard® (*Figura 15*).

7.1.2 Recipiente para la hidratación de los listones

Del total de listones elaborados 24 fueron colocados en el recipiente con agua y mantenidos en inmersión total. El tiempo en el cual alcanzaron la saturación de agua fue de 15 días (*Figura 7*).

7.1.3 Dispositivo de suavizado de los listones

La cámara de suavizado fue diseñada y fabricada por el Dr. David Raya González y el alumno Miguel Ángel Cárdenas Gutiérrez de material tubular de PVC con las características y dimensiones indicadas en la *Figura 9*. Se forró con fibra de vidrio de un espesor de 20 mm con el fin de evitar la fuga del calor y de mantener constante la temperatura dentro de ella durante el suavizado de la madera. Para el registro de la temperatura se instaló un termómetro en la parte central de la cámara. También se elaboró un soporte de madera instalado dentro de la cámara para mantener los listones suspendidos de la superficie, logrando con esto que la exposición de la pieza al vaporizado fuera completa por todos sus lados, durante los 180 minutos del tratamiento. Se contó para el uso de este dispositivo de un generador de vapor conectado a uno de los extremos de la cámara.

7.1.4 Dispositivo semicircular fijo y dispositivo móvil

El material de estos elementos fue de madera, con la forma y dimensiones indicadas en la *Figura 10*. El espesor de los moldes fue de 45 mm (Olgún, 2010, Modificado por Raya y Rincón, 2014).

7.1.5 Dispositivo mecánico para aplicar la fuerza para la deformación

El material de este instrumento fue de metal con la forma y dimensiones indicadas en la *Figura 11*. La parte central del dispositivo es un tornillo que aplica la fuerza mediante el uso de un volante manual de 400 mm de diámetro.

7.1.6 Dispositivo para secado de los listones deformados

Se fabricó de madera con las dimensiones indicadas en la *Figura 12*.

7.1.7 Dispositivo de medición del tiempo de paso de onda

El tiempo de paso de la onda en el eje longitudinal fue medido utilizando la tecnología Metriguard ® ("Metriguard", 2017).



Figura 5. Medidor de tiempo de paso de onda y accesorios (Imágenes tomadas de: <http://metriguard.com/index.php>)

7.2 Métodos

7.2.1 Ensayos preliminares

En la fase de ensayos preliminares se usaron tiempos de vaporizado de 60 y 120 minutos. Ver Anexo 1. Presentándose falla en los listones al momento de aplicar la fuerza para su deformado. Posteriormente se aumentó el tiempo de vaporizado a 180 minutos. Con este tiempo cada uno de los listones fue deformado de manera exitosa. Determinándose el tiempo de 180 minutos como el tiempo ideal de suavizado para la madera de esta especie. De los listones elaborados se formaron tres grupos que correspondieron a los tres tratamientos del experimento.

Tratamiento (T0) = tratamiento testigo

Tratamiento (T1) = tratamiento de suavizado

Tratamiento (T2) = tratamiento de suavizado y deformado

7.2.2 Fase experimental

A los listones del tratamiento T1 y T2 previamente a ser introducidos en la cámara de vaporizado se les incrementó el contenido de humedad por encima del punto de saturación de la fibra (PSF). Posteriormente fueron sometidos al higo-tratamiento dentro de la cámara de vaporizado por un tiempo de 180 minutos. El tiempo para que la cámara se saturara con vapor de agua fue de 15 minutos. Y los listones del tratamiento T2 fueron deformados en un molde semicircular de 400 mm de radio y utilizando un fleje metálico que ayudó a minimizar las tensiones internas de la madera durante la flexión (Wright, 2013). La fuerza se aplicó con el dispositivo de deformado

(ver *Figura 11*). El Anexo 2 muestra ilustraciones de las condiciones del equipo y resultados en esta fase de la investigación.

Los listones deformados se mantuvieron en el dispositivo por un tiempo de 24 horas, posteriormente se retiraron y se colocaron en otro dispositivo con la función de mantener la forma curva del listón y asimismo comenzar a disminuir el contenido de humedad de la madera a temperatura ambiente hasta llegar al 11% en promedio. Una vez que los listones alcanzaron el contenido de humedad deseado se recortaron las probetas, formando tres grupos de 35 unidades con una longitud de 320 mm.

7.2.3 Fase de evaluación del doblado

A cada grupo de probetas se les determinó el tiempo de paso de onda en el eje longitudinal. Una vez que cada probeta era fijada en el dispositivo se le aplicaba un impacto con el péndulo, midiéndose el tiempo de paso de la onda de un extremo al otro en microsegundos, este procedimiento se repitió tres veces por cada probeta. Con el valor promedio del tiempo de paso de onda se obtuvo el valor de la velocidad de paso en m/s, y asimismo se determinó el módulo de elasticidad promedio en MPa para cada uno de los tratamientos.

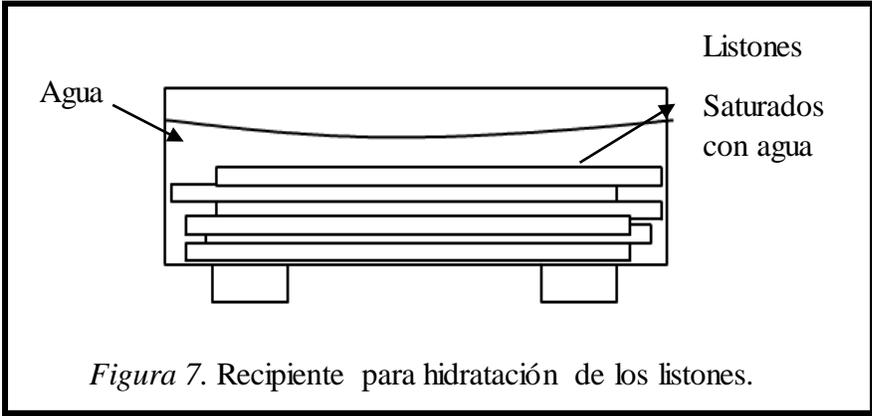
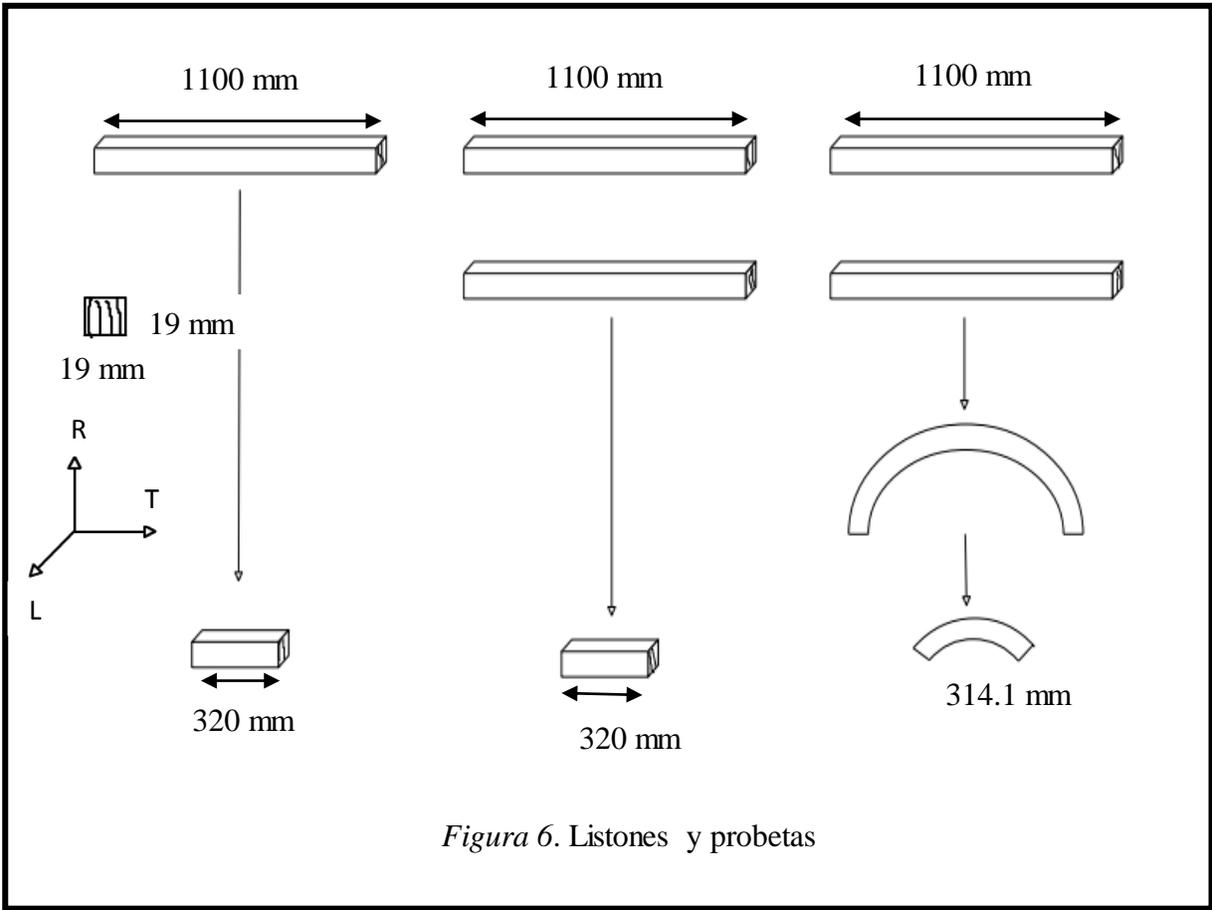
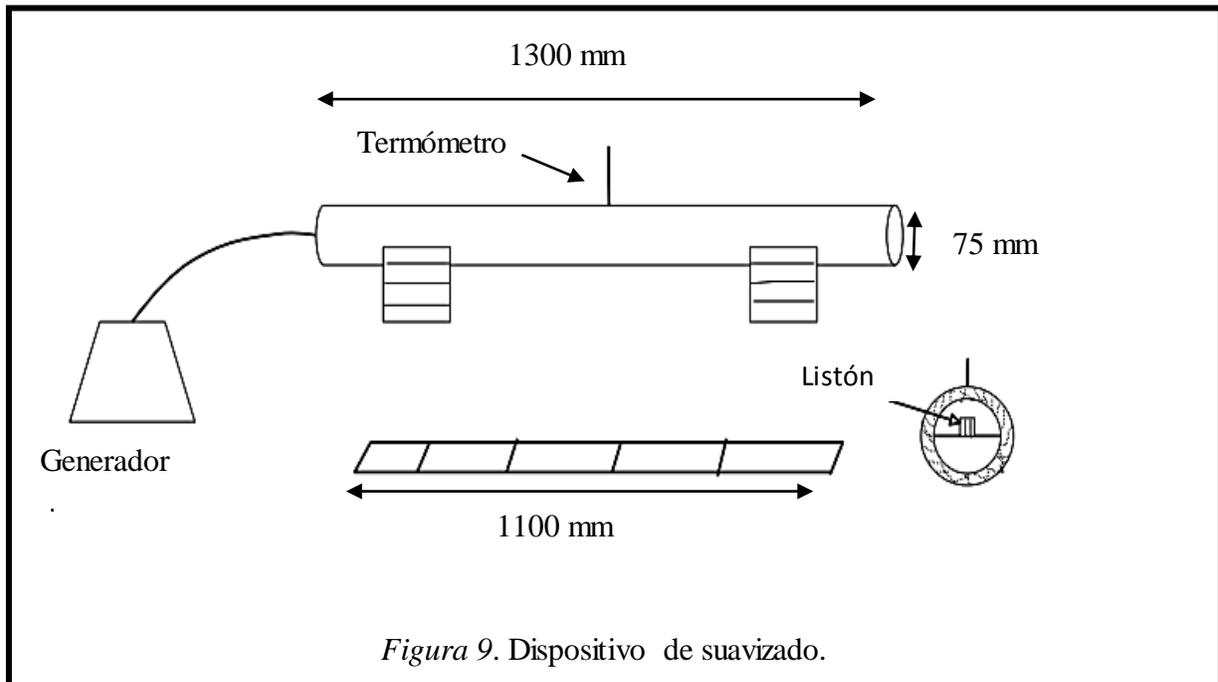
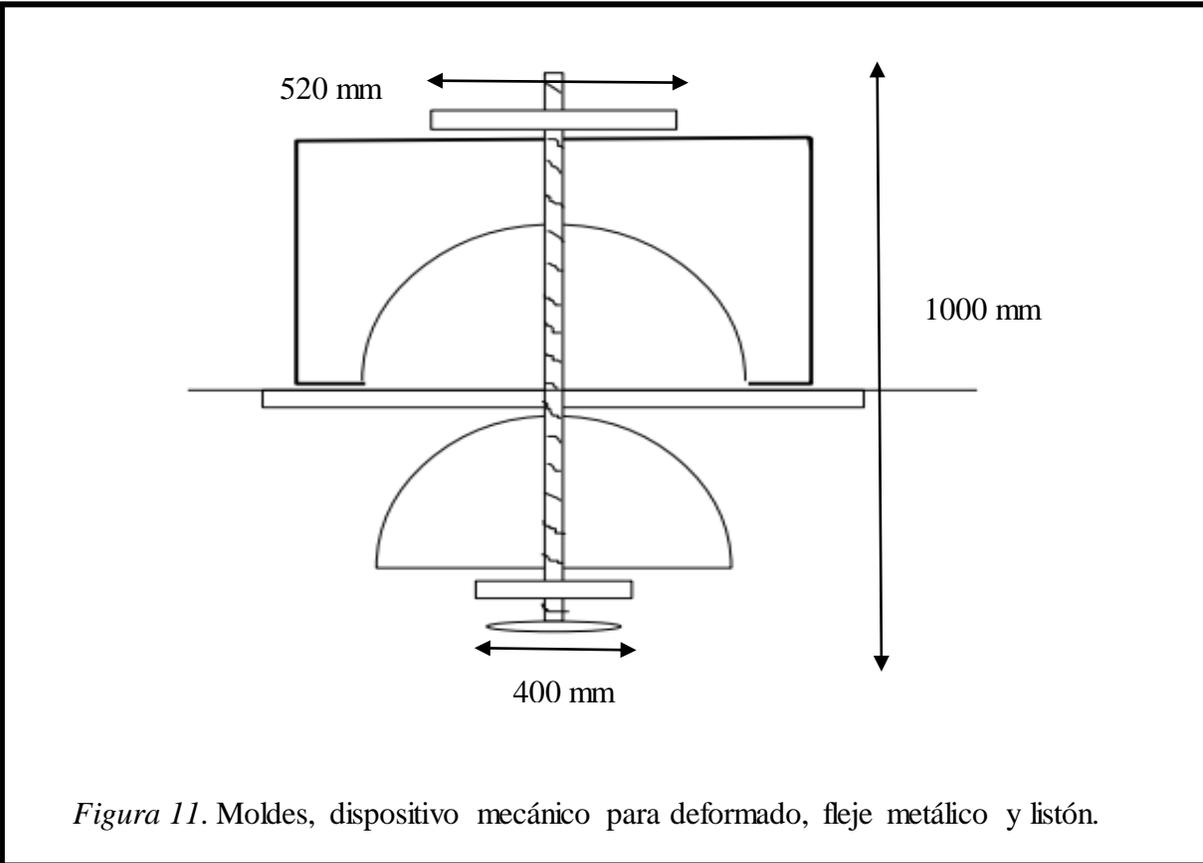
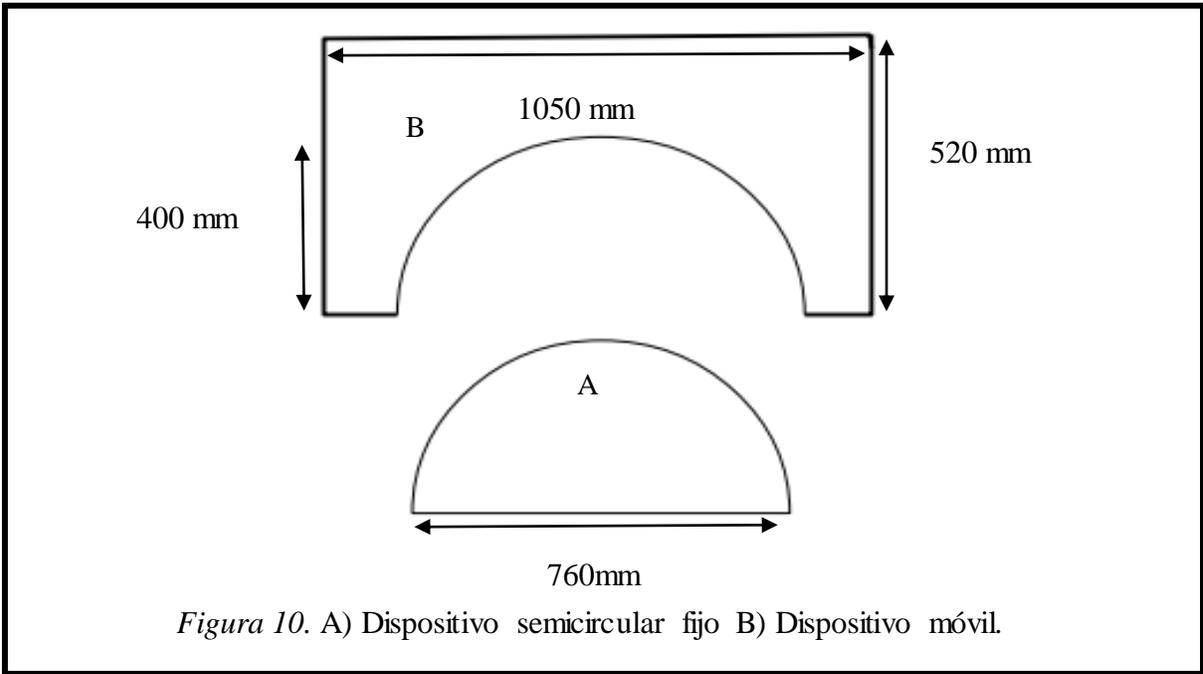
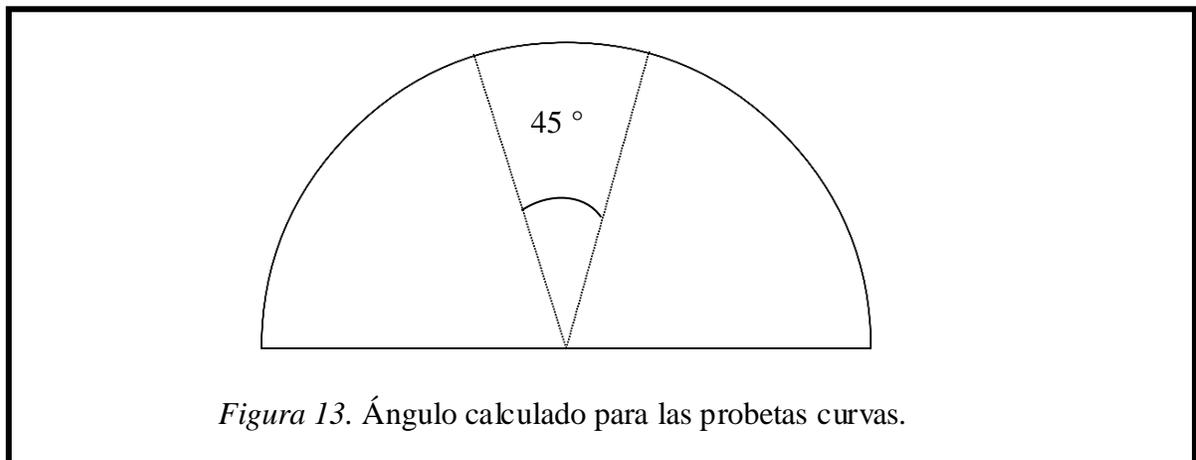
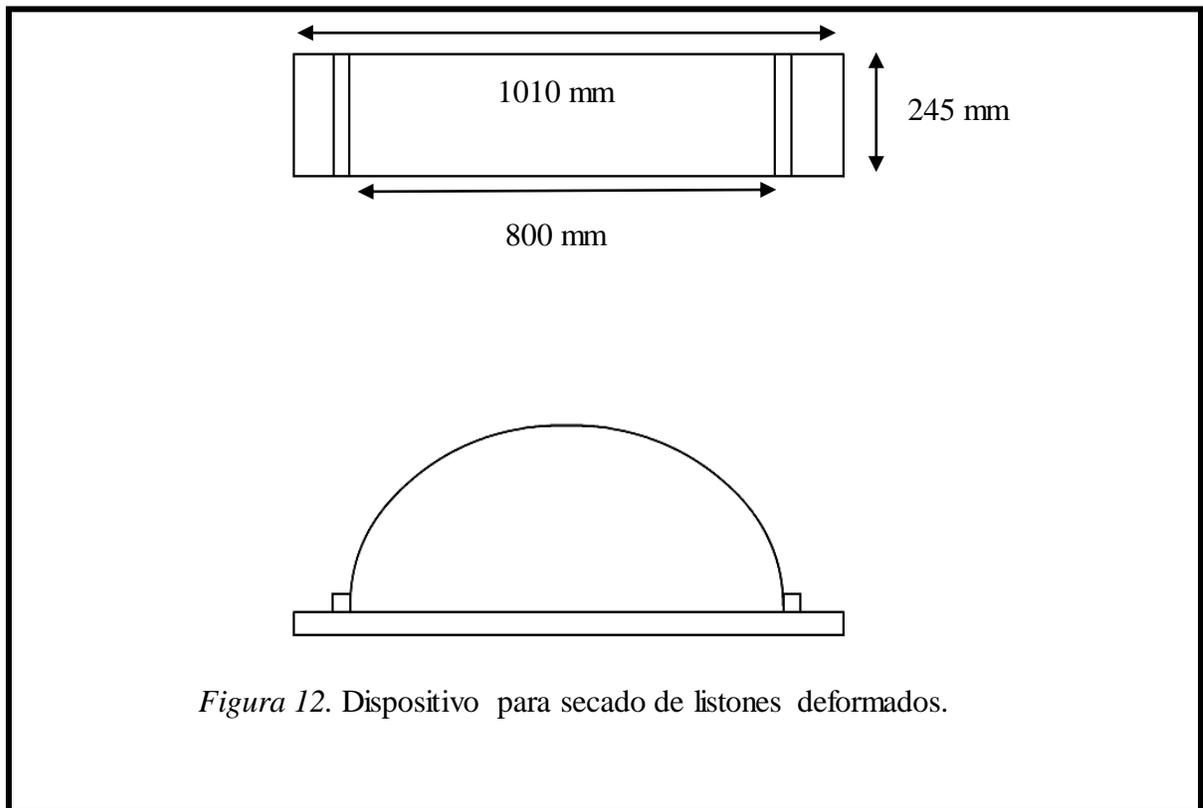


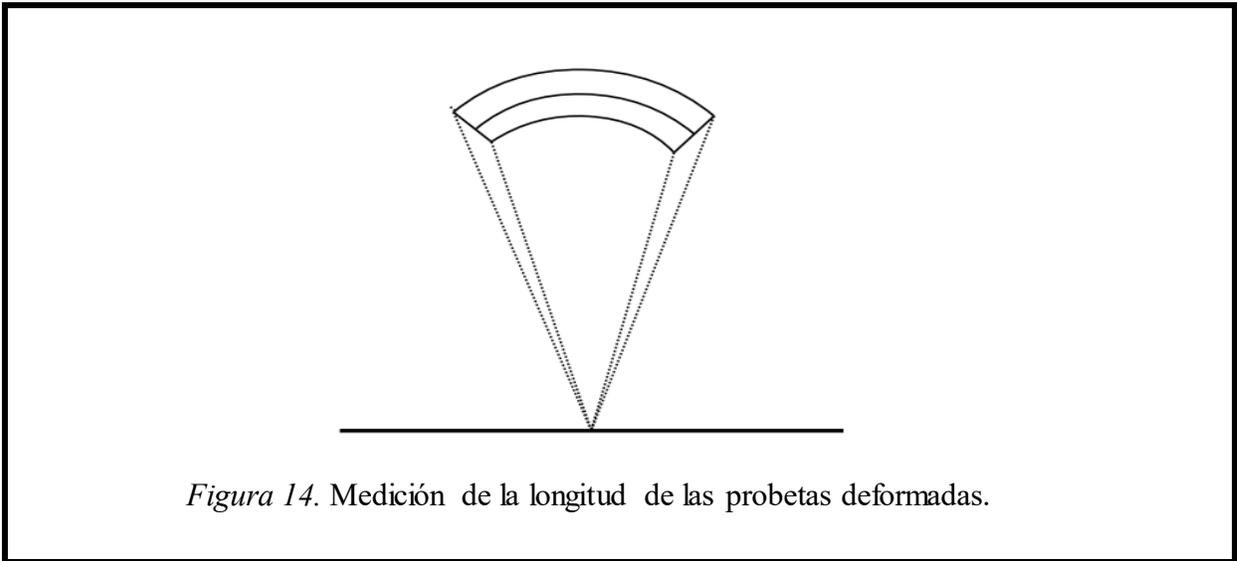


Figura 8. Listón humectado preparado para entrar a la cámara









$$L_{\text{arco}} = \frac{r}{36} \quad (1)$$

Donde:

L_{arco} = Longitud de la probeta curva (cm)

r = Radio de curvatura (cm)

θ = Angulo de curvatura (rad)

Formula:

$$L_{\text{arco}} = \frac{2 * r * \text{ángulo}}{360} \quad r=40 \text{ cm}; \text{ ángulo}= 45^\circ$$

$$= \frac{2 * 40 * 45}{360} = 31.41 \text{ cm} = 314.1 \text{ mm}$$

Pruebas de ondas de esfuerzo

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

Donde:

E_{oe} = Módulo dinámico (MPa)

ρ_{CH} = Densidad (kg/m^3)

v_{oe} = Velocidad de onda (m/s)

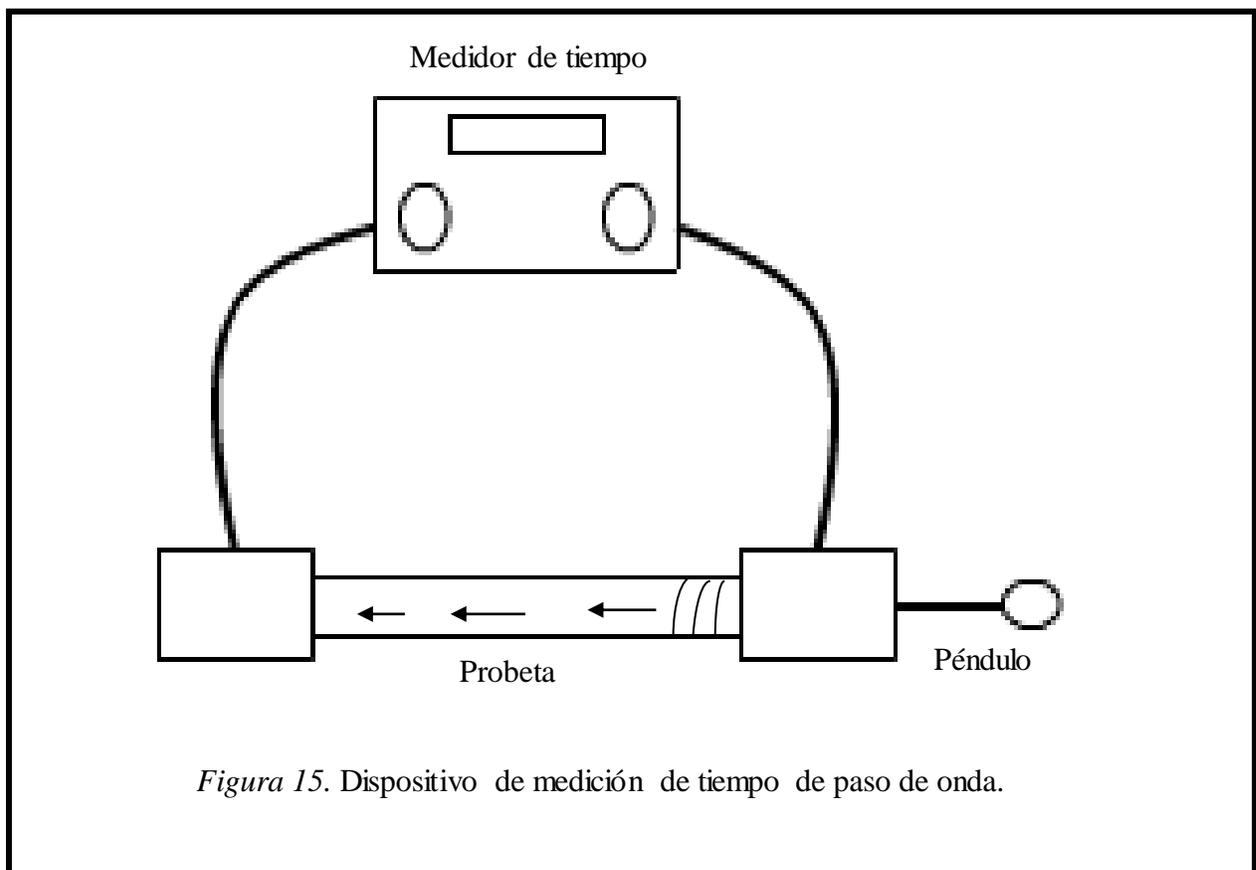


Figura 15. Dispositivo de medición de tiempo de paso de onda.

8. Resultados

8.1. Doblado de madera de *E. cyclocarpum*, cámara de vaporizado, moldes y dispositivo de deformado

Tabla 1. Determinación de tiempo de vaporizado adecuado

Tiempo de vaporizado	Número de listones	Resultado
60 minutos	3	Ruptura de listón
120 minutos	3	Ruptura de listón
180 minutos	12	Exitoso

En la *Figura 16* se muestra un listón doblado exitosamente. Cada uno de los 12 listones que fueron doblados en la fase experimental dio el mismo resultado.

La *Figura 17* muestra la cámara de vaporizado con las mejoras que se le realizaron en relación a la utilizada en la fase preliminar. Su funcionamiento en esta fase fue el adecuado.

Y la *Figura 18* muestra los moldes y el dispositivo usado para aplicar la fuerza para el deformado. El volante permitió la aplicación de la fuerza que requirió cada listón para su doblado en un tiempo promedio de 2 minutos.



Figura 16. Listón doblado.

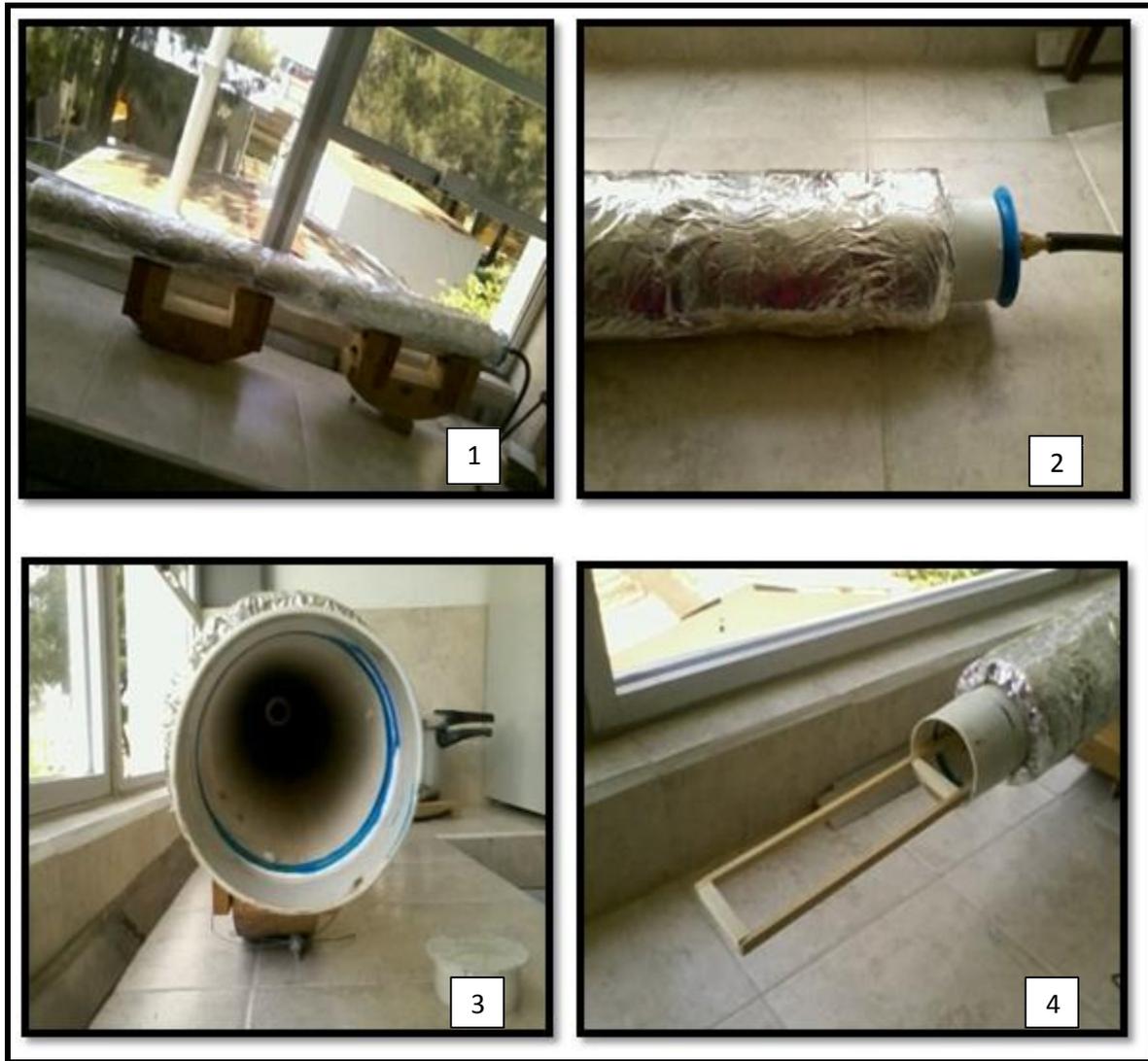


Figura 17. 1) Cámara de vaporizado 2) Entrada de vapor 3) Vista frontal 4) Soporte para listón.



Figura 18. Moldes y dispositivo de deformado.

8.2. Evaluación del curvado

Tabla 2. Contenido de humedad, densidad, velocidad de onda y módulo dinámico de *E. cyclocarpum*.

	CH	CH	V _{oe}	E _{oe}
	(%)	(kg/m ³)	(m/s)	(MPa)
T0				
\bar{X}	11	447	3267	4796
σ	0.4	46,8	164	735,5
CV	3.5	10,5	5	15,3
T1				
\bar{X}	11	446	3301	4879
σ	0.7	37,3	181	649
CV	5.6	8,4	5,5	13,3
T2				
\bar{X}	11	446	3175	4739
σ	0.7	43.4	143	694.5
CV	6.6	9.7	4,5	14.7

T0= Tratamiento cero; T1= Tratamiento uno; T2= Tratamiento dos; CH = Contenido de humedad; CH= Densidad; v_{oe}= Velocidad de onda; E_{oe} = Módulo dinámico; \bar{X} Media; σ Desviación estándar; CV= Coeficiente de variación.

9. Análisis y Discusión

9.1 Contenido de humedad

Los resultados para el contenido de humedad quedaron como una constante. No se presentó variación entre los tratamientos 1 y 2 en relación con el tratamiento testigo.

9.1.1 Coeficiente de variación del contenido de humedad

El coeficiente de variación de los tratamientos T1 y T2 aumento en referencia al coeficiente de variación del tratamiento testigo.

9.2 Densidad

La densidad de la madera para los tratamientos 1 y 2 resultó igual. En relación con la madera testigo la variación no fue significativa. La estabilidad dimensional de esta madera se reporta como buena. Esto se comprueba con estos resultados. Ávila y Herrera (2012) reportan un valor de densidad de 430 kg/m^3 y Martínez *et al.* reportan una densidad de 450 kg/m^3 . Por lo tanto se afirma que el proceso de vaporizado previo al proceso de deformado de la madera no influye en la calidad de la madera tratada.

9.2.1 Coeficiente de variación de la densidad

Este coeficiente en los tratamientos T1 y T2 disminuyeron en relación al coeficiente de variación del tratamiento testigo.

9.3 Velocidad de paso de onda

La velocidad de paso de onda en tratamiento 1 aumento en relación a la del tratamiento testigo.

Se atribuye este incremento a que durante los 180 minutos de vaporizado la madero liberó componentes solubles en agua. Esto generó la creación de espacios dentro de la estructura de la madera. Influyendo en que la onda recorriera la longitud de las probetas de manera más rápida.

La velocidad de paso en el tratamiento 2 disminuyó en relación a la del tratamiento testigo.

Atribuyéndose esto a que la madera vaporizada al momento de realizarse el doblado mecánico sufre una compactación de sus componentes. Provocando la disminución de la velocidad. Niems (1994) reporta velocidades de transmisión de onda en *Fitzroya cupressoides* (460 Kg/m³) de 3712 m/s y de 4717 m/s en *Laureila philippiana* (480 Kg/m³).

Se concluye que los tratamientos de suavizado y deformado si influyen en cuanto a la velocidad de paso de onda en el eje longitudinal.

9.3.1 Coeficiente de variación de la velocidad de paso de onda

El coeficiente de variación del T1 aumentó ligeramente en relación al coeficiente de variación del tratamiento testigo.

Así mismo el coeficiente de variación del T2 disminuyó ligeramente en relación al tratamiento testigo.

White y Ross (2014) mencionan que un incremento del 30% en el tiempo de transmisión implica un 50% de pérdida de resistencia en el elemento. Estadísticamente la diferencia entre los tres tratamientos no es significativa.

10. Conclusiones

Una vez realizado exitosamente el doblado de 12 listones y hecha la evaluación y análisis estadístico a los resultados obtenidos de la madera de cada uno de los tres tratamientos se concluye que es posible doblar madera de *Enterolobium cyclocarpum* mediante el método de vaporizado sin resultar esto en una disminución significativa del módulo de elasticidad. Lo cual significa que la madera conserva su resistencia natural.

El objetivo principal del trabajo se logró y se verificó como cierta la hipótesis planteada “La madera de *Enterolobium cyclocarpum* puede ser doblada mediante la aplicación de vapor, sin que se modifique su módulo de elasticidad”.

También se comprobó su estabilidad dimensional y resistencia al ser sometida a los procesos de vaporizado y doblado mecánico. Ávila y Herrera (2012) reportaron en su artículo que no hubo variación de la densidad en la madera de esta especie en estudio después de los tratamientos de extracción a los que fue sometida.

El valor de la densidad determinada en el estudio se reporta dentro de los rangos reportados por diversos autores (Martínez *et al*, 2012), Ávila y Herrera (2012) y Meier (2015).

Se afirma que la información obtenida contribuirá al mejor uso y aprovechamiento de la especie.

El diseño de mobiliario y artículos diversos con elementos curvos contribuirá a sí mismo al incremento de su valor estético y comercial.

11. Recomendaciones

Se observó durante el desarrollo de la investigación que el proceso de vaporizado provocó una ligera decoloración de la madera una vez que esta llegó al contenido de humedad deseado. Se recomienda por esta razón que al producto terminado le sea aplicado un acabado profesional de manera que la coloración natural de la madera no se pierda.

Otra recomendación es la necesidad de elaborar dispositivos en los cuales la madera doblada pueda permanecer bajo presión durante el tiempo en el cual pierde la humedad adquirida durante los tratamientos, con la finalidad de evitar alabeos en las piezas.

También es importante probar con otros espesores de la madera para poder determinar el espesor máximo posible a doblar y asimismo realizar pruebas con otros radios de curvatura.

Finalmente se sugiere que la información y resultados obtenidos durante la investigación pueda ser transmitida y presentada en las regiones en donde esta especie en estudio es la materia prima en la elaboración de ebanistería fina, con el propósito de provocar una innovación en el diseño de artículos y piezas curvas que pueda incrementar el alto valor comercial que ya tiene la especie.

Referencias

Ávila, C., L. E.A. & Herrera, F., M. A. (2012). *Efecto de los extraíbles en tres propiedades físicas de la madera de Enterolobium cyclocarpum procedente de Michoacán, México*. Bosque, 33(2), 227-232.

Boonstra, M. J., Acker, J. V., Tjeerdsma, B. F., & Kegel, E. V. (2007). *Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents*. Annals of Forest Science.

Dimitar, H. A. (2014). *Comparative analysis of methods for plastification of solid wood*. Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies.

Gasparik M. & Barcik Stefan. (2014). *“Effect of Plasticizing by Microwave Heating on Bending Characteristics of beech wood”*. Bioresources 9(3), 4808-4820.

Hellier, J. Ch. (2003). *Handbook of Nondestructive Evaluation*. New York: Mc-Graw-Hill.

Ibach, E. R. (2010). *Specialty treatments*. En: Wood Handbook. Chapter 19. Madison: Forest Products Laboratory. U.S.

International Organization for Standardization (ISO). (2012). ISO 3129: 2012. Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. Brussels: International Organization for Standardization.

Jorgensen, N. R. 1968. *Steam bending of Hickory*. Division of Forest Products and Engineering Research. Washington, D.C.

Keenan, B. 1985. En: *Fine Wood working on Bending Wood*. The Taunton Press. US.

Martínez Pacheco, M. M.; Del Rio, R. E.; Flores García, A.; Martínez Muñoz, R. E.; Ron Echeverría, O. A. & Raya González, D. (2012) *Enterolobium cyclocarpum (Jacq.) Griseb.: The biotechnological profile of a tropical tree*. Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas.

Meier, E. (2015). *Wood!*. Sierra's Ascent Publishing. Minnetonka, USA.

Metriguard. (2017). Metriguard.com. Recuperado 7 Febrero 2017, de <http://metriguard.com/catalog.php>

Michael Thonet. (2017). Es.wikipedia.org. Recuperado 14 Enero 2017, de https://es.wikipedia.org/wiki/Michael_Thonet

Olguín, C. J.B. (2011). *Plastificado higro-térmico de la madera de Quercus scytophylla. Estudio por ondas de esfuerzo*. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.

Pennington, T. D. & Sarukan, J. (2005). *Árboles tropicales de México*. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.

Tenorio, C., Moya, R., Salas, C., & Berrocal, A. (2016). *Evaluation of wood properties from six native species of forest plantations in Costa Rica*. *Bosque (Valdivia)*, 37(1), 71-84.

Varga, D; & van der Zee, M. (2007). *Influence of steaming on selected wood properties of four hardwood species*. Springer. University of West Hungary, Sopron.

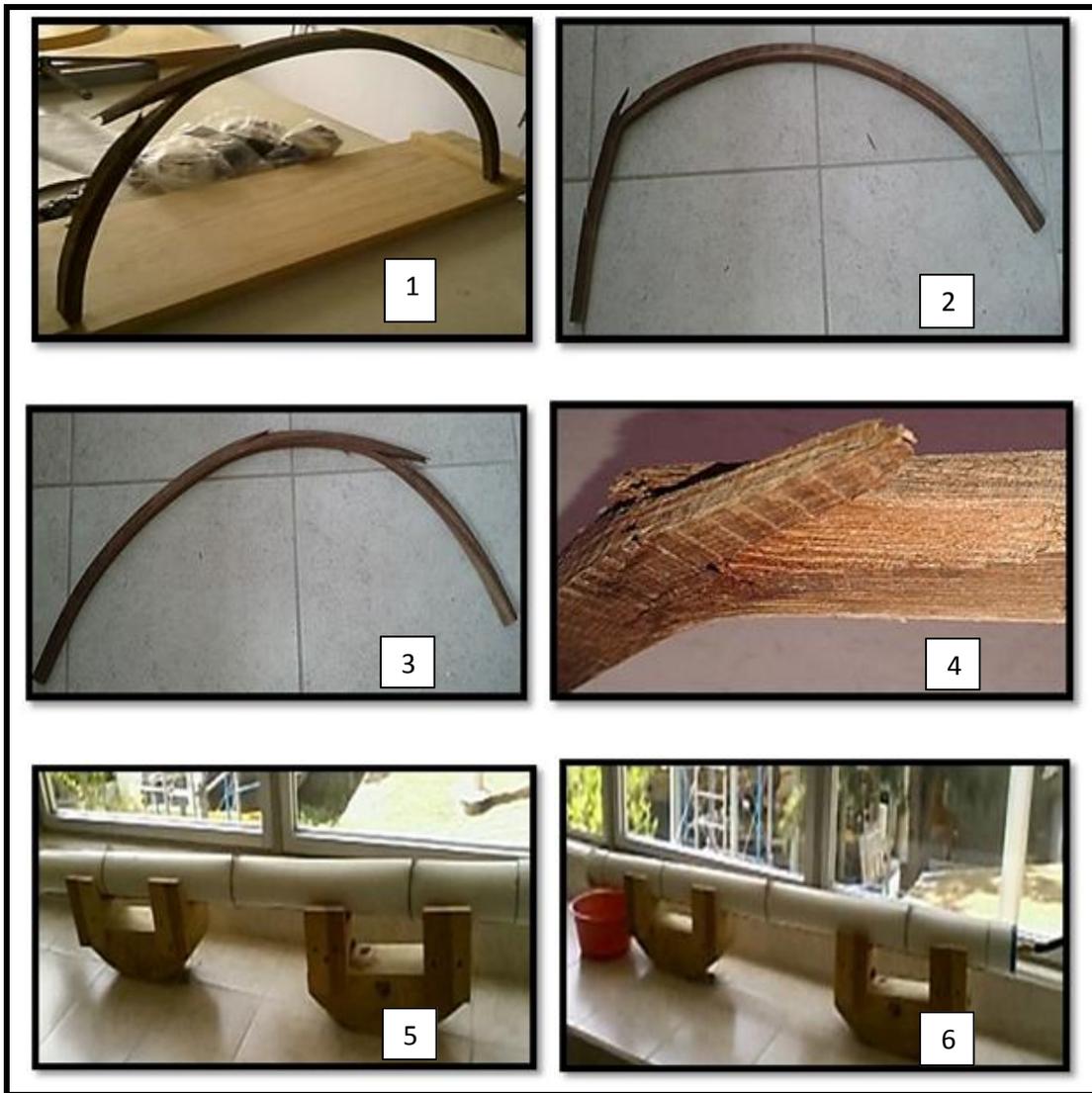
Vignote Peña, S. & Martínez Rojas I. (2006). *Tecnología de la madera*. Madrid: Mundi-Prensa.

White, R. H.; & Ross, R. J. (Eds.). 2014. *Wood and timber condition assessment manual: second edition*. General Technical Report FPLGTR-234. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Wright, S. R; Bond H. B; & Chen, Z. 2013. *Steam bending of Wood*. *Bioresources* 8(4), 4793-4796.

Zhang, S.Y. (2003). *Wood quality attributes and their impacts on wood utilization*. Recuperado 20 Noviembre 2016 de: <http://www.fao.org/docrep/ARTICLE/WFC/XII/0674-B1.HTM>

Anexo 1. Fase preliminar



En las figuras del 1 al 4 se muestran las fallas que presentaron los listones en la fase de preliminares. Los tiempos de vaporizado de esta etapa comenzaron con 60 minutos y 120 minutos. Con estos tiempos no fue posible lograr doblar la madera exitosamente. Las figuras 5 y 6 son imágenes de la cámara de vaporizado que se fabricó a la cual fue necesario realizarle mejoras forrándola con fibra de vidrio e instalándole un termómetro en la parte central.

Anexo 2. Fase experimental



Figura 1. Forrado de la cámara con fibra de vidrio. *Figura 2.* Termómetro. *Figura 3* Listón humectado para entrar a la cámara. *Figura 4.* Cámara en funcionamiento. 180 minutos de vaporizado. *Figura 5.* Listón doblado. *Figura 6.* Probetas para evaluación de la calidad del doblado.

Anexo 3. Concentrado de información

Total de listones	42
Listones utilizados en la fase preliminar	6
Tratamientos	3 (T0, T1, T2)
Listones por tratamiento	12
Tiempo de humectación de los listones	15 días
Tiempo de suavizado en la cámara	180 minutos
Número de probetas por tratamiento para evaluación	35 piezas
Contenido de humedad de la madera evaluada	11%
Velocidad promedio de onda en el eje longitudinal T0	3267 m/s
Velocidad promedio de onda en el eje longitudinal T1	3301 m/s
Velocidad promedio de onda en el eje longitudinal T2	3175 m/s
Módulo de elasticidad promedio por tratamiento T0	4796 MPa
Módulo de elasticidad promedio por tratamiento T1	4879 MPa
Módulo de elasticidad promedio por tratamiento T2	4739 MPa
Temperatura de la cámara	92 °C
Tiempo de realización del doblado	70 segundos