



UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LA  
MADERA

OPCIÓN DE TITULACIÓN POR DIPLOMADO

**“USO DE LA REHIDRATACIÓN, PRESIÓN Y VACÍO EN EL  
ENDEREZADO DE MADERA DE PINO”**

DOCUMENTO RECEPCIONAL TÉCNICO

Que para obtener el título de:

**INGENIERO EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA**

PRESENTA

GONZALO HERNÁNDEZ CALDERÓN

ASESOR  
DR. JOSÉ CRUZ DE LEÓN

MORELIA, MICHOACÁN; AGOSTO DE 2008.

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
1.- RESUMEN	1
2.- INTRODUCCIÓN	2
3.- ANTECEDENTES	4
4.- OBJETIVO GENERAL	9
5.- DESARROLLO DEL TEMA	10
6.- RESULTADOS	15
7.- CONCLUSIONES	27
8.- RECOMENDACIONES	28
9.- BIBLIOGRAFÍA	29

## ÍNDICE DE FIGURAS

Número	Descripción	Página
1	Defectos debidos a un mal secado: torcedura, arqueamiento, encorvado y acanalamiento.	6
2	Agua fija (AF), agua libre (AL) y parénquima (P) en una madera de pino.	7
3	Determinación del encorvado.	10
4	Determinación de la torcedura.	11
5	Determinación del arqueamiento.	11
6	Madera en el autoclave.	12
7	Flejado después del proceso.	13
8	Viga después del proceso.	13
9	Diagrama de flujo del proceso realizado.	14
10	Primera repetición. Magnitudes de los defectos de alabeo antes y después del proceso de rehidratación.	17
11	Segunda repetición. Magnitudes de los defectos de alabeo antes y después del proceso de rehidratación.	20
12	Gráfica de los alabeos antes del proceso de rehidratación.	21
13	Porcentaje de mejoría de los alabeos.	21

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Número</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
1	Magnitudes de los alabeos antes del proceso de rehidratación	15
2	Magnitudes de los alabeos después del proceso de rehidratación	16
3	Magnitudes de los alabeos antes del proceso de rehidratación.	18
4	Magnitudes de los alabeos después del proceso de rehidratación.	19
5	Costo de energía de las bombas utilizadas.	25
6	Desglose de costos de las dos repeticiones.	25
7	Ganancia por m <sup>3</sup> y pt por tipo de alabeo.	26

# 1.- RESUMEN

Las empresas madereras presentan con frecuencia pérdidas económicas por vigas defectuosas por diversas formas de alabeo (curvado, torcedura y arqueamiento, etc.). Estos defectos son causados por un proceso heterogéneo de secado en la pieza.

Con el fin de disminuir estos defectos, de mejorar la calidad de la madera y proporcionarle un valor agregado, se realizó por medio de presión y vacío (método Bethell) la rehidratación de las células de la madera. Con ello se logró enderezar las piezas en un 65.62 %.

En la literatura especializada no se menciona específicamente el uso de presión y vacío para el enderezamiento de piezas de madera y sólo se menciona la forma de doblado o curvado de la misma usando madera húmeda y calor.

Este trabajo se realizó en el Laboratorio de Conservación y Preservación de la Madera (LACOPREMA) de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Se llevaron a cabo 2 tratamientos, cada uno de 16 vigas de diversas medidas, en las cuales se identificaron 3 defectos: encorvado, torcedura y arqueamiento.

## 2.- INTRODUCCIÓN

La madera en forma de tablas, tablones, vigas, gualdras etc, de una industria maderera, sufre diversas deformaciones tales como torcedura, arqueamiento, encorvamiento y acanalamiento, etc. Estas deformaciones son denominadas alabeos y son ocasionadas entre otros aspectos por un mal acomodo de las piezas, por diferencia de gradientes de humedad (mal secado) en las piezas o por inclinación de los anillos de crecimiento. Todas las piezas de madera con algún alabeo, son consideradas piezas defectuosas por lo que su valor disminuye ó inclusive no se pueden comercializar, además de que ocupan un espacio innecesario en el patio de almacenamiento.

Lo que se pretende con este trabajo es contribuir con las empresas madereras a disminuir sus perdidas económicas, ayudándoles con este proceso a enderezar las vigas que presenten alabeos, basándose en el principio de rehidratación de las células de la madera.

La rehidratación de las células de la madera permite que recuperen su flexibilidad y con ello la forma original de las piezas. Para que la gran mayoría de las células de la madera se hidraten, es necesario aplicar fuerzas mayores a la presión atmosférica. Estas fuerzas se pueden lograr utilizando una autoclave en dónde se aplique, a través de bombas, presiones mayores a la atmosférica. Sin embargo para que exista mayor impregnación se debe aplicar primeramente un vacío.

Un método de carácter industrial es el proceso Bethell también denominado de célula llena, en donde se puede controlar la hidratación y se garantiza la penetrabilidad del medio hidratante.

Para éste trabajo de investigación, se realizaron dos repeticiones de 16 vigas comerciales cada una. De las 32 vigas utilizadas, se mejoraron 21 vigas, lo que equivale a un 65.62 %. Para ayudar a mantener la forma de las piezas de madera utilizadas en este trabajo de investigación, éstas se sujetaron por medio de flejes y se sometieron a un proceso de secado al aire libre por un tiempo de dos semanas. Tiempo establecido por la industria para considerarlo como un proceso económicamente factible.

Se realizó un análisis de costos simple para definir la viabilidad económica del proceso.

La investigación y el trabajo mencionado se llevaron a cabo utilizando la planta de tratamiento de madera de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la UMSNH, la cual fue construida bajo las especificaciones de la norma AMERICAN WOOD PRESERVERS' ASSOCIATION (AWPA) y el código AMERICAN STANDARD MECHANICALS ENGINEERS (ASME) cumpliendo con las características que debe tener para impregnar madera a presión y vacío con sustancias hidrosolubles.

### 3.- ANTECEDENTES

En la literatura especializada consultada, no se menciona específicamente el uso de presión y vacío para el enderezamiento de piezas de madera, pero si se menciona la forma de doblado o curvado de la misma usando madera húmeda y calor.

Originalmente para elaborar piezas curvas se usaba un bloque de madera sólida a la que se le daba la forma curva deseada mediante cortes; esta técnica hasta la fecha es utilizada por los constructores de muebles. A principios de los años treinta Alvaar Aalto y Marcel Breuer aplican esta técnica en el diseño de sillas y sillones de madera con formas curvas, inspirados en el mobiliario que en fechas anteriores diseñaron usando curvas con secciones tubulares de metal, convirtiéndose así en pioneros en el uso de esta técnica a nivel mundial. De ahí parte la idea de que este proceso puede ser reversible si se puede doblar la madera para determinados usos como muebles y arcos se puede hacer lo contrario para evitar deformaciones que en ocasiones nos hacen inservibles las piezas de madera originando grandes pérdidas en las industrias (Pinillos, S/F).

Las deformaciones más frecuentes son el encorvado, arqueamiento, torcedura y acanalamiento (Vignote- Martínez, 2006).

El encorvado, arqueamiento, torcedura y acanalamiento se pueden calibrar por la flecha respectiva. El alabeo se puede evaluar por la altura que alcanza la esquina levantada sobre el plano formado por las otras tres, aunque también puede serlo por la tangente del ángulo que forma el extremo levantado (Vignote- Martínez, 2006).

Los alabeos de la pieza, además de obedecer a causas inherentes a la propia naturaleza del árbol, en ocasiones son generados por causas ligadas al aserrio. Factores como puesta a punto de la máquina en cuanto a los dispositivos de avance y fijación, la posición de la troza en la máquina, e incluso una

inadecuada operación de aserrio, pueden ocasionar piezas curvas (García-Guindeo, 2002).

El alabeo es el termino general usado para designar cualquiera de los defectos, por la contracción inherente e irregular de la madera durante el secado, el alabeo se define como cualquier desviación de la superficie de una tabla que deja de ser plana y recta (Caraveo, 1982).

Los tipos de alabeos encontrados en el presente trabajo fueron el encorvado, el arqueamiento y la torcedura. A continuación se describe cada uno de ellos de acuerdo a Sánchez (1991).

Encorvado.- Es cuando la pieza se distorsiona de tal manera que aunque permanezca plana, sus cantos se desvían de una línea recta entre un extremo y otro.

Arqueamiento.- Es la desviación de cara a lo largo de una tabla con respecto a una recta trazada de extremo a extremo.

Torcedura.- Es la desviación del plano horizontal por curvatura de los ángulos de una tabla, dejando los cantos de ser paralelos o bien cuando las 4 esquinas de una pieza no están en el mismo plano que las otras 3.

En la figura 1, se observan los alabeos más comunes en la madera ocasionadas por un mal secado y por contracciones de la madera (Londoño, S/F).

Dentro de una misma pieza: se pueden producir diferencias de humedad entre los extremos, entre caras opuestas o entre los lados. Estas diferencias darán lugar posteriormente, si la madera se sitúa en un ambiente seco, a toda gama de deformaciones ya conocidas. Además pueden presentarse gradientes de humedad entre las capas internas y externas de la pieza. Estos gradientes de por si solos no implican deformaciones posteriores, pero si se refiere a la pieza, volverán a presentarse diferencias de humedad entre los lados al quedar al descubierto las zonas húmedas y por tanto la posibilidad de que se den deformaciones de canto (Vignote- Jiménez, 1996).

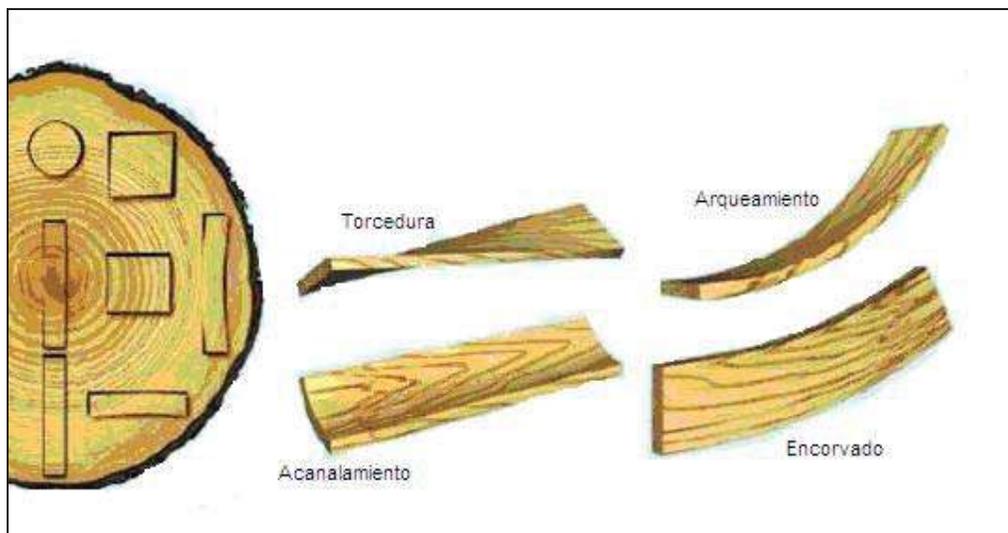


Figura 1. Defectos debidos a un mal secado: torcedura, arqueamiento, encorvado y acanalamiento.

El término permeabilidad se usa para indicar la velocidad del flujo de gases y líquidos en la madera. Esta propiedad tiene gran importancia en la preservación y pulpeo, procesos en los cuales es necesario incluir líquidos en la madera, y en el secado, donde la remoción de agua capilar y vapor de agua son factores muy importantes. En las coníferas, las aberturas en el marco de las membranas de las punteaduras son generalmente estructuras limitantes de la permeabilidad, en ellas el tamaño reducido de estas aberturas se refleja en los valores de permeabilidad longitudinal (Arroyo, 2003).

La pérdida de humedad y la contracción continúan hasta un momento en que la humedad de la pared celular ya no puede ser evaporada por la temperatura ambiental existente. En este momento se denomina “contenido de humedad en equilibrio” (CHE), y varía de acuerdo a la temperatura y humedad relativa del aire del lugar donde este colocada la madera. Sin embargo, su variación no es muy amplia y oscila alrededor del 12 al 15% (Cruz, 2006).

Contracción, contenido de humedad en equilibrio e hinchamiento, estos tres conceptos engloban lo que comúnmente es llamado “trabajo de la madera”. En cualquier madera y en cualquier lugar, el fenómeno del “trabajo de madera” es constante y permanente (Cruz, 2006).

La madera contiene agua de constitución, inerte a su naturaleza orgánica, agua de saturación, que impregna las paredes de los elementos leñosos y agua libre, absorbida por capilaridad por los vasos y traqueidas (Cruz, 2002). La figura 2 muestra la ubicación del agua de las paredes celulares (AF), el agua de los lumenes (AL) y el Parénquima (P).

Como la madera es higroscópica, absorbe o desprende humedad, según el medio ambiente. El agua libre desaparece totalmente al cabo de un cierto tiempo, quedando, además del agua de constitución, el agua de saturación correspondiente a la humedad de la atmósfera que rodea a la madera, hasta conseguir un equilibrio, diciéndose que la madera esta secada al aire (Cruz, 2002).

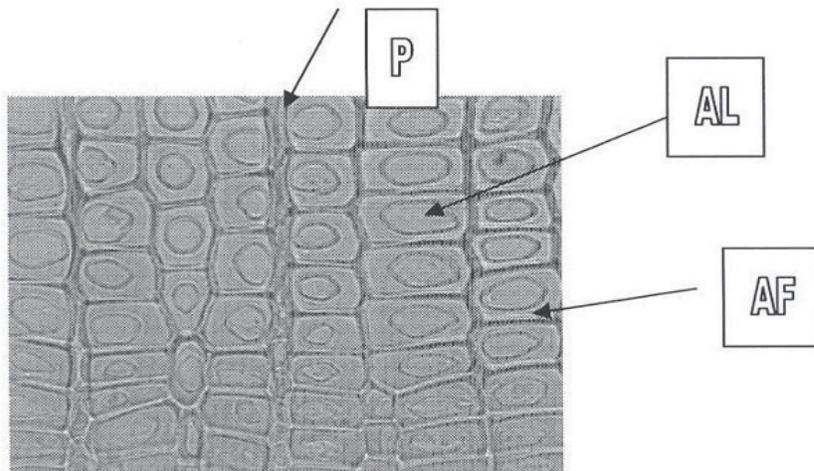


Figura 2. Agua fija (AF), agua libre (AL) y parénquima (P) en una madera de pino.

El punto de saturación de la fibra (PSF) es la etapa de secado o humedecimiento de la madera en la que las paredes de la madera son saturadas con agua y las cavidades de las células están libres de agua. Normalmente se aplican a células individuales o a grupos de células, no a

todas juntas. Se toma aproximadamente el 30% de contenido de humedad, basado en el peso de la madera estufada (Simpson, 1996).

Origen de algunas deformaciones:

- a) Relativas al apilado y acomodo de las piezas de madera.
  - Separadores mal espaciados o de espesor inadecuado.
  - Tablas que sobresalen de la pila.
  - Espesores desiguales.
  
- b) Relativas a la instalación de secado.
  - Ventilación insuficiente.
  - Circulación del aire escasa, con turbulencias o irregulares.
  
- c) Relativas a una irregular distribución de la humedad dentro de cada pieza.
  - De una cara o canto respecto al otro.
  - A lo largo de la pieza.
  - Dentro de la sección de la pieza. (Vignote- Martínez, 2006).

## **4.- OBJETIVO GENERAL**

Lograr la corrección de los alabeos, rehidratando las células de la madera por encima del Punto de Saturación de la Fibra (PSF), con agua utilizando presión y vacío (proceso Bethell). Sujetando las vigas por medio de flejes durante su proceso de secado al aire libre.

## 5.- DESARROLLO DEL TEMA

Se utilizaron 32 vigas de madera de pino (*Pinus sp.*) donadas por una industria maderera de Morelia, Michoacán, de las siguientes medidas:

5 vigas de 3 ½" \* 8 1/2" \* 16', 2 vigas de 3 ½" \* 8 ½" \* 12', 9 vigas de 3 ½" \* 6 ½" \* 12', 10 vigas de 1 ½" \* 4" \* 16', 5 vigas de 3 ½" \* 8" \* 16', 1 tabla de 1 ½" \* 9 ½" \* 7'. El total de las vigas asciende a 727.6 pie tabla y presentaban un contenido de humedad promedio de 19.5 %.

Se enumeraron las 32 vigas para su identificación y se les tomó el contenido de humedad utilizando un higrómetro de agujas, después se identificó el alabeo que presentaba cada una de ellas.

Para la medición del encorvado, se colocó la viga por el canto en el suelo en un lugar plano, midiéndose en cm la distancia del canto de la pieza al suelo (figura 3).

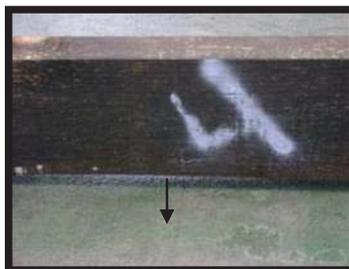


Figura 3. Determinación del encorvado.

De igual manera se procedió a medir la torcedura. Para ello, la medida se realizó de la esquina o extremo más alto de la viga al suelo (figura 4).



Figura 4. Determinación de la torcedura.

Para la medición del arqueamiento, se colocó la viga por la cara en el suelo en un lugar plano, midiéndose en cm la distancia de la cara de la pieza al suelo (figura 5).

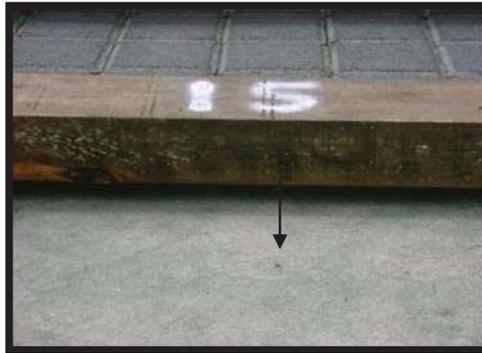


Figura 5. Determinación del arqueamiento.

Se realizaron 2 repeticiones (cargas) cada una con 16 vigas escogidas al azar. Para el proceso Bethell, se siguió en términos generales la metodología de Aburto (2006) y Ambriz (2002). El proceso para esta investigación consistió a grandes rasgos en los aspectos siguientes:

1. Se introdujo la madera al autoclave con un contenido de humedad alrededor del 19.5 % (Figura 6).
2. Se realizó el primer vacío (650 mm Hg), extrayendo todo el aire posible de la madera.
3. Se inundó el autoclave con agua.

4. Se presurizó el sistema, logrando que el agua penetrara dentro de la madera. Se trabajó con una presión de  $10 \text{ Kg/cm}^2$ .
5. Una vez que se alcanzaron los valores deseados de saturación de la madera, se extrajo el agua sobrante del autoclave, devolviéndola a un tanque de depósito de 3300 lts de capacidad.
6. Se hizo vacío nuevamente, para remover el exceso de agua.
7. Se abrió la puerta del autoclave, finalizando así el proceso de rehidratación.



Figura. 6. Madera en el autoclave.

**Nota:** Obsérvese como el autoclave no puede ser llenado completamente por los alabeos de las vigas.

Al final de cada proceso se llevaron las vigas al patio de secado y se flejaron mecánicamente (fleje de acero al carbón), en 2 paquetes de 16 vigas, como se muestra en la figura 7, dejándolas así durante 2 semanas. El contenido de humedad al final del proceso que presentaron las vigas fue del 75% en promedio.



Figura. 7. Flejado después del proceso.

Al terminar el periodo de 2 semanas, la madera rehidratada, se volvió a medir de la misma manera que al principio para identificar los posibles cambios que ocurrieron (figura 8). El contenido de humedad promedio de las vigas fue del 62%.



Figura.8. Viga después del proceso.

A continuación se muestra el diagrama de flujo seguido durante nuestro proceso de rehidratación, presión y vacío en el enderezamiento de madera de pino.

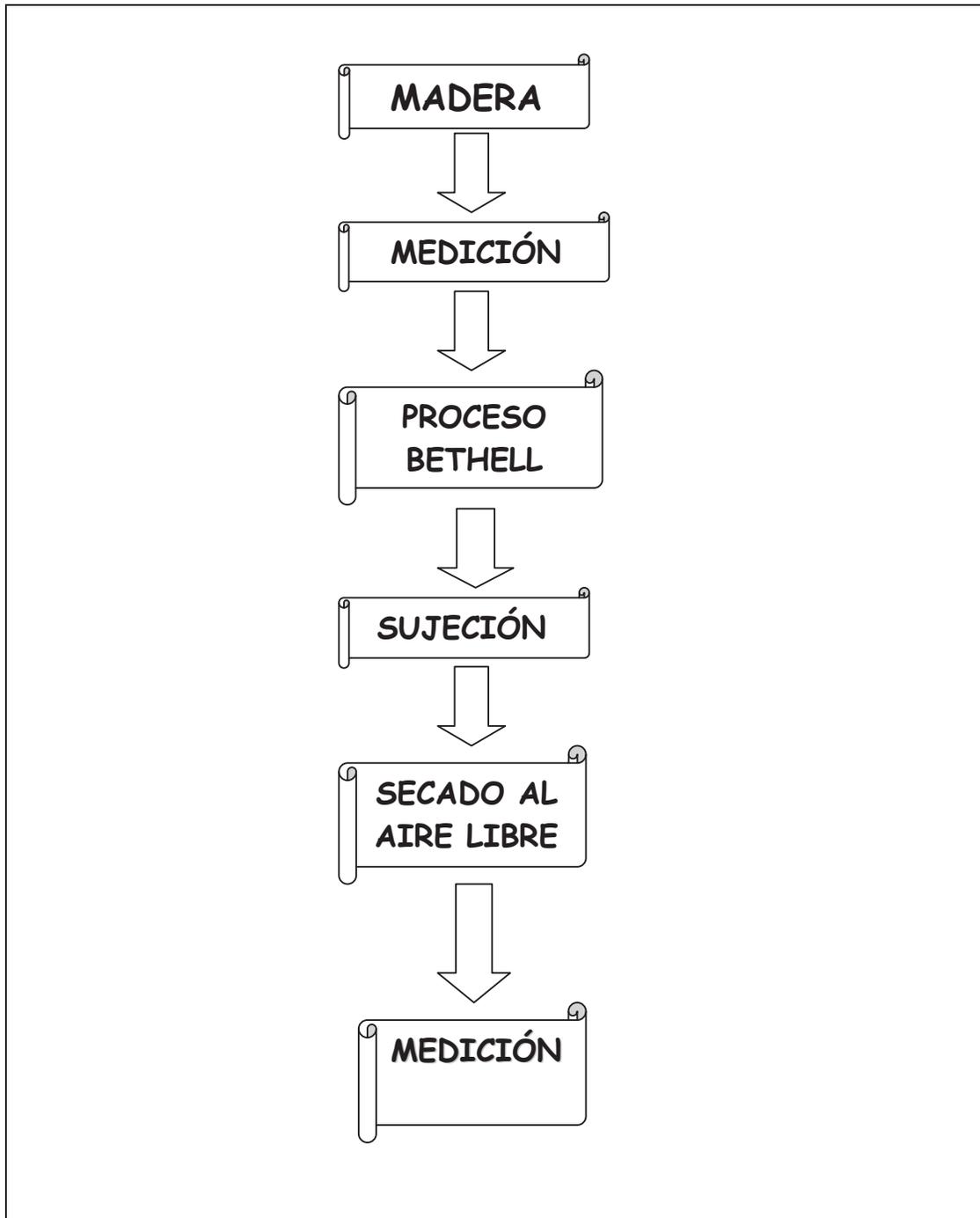


Figura 9. Diagrama de flujo del proceso realizado.

## 6.- RESULTADOS

A continuación se presentan las dimensiones comerciales de las vigas, así como los defectos y sus magnitudes que fueron encontrados en las dos repeticiones (cargas) de 16 vigas cada una. La duración promedio de cada repetición fue de aproximadamente 5 horas.

### PRIMERA REPETICIÓN.

El cuadro 1, muestra las magnitudes de los defectos encontrados **antes** del proceso de rehidratación (ver también la figura 10). De las 16 vigas analizadas, 10 mostraron el defecto de encorvado (62.50%), 3 de torcedura (18.75%) y 3 de arqueamiento (18.75%).

La magnitud del encorvado oscila entre 1 y 3.5 cm, la de la torcedura de 2 a 6 cm y la del arqueamiento es de 2 a 3 cm.

Cuadro 1. Magnitud de los alabeos antes del proceso de rehidratación.

Vigas	Medidas comerciales	Defecto	Magnitud (cm)
1	3 ½" * 8 ½" * 16'	Encorvado	2
2	3 ½" * 8 ½" * 16'	Torcedura	6
3	3 ½" * 8 ½" * 16'	Arqueamiento	2
4	3 ½" * 8 ½" * 12'	Encorvado	3.5
5	3 ½" * 8 ½" * 16'	Encorvado	2.4
6	3 ½" * 8 ½" * 12'	Torcedura	2
7	3 ½" * 8 ½" * 12'	Encorvado	1.9
8	3 ½" * 6 ½" * 12'	Encorvado	1.7
9	3 ½" * 6 ½" * 12'	Encorvado	1
10	3 ½" * 6 ½" * 12'	Torcedura	4.6
11	3 ½" * 6 ½" * 12'	Arqueamiento	2.6
12	3 ½" * 6 ½" * 12'	Encorvado	1.7
13	3 ½" * 6 ½" * 12'	Encorvado	1.4
14	3 ½" * 6 ½" * 12'	Encorvado	1.8
15	3 ½" * 6 ½" * 12'	Arqueamiento	3
16	3 ½" * 6 ½" * 12'	Encorvado	3.2

El cuadro 2, muestra las magnitudes de los defectos encontrados **después** del proceso de rehidratación (ver también la figura 10). De las 16 vigas analizadas, 10 mostraron el defecto de encorvado de las cuales se corrigieron 8 (50%), 3 de torcedura de las cuales se corrigió solo una (6.25%) y 3 de arqueamiento corrigiéndose todas (18.75%).

La magnitud del encorvado oscila entre 0 y 1.7 cm, la de la torcedura de 0 a 3 cm y la del arqueamiento se corrigió por completo.

Cuadro 2. Medidas de los alabeos después del proceso de rehidratación.

Vigas	Medidas comerciales	Defecto	Magnitud (cm)
1	3 ½" * 8 ½" * 16'	Encorvado	0
2	3 ½" * 8 ½" * 16'	Torcedura	3
3	3 ½" * 8 ½" * 16'	Arqueamiento	0
4	3 ½" * 8 ½" * 16'	Encorvado	0
5	3 ½" * 8 ½" * 16'	Encorvado	0
6	3 ½" * 8 ½" * 12'	Torcedura	1
7	3 ½" * 8 ½" * 12'	Encorvado	0
8	3 ½" * 6 ½" * 12'	Encorvado	0
9	3 ½" * 6 ½" * 12'	Encorvado	0
10	3 ½" * 6 ½" * 12'	Torcedura	0
11	3 ½" * 6 ½" * 12'	Arqueamiento	0
12	3 ½" * 6 ½" * 12'	Encorvado	0
13	3 ½" * 6 ½" * 12'	Encorvado	0
14	3 ½" * 6 ½" * 12'	Encorvado	1
15	3 ½" * 6 ½" * 12'	Arqueamiento	0
16	3 ½" * 6 ½" * 12'	Encorvado	1.7

De las magnitudes del cuadro 1 y 2 se elaboró la gráfica de la figura 10. En ella se muestra una simple comparación general de las magnitudes de los defectos de todos los alabeos antes y después de la primera repetición (carga 1). De las 16 vigas se mejoraron 12, lo que equivale a una mejoría general del 75%. Nótese que sólo la viga 2, 6, 14 y 16, no lograron su corrección al 100 % como las demás.

La viga 2, tenía antes del tratamiento 6 cm de alabeo y disminuyó a 3 cm, es decir, tuvo una mejoría del 50%. La viga 6 igual mejoró un 50% disminuyendo su magnitud de 2 a 1 cm. La viga 14 tuvo antes del tratamiento una magnitud de 1.8 cm y de 1 cm al final, por lo que mejoró un 44.45%. Finalmente la viga 16, tenía antes 3.2 cm y bajó a 1.7 cm, teniendo una mejoría de 46.88 %.

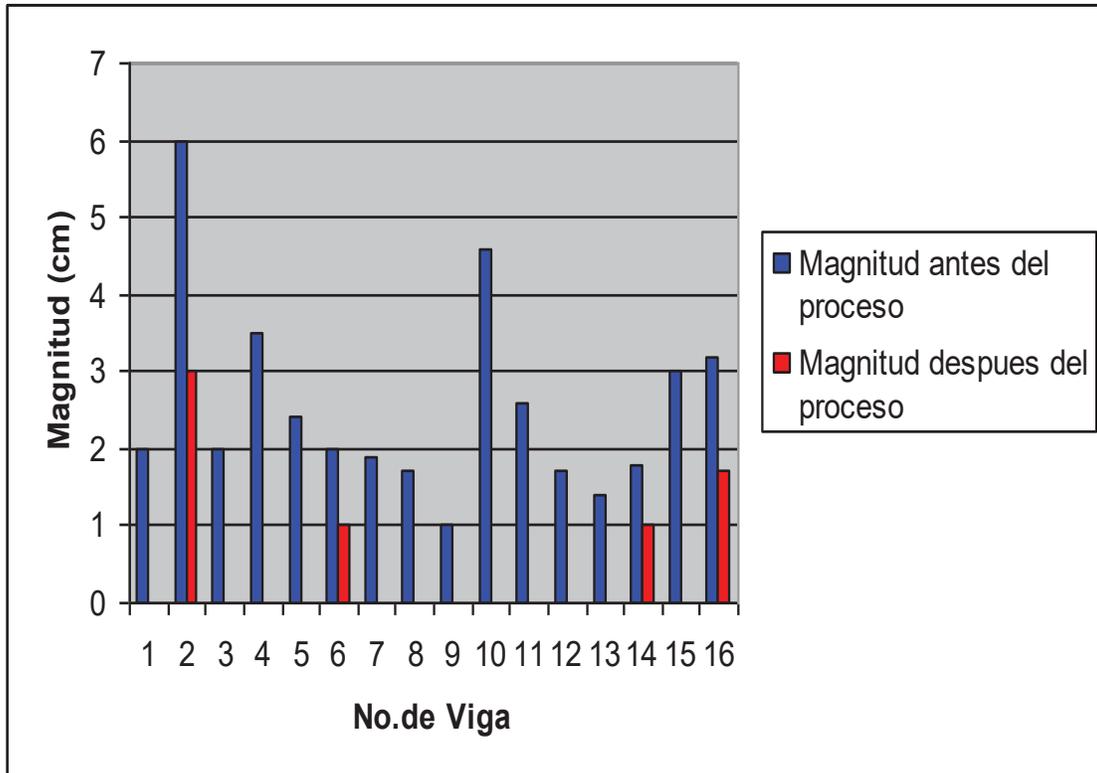


Figura 10. Primera repetición. Magnitudes de los defectos de alabeo antes y después del proceso de rehidratación

## SEGUNDA REPETICIÓN.

El cuadro 3, muestra las magnitudes de los defectos encontrados **antes** del proceso de rehidratación. De las 16 vigas analizadas, 4 mostraron el defecto de encorvado (25%), 1 de torcedura (6.25%) y 11 de arqueamiento (68.75%).

La magnitud del encorvado oscila entre 1.4 y 5 cm, la de la torcedura es de 2.8 cm y la del arqueamiento es de 2 a 9 cm.

Cuadro No 3. Magnitudes de los alabeos antes del proceso de rehidratación.

Vigas	Medidas comerciales	Defecto	Magnitud (cm)
1	1 ½" * 4" * 16'	Encorvado	5
2	1 ½" * 4" * 16'	Torcedura	2.8
3	1 ½" * 4" * 16'	Arqueamiento	9
4	1 ½" * 4" * 16'	Arqueamiento	3
5	1 ½" * 4" * 16'	Arqueamiento	4
6	1 ½" * 4" * 16'	Encorvado	1.4
7	1 ½" * 4" * 16'	Arqueamiento	3.5
8	1 ½" * 4" * 16'	Arqueamiento	5
9	1 ½" * 4" * 16'	Arqueamiento	3
10	1 ½" * 4" * 16'	Arqueamiento	6
11	3 ½" * 8" * 16'	Encorvado	4
12	3 ½" * 8" * 16'	Encorvado	3
13	3 ½" * 8" * 16'	Arqueamiento	4
14	3 ½" * 8" * 16'	Arqueamiento	7
15	3 ½" * 8" * 16'	Arqueamiento	2
16	1 ½" * 9½" * 7'	Arqueamiento	3

El cuadro 4, muestra las magnitudes de los defectos encontrados **después** del proceso de rehidratación (ver también figura 11). De las 16 vigas analizadas, 4 mostraron el defecto de encorvado de las cuales se corrigió 1 (6.25%), 1 de torcedura la cual no se corrigió y 11 de arqueamiento de las cuales se corrigieron 8 (50%).

La magnitud del encorvado oscila entre 0 y 3 cm, la de la torcedura de 1 cm y la del arqueamiento de 0 a 2.5 cm.

Cuadro 4. Magnitudes de los alabeos después del proceso de rehidratación.

Vigas	Medidas comerciales	Defecto	Magnitud (cm)
1	1 ½" * 4" * 16'	Encorvado	3
2	1 ½" * 4" * 16'	Torcedura	1
3	1 ½" * 4" * 16'	Arqueamiento	0
4	1 ½" * 4" * 16'	Arqueamiento	1
5	1 ½" * 4" * 16'	Arqueamiento	0
6	1 ½" * 4" * 16'	Encorvado	Ruptura
7	1 ½" * 4" * 16'	Arqueamiento	0
8	1 ½" * 4" * 16'	Arqueamiento	0
9	1 ½" * 4" * 16'	Arqueamiento	0
10	1 ½" * 4" * 16'	Arqueamiento	0
11	3 ½" * 8" * 16'	Encorvado	0
12	3 ½" * 8" * 16'	Encorvado	3
13	3 ½" * 8" * 16'	Arqueamiento	0
14	3 ½" * 8" * 16'	Arqueamiento	2.5
15	3 ½" * 8" * 16'	Arqueamiento	1
16	1 ½" * 9½" * 7'	Arqueamiento	0

De las magnitudes del cuadro 3 y 4 se elaboró la gráfica de la figura 11. En ella se muestra una simple comparación general de las magnitudes de los defectos de todos los alabeos antes y después de la segunda repetición (carga 2). De las 16 vigas se mejoraron 9, lo que equivale a una mejoría general del 56.25%. Nótese que sólo la viga 1, 2, 4, 12,14 y 15, no lograron su corrección al 100 % como las demás y la viga 6 se colapso debido a que tenía un nudo en la parte del centro de la viga mayor de la tercera parte de su sección, ocasionando que la presión generada en el autoclave la colapsara.

La viga 1, tenía antes del tratamiento 5 cm de alabeo y disminuyó a 3 cm, es decir, tuvo una mejoría del 40%. La viga 2 igual mejoró un 62.29% disminuyendo su magnitud de 2.8 a 1 cm. La viga 4 tuvo antes del tratamiento una magnitud de 3 cm y de 1 cm al final, por lo que mejoró un 66.67%, la viga 12 no tuvo ninguna mejoría, la viga 14 mejoro en un 64.29% disminuyendo su magnitud de 7 a 2.4 cm. Finalmente la viga 15, tenía antes 2 cm y bajó a 1 cm, teniendo una mejoría de 50 %.

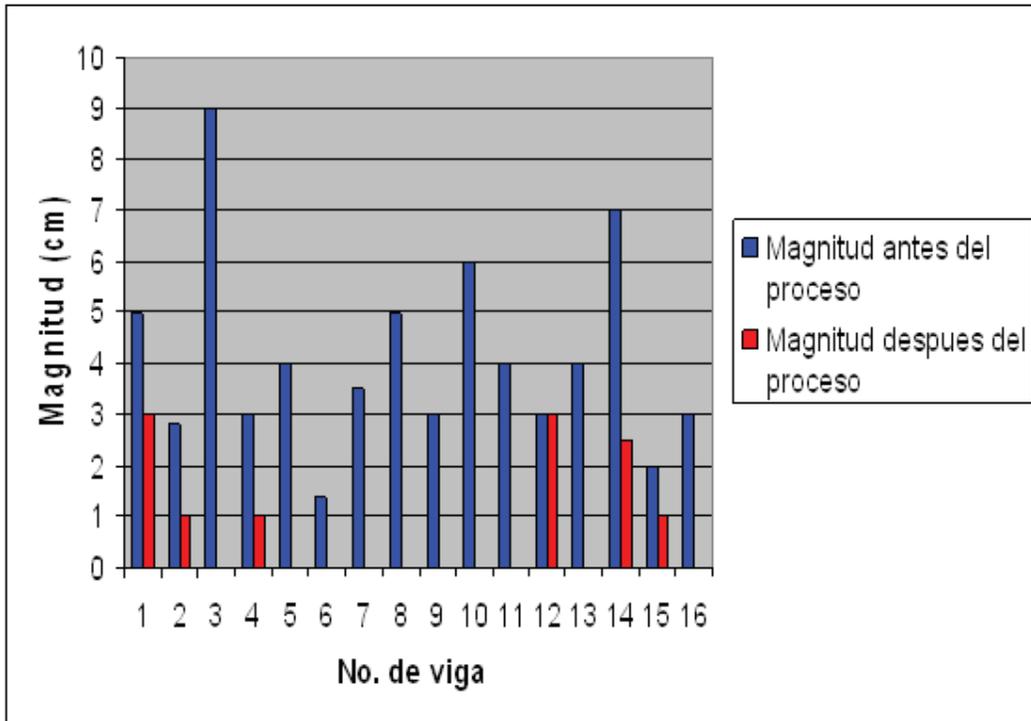


Figura 11. Segunda repetición. Magnitudes de los defectos de alabeo antes y después del proceso de rehidratación.

Considerando los valores del cuadro 1 y 3 que corresponden al total de las vigas (total 32 vigas en dos repeticiones) antes de cada proceso de rehidratación, se muestran en la figura 12, los valores porcentuales de los tres alabeos encontrados: el encorvado representa un 43.75%, el arqueamiento igual 43.75% y la torcedura un 12.5%.

#### **Mejoramiento porcentual por tipo de defecto (ver cuadros 2 y 4).**

El encorvado mejoró un 64.28 % porque de 14 vigas (100%) que presentaron este alabeo se mejoraron 9. El arqueamiento mejoró un 78.57% ya que mejoraron 11. La torcedura mejoro solamente en un 25% ya que se tenían 4 vigas con este alabeo y solo se mejoró una. Los resultados anteriores se pueden observar mejor en la figura 13.

Estos resultados nos indican que los alabeos que más se corrigieron fueron en orden de importancia, el arqueamiento y el encorvado.

Todos los tipos de alabeos se pueden mejorar todavía más porque vale la pena recordar que el sistema de sujeción (flejado) se retiró a las dos semanas y si se dejaran mas tiempo (por lo menos unas 4 semanas), se obtendrían mejores resultados. El óptimo resultado se obtendría cuando la madera obtuviera su Contenido de Humedad en Equilibrio y entonces se retirara el sistema sujeción.

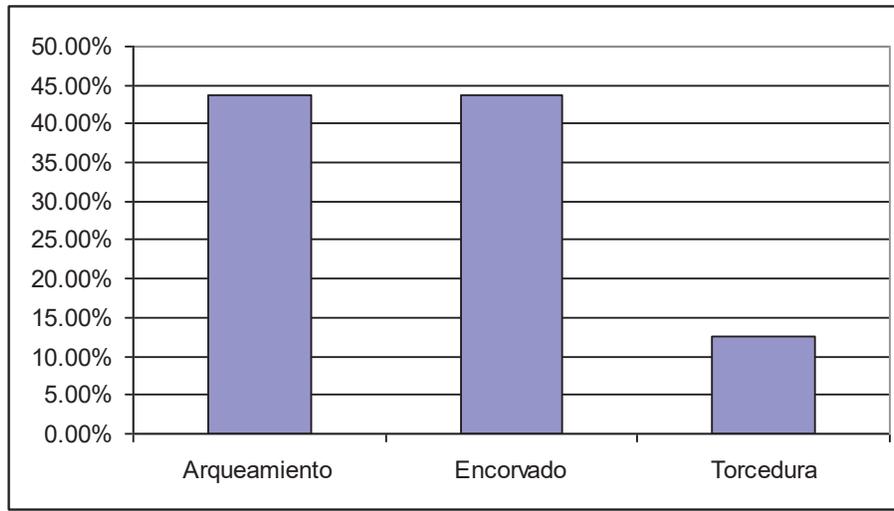


Figura 12. Gráfica de los alabeos antes del proceso de rehidratación.

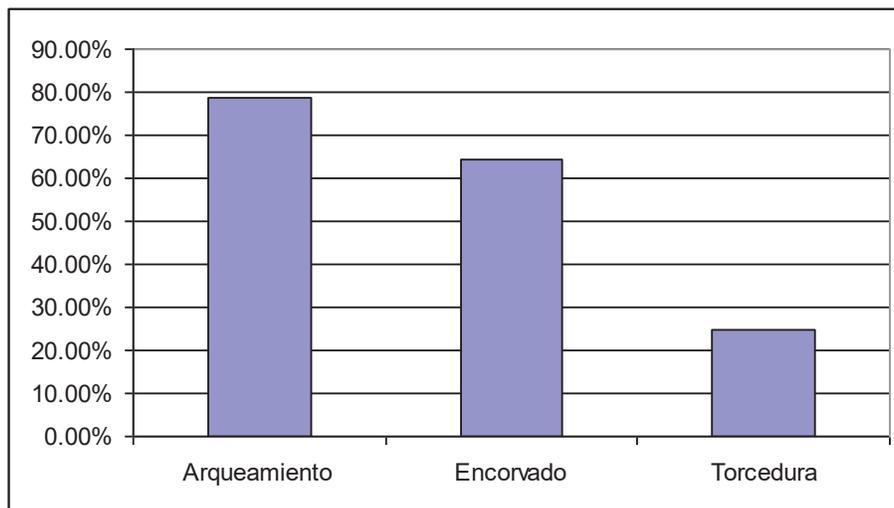


Figura 13. Porcentaje de mejoría de los alabeos.

## ANALISIS DE COSTOS

Para ver la viabilidad del proceso de rehidratación para enderezar vigas de madera de pino, se realizó un análisis de costos simple. Para ello se investigaron datos de la empresa de Triplay y Laminados Continental de Morelia Mich., del Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS) de Michoacán y de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

De las 32 vigas que se analizaron solo 21 se lograron mejorar, esto equivale al 65.62% de recuperación.

## PORCENTAJE DE APROVECHAMIENTO.

Para determinar el porcentaje de aprovechamiento (PA) durante el proceso, se utilizó la siguiente ecuación:

$$PA = \frac{VD}{TV} (100)$$

En donde:

VD= numero de vigas defectuosas

TV= numero total de vigas

De tal manera que  $PA = \frac{21}{32} (100) = 65.62\%$

De acuerdo con datos proporcionados por la empresa de Triplay y Laminados Continental de Morelia, tenemos los siguientes datos de los costos por pie tabla (pt). Se tomó en cuenta que el pie tabla en vigas de madera de pino tiene precio al público de \$ 12.50.

La cubicación de las 32 vigas equivale a 727.60 pt., resultando un costo total en pesos de \$ 9 095.00. Según la empresa las vigas defectuosas disminuyen su valor en un 50 % cuando mucho. Tomando en cuenta esa información, se tendría entonces un valor máximo en pesos de las vigas de \$ 4 547.50

Las 21 vigas mejoradas equivalen a 448.31 pt, lo que multiplicado por \$ 12.50 pesos nos proporciona un resultado de \$ 5603.87. Sumando los pt de las vigas que no se mejoraron que equivalen a 279.29 y a \$ 1745.56 nos da un gran total de **\$ 7 349.43 (siete mil trescientos cuarenta y nueve pesos con cuarenta y tres centavos)**.

Para determinar el ahorro ocasionado sólo por mejorar el proceso, necesitamos entonces restarle a los \$ 7 349.43 los \$ 4 547.50 del costo de las vigas si éstas se vendieran a la mitad de su precio. Obtenemos así, un monto de **\$ 2801.93 (dos mil ochenta y un pesos con noventa y tres centavos)**, de ahorro en pesos.

Sin embargo para obtener la posible ganancia final (ahorro final) tendremos que restarle los gastos derivados del uso de agua, de luz, de mano de obra y del costo de la rehidratación por pie tabla.

#### **Costos del agua utilizada.**

Para determinar el gasto de agua, primero se determinó el volumen del autoclave como se muestra a continuación.

Las medidas del autoclave son las siguientes: diámetro 0.76 metros y longitud 7.30 metros.

#### **Formula del cilindro: $V = (\pi) (r^2) (L)$**

$$V = (\pi) (0.38)^2 (7.30)$$

$$V = 3.31 \text{ m}^3$$

Este es el volumen total del autoclave considerando que solo fuera un solo proceso ó carga, pero en esta investigación se realizarón dos procesos de tal forma que este valor se multiplica por dos para obtener el valor total.

$$V = 3.31 \text{ m}^3 (2) = 6.62 \text{ m}^3$$

Ahora se convierten los pt totales en  $\text{m}^3$ . Para ello se usa la siguiente ecuación:

$$VMm^3 = VTMPt * VPTm^3$$

En donde:

$VMm^3$  = Volumen de madera en  $\text{m}^3$

$VTMPt$  = Volumen total de madera en pt

VPTm<sup>3</sup>= volumen de un pt en m<sup>3</sup>.

Por lo tanto tenemos que:

$$VMm^3 = 727.60 * 0.00236 = 1.717m^3$$

Nota: por definición, el volumen de un pt es la multiplicación de 0.0254m \* 0.3048m \* 0.3048m que da como resultado la constante 0.00236 m<sup>3</sup>.

De acuerdo con Sánchez (2005) la absorción promedio de la madera de pino (*Pinus sp.*) es de 427.065 kg/m<sup>3</sup> por lo que multiplicado esto por los 1.717 m<sup>3</sup> de madera nos proporciona un gasto de agua de **733.27** Kg o litros de agua.

Considerando que 1 m<sup>3</sup> de agua son 1000 litros entonces tenemos **0.73327** m<sup>3</sup>.

De acuerdo con los datos obtenidos de la página web del Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS), se tiene un costo de \$ 6.64 por m<sup>3</sup> mas 20 % de alcantarillado mas IVA, lo que equivale a \$ 9.16 por m<sup>3</sup> (Báez y Villafaña, 2001).

El gasto de agua en nuestro análisis para 727.6 pies tabla (pt), fue de 0.73327 m<sup>3</sup> de tal forma que multiplicado por el costo de \$ 9.16 pesos asciende a **\$ 6.71 (seis pesos con setenta y un centavos)**.

#### **Costos de la energía utilizada.**

Para determinar el gasto de energía eléctrica, se tomo en cuenta el costo por Kw/hr de \$1.83 (un peso con ochenta y tres centavos). En contrato de media tensión del tipo OM de acuerdo a los valores de los recibos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) del mes de julio del 2008.

Para calcular el gasto total de los dos procesos en Kw/hr, tenemos que saber el gasto de energía de las diferentes bombas utilizadas, por lo que con el valor de los caballos de fuerza (HP) de cada bomba y su equivalencia en Kw/hr se pueden obtener. El cuadro 5 presenta las bombas utilizadas, su respectivo valor de HP, su gasto en Kw/hr y el costo de energía que representaron. El costo total fue de **\$13.72 (trece pesos con setenta y dos centavos)**.

Cuadro 5. Costo de energía de las bombas utilizadas

Bomba	HP	Kw/hr	Tiempo trabajado	Costo en pesos
De Presión	1.5	1.11	80 min (1.33 hrs)	\$2.43
De vacío		3.73	130 min (2.17 hrs)	\$3.97
De llenado	1.0	0.74570	240 min (4 hrs)	\$7.32
			total	<b>\$13.72</b>

1Hp equivale a 0.74570 kw/hr.

1 Kw/hr= \$ 1.83

### Costos por mano de obra utilizada.

El costo de mano de obra por carga es de \$ 50.00 (cincuenta pesos) por trabajador, los trabajadores empleados para este caso fueron 2. Lo cual nos da un total de **\$200.00 (doscientos pesos)**.

### Costos del proceso.

El costo por pie tabla (pt) es de \$1.00 (un peso) por el tratamiento con agua, y el total de pies tabla para esta investigación fue de 727.60 pt, lo cual nos da un valor de **\$ 727.60 (setecientos veintisiete pesos con seis centavos)**.

### Desglose de costos.

Ahora se resta al valor total de ahorro por el proceso \$2801.93, el costo del proceso (\$727.60), el de la mano de obra (\$200.00), el costo de energía eléctrica (\$13.72) y el costo de agua (\$6.71), quedando finalmente un ahorro total o posible ganancia total de \$ 948.03 de las dos repeticiones (cuadro 6).

Cuadro 6. Desglose de costos de las dos repeticiones

Costo del proceso	\$ 727.60
Mano de obra	\$ 200.00
Costo de energía eléctrica	\$ 13.72
Costo de agua	\$ 6.71
<b>Total</b>	<b>\$ 948.03</b>

Ahora restamos este valor a la ganancia total del proceso y obtenemos un valor de **\$1,853.90 (mil ochocientos cincuenta y tres pesos con nueve centavos)**.

Finalmente para hacer unitario el ahorro obtenido tenemos que dividir esta cantidad entre los m<sup>3</sup> (1.717) y pt totales (727.60) de las dos repeticiones. El ahorro o ganancia final por m<sup>3</sup> es de **\$1 079.00 (mil setenta y nueve pesos)** y de cada pt es de **\$2.55 (dos pesos con cincuenta y cinco centavos)**.

$$ahorrofinal = 1853.90 / 1.717m^3 = \$1079.00$$

$$ahorrofinal = 1853.90 / 727.60pt = \$2.55.$$

### **Desglose de ganancia por tipo de defecto**

Los costos anteriormente mencionados los podemos desglosar también por tipo de defecto, por lo que considerando las ganancias por m<sup>3</sup> y pt y el porcentaje de mejoría que tuvo cada tipo de alabeo, tendríamos lo siguiente (cuadro 7):

Cuadro 7. Ganancia por m<sup>3</sup> y pt por tipo de alabeo

<b>Tipo de defecto</b>	<b>% de mejoría</b>	<b>Ganancia por m<sup>3</sup></b>	<b>Ganancia por pt</b>
Arqueamiento	78.57	\$847.77	\$2.00
Encorvado	64.28	\$693.58	\$1.63
Torcedura	25.00	\$269.75	\$0.63

## 7.- CONCLUSIONES

- 1.- De las 32 piezas tratadas las que presentaron mejor resultado fueron las de  $3\frac{1}{2}'' * 6\frac{1}{2}'' * 12'$ , en la primera repetición y en la segunda las de  $1\frac{1}{2}'' * 4'' * 16'$ .
- 2.- El resultado no fue como se había pensado del 100% pero tomando en cuenta el resultado de 65.62%, es bueno ya que esto contribuye a la conservación del bosque.
- 3.- El valor obtenido como ganancia para la industria maderera por cada  $m^3$  es de \$ 1,079.00 (mil setenta y nueve pesos).
- 4.- El valor obtenido como ganancia para la industria maderera por cada pt es de \$2.55 (dos pesos con cincuenta y cinco centavos).
- 5.- El alabeo que mejor se pudo corregir con el método de rehidratación por presión y vacío (Bethell), fue el arqueamiento (78.57% de mejoría).
- 6.- Para el arqueamiento se puede obtener una ganancia de \$847.77 (ochocientos cuarenta y siete pesos con setenta y siete centavos) por  $m^3$  y \$2.00 (dos pesos) por pt.
- 7.- El alabeo que quedó en segundo lugar fue el encorvado (64.28% de mejoría)
- 8.- Para el encorvado se puede obtener una ganancia de \$693.58 (seiscientos noventa y tres pesos con cincuenta y ocho centavos) por  $m^3$  y \$1.63 (un peso con sesenta y tres centavos) por pt.
- 9.- El alabeo que menos se mejoró fue la torcedura (25.00% de mejoría).
- 10.- Para la torcedura se puede obtener una ganancia de \$269.75 (doscientos sesenta y nueve pesos con setenta y cinco centavos) por  $m^3$  y \$0.63 (sesenta y tres centavos) por pt.
- 11.- Las pérdidas económicas en la industria maderera se reducen.

## 8.- RECOMENDACIONES

- 1.- El proceso se llevó a cabo con agua, y esto nos da resultados favorables, pero este proceso se podría realizar con otras sustancias hidrosolubles tales como: sales CCA, o sales de boro para observar las diferencias entre estas y así determinar cual es la mejor para el proceso de enderezamiento de vigas, tomando en cuenta que estas incrementarían los costos del tratamiento pero también alargarían la vida útil de la madera.
- 2.- Es necesario para la realización de estas pruebas, seleccionar las vigas con las medidas más uniformes para obtener resultados más precisos.
- 3.- Con los parámetros y la metodología seguida en este trabajo podemos recomendar la rehidratación de las células con presión y vacío para corregir alabeos de la madera.
- 4.- Es necesario hacer una variación de tiempos de sujeción y secado. Todos los tipos de alabeos se pueden mejorar todavía más porque vale la pena recordar que el sistema de sujeción (flejado) se retiró a las dos semanas y si se dejaran mas tiempo (por lo menos unas 4 semanas), se obtendrían mejores resultados. El óptimo resultado se obtendría cuando la madera obtuviera su Contenido de Humedad en Equilibrio y entonces se retirara el sistema de sujeción.
- 5.- En los patios de almacenamiento y recepción de madera aserrada, es necesario que cuando llegue madera, la almacenen bajo sombra, con buena ventilación y con separadores de la misma medida y distribuidos adecuadamente para evitar que se presenten estos alabeos.
- 6.- Lo mencionado en el punto 5 también aplica para las piezas rehidratadas.
- 7.- El flejado debe ser uniformemente distribuido.

## 9.- BIBLIOGRAFÍA

- ❖ ABURTO G., G. 2006. Impregnación de la madera de mango (*Mangifera indica* L.) con sales CCA y sales de boro por los métodos de inmersión y célula llena. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México. 72 pp.
- ❖ AMBRIZ P., J. E. 2002. Diseño de una planta de impregnación de madera para preservadores hidrosolubles. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México. 129 pp.
- ❖ ARROYO P., J., 2003. Propiedades físico-mecánicas de la madera. 2da edición. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales- ULA. Mérida – Venezuela. 158 pp.
- ❖ AWWA (American Wood – Preservers` Association). 1991. AWWA book of Standards. Woodstock, MD.
- ❖ CARAVEO M, A., 1982: La madera aserrada. 1ra edición. Ediciones Chihuahua, Chihuahua. México. 270 pp.
- ❖ ÇENGEL, Y. Y BOLES, M, 1996. Termodinámica. 2da edición, tomo 2. Ediciones Mc Graw- Hill. Colombia. 866 pp.
- ❖ CRUZ DE LEON J., 2002. Secado de Madera Aserrada. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Coordinación de la Investigación Científica. UMSNH. Morelia, México. 103 pp.
- ❖ CRUZ DE LEON, J., 2006. Manual Para la conservación y Preservación de Madera Estructural en Edificios Históricos. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México. 145 pp.

- ❖ GARCIA, L. Y GUINDEO, A. 2002. La madera y su tecnología aserrado, chapa y tableros contrachapados, tableros de partículas y de fibras, tableros enlistonados, OSB y LVL, madera laminada carpintería industrializada, tecnología de corte y tecnología de la aspiración. 1ra edición. Ediciones Mundi- Prensa Madrid. 322 pp.
  
- ❖ SANCHEZ R., D. 2005. Preservación a presión comparando los métodos, célula llena (Bethell) contra célula vacía (Lowry) impregnando madera de *Pinus leiophylla* Schl. & Cham. Con sales CCA. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México. 85 pp.
  
- ❖ SANCHEZ V., T. 1991. Defectos del secado y sus causas. Tesis profesional. Escuela de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México. 69 pp.
  
- ❖ SIMPSON, T.W, 1996: Dry Kiln Operators Manual. Research Forest Products Technologist. 274 pp.
  
- ❖ VIGNOTE, S. Y JIMENEZ, F.J, 1996: Tecnología de la Madera. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación/ Secretaria General Técnica/ Centro de Publicaciones. Madrid.602 pp.
  
- ❖ VIGNOTE, S. Y MARTINEZ, I, 2006. Tecnología de la madera. Ediciones Mundi- Prensa Madrid. 678 pp.

## REFERENCIAS DE INTERNET.

- ❖ Báez, A. Y Villafaña A, 2001. Taller de intercambio de experiencias en la situación tarifaria del Organismo Operador por el cobro del servicio de agua Potable. [Internet]. Disponible en <<http://seia.guanajuato.gob.mx/panel/document/phpver.php?Id=1983>>. [consulta; Agosto 20, 2008].
  
- ❖ Londoño A., A. S/F. Defectos en la madera. [Internet]. Universidad de Tolima. Disponible en <[http://www.almamater.edu.co/Memorias.PDF/3.Defectos.de.Madera\\_Alberto.Londono\\_UT.pdf](http://www.almamater.edu.co/Memorias.PDF/3.Defectos.de.Madera_Alberto.Londono_UT.pdf)>. [consulta; Julio 28, 2008].
  
- ❖ Pinillos C, E. S/F; Doblado de la madera [Internet]. Departamento de productos forestales. Instituto de ecología Ac. Veracruz México. Disponible en <<http://www.mexicandesign.com/revista/cueto.htm>>. [consulta; Abril 11, 2008].