

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONOMICAS

“REDUCCIÓN DE DEFECTOS POR USO DE PESO SOBRE LOS CASTILLOS
EN EL SECADO DE MADERA DE HULE (*Hevea brasiliensis M*)”



GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2004
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS

“REDUCCIÓN DE DEFECTOS POR USO DE PESO SOBRE LOS CASTILLOS
EN EL SECADO DE MADERA DE HULE (*Hevea Brasiliensis M*)”

TESIS
PRESENTADA A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE
AGRONOMIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

POR

RAMIRO PAZOS AVALOS

En el acto de investidura como

INGENIERO AGRÓNOMO

EN

RECURSOS NARURALES RENOVABLES

EN EL GRADO ACADEMICO DE

LICENCIADO

Guatemala, Septiembre de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

RECTOR MAGNIFICO
Dr. Mv. LUIS ALFONSO LEAL MONTERROSO

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA

DECANO	Ing. Agr. Ph. D. ARIEL ABDERRAMAN ORTIZ LOPEZ
VOCAL I	Ing. Agr. ALFREDO ITZEP MANUEL
VOCAL II	Ing. Agr. MANUEL DE JESÚS MARTINEZ OVALLE
VOCAL III	Ing. Agr. ERBERTO RAUL ALFARO ORTIZ
VOCAL IV	Mep. JUVENCIO CHOM CANIL
VOCAL V	Mep. BAYRON GIOVANY GONZALEZ CHAVAJAY
SECRETARIO	Ing. Agr. PEDRO PELAEZ REYES

Guatemala, Septiembre de 2004.

Honorable Junta Directiva
Honorable Tribunal Examinador
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala

Distinguidos miembros:

De conformidad con lo que establece la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos e Guatemala tengo el Honor de someter a consideración el trabajo de tesis titulado

“REDUCCIÓN DE DEFECTOS POR USO DE PESO SOBRE LOS CASTILLOS EN EL SECADO
DE MADERA DE HULE (*Hevea brasiliensis M*)”

presentado como requisito previo a optar al título de Ingeniero Agrónomo en Recursos Naturales Renovables en el grado académico de Licenciado,

Esperando que el presente trabajo merezca su aprobación.

Atentamente:

Ramiro Pazos Avalos

DEDICO ESTE LOGRO A:

DIOS TODO PODEROSO: Fuente de sabiduría infinita.

LA SANTÍSIMA VIRGEN MARÍA: Madre Divina que ha intercedido por éste hijo suyo.

MI FAMILIA: Por su apoyo y amor. Que esto sea una recompensa a los esfuerzos y sacrificios hechos para la consecución esta meta.

MI NOVIA: Por el amor incondicional que me has regalado.

MIS AMIGOS: Por compartir mis alegrías y mis tristezas.

MIS COMPAÑEROS: Por hacer que mi paso por esta casa de estudios fuera algo realmente agradable.

AGRADECIMIENTO A:

Interforest Ltd. Por abrirme las puertas para la realización de este estudio.

Los señores Giuseppe Dal Bosco y Robert Davies, por la confianza, amistad y buena voluntad manifiesta en todo momento.

Sr. José Mario Saravia M. Asesor de Tesis y supervisor de Eps por su amistad, consejos y valioso aporte a la realización de ésta investigación.

El personal de Procinsa, por las atenciones brindadas durante la realización de la fase de campo de este experimento.

Sr. Gilberto López, por compartir sus conocimientos y colaborar desinteresadamente en la fase experimental de este estudio.

Todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron a que pudiera alcanzar esta meta.

Guatemala, Septiembre de 2004.

INDICE GENERAL

	Página
Índice de cuadros	ix
Índice de figuras	ix
Resumen	x
1. Introducción	01
2. Planteamiento del problema	03
3. Marco teórico	03
3.1 Marco Conceptual	03
3.1.1 Anatomía de la Madera	03
3.1.1.1 Clasificación de las especies leñosas	03
3.1.1.2 Planos de corte de la madera	04
3.1.1.3 Elementos que componen el tallo	05
3.1.1.4 Composición anatómica del tallo	07
3.1.2 Anatomía de Angiospermas	07
3.1.2.1 Elementos vasculares	07
3.1.2.2 Distribución de los vasos	08
3.1.2.3 Parénquima radial	09
3.1.2.4 Parénquima axial o longitudinal	09
3.1.2.5 Fibras	10
3.1.2.6 Vías en las que se mueve el agua en las Angiospermas	10
3.1.3 Estructura y características de la madera de Hule	11
3.1.3.1 Anatomía de la madera de Hule	11
3.1.3.2 Propiedades físicas y mecánicas de la madera de Hule	12
3.1.4 Relación entre madera y humedad	13
3.1.4.1 Formas en las que la madera pierde humedad	15
3.1.5 Esfuerzos de la madera	16
3.1.6 Defectos de secado	16
3.1.6.1 Agrietamientos	16
3.1.6.2 Colapso	16
3.1.6.3 Torceduras	17
3.1.6.4 Apanalado (Honeycomb)	17
3.1.7 Diferentes medios utilizados en el secado de la madera	18
3.1.7.1 Secado al aire	18
3.1.7.2 Pre secado	19
3.1.7.3 Secado en horno o en estufa	19
3.1.7.3.1 Temperatura	20
3.1.7.3.2 Humedad Relativa	21
3.1.7.3.3 Velocidad del aire (movimiento del aire)	22
3.1.7.3.4 Selección de la Madera	23

3.1.7.3.5 Apilado y Cargado del horno	23
3.1.7.3.6 Separadores	23
3.1.7.3.7 Sobresalido de extremos	23
3.1.7.3.8 Clasificación por largos	24
3.1.7.3.9 Soportes y Contrapesos de la Pila	24
3.1.7.3.10 Muestras para el control del Secado	25
3.1.7.3.11 Operación del horno	25
3.1.7.3.11.1 Calentamiento e Inicio de la operación	25
3.1.7.3.11.2 Tratamientos de Igualación o equilibrado	26
3.1.7.3.11.3 Acondicionamiento	26
3.1.7.3.11.4 Fin del proceso de secado y descarga del horno	27
3.1.7.4 Secado artificial de la madera de Hule	27
3.1.7.4.1 Preparación de la madera y apilado	28
3.1.7.4.2 Secado en horno convencional	28
3.1.7.4.2.1 Etapa de presecado	28
3.1.7.4.2.2 Inicio del programa de secado	29
3.1.7.4.2.3 Tratamiento para evitar combados o curvado	29
3.1.7.4.2.4 Endurecimiento superficial	29
3.1.7.4.2.5 Tratamiento de Igualado y Acondicionado	30
3.1.7.4.3 Defectos del secado de madera de Hule	30
3.1.7.4.4 Movimiento Relativo y contracción	30
3.2 Marco Referencial	31
3.2.1 Descripción de la zona de ubicación de Procinsa	31
3.2.1.1 Fisiografía	31
3.2.1.2 Ubicación	31
3.2.1.3 Límites	32
3.2.1.4 Relieve e Hidrografía	32
3.2.1.5 Clima	32
3.2.1.6 Suelos	32
3.2.1.7 Accesibilidad	33
3.2.1.8 Uso Actual de la Tierra	33
3.2.1.9 Fauna Silvestre	33
3.2.1.10 Demografía	33
4. Objetivos	34
4.1 General	34
4.2 Específicos	34
5. Hipótesis	34
6. Metodología	35
6.1 Material experimental	35
6.1.2 Tratamiento del material experimental	35
6.1.2.1 Aserrío primario	35
6.1.2.2 Clasificación de piezas	36
6.1.2.3 Presurizado o impregnación	36

6.1.2.4 Presecado	36
6.2 Instalaciones y equipo	37
6.3 Armado de las unidades experimentales	37
6.4 Control de las condiciones para el secado dentro del horno	38
6.5 Desarrollo de experimento	39
6.5.1 Procesos	39
6.5.2 Toma de datos	39
6.5.2.1 Cuantificación de pérdidas por defectos de secado	39
6.6 Análisis de la información	39
6.6.1 Diseño experimental	39
6.6.2 Variables	40
6.6.3 Análisis de sensibilidad	40
6.6.3.1 Supuestos	41
6.6.3.1.1 Supuestos referentes a volumetría	41
6.6.3.1.2 Supuestos referentes al tiempo de operación de los hornos	41
6.6.3.1.3 Supuestos referentes al tratamiento al que no se aplicó peso	41
6.6.3.1.4 Supuestos referentes al tratamiento al que se aplicó peso	42
6.6.3.1.5 Supuestos referentes a la aplicación de peso utilizando losas de concreto	42
6.6.3.1.6 Supuestos referentes a costos de operación	43
6.6.3.2 Procesamiento de datos y presentación	43
7. Resultados	44
7.1 Tipos de defectos ocurridos durante el proceso de secado	44
7.1.1 Tablas que presentaron encorvamiento	44
7.1.2 Tablas que presentaron rajaduras	46
7.1.3 Tablas que presentaron combaduras	47
7.1.4 Tablas que presentaron revirados	49
7.2 Análisis de sensibilidad	51
7.2.1 Primer escenario de análisis	53
7.2.2 Segundo escenario de análisis	53
7.2.3 Tercer escenario de análisis	54
7.2.4 Cuadro escenario de análisis	55
7.2.5 Quinto escenario de análisis	55
7.3 Síntesis de resultados	56
8. Conclusiones	58
9. Recomendaciones	59
10. Bibliografía	60

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1	Características de las contracciones de la madera de árbol de Hule	31
Cuadro 2	Incidencia de tablas con encorvamiento para cada corrida	44
Cuadro 3	Incidencia de tablas con rajaduras para cada corrida	46
Cuadro 4	Incidencia de tablas con combaduras para cada corrida	48
Cuadro 5	Incidencia de tablas con revirados para cada corrida	50
Cuadro 6	Supuestos para análisis de sensibilidad	52
Cuadro 7	Resultados obtenidos al asumir pérdidas del 5.2% y 8.4%	53
Cuadro 8	Resultados obtenidos al asumir pérdidas del 5.6% y 9.6%	54
Cuadro 9	Resultados obtenidos al asumir pérdidas del 5.6% y 7.4%	54
Cuadro 10	Resultados obtenidos al asumir pérdidas del 4.4% y 9.6%	55
Cuadro 11	Resultados obtenidos al asumir pérdidas del 4.4% y 7.5%	55
Cuadro 12	Resumen de resultados obtenidos durante el proceso	57

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Cortes en la madera	04
Figura 2	Partes del tronco	05
Figura 3	Agua en la madera	14
Figura 4	Defectos de la madera	18
Figura 5	Vista de una tarima de madera apilada	24
Figura 6	Método de corte de una y dos muestras de secado en una tabla	25
Figura 7	Pruebas de tensión	27
Figura 8	Construcción de las tarimas de madera	38
Figura 9	Volumen promedio de incidencia de defectos por encorvamiento	45
Figura 10	Volumen promedio de incidencia de defectos por rajaduras	47
Figura 11	Volumen promedio de incidencia de defectos por combaduras	49
Figura 12	Volumen promedio de incidencia de defectos por revirados	51
Figura 13	Volumen de tablas defectuosas para cada pareja utilizada en el proceso	56

REDUCCION D E DEFECTOS POR USO DE PESO SOBRE LOS CASTILLOS EN EL SECADO DE MADERA DE HULE (*Hevea brasiliensis M.*)

USE OF WEIGHT OVER THE CASTLES FOR DEFECT REDUCTIONS IN THE LUMBER SEASONING OF RUBBER WOOD (*Hevea brasiliensis M.*)

RESUMEN

El secado es una fase importante en la transformación industrial de la madera, puesto que en este proceso siempre hay un porcentaje de madera que se pierde por defectos, lo que hace necesario probar métodos que permitan reducir las pérdidas y aumentar las ganancias. Esta investigación persigue cuantificar el volumen de pérdida que se obtiene en una industria nacional que durante el proceso de secado, utiliza castillos de madera sin ningún tipo de peso en la parte superior de los mismos, contra la metodología que propone poner peso sobre los castillos para restringir el movimiento de las fibras, y así determinar si existen diferencias significativas con base estadística y generar un modelo de sensibilidad económica que sirva de herramienta para validar la utilización del método en cuestión. Para obtener los resultados deseados, se construyeron tres losas de concreto de 1m de ancho por 2.44 m de largo, las cuales pudieran aplicar un peso de 250 kg/m². Para analizar los datos que se obtuvieron de las cuatro corridas del experimento se utilizó una prueba de T de student de diferencias pareadas con la finalidad de comparar los tratamientos. El análisis de sensibilidad se basó en supuestos referentes a volumetría de ingreso a los hornos, el tiempo que lleva secar una carga de madera, las pérdidas de volumen calculadas para el tratamiento al cual no se aplicó peso, la cantidad de losas para aplicar peso, las pérdidas de volumen calculadas para el tratamiento al cual se aplicó peso y los costos calculados para llevar a cabo la operación de los hornos. Los resultados reflejaron que la relación entre el uso de peso sobre los castillos de madera de hule y la reducción de defectos es directa, ya que la fuerza extra aplicada por las losas de concreto mantiene la geometría de las piezas procesadas. Por otra parte, los resultados evidenciaron con un 95% de confianza la reducción en la incidencia de defectos durante el proceso de secado de madera. El análisis de sensibilidad revela que los costos de construcción de las losas se cubren en el primer año de operaciones, lo cual evidencia la factibilidad de aplicar peso en los castillos durante el proceso de secado.

1. INTRODUCCIÓN

El establecimiento de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis M*) en Guatemala se inició aproximadamente en la década de 1940, debido a la demanda mundial de látex y aprovechando las características climáticas de algunas regiones del país, como la Costa Sur, las cuales eran idóneas para el crecimiento de dicha especie.

La producción comercial de látex inicia aproximadamente a los 6 años de edad y si se pica correctamente, puede mantener un buen nivel de producción hasta los 25 o 30 años. Después de éste tiempo, la producción decrece y el árbol debe ser reemplazado para mantener una producción constante.

La madera de los árboles tumbados se utilizaba en nuestro país como leña. Sin embargo, la madera de hule no tiene buenas características para este uso, lo cual aunado a la susceptibilidad que tiene de ser atacada por insectos y hongos, hacía pensar que la utilización de éstas trozas era muy limitada y con poco o ningún valor comercial.

A finales de la década de 1970 en países como Malasia e Indonesia se empezó a utilizar la madera de hule en forma industrial a raíz de las investigaciones hechas por científicos ingleses, quienes reportaron un vasto potencial de uso para la fabricación de muebles, paredes, pisos, etc.

Debido a la necesidad de nuevas alternativas para el abastecimiento de madera en las industrias nacionales y sabiendo el éxito obtenido por los países asiáticos en lo que respecta al procesamiento de la madera de hule, surge en Guatemala la inquietud de aprovechar la misma, la cual proviene de los árboles que han dejado de producir látex en las plantaciones.

El procesamiento industrial de la madera de hule en Guatemala tiene como principal protagonista a la empresa denominada Procesadora Industrial de Madera S.A., la cual es la mayor exportadora de productos elaborados de madera de hule en nuestro país.

La transformación de la madera comienza con el aserrado, es decir, obtener tabloncillos de las trozas almacenadas en los patios de acopio. Dichas tablas se clasifican según sus

características de largo y grosor, y se apilan para someterlas a impregnación. Después de que la madera ha sido tratada, debe secarse, para poder iniciar entonces, la elaboración de los productos.

El secado de la madera de hule se hace en hornos de secado convencional, en los cuales se lleva un estricto control de los programas de secado. El tiempo requerido para llevar la madera a un contenido de humedad del 8% es de aproximadamente 8 a 10 días, obteniendo según López (5) alrededor de un 96% de madera libre de defectos de secado.

En los países asiáticos, en donde la investigación de métodos para hacer más eficiente el procesamiento de la madera de hule se recomienda poner pesos equivalentes a 250 kg/m², sobre los castillos de la madera que se seca al horno, con el fin de disminuir los defectos que puedan ocurrir durante la liberación de las tensiones durante el proceso de secado.

En el presente trabajo de investigación se pretende comparar la cantidad de madera que se pierde sin la utilización de peso sobre los castillos de secado, contra la cantidad de madera que se perderá utilizando peso sobre los castillos de secado. Con los datos que se obtengan, se pretende tener argumento para decidir sobre el uso o no de peso en los castillos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El secado de madera en horno se ha convertido en una práctica indispensable para garantizar la calidad y durabilidad de la madera procesada, sin embargo, si este proceso no se realiza adecuadamente, se puede obtener una pérdida considerable en volumen, ocasionada principalmente por la aparición de defectos en la madera durante el secado. En Procinsa se seca un promedio de 4,800 m³ de madera de hule por año, de los cuales se pierde aproximadamente el 4% (Q 50,000) según la información proporcionada por López (5). En algunos países asiáticos se han probado metodologías tendientes a reducir la incidencia de defectos en la madera durante el proceso de secado, siendo una de ellas, el uso de losas de concreto ubicadas en la parte superior de los castillos las cuales aplican una fuerza aproximada de 250 kg/m². A pesar de lo anterior, en la industria en referencia no se utiliza ninguna práctica tendiente a optimizar el proceso de secado, por lo que las pérdidas de madera no tienden a reducirse.

3. MARCO TEORICO

3.1 Marco Conceptual

3.1.1 Anatomía de la madera

Para poder comprender los procesos por los cuales la madera gana o pierde agua, es importante conocer los diferentes elementos que constituyen el tronco leñoso de la planta, por lo que el conocimiento de la anatomía de la madera es indispensable.

Para Silva (10), la anatomía de la madera es la rama de la botánica que se encarga del estudio de los arreglos estructurales de los diversos elementos que constituyen el tronco o leño de las especies arbóreas, mientras que la anatomía general se encarga del estudio de la constitución o la organización del leño.

3.1.1.1 Clasificación de las especies leñosas

La gran mayoría de especies arbóreas se encuentran clasificadas botánicamente en dos grandes grupos, los cuales son:

- A. Gimnospermas
- B. Angiospermas

Las gimnospermas son llamadas comúnmente coníferas, y en el ámbito internacional son también conocidas como “softwoods”. Las angiospermas son también llamadas latifoliadas o de hoja ancha, y en el ámbito internacional se le conocen como “hardwoods” (10).

3.1.1.2. Planos de corte de la madera

Para poder estudiar las características anatómicas de la madera hay que tomar en cuenta que la madera es un material tridimensional, y que en nuestro caso, el tronco es la parte más importante del vegetal.

Lo anterior hace necesario que se observen varios planos de corte en la madera, los cuales son los siguientes y se pueden observar en la figura 1:

- A. Corte transversal
- B. Corte longitudinal – radial
- C. Corte longitudinal – tangencial

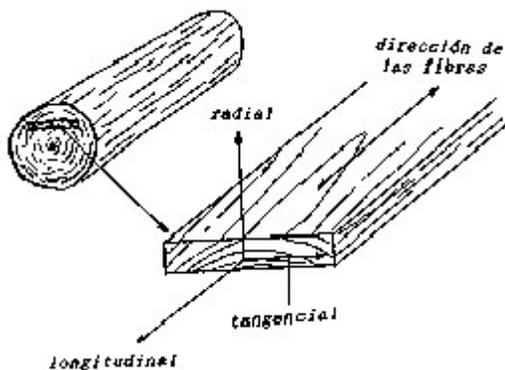


Figura 1 Cortes en la madera. Fuente: Gutierrez S. 1972.

El corte transversal se hace perpendicular al eje mayor del árbol (eje vertical), y es aquí en donde se pueden observar con cierta facilidad la disposición de los tejidos del árbol.

El corte longitudinal – tangencial, es aquel que se hace paralelo al eje vertical del árbol, dicho de otra manera, es paralelo a la médula del tronco del árbol.

El corte longitudinal – radial, también se hace paralelo al eje vertical del árbol, pero a diferencia del tangencial, éste pasa por el centro del tronco (médula) y tiene un ángulo perpendicular con respecto a los anillos de crecimiento (10).

3.1.1.3 Elementos que componen el tallo

Visto en un plano transversal, se pueden observar en el tronco varios elementos, los cuales aparecen en la figura 2 empezando desde el centro:

- A. Médula
- B. Duramen
- C. Albura
- D. Corteza

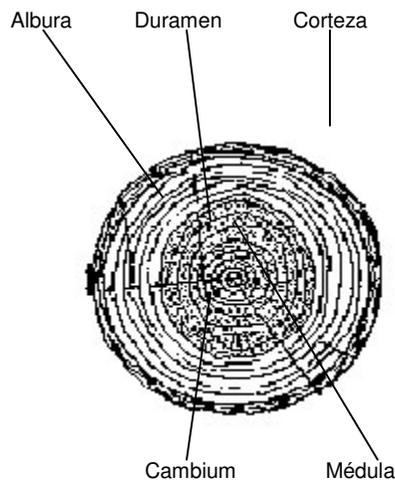


Figura 2 Partes del tronco Fuente: Gutierrez S. 1972.

Es importante señalar que entre la albura y la corteza se encuentra una zona visible únicamente al microscopio conocida como “cambium”, el cual está constituido de células meristemáticas que son las responsables de la formación de las células de xilema y de floema.

La médula está formada de tejido parenquimático, y básicamente almacena sustancias de reserva. Puede ser esponjosa, continua o seccionada. Uno de los aspectos importantes a considerar es que la madera cerca de la médula es más débil, debido a la menor densidad que tiene, por lo que se dice que una troza con médula es de menor calidad (10).

Cuando un árbol está en etapas tempranas de crecimiento, los tejidos que rodean la médula son tejidos de conducción, los cuales son responsables de conducir agua y sales minerales. En esta fase, se dice que el árbol está compuesto únicamente por albura (madera juvenil). Después de cierto tiempo, ocurre la muerte del protoplasma de los tejidos de conducción que se encuentran más al centro del tronco, dando origen a lo que se conoce como duramen.

Conforme el árbol va creciendo, las células que están más al centro del tronco van muriendo, formando así, nuevas capas de duramen.

La corteza está constituida principalmente por dos capas de células, una interna de tejido vivo, la cual tiene función de conducción descendente, y otra capa externa, que son células muertas, las cuales tienen la función de proteger a los árboles del ataque de los microorganismos, insectos o daños mecánicos.

En las regiones en donde se marcan bien las estaciones de crecimiento, ocurre en los árboles la formación de anillos de crecimiento, los cuales están compuestos de capas de células alternas y de diferentes densidades. El crecimiento del anillo comienza en la primavera, hasta uno o dos meses antes del otoño. Durante este período una nueva capa de células se ha formado entre el tronco y la corteza, la cual recibe el nombre de leño temprano o “Spring wood”. La madera que no se forma en el período de crecimiento recibe el nombre de leño tardío o “Summer wood” (10).

Estos anillos de crecimiento están siempre presentes en las coníferas, y en un corte transversal se visualizan como anillos concéntricos, de color claro y de color oscuro. Los anillos de

leño temprano tienen un color más claro debido a que poseen una pared más delgada y un lumen más grueso. En consecuencia, la madera de leño temprano es menos densa que la de leño tardío (10).

3.1.1.4 Composición anatómica del tallo

El tallo de las coníferas y de las latifoliadas difiere principalmente en la complejidad de los elementos celulares “vasculares” que los conforman; esto se debe a que la composición de las coníferas es bastante simple por tener en su gran mayoría sólo dos tipos de células: traqueidas y parénquima. En el caso de las latifoliadas su composición es más compleja y tiene varios tipos de células como las traqueidas, Fibras, Vasos, Parénquima, entre otros.

3.1.2 Anatomía de Angiospermas

A diferencia de las Gimnospermas, las angiospermas poseen una estructura más compleja debido a que poseen diferentes tipos de células. Dichas células son las siguientes:

- A. Elementos vasculares
- B. Células de parénquima longitudinal o axial
- C. Fibras
- D. Células de parénquima radial
- E. Células epiteliales de los canales secretores.

3.1.2.1 Elementos vasculares

Los elementos vasculares llamados también vasos, se encuentran en dirección longitudinal o axial, y cuando son vistos en un plano transversal se denominan poros. Se comunican longitudinalmente por medio de perforaciones en los extremos de las células, llamadas placas de perforación. Estas placas pueden ser simples, cuando hay una sola perforación, o pueden ser multiperforada, cuando hay más de una perforación (10).

Los elementos de los vasos también se comunican con otros elementos adyacentes por medio de puntuaciones las cuales varían dependiendo el contacto con otras células. Por ejemplo,

si un vaso está en contacto con una fibrotraqueida, la puntuación es areolada, mientras que si está en contacto con una célula parenquimática, la puntuación será semi-areolada (10).

Cuando la madera se observa en un corte transversal, los vasos o los poros se pueden encontrar rodeados por otros tipos de células, formando un vaso o poro solitario, el cual puede estar junto a más poros solitarios, los cuales pueden formar cadenas radiales o tangenciales (10).

3.1.2.2 Distribución de los vasos

Los vasos se pueden distribuir en tres formas las cuales son:

- A. En anillos
- B. Difusa
- C. Semi-difusa

La distribución en anillos se presenta cuando se dan concentraciones de poros en el leño temprano, los cuales tienen diámetros mayores que en el leño tardío. Este tipo de distribución aparece generalmente en maderas de clima frío (10).

La distribución difusa se da cuando los poros no están distribuidos de forma regular en la madera. Este tipo de distribución se da en la mayoría de maderas de climas tropicales (10).

La distribución semi-difusa, se da cuando los poros están distribuidos de modo intermedio entre porosidades en anillos y difusas (10).

Los poros pueden tener o no obstrucciones por ciertos materiales como por ejemplo oleo-resinas, materiales calcáreos y tilas (10).

Las tilas son semejantes a bolsas, las cuales entran a los vasos a través de las puntuaciones de las células parenquimáticas adyacentes. Es muy común encontrar tilas en los vasos que forman el duramen de algunas especies, llegando en algunos casos a obstruir total o parcialmente el lumen celular. También es posible que las gomas u otros depósitos en el lumen de

las células puedan impedir o disminuir grandemente la permeabilidad en el duramente de muchas maderas de angiospermas (10).

3.1.2.3 Parénquima radial

Este tipo de células es el que forma los radios en las angiospermas, y su orientación es horizontal. Tiene como función el transporte de sustancias nutritivas o savia elaborada para la parte funcional del tronco, así como también almacena sustancias nutritivas que le son útiles a la planta. El largo y alto de las células varía dependiendo las especies, y a diferencia de las gimnospermas, los radios pueden llegar a ser uni, bi, tri, tetraseriados (10).

3.1.2.4 Parénquima axial o longitudinal

Se encuentra en sentido vertical o en el eje mayor del tallo, y su función principal es de procesamiento y almacenamiento de sustancias nutritivas para el árbol. Visto en un corte transversal, las células de parénquima son más claras que el color de las fibras que constituyen el tronco; es importante mencionar que el arreglo presentado por las células parenquimáticas es de gran importancia para la identificación de las maderas (10).

Este tipo de parénquima es más abundante en las latifoliadas que en las coníferas y se puede clasificar como seriado, o tabicado y fusiforme o epitelial. También dependiendo su relación espacial se puede clasificar como:

- A. Apotraqueal, el cual no está relacionado con los vasos.
- B. Paratraqueal, el cual está relacionado con los vasos.

3.1.2.5 Fibras

Se identifican con el nombre de fibras, a todas las células largas y delgadas que constituyen tanto al floema como al xilema que no es vascular (vasos) o tejido parenquimático (10).

En las Angiospermas se pueden identificar distintos tipos de fibras, los cuales son:

- A. Fibra libriforme
- B. Fibrotraqueidas
- C. Fibra gelatinosa
- D. Fibra septada

De las anteriores, la fibra libriforme es el tipo de fibra más abundante y representativa de las Angiospermas, y en cuanto a forma, posee extremos afilados, con paredes de espesura variable y con puntuaciones simples (10).

3.1.2.6 Vías en las que se mueve el agua en las Angiospermas

Los vasos pueden constituir aproximadamente el 5-60% de volumen de madera de las Angiospermas, y son la vía longitudinal que presenta menor resistencia al paso de líquido debido a que las perforaciones de las placas de las células son grandes cuando son simples y son bastante finas cuando son multiperforadas, por lo tanto, la mayor cantidad de agua que se mueve longitudinalmente pasa por los vasos.

El paso de líquido entre los vasos, traqueidas y fibrotraqueidas se da a través de las puntuaciones areoladas, entre las células parenquimáticas y fibras libriformes se da a través de las puntuaciones simples, y entre los vasos, traqueidas y fibrotraqueidas y demás células se da por las puntuaciones semi-areoladas. Es importante mencionar que en las Angiospermas no existe torus y que por lo tanto no se da obstrucción por aspiración del torus en las puntuaciones. El movimiento de agua en las demás células vasculares es mucho menor que en los vasos, pero tiene la misma tendencia que en las Gimnospermas (10).

3.1.3 Estructura y características de la madera de Hule (*Hevea brasiliensis*)

Los árboles de hule alcanzan su mayor producción de látex alrededor de los 25 años de edad, después de este tiempo, su producción de látex empieza a decaer y ya no es rentable tenerlos plantados. Sin embargo, su madera se puede procesar industrialmente para diferentes productos.

Por lo anterior es importante el conocimiento de las características físicas y anatómicas de la madera para poder optimizar los procesos productivos, con el fin de reducir la mayor cantidad de pérdida y obtener mejores márgenes económicos.

3.1.3.1 Anatomía de la madera de Hule

La textura de la madera es moderadamente fibrosa, quebradiza o granular, presentando un grano que puede variar desde recto hasta ligeramente entrelazado (4).

El color es amarillo claro o crema cuando la madera está verde, pero toma un color café claro durante el secado. (10) La madera se clasifica como suave a moderadamente dura, teniendo una densidad de 0.51g/cc a un 12% de contenido de humedad (11).

La distribución de los poros vistos en un plano transversal es difusa, presentando poros solitarios o veces en grupos radiales que pueden ir de 2 a 4 y más comúnmente de 5 a 8 (4). Los poros son de forma ovalada o redonda con un diámetro tangencial que oscila entre 150 a 250 μm , siendo el promedio 200 μm . (4). Los poros tienen perforaciones simples circulares. La abertura y los bordes de las puntuaciones intra-vasales que frecuentemente son alargadas y casi escaleriformes opuestas tienen entre 21 y 25 μm de diámetro. Es importante mencionar que es muy común encontrar los vasos con tilas. (4). Los tejidos vasculares "vasos", son conspicuos en los planos radiales y tangenciales (11).

Hay fibras de 1.20 mm a 1.65 mm de largo, no septadas, con puntuaciones simples o con orillas principalmente confinadas a las paredes radiales (4). El parénquima se puede observar a simple vista, apareciendo en forma de líneas con espacios estrechos e irregulares, los cuales al cruzarse con los rayos forman una especie de "red". (11). El tipo de parénquima presente puede ser tanto Apotraqueal como Paratraqueal (4).

Los rayos de la madera son moderadamente anchos, aunque son pocos y muy dispersos. Las puntuaciones en las paredes de los rayos son semi-areoladas con diámetros pequeños (10). Los rayos tienen entre 7 y 10mm de largo con un ancho de 2 a 3 células, sin embargo se pueden encontrar rayos uniseriados con un diámetro semejante al de 4 células de ancho (4).

La formación de duramen es insignificante y al parecer no hay ninguna transición entre albura y duramen, el cual se encuentra únicamente cerca de la médula (11). Por la distribución de los poros no es posible distinguir anillos de crecimiento en la madera de hule, sin embargo la presencia de madera de tensión puede dar origen a la formación de anillos concéntricos falsos, los cuales son bastante comunes en muchos de los clones (11).

La madera de tensión puede alcanzar porcentajes desde 15 a 65% de la madera y esta distribución errática tiende a dar una apariencia lanosa a la superficie. Se supone que esta variación es responsable de algunos de los defectos más comunes que se observan durante el proceso de secado (11).

3.1.3.2 Propiedades físicas y mecánicas de la madera de Hule

La madera de Hule como cualquier otra madera, posee propiedades distintas en los diferentes planos de corte, dentro del árbol, entre árboles, entre ubicación y condiciones de crecimiento. Dicha variabilidad puede deberse al alineamiento y distribución de las células en la madera y a la presencia de materiales extraños dentro de las mismas, tales como Látex y Resinas (4).

Las propiedades anteriormente mencionadas, son tomadas en cuenta para los diferentes usos que se le pretende dar a la madera y es común que se tengan gráficos de las distintas procedencias. Es importante mencionar que las características de fuerza en estado verde no varían mucho con el contenido de humedad (11).

La madera de hule tiene una mayor resistencia a las fuerzas dinámicas en comparación con las fuerzas estáticas; se sabe que la madera de hule resiste cerca del doble de la fuerza cuando se usan cargas dinámicas que cuando se le aplican fuerzas lentamente. Sin embargo, cuando la madera está seca, la resistencia estática es mayor que cuando está húmeda, éste no es el caso de las propiedades dinámicas. Lo anterior se debe al estrés de la fibra en el límite de elasticidad y los módulos de elasticidad, por lo que el contenido de humedad puede ayudar a soportar mayores impactos (11).

3.1.4 Relación entre madera y humedad

Los árboles vivos o recién cortados contienen una considerable cantidad de humedad, la cual es llamada savia, que básicamente es agua con pequeñas cantidades de materiales en solución. La savia es necesaria para la vida y crecimiento del árbol. En un árbol vivo, el agua se pierde continuamente por transpiración lo cual es respuesta del suelo (1), pero cuando el árbol se convierte en madera aserrada, las tablas empiezan a perder humedad para poder alcanzar un equilibrio con el ambiente que la rodea.

En las Gimnospermas es común que la albura tenga más humedad que el duramen. La diferencia entre el contenido de humedad en estado verde entre la albura y duramen es mucho menor en las Angiospermas (1).

Es importante mencionar que el agua presente en la madera existe en dos formas: la primera es llamada agua libre, y es la que se encuentra en los lúmenes o cavidades celulares de los elementos vasculares, y la segunda es la llamada agua límite o agua ligada, la cual se encuentra en el interior de las paredes celulares y es retenida por capilaridad o por la formación de puentes de hidrógeno con las terminales OH de las moléculas de celulosa presentes en la pared celular (10). En la figura 3 se observa un esquema de lo mencionado anteriormente.

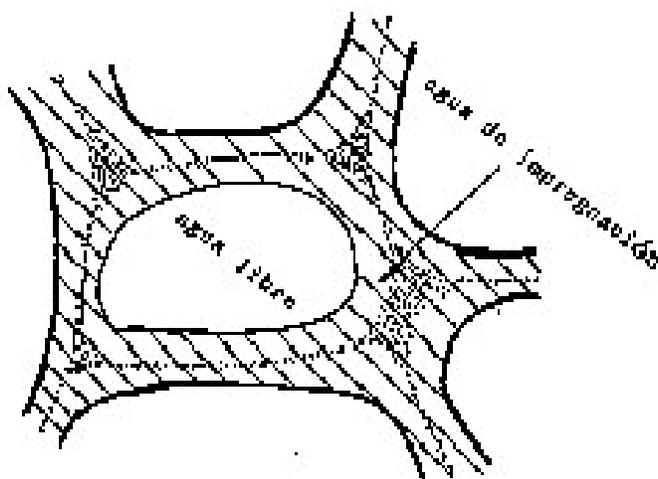


Figura 3. Agua en la madera. Fuente: Gutierrez S. 1972.

El contenido de humedad de la madera se expresa como un porcentaje de su peso seco al horno. Por ejemplo, “cuando se dice que una pieza de madera tiene un contenido de

humedad del 10%, significa que el peso del agua en esa pieza es igual al 10% del peso seco al horno de esa misma pieza” (1).

Cuando las paredes celulares están saturadas con agua, pero sus cavidades celulares o lúmenes están vacíos, se dice que la madera está al Punto de Saturación de la Fibra, el cual tiene un valor estimado de más o menos el 30% de contenido de humedad. Es importante mencionar que arriba del punto de saturación de la fibra, la madera no sufrirá cambios dimensionales significativos; como dice Brown (1): “Esto es así debido a que el agua libre es retenida en la cavidad de la célula, justamente como el agua se puede contener en un tubo de ensayo. Poniendo agua en el tubo de ensayo o sacándola de él, de ninguna manera se cambia el tamaño del tubo”. Cuando la madera está por debajo del punto de saturación de la fibra, sí ocurrirán cambios en las dimensiones de la madera, debido a que las microfibrillas que constituyen las paredes celulares se juntarán al perder el agua que estaba entre las mismas.

La madera es un material higroscópico, y debido a esto, tiende a equilibrar su contenido de humedad con el contenido de humedad y temperatura del ambiente que la rodea. Cuando se alcanza ese equilibrio se dice que la madera ha alcanzado el contenido de humedad de equilibrio (6).

3.1.4.1 Formas en las que la madera pierde humedad

Una tabla u otra pieza de madera se seca por la evaporación de la humedad que está próxima o en la superficie de la misma. Para que se pueda dar este proceso, el contenido de humedad de la superficie debe estar por debajo del contenido de humedad de equilibrio que alcanzaría con las condiciones externas. Dicho en otras palabras, la presión de vapor de la atmósfera circundante debe ser menor que la presión de vapor que tiene la superficie de la pieza (6).

Conforme la superficie va perdiendo humedad, las moléculas de agua del interior se moverán por difusión hacia afuera, utilizando como vías las puntuaciones laterales de las células vegetales. Sin embargo, la velocidad con que el agua pasa del interior al exterior de la madera es lenta, y usualmente la superficie tiene un contenido de humedad menor que el interior de la pieza, creándose así un gradiente de humedad. Según Brown (1): “La velocidad a la cual se seca una

pieza de madera, depende principalmente de la velocidad de difusión de la humedad desde el interior hasta el exterior de la pieza”.

A pesar de lo anterior, hay otros factores que influyen la velocidad de secado de la madera aserrada, los cuales son:

- A. la temperatura
- B. la humedad relativa
- C. la circulación del aire
- D. las especies que se trabajan
- E. el tipo de madera
- F. el contenido inicial de humedad
- G. la dirección del grano
- H. el grueso o ancho de la madera

3.1.5 Esfuerzos de la madera

A medida que el proceso de secado de la madera avanza, es común encontrar tensiones o esfuerzos en la misma. Esto se debe al hecho de que la superficie exterior de la madera alcanzará más rápido el punto de saturación de la fibra, y cuando esté por debajo de éste, las fibras empezarán a contraerse. Sin embargo, cuando la superficie exterior empieza a contraerse, el interior todavía tendrá un contenido de humedad mayor al punto de saturación de la fibra, por lo que tenderá a mantener sus dimensiones, creándose entonces un choque entre la capa externa y la capa interna. Según Brown (1): “Cuando este esfuerzo se excede del límite proporcional, la madera se encuentra sujeta a esfuerzos de tensión”. El caso contrario se da, por ejemplo, cuando una pieza de madera se encuentra seca y se coloca en un ambiente con un contenido de humedad mayor al contenido de humedad de equilibrio; en ese caso las capas externas ganan humedad y tenderán a expandirse, pero el centro de la pieza no, por lo que existe un esfuerzo entre el interior y el exterior, inverso al que mencionamos anteriormente. En este caso se dice que una condición de compresión existirá en las capas exteriores de la madera (1).

3.1.6 Defectos de secado

3.1.6.1 Agrietamientos

Este tipo de defecto ocurre cuando el exterior de la pieza de madera se seca por debajo del punto de saturación de la fibra, mientras que la parte interior todavía está por encima del mismo. La madera de la parte exterior está sujeta a un esfuerzo de tensión, mientras que la madera de interior está sujeta a un esfuerzo de compresión. Si la tensión es mayor a la resistencia de las fibras, éstas tenderán a separarse formando grietas en las superficies de los planos de corte. Para las maderas resinosas Brown (1) dice que “los canales resiníferos también forman líneas de menos resistencia, en las cuales los agrietamientos y las rajaduras tienen su origen”.

3.1.6.2 Colapso

El colapso es una forma “anormal” de contracción la cual se da cuando la madera todavía no ha alcanzado el punto de saturación de la fibra. Este tipo de defecto se presenta cuando el lumen celular está saturado con agua y no contiene aire en el mismo. Conforme el agua va saliendo a través de las puntuaciones, se va creando un vacío en la cavidad celular, el cual aunado a la fuerza con que el agua está ligada a las paredes celulares, puede hacer que las paredes se junten y la madera se combe.

3.1.6.3 Torceduras

Según Viscarra (12), éste término generalmente se considera en alguno de los siguientes casos:

- A. Acanaladura o abarquillado, que es la tendencia de algunas tablas de corte plano a desarrollar una curvatura a lo ancho de la pieza.
- B. Revirado, es la distorsión en el largo de la pieza.
- C. Combadura o arqueado, cuando la curvatura se encuentra a lo largo de la cara de la tabla.
- D. Encorvadura, que es la curvatura del lado o canto de una tabla.

3.1.6.4 Apanalado (Honeycomb)

Este término se utiliza para describir ciertos defectos que se dan en el interior de la madera por efecto de las tensiones que están presentes. Comienza generalmente en las últimas

etapas del secado como resultado directo de rigurosas condiciones de secado en las primeras etapas. Son más frecuentes en las maderas que tienen rayos grandes (6).

En la figura 4 se pueden apreciar los defectos más comunes que ocurren durante el proceso de secado.

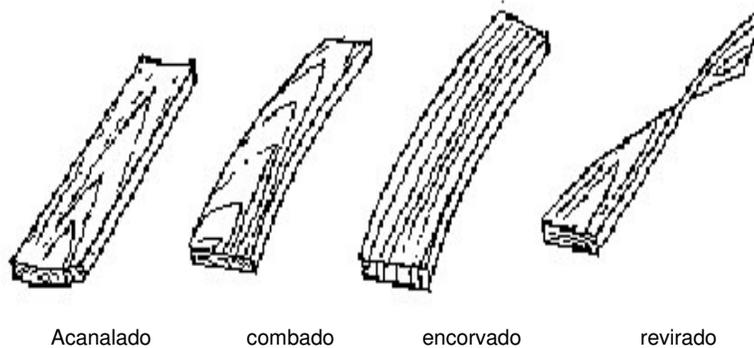


Figura 4 Defectos de la madera. Fuente: Gutierrez S. 1972.

3.1.7 Diferentes medios utilizados en el secado de la madera

3.1.7.1 Secado al aire

El secado al aire consiste en poner la madera aserrada en un patio y exponerla a las condiciones ambientales presentes en el lugar. El secado de la madera ocurrirá a menos que la humedad relativa sea excesivamente alta. El proceso de secado al aire es el más económico, pero requiere una mayor cantidad de tiempo para reducir el contenido de humedad de la madera. Además, no se puede ejercer un control ambiental a fin de reducir los defectos por secado o llevar la madera a un contenido de humedad específico.

El objetivo del secado al aire generalmente es bajar la humedad de las cargas de madera verde para luego poder secarlas en horno, en donde se llevarán a un contenido de humedad específico (6).

Hay varias formas de apilar la madera, el más eficiente es el denominado “flat piling”, porque reduce en una buena parte los defectos de secado de maderas susceptibles; sin embargo, hay otros métodos que se pueden utilizar para maderas que no son tan susceptibles a los defectos. Algunos de estos son: end racking, end piling, o crib piling (6).

3.1.7.2 Presecado

El presecado es un tipo de secado al aire acelerado, en el cual se puede llevar la madera a un contenido de humedad de 20% a 30%, más rápido y económico que en el secado al aire.

En su forma más sencilla, el presecado consiste en hacer que el aire circule a través de las pilas de madera en forma horizontal, utilizando medios artificiales como ventiladores. También se necesitan construcciones de bajo costo y algunos desvíos que obliguen que el aire pase por esas construcciones, en las cuales, estarán las pilas de madera.

Otros presecadores utilizan pequeñas cantidades de calor, y se utilizan cuando el ambiente esta frío y húmedo.

A cambio de la pequeña inversión que se realiza en el presecado, se tiene el beneficio que el proceso es de 2 a 2 ½ veces más rápido que el secado al aire (6).

3.1.7.3 Secado en horno o en estufa

Durante la operación normal de un horno de secado, es necesario tomar ciertas precauciones para poder obtener los resultados esperados. Un buen apilado de la madera, muestras suficientes para controlar el contenido de humedad a un determinado tiempo, así como

el control de las condiciones de secado, son importantes para el éxito durante el proceso de secado (11).

Un horno convencional es una cámara cerrada, equipada con ventiladores que logran que el aire circule dentro del mismo; tiene un sistema de calentamiento controlado, el cual eleva la temperatura del aire y también tiene dispositivos con los cuales se logra regular la humedad relativa dentro del horno (11).

Según Brown (1), los principales requisitos para una buena construcción de un horno para secar madera son:

- A. La estufa debe ser físicamente tan fuerte como para soportar las cargas de madera y el equipo de calentamiento y circulación sin que haya fallas mecánicas.
- B. La construcción debe ser tal que no se desintegre por la acción de los microorganismos deterioradores, ni por la corrosión.
- C. Las estufas deben ser suficientemente aislantes o las pérdidas de calor traerán como resultado costos excesivos y fallas en la operación.
- D. Las estufas deben estar construidas a prueba de fuego. Esto es particularmente importante para las estufas de aire caliente.

Dentro del horno se controlan factores como la humedad relativa, la temperatura del aire y la velocidad del viento, los cuales juegan un papel importante en la extracción de la humedad de la madera.

3.1.7.3.1 Temperatura

La temperatura del aire es otro factor importante en el proceso de secado de la madera, debido a que a mayor temperatura del aire, mayor será la tasa de transferencia de calor desde la superficie de la madera hacia el medio ambiente. En el secado artificial se distinguen dos temperaturas las cuales son:

- A. Temperatura de bulbo seco: que es la temperatura del aire que circula en el horno.
- B. Temperatura de bulbo húmedo: que es la temperatura del vapor de agua que sale de la madera húmeda (3).

El secado de la madera se desarrolla más rápidamente cuando más elevada sea la temperatura del aire y más baja la humedad relativa del aire. No obstante, se debe seguir un programa de secado en el cual se vayan aumentando poco a poco tanto la temperatura como la humedad para que no se produzcan defectos en la madera (3).

3.1.7.3.2 Humedad relativa

Este es uno de los factores más importantes en el proceso de secado de la madera, puesto que si la atmósfera que está en contacto con la madera tiene una cantidad similar de humedad, irá tomando ganando humedad de una forma lenta y el secado de la madera tomará más tiempo. Al contrario, si la atmósfera tiene un contenido de humedad bajo, podrá tomar más humedad y por lo tanto la madera se secará más rápido (1).

El contenido de humedad del aire puede expresarse como humedad absoluta y humedad relativa. La humedad absoluta hace referencia al peso del vapor de agua por unidad de volumen de aire, por ejemplo se puede expresar como 200 gr por metro cúbico. La humedad relativa se refiere a la cantidad de humedad que la atmósfera puede retener a una presión y temperatura determinada y se expresa en términos de porcentaje (1).

De acuerdo a lo mencionado en los párrafos anteriores, el lector podrá pensar que si se mantiene una atmósfera con un contenido de humedad relativa bajo, el secado de la madera se realizará más rápido. Sin embargo, el secado no solo incluye la evaporación de la humedad superficial, sino que también incluye la difusión de la humedad del centro de la madera hacia la superficie, y si se crea un gradiente demasiado amplio entre la superficie y el interior de la madera, se corre el riesgo de que aparezcan serios defectos de secado. De lo anterior surge la necesidad de poder controlar y variar la humedad relativa de la atmósfera dentro del horno (1).

Brown (1) dice que “la humedad relativa en una estufa de secado se controla de dos maneras: Cuando el aire que hay en la cámara de secado se vuelve demasiado seco, se introduce humedad adicional para elevar la humedad relativa, abriendo una espina de vapor en una línea de aspersión de agua en el interior de la estufa. Si la humedad relativa que existe en la cámara de secado es demasiado alta, se reduce el nivel deseado, eliminando con ventilador el aire cargado de humedad al exterior y reponiéndolo con aire seco.”

3.1.7.3.3 Velocidad del aire (movimiento del aire)

En el secado en hornos, el aire es el elemento utilizado para remover la humedad superficial de las tablas, de manera que para un secado continuo es necesario tener un flujo de aire adecuado a las características de la madera que se esté tratando (3).

La temperatura a la cual circula el aire está dada por el programa de secado que se esté utilizando, y es dicha temperatura la que produce la rapidez de transmisión del flujo de humedad, desde el centro de la pieza a la superficie.

Mientras se da el proceso de secado, la humedad que va saliendo de las tablas tiende a adherirse a la superficie, que puede ser una película de aire y vapor de agua, la cual se resiste a la libre evaporación. Dicha resistencia, cambia debido a la velocidad del aire y con la cantidad de humedad con la cual se evapora (3).

Con respecto a lo anterior, Gutiérrez menciona lo siguiente: “El hecho experimental importante es que en el secamiento de una pila muy angosta de madera, el aumento de la velocidad del aire produce efectos exactamente similares al caso de disponer en el aire entrante, una menor humedad con una menor velocidad del aire. En otras palabras, la resistencia a la libre evaporación puede ser vencida por dos formas alternativas para iguales razones de secamiento:

- A. Aumento de la velocidad del aire a cierta humedad relativa
- B. Contar con aire a menor humedad relativa y a menor velocidad.

Antes de empezar a operar el horno hay una serie de requisitos que se deben cumplir para que los resultados sean óptimos. Entre ellos se pueden mencionar: selección de la madera, apilado o armado de la carga para el horno, toma de muestras para el control de humedad durante el secado, la selección del horario o programa para la especie en cuestión, el control del contenido de humedad, la aplicación de tratamientos de igualado y acondicionamiento, y pruebas finales del contenido de humedad, distribución y tensiones de la madera (11).

3.1.7.3.4 Selección de la Madera

En esta etapa se trata de que las cargas que se ingresan al horno sean lo más homogéneas posibles, tomando en cuenta la especie, el espesor, el nivel de humedad, y el tipo de corte.

3.1.7.3.5 Apilado y Cargado del Horno

El encastillado o construcción de las pilas que se introducirán en el horno tiene una gran importancia, debido a que si éstas están mal armadas, ocurrirá una degradación del material en forma de rajaduras, torceduras, combaduras, etc., aún cuando los demás factores que influyen en el secado sean controlados de manera perfecta. Algunas consideraciones para encastillar la madera se mencionan a continuación (11).

3.1.7.3.6 Separadores

Los separadores o “stickers”, se utilizan para permitir que el aire fluya a través de las tablas, y deben de ser de un espesor uniforme, el cual puede ir de 1 a 1 ½ pulgadas. Los separadores deben estar exactamente alineados en dirección vertical y espaciados hasta 60 cm uno del otro. Si los separadores no están colocados adecuadamente a lo largo de la carga, pueden originarse bloqueos al paso del aire y se pueden presentar defectos en el proceso de secado. Es importante mencionar que los separadores de los extremos deben colocarse lo más cerca posible de los mismos, para evitar que se presenten agrietamientos (11).

3.1.7.3.7 Sobresalido de extremos

Debe cuidarse de que no haya piezas que sobresalgan de la carga, debido a que se curvarán bajo su propio peso al no estar soportado. Lo anterior afecta a la tabla e incluso al resto de la pila. Por otro lado, si una piezas sobresale de entre las demás, ésta tiende a secarse más rápido, por lo que pueden presentarse agrietamientos severos en los extremos (11).

3.1.7.3.8 Clasificación por largos

El caso anterior, puede evitarse si se clasifican los largos de la madera antes de armar la pila. Un ejemplo de esto lo da Viscarra diciendo: “Las tablas largas pueden ser usadas para las hileras exteriores de la carga y dos cortas, que juntas sumen el largo de la carga, una tras otra para llenar el resto de las filas, Si una combinación de dos tablas no ajusta la longitud de la carga, se traslapan entre ellas, de modo que los extremos sean cuadrados. Si el largo de esas piezas es tal que sus extremos no caben dentro del espaciamiento normal de los listones, puede ser útil un pequeño listón del ancho de la pieza para apoyarla.”

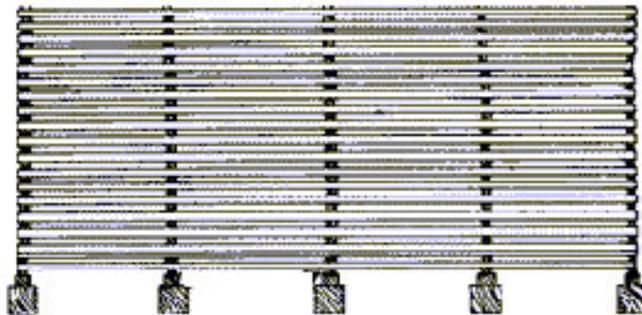


Figura 5 Vista de una tarima de madera apilada. Nótese la perfecta alineación de los separadores.
Fuente: Simpson 1991.

3.1.7.3.9 Soportes y Contrapesos de la Pila

Cuando la madera que se está trabajando es muy susceptible a alabeos, es recomendable colocar contrapesos encima de la capa superior de los castillos, los cuales pueden ser piezas de durmientes en desuso o moldes de hormigón, los cuales apliquen una presión de entre 250 y 1000 kg/m², lo cual depende de la especie que se esté trabajando, el espesor del material y el grado de reducción de la deformación. Estos contrapesos ayudan a estabilizar la carga, especialmente de las hileras superiores de madera, que es donde se presentan las torceduras (11).

3.1.7.3.10 Muestras para el control del Secado

En general las muestras se seleccionan durante el apilado de la carga y deben ser representativas de la madera más húmeda y difícil de secar y de la madera más seca o más fácil de secar. El número de muestras a medir es como mínimo de 10 a 12 muestras por cada carga de 100 m³ (11). En la figura 6 se aprecian los cortes hechos a la tabla para sacar los muestras de secado.

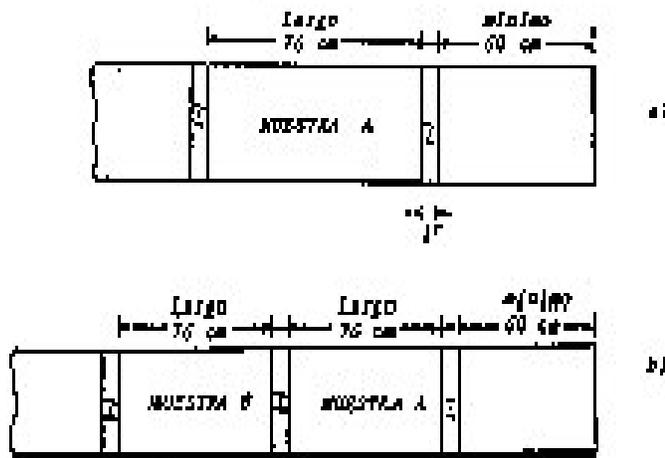


Figura 6 Método de corte de una y dos o más muestras de secado en una tabla. Fuente: Gutierrez S. 1972.

3.1.7.3.11 Operación del horno

3.1.7.3.11.1 Calentamiento e Inicio de la operación

El calentamiento tiene por objetivo elevar la temperatura del horno gradualmente hasta alcanzar la temperatura inicial del programa de secado. Esto se hace con el objeto de evitar los defectos de secado por el resecamiento excesivo de las partes externas de las tablas. Una vez alcanzada la temperatura inicial del programa de secado, éste se ejecuta normalmente, variando las condiciones de temperatura y humedad según sea requerido.

3.1.7.3.11.2 Tratamientos de Igualación o equilibrado

Es normal que mientras la madera se seca, algunas piezas se sequen más rápido que otras. Esto se debe a las diferencias que puedan presentar las piezas, como por ejemplo: si la pieza es albura o duramen o si tiene un grano recto o espiralado, entre otras cosas. La ecualización comienza incrementando la humedad en el horno, de manera que las piezas más secas ya no pierdan humedad. Al mismo tiempo, la humedad no se debe elevar mucho, o las piezas más húmedas no se continuarán secando (13).

3.1.7.3.11.3 Acondicionamiento

El acondicionamiento es el proceso en el cual se remueven los estreses creados en las primeras etapas del secado cuando la capa externa de las tablas trata de contraerse, pero la parte interna todavía húmeda impide ese movimiento. Durante el proceso de acondicionado, el exterior de la madera gana humedad de forma acelerada, por lo que tiende a expandirse, sin embargo, debido a que el centro está seco, esta expansión no tiene lugar.

El objetivo de aplicar humedad a la parte exterior es que el intento de expansión de la madera cancele el intento de contracción que se dio al principio. La madera que conserva estreses se denomina madera endurecida y presenta problemas después que se ha trabajado la madera. (Alabeos, problemas con encolados, etc.) (13). Ver figura 7.

Según Denig (2), el proceso de acondicionamiento debe ser de la siguiente manera:

- A. Comience el acondicionamiento cuando la muestra más húmeda alcance el contenido de humedad deseado (esto se alcanza al final del ecualizado).
- B. Programe el horno a fin de que se alcance el contenido de humedad deseado más 4%. Por ejemplo, si el contenido de humedad que se desea alcanzar es 7%, entonces el contenido de humedad durante el acondicionamiento debe ser de 11%.
- C. El proceso debe detenerse cuando las muestras utilizadas para la prueba de estrés salgan satisfactorias. Para madera de 1 pulgada, el proceso de acondicionado puede durar desde 6 hasta 18 horas dependiendo la especie y el tipo de horno.



Figura 7 Pruebas de tensión. La muestra de la izquierda no presenta evidencia de estrés, mientras que las dos de la derecha presentan endurecimiento superficial. Fuente: Wengert 1992.

3.1.7.3.11.3 Fin del proceso de y Descarga del horno

Una vez que se ha constatado que las tensiones se han liberado, se corta el ingreso de vapor y de calor al horno, y se mantienen las puertas cerradas hasta que la temperatura del bulbo seco esté aproximadamente unos 10° C arriba de la temperatura ambiente. En ese momento se pueden abrir las puertas del horno y descargar la madera (11).

3.1.7.4 Secado artificial de la madera de Hule

La madera de Hule, como todas las demás, debe secarse para poderla utilizar en procesos industriales secundarios como la elaboración de muebles, molduras, chapas, etc. Saravia, menciona algunos de los factores que justifican el secado de la madera:

- A. Lograr estabilidad dimensional de la madera al llevarla a un contenido de humedad adecuado a su uso final.
- B. Obtener mayor calidad y eficiencia en el acabado, encolado, pintado y pulido;
- C. Facilitar la preservación;
- D. Reducir los costos de transporte; y
- E. Mejorar la calidad superficial en procesos de elaboración.

El secado de la madera de hule se realiza generalmente en hornos convencionales, calentados por aire o por vapor de agua, en los cuales se ejecutan los programas de secado

específicos para esta especie, hasta que se alcanza un contenido de humedad de aproximadamente 8 a 10%, que es lo que la industria requiere para su procesamiento secundario.

3.1.7.4.1 Preparación de la madera y apilado

Debido a que la madera de Hule es muy susceptible al ataque de insectos y hongos, debe ser tratada inmediatamente con químicos después de aserrada y no almacenarse ni aún entarimada por tiempos prolongados, ya que se puede producir algún daño causado por la decoloración por oxidación, manchas o degradación, lo que representaría pérdidas para el aserradero (10).

El armado de las pilas, es un proceso importante, debido que un buen apilado ayudará a reducir los defectos que se dan durante el secado y no estorbará el paso del aire entre las tablas. Es recomendable que los separadores sean del mismo grosor, que estén alineados verticalmente, y que estén separados a una distancia de 45cm entre ellos. El ancho más común para las pilas es de 1.5m, pero éste variará dependiendo de las dimensiones del horno.

Lay-Thong y Heok-Choh (4), citando a Ho & Choo, dicen: “Para un control futuro del combado o arqueado, se recomienda que la madera sea apilada y enfardada con bandas metálicas o con pesos equivalentes a 240 kg/m², colocados arriba del entarimado para que la conserve siempre plana.”

3.1.7.4.2 Secado en horno convencional

3.1.7.4.2.1 Etapa de Presecado

Debido a la susceptibilidad de la madera al ataque de hongos e insectos, en algunos lugares se practica un Presecado, para evitar los efectos dichos organismos destructores. El Presecado consiste en elevar la temperatura del bulbo seco a por lo menos 70° C con un 100% de contenido de humedad durante 3 a 4 horas (10).

3.1.7.4.2.2 Inicio del programa de secado

Como se ha mencionado anteriormente, durante el programa de secado se da un flujo de humedad que va desde el centro de la tabla hacia la parte más externa de la misma, en donde dicha humedad es removida por el aire que circula en el horno y luego es liberada por las ventilas para mantener un contenido de humedad controlado. Si se quiere aumentar la velocidad de secado, se puede aumentar la temperatura de bulbo seco o también se puede bajar el contenido de humedad relativa, sin embargo, la humedad que se pierda en la superficie no debe exceder a la cantidad que llega a ésta desde el centro, pues un secamiento excesivo puede ocasionar que la madera se raje o se parta. Para evitar este problema se utiliza una programación de secado la cual se ajusta a las características propias de una determinada carga (10).

La madera de Hule se seca relativamente rápido. Por ejemplo, tablas de 1 pulgada de espesor con un contenido de humedad de 60% tarda entre 6 – 8 días en secarse hasta un 8-10% de contenido de humedad (10).

3.1.7.4.2.3 Tratamiento para evitar combados o curvados

La madera de Hule está propensa a presentar combados o arqueados que se presentan después de la ejecución del programa de secado. Para poder recuperar esas tablas se recomienda elevar la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo a aproximadamente 100° C y mantener esta condición por un período de 4 a 8 horas. Después de esto la madera se podrá mantener recta si se aplica pesos encima del entarimado como se describió previamente (10).

3.1.7.4.2.4 Endurecimiento superficial

Es común que se presente un endurecimiento superficial al final del proceso de secado de la madera de Hule, por lo que las pruebas de dentado son necesarias para ver la severidad del mismo, y así aplicar un procedimiento liberador de las tensiones. Una buena práctica para minimizar el endurecimiento es aumentar la temperatura de bulbo seco cerca de 120° C, con una humedad relativa de 90%, durante 3 o 6 horas, dependiendo de lo observado en las pruebas de dentado (10).

3.1.7.4.2.5 Tratamiento de Igualado y Acondicionado

Para la madera de Hule, se toman los mismos principios de igualado y acondicionado mencionados anteriormente. El tratamiento es importante, ya que así se evita que la madera más seca siga perdiendo humedad y que la madera más húmeda no se seque por debajo de lo requerido. Según Thong y Choh (4), para la madera del árbol de Hule cuyo grosor sea de 25mm, un período acondicionador de cerca de 24 horas es suficiente.

3.1.7.4.3 Defectos del secado de madera de Hule

Para que el proceso de secado sea eficiente, es importante armar las pilas de manera correcta, y seguir las programaciones de secado de la forma más fiel posible, de esta manera se reduce la incidencia de defectos al mínimo (10).

Sulaiman & Lim, citados por Thong y Choh (4), dicen que no hay consistencia en la proporción de madera tensada encontrada en los Arboles de Hule, que generalmente varía entre 30 y 40%. Si la presencia de tensiones en la madera es fuerte, pueden aparecer arqueamientos severos en tablas radiales y un cierto grado de arqueamiento en las tablas tangenciales.

3.1.7.4.4 Movimiento Relativo y Contracción

La contracción de la madera de Hule es pequeña, por lo que es ideal para la fabricación de molduras y muebles. La estabilidad dimensional de la madera de Hule se alcanza entre 64 y 95% de humedad relativa a 20° C.

En el cuadro 1 se observa que la madera de Hule presenta los siguientes valores:

Cuadro 1 Características de las contracciones de la madera del Arbol de Hule. Fuente: Thong, Choh. 1994

CARACTERÍSTICAS DE CONTRACCIÓN	RADIAL (%)	TANGENCIAL (%)
Contracción (verde, secado al aire) a un 15% en especímenes más pequeños,	0.90	1.90
Contracción (verde, secado en Horno Industrial a un 19% en tablas de 1 pulgada.	1.98	2.64
Contracción (verde, secado al Horno microondas para especímenes más pequeños.)	2.30	5.10
Movimiento	0.88	1.43

3.2 MARCO REFERENCIAL

3.2.1 Descripción de la zona de ubicación de Procinsa.

3.2.1.1 Fisiografía

La fisiografía del área está íntimamente relacionada con el proceso y desarrollo geológico propio de la región.

La forma de la tierra corresponde a una llanura interior de inundación formada por aluvión cuaternario. Meandros bien desarrollados, así como abandonados y meandros fósiles, caracterizan el paisaje fisiográfico en la sección baja de la región (7).

La provincia o región fisiográfica corresponde a la depresión del Motagua.

La zona de vida a Monte espinoso Subtropical.

A nivel de gran paisaje se ubica el área en el río Motagua.

El paisaje corresponde a una zona de meandros.

3.2.1.2 Ubicación

El área en la que se realizó el estudio se encuentra a 15° 2' 0'' Latitud Norte y 89° 35' 00'' Longitud Oeste, aproximadamente, cercana del río Motagua y de la carretera CA-10 en jurisdicción del municipio de Estanduela, del departamento de Zacapa Su altura sobre el nivel del mar varía alrededor de 170 metros (7).

3.2.1.3 Límites

El área limita con el río Motagua y el río Grande de Zacapa (7).

3.2.1.4 Relieve e Hidrografía

El relieve es casi plano, a excepción de las proximidades del río Motagua, donde el relieve es de ondulado a quebrado. El drenaje natural es el río Motagua, primordialmente (7).

3.2.1.5 Clima

La región está comprendida dentro de la zona de vida Monte Espinoso Subtropical, según el sistema de Holdridge, aplicado por De la Cruz (7).

En esta zona de vida, las condiciones climáticas están representadas por días claros en la mayor parte del año y una escasa precipitación anual, que generalmente se presenta durante los meses de agosto a octubre y es de 400 a 600 mm anuales. La temperatura media anual oscila entre 24° C a 26° C. La evapotranspiración potencial puede estimarse en promedio de 130% mayor a la cantidad de lluvia total anual (7).

3.2.1.6 Suelos

El suelo está comprendido en las Clases Misceláneas de Terreno, Suelos de los Valles, No diferenciados, de acuerdo a la clasificación de reconocimiento de los suelos de la República de Guatemala (7).

Los Suelos de los Valles, No diferenciados, se encuentran a lo largo del río Motagua. Casi todos los terrenos son de buena calidad adaptables al cultivo, pero es necesario proveer regadío para poder utilizarlos de buena manera (7).

3.2.1.7 Accesibilidad

El acceso principal al área es a través de la carretera CA-10, que de Río Hondo conduce a Zacapa y Chiquimula. La carretera CA-9 al Atlántico conduce de la ciudad capital al municipio de Río Hondo (7).

3.2.1.8 Uso Actual de la Tierra

La mayor parte de los terrenos de la zona son áreas de bosque natural (matorral ralo) constituido mayormente por arbustos y plantas espinosas; entre las principales especies que predominan están: *Cactus spp.* (Cacto, nopal, tuna), *Pereskia spp.* (Pitaya de árbol), *Jaquinia spp.* (Limoncillo), *Guaiacum spp.* (Guayacán), *Bucida macrostachys* (Almendro de cerro, roble), *Acacia farnesiana* (espino blanco), *Cordia alba* (Cupay).

El bosque se encuentra muy intervenido y abierto, las especies valiosas como el Guayacán son árboles de diámetros inferiores y escasos (7).

3.2.1.9 Fauna Silvestre

El valle del Motagua es una de las zonas faunísticas de Guatemala para distribución de herpenofauna: especies de anuros, lagartijas, serpientes. En cuanto a aves, se mencionan *Caprimulgus ridwayi* (tapacamino), *Momotus mexicanus* (Tolobojo) y *Passerina versicolor* (colorín oscuro). En relación a mamíferos se mencionan murciélagos, conejos y otros roedores (7).

3.2.1.10 Demografía

El escenario corresponde a una región de relativa baja concentración de población, debido principalmente a lo árido de la zona. La aldea Chispán es el centro de población más cercano al área. Los pobladores se dedican principalmente a trabajar en las industrias cercanas y a actividades agrícolas en cultivos de exportación que se han establecido en la región. Una minoría se dedica a actividades agrícolas y pecuarias propias (7).

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

4.1.1 Establecer la relación que tiene el uso de peso sobre los castillos de madera de hule y la reducción de pérdidas por secado.

4.2 Objetivos Específicos

4.2.1 Cuantificar el volumen de madera defectuosa que se obtiene utilizando o no, peso en los castillos.

4.2.2 Demostrar, si existe, diferencia estadística entre el volumen defectuoso de los castillos con peso y sin peso.

4.2.3 Hacer un análisis de sensibilidad para validar la implementación de esta metodología en la industria en referencia.

5. HIPOTESIS

Ho: El uso de peso en los castillos de madera de Hule (*Hevea brasiliensis*) no reduce las pérdidas por defectos durante el secado.

H1: El uso de peso en los castillos de madera de Hule (*Hevea brasiliensis*) reduce las pérdidas por defectos durante el proceso de secado.

6. METODOLOGÍA

6.1 Material experimental

Para poder realizar el estudio se utilizó madera del árbol de Hule (*Hevea brasiliensis*), la cual se encontraba almacenada en troza en los patios de acopio de PROCINSA. El almacenamiento se hace de tal manera que las trozas que tienen más tiempo en el patio sean las primeras que se procesen.

6.1.2 Tratamiento del material experimental

Antes de ingresar la madera a los hornos para la fase de secado, fue necesario someterla a varios procesos para garantizar la homogeneidad del material a evaluar, entre los que se mencionan los siguientes:

- A. Aserrío primario
- B. Clasificación de piezas.
- C. Presurizado
- D. Pre-secado

6.1.2.1 Aserrío primario

Este es el proceso en el cual las trozas son aserradas para obtener tablonés y para lo cual PROCINSA cuenta con aserraderos primarios, canteadoras, sierras múltiples y despuntadoras.

Los cortes más comunes que se realizaron fueron radiales y tangenciales y si los árboles presentan mucha conicidad se utiliza el corte que se denomina “en flor”, el cual consiste en sacar las tablas paralelas a la corteza, con lo cual se consigue aprovechar un mayor volumen de la troza.

6.1.2.2 Clasificación de piezas

La clasificación de las piezas o tablonos que se obtienen del aserrío primario se hizo en base al largo de la pieza e incidencia de nudos, con lo cual se armaron perchas de madera de características similares para luego someterlas al proceso de impregnación.

6.1.2.3 Presurizado o impregnación

El proceso de presurizado o impregnación consiste en inyectar un preservante químico dentro de las cavidades celulares de la madera para protegerla del ataque de hongos e insectos. En esta empresa, dicho proceso se sigue al de la elaboración de las tablas, debido a que la madera aserrada de hule es muy susceptible al ataque por hongos e insectos.

Para poder impregnar las tablas satisfactoriamente, éstas debían tener un contenido de humedad (CH), de aproximadamente 30%, que es más o menos el valor del Punto de Saturación de la Fibra (PSF). El proceso efectuado en el cilindro de impregnación inició con la creación de un vacío, con el cual se pretende extraer la mayor cantidad de agua posible de las cavidades celulares; una vez hecho esto, se procedió a aplicarle una presión de aproximadamente 14 bares, para inyectar a las células el preservante. El ciclo del proceso dura aproximadamente 8 horas, y al final la madera salió totalmente saturada con el preservante.

6.1.2.4 Presecado

Una vez terminada la impregnación, las cargas se trasladaron al área de Presecado, en donde el contenido de humedad bajó a valores del 40 a 50% para luego poder hornearlo.

Este proceso inició con la colocación de las tablas en una galera de Presecado, en la cual se colocaron las tablas que se agruparon en pilas de 1 metro de ancho, por 1.20 metros de alto con un largo de 2 a 10 pies, utilizando separadores o stickers de una o tres cuartos de pulgada. La galera tiene una orientación de norte a sur y tiene un ancho no mayor de 6 metros, con una altura aproximada de unos 8 metros.

6.2 Instalaciones y equipo

El estudio se llevó a cabo en las Instalaciones de la Procesadora Industrial de Madera S.A., la cual cuenta con 6 hornos de secado.

Para el proceso experimental se utilizó un horno, cuya capacidad máxima es de aproximadamente 47 m³ (20,000 pies tablares). Este horno posee equipo electrónico conectado a un computador, que constantemente está monitoreando las condiciones ambientales que se dan dentro de la cámara de secado.

Para construir los pesos que se colocaron sobre los castillos de madera, se pidió la colaboración de un Ingeniero Civil, el cual diseñó los planos de la losa, que tuvo las dimensiones de 1 metro de ancho por 8 pies de largo, la cual fue resistente a la manipulación y se pudo mover y almacenarse con la ayuda de un montacarga. Una vez hechos los planos, se contactó a un trabajador especializado en el ramo, para que construyera las losas.

Como equipo adicional se utilizó:

- A. Estufa de convección para determinar el contenido de humedad.
- B. Balanza con capacidad de 10 Kg y precisión de ± 1 gr

6.3 Armado de las unidades de experimentales (Encastillado)

Antes de poner a funcionar el horno, fue necesario armar los castillos de madera que estuvieron dentro del mismo. Este procedimiento se hizo manualmente, y se inicio colocando en la primera hilera, tablas de un mismo largo, de tal manera que alcanzaran aproximadamente 1 metro de ancho. La segunda hilera se colocó sobre los separadores puestos en la primera hilera de tablas, los cuales estuvieron separados a una distancia de 45 cm entre sí. Este procedimiento se repitió hasta que la tarima alcanzó una altura aproximada de 1.10 metros de altura. Ver figura 8. A esta armazón se le denomina tarima o estiba de madera. Un castillo de madera consta de 3 tarimas, montadas una encima de la otra y separadas por vigas de madera de 1 metro de largo por

aproximadamente 10 cm de alto y 5 cm de ancho. Cuando los castillos seleccionados estuvieron armados, se procedió a colocar la losa encima de los mismos con un montacarga para aplicar la fuerza de 250 kg/m².

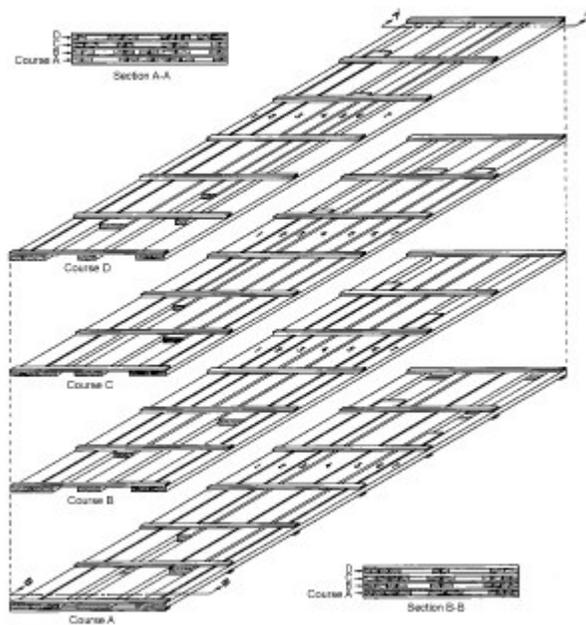


Figura 8 Construcción de las tarimas de madera. Nótese que se trata de dejar los separadores cerca de los extremos de la tarima. Fuente: Simpson, Wengert. 2000.

6.4 Control de las condiciones para el secado de la madera dentro del horno

Básicamente se controlaron las condiciones de Contenido de Humedad, Temperatura y velocidad del aire. Para controlar el contenido de humedad se utilizaron termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo, los cuales estuvieron instalados dentro del hornos en ubicaciones definidas para dar lecturas representativas del interior del mismo. La temperatura del aire se controló por medio de las lecturas del bulbo seco y la velocidad del aire se monitoreo por medio de un medidor digital de velocidad del aire.

6.5 Desarrollo del experimento

6.5.1 Procesos

Una vez armados los castillos, se puso a funcionar el horno y el proceso finalizó cuando la madera llegó a un contenido de humedad de aproximadamente 8%.

Para reducir el error experimental se hicieron 4 corridas del experimento, lo cual tomó aproximadamente 2 meses (Septiembre – Octubre del 2003).

6.5.2 Toma de datos

6.5.2.1 Cuantificación de pérdidas por defectos de secado

Para cuantificar la cantidad de madera que presentó defectos ocasionados durante el proceso de secado, se procedió a separar las estibas seleccionadas al azar que sirvieron para generar la información.

Una vez identificadas las estibas, se procedió a desempolinar la madera, y durante este proceso se evaluaron las tablas en forma individual.

Los factores que se tomaron en cuenta al evaluar las tablas fueron: el uso o no de peso y el tipo de defecto que presentaban.

6.6 Análisis de la información

6.6.1 Diseño experimental

Para analizar los datos que se obtuvieron de las cuatro corridas del experimento se utilizó una prueba de T de student de diferencias pareadas con la finalidad de comparar los tratamientos.

Lo anterior obedeció a que las dos muestras no son independientes, debido a que se secaron en un mismo horno y bajo las mismas condiciones. Para reducir la variabilidad, se realizaron 3 repeticiones consistentes en 4 corridas.

Este experimento fue diseñado para que siempre hubiese tres pares de muestras en cada horno, con lo cual, se pudo observar la variación entre los pares de una misma corrida.

Para el análisis adecuado de los datos, se utilizaron las 12 diferencias de las parejas para aceptar o rechazar la hipótesis nula.

6.6.2 Variables

La variable de respuesta fue el volumen (metros cúbicos) con o sin defecto en el proceso de secado en los castillos.

6.6.3 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se generó utilizando una serie de supuestos, los cuales en conjunto dieron como resultado la diferencia reflejada en términos monetarios, entre los tratamientos utilizados en esta investigación.

Los supuestos a tomar en cuenta hacen referencia a la volumetría de ingreso a los hornos, el tiempo que lleva secar una carga de madera, las pérdidas de volumen calculadas para el tratamiento al cual no se aplicó peso, la cantidad de losas para aplicar peso, las pérdidas de volumen calculadas para el tratamiento al cual se aplicó peso y los costos calculados para llevar a cabo la operación de los hornos. Los valores de éstos supuestos se presentan en el cuadro 6.

6.6.3.1 Supuestos

6.6.3.1.1 Supuestos referentes a volumetría

- A. No. de Hornos: Se refiere a la cantidad de hornos que operan normalmente en Procinsa secando madera de Hule.
- B. Capacidad del horno: Se refiere al volumen promedio de madera expresado en pies tablares que se puede ingresar al horno durante el proceso de secado.
- C. Número de castillos por horno: Se refiere a la cantidad de castillos de madera de ocho pies de largo que se pueden ingresar al horno.
- D. Capacidad de todos los hornos en volumen: Se refiere al volumen de madera que ingresa a los hornos en un ciclo de secado.

6.6.3.1.2 Supuestos referentes al tiempo de operación de los hornos

- A. Días por año: Días que tiene un año corriente.
- B. Ciclo de secado total en días: Se refiere al número de días que se necesita para preparar la madera y secarla hasta un 8% de contenido de humedad.
- C. Días efectivos de secado: Se refiere al número de días en los cuales el horno está secando la madera.
- D. Días de mantenimiento: Número de días que se utilizan para revisar el sistema de secado del horno entre cada ciclo de secado.
- E. Días para carga y descarga: Días necesarios para armar e ingresar y egresar los castillos de madera al horno.
- F. Días de secado efectivo: Días al año en que los hornos están secando la madera.

6.6.3.1.3 Supuestos referentes al tratamiento en el que no se aplicó peso

- A. Volumen teórico máximo de secado anual: Se refiere al volumen anual de madera que se ingresa a los hornos.
- B. Porcentaje de madera perdida (sin uso de peso): Se refiere al porcentaje real de madera que se pierde durante el proceso de secado.
- C. Volumen de pérdida en un castillo/ciclo: Se refiere al volumen de madera que se pierde en un castillo en un ciclo de secado en base al porcentaje de madera perdida.

- D. Volumen de pérdida en un horno/ciclo: Es el volumen de madera que se pierde en un horno por ciclo de secado en base al porcentaje de madera perdida.
- E. Volumen de pérdida pt/año: Es el volumen de madera que se pierde en un año de operación de los hornos.

6.6.3.1.4 Supuestos referentes al tratamiento en el que se aplicó peso

- A. Porcentaje de madera perdida (con uso de peso): Se refiere al porcentaje real de madera que se pierde durante el proceso de secado.
- B. Volumen de pérdida por castillo/ciclo: Se refiere al volumen de madera que se pierde en un castillo en un ciclo de secado en base al porcentaje de madera perdida.
- C. Volumen de pérdida por horno/ciclo: Es el volumen de madera que se pierde en un horno por ciclo de secado en base al porcentaje de madera perdida.
- D. Volumen de pérdida pt/año: Es el volumen de madera que se pierde en un año de operación de los hornos.

6.6.3.1.5 Supuestos referentes a la aplicación de peso utilizando losas de concreto.

- A. Losas por castillo: Es la cantidad de losas de 1m X 2.44m las cuales se pueden en la parte superior de los castillos.
- B. Losas por horno: Es la cantidad máxima de losas de concreto que se pueden colocar dentro del horno en un ciclo de secado.
- C. Losas totales: Es la cantidad total de losas que se pueden colocar en los castillos en tres hornos.
- D. Losas de repuesto: Se refiere a la cantidad de losas extra que se construyen para reemplazar alguna losa dañada.
- E. Duración de losas: Se refiere al tiempo de vida útil de las losas expresado en años.

6.6.3.1.6 Supuestos referentes a costos de operación

- A. Costo de secar un pie tablar de madera en horno: Se refiere al costo aproximado de secar un pie tablar de madera de hule que ingresa al horno en un ciclo de secado. El costo es de sesenta centavos de quetzal por pie tablar, dato que se obtuvo de la gerencia operativa de Procinsa.
- B. Costo de secar una carga de madera en los hornos: Se refiere al costo teórico anual de secar madera.
- C. Costo real de secar un pie tablar de madera sin defectos (sin peso): Es el precio real de secar un pie tablar de madera sin defectos al final del proceso de secado sin aplicar peso.
- D. Costo real de secar un pie tablar de madera sin defectos (con peso): Es el precio real de secar un pie tablar de madera sin defectos al final del proceso de secado aplicando peso.
- E. Costo de construir una losa de 3 x 8 pies: Es el costo que incluye materiales de construcción y mano de obra necesarios para construir una losa de concreto con un peso de 250 kg/m².
- F. Tasa de interés compuesto: Se refiere al aumento en costos que se registra anualmente. El dato que se utiliza es del 3%, el cual se obtuvo comparando los costos de secado de los últimos 3 años en Procinsa.

6.6.3.2 Procesamiento de datos y presentación

La información generada a partir de los supuestos se ingresó en una hoja electrónica diseñada para visualizar los costos y beneficios de ambos tratamientos en un lapso de 10 años, considerando que es un tiempo prudencial para ver el comportamiento del retorno de inversión al poner en marcha el proyecto.

7. RESULTADOS

7.1 Tipos de defectos ocurridos durante el proceso de secado

7.1.1 Tablas que presentaron encorvamiento

El encorvamiento es un defecto que aparece durante el proceso de secado debido a la diferencia en la contracción que se da en dos planos opuestos de la pieza aserrada, lo que deforma en los ángulos rectos de los extremos. Ver cuadro 2.

Cuadro 2 Incidencia de tablas con encorvamiento para cada corrida.

No. De Corrida	Volumen de tablas Defectuosas/corrida (m ³)		Volumen de tablas Encorvadas/corrida (m ³)		% Tablas encorvadas/corrida	
	Con peso	Sin peso	Con peso	Sin peso	Con peso	Sin peso
1	2.81	4.10	1.48	1.77	52.92	43.20
2	3.02	4.93	2.09	2.11	69.57	42.79
3	2.83	4.65	1.81	1.92	64.09	41.41
4	2.75	5.06	1.89	1.95	68.92	38.66

Aplicando los estadísticos descriptivos más relevantes a la columna del volumen de tablas encorvadas por corrida, se puede asegurar que el rango es de 0.61 m³, con un valor máximo de 2.09 m³ y un valor mínimo de 1.48 m³, la media aritmética del volumen de las tablas encorvadas en el tratamiento al que se aplicó peso es de 1.82 m³ con una desviación estándar de 0.25 m³, con lo que se obtiene un coeficiente de variación del 13.97%, lo cual representa poca variación de los resultados obtenidos respecto a la media.

Por otra parte, el volumen de tablas encorvadas en el tratamiento al que no se aplicó peso tienen un rango de 0.34 m³ con un valor máximo de 2.11 m³ y un valor mínimo de 1.77 m³. La media aritmética es de 1.94 m³ con una desviación estándar de 0.14 m³, lo cual implica un coeficiente de variación del 7.19%, lo cual indica que los datos obtenidos en este tratamiento fueron muy similares en todas las corridas.

Los resultados muestran que la diferencia entre tratamientos es de aproximadamente 0.12 m³ en promedio lo cual se puede apreciar en la figura 9.

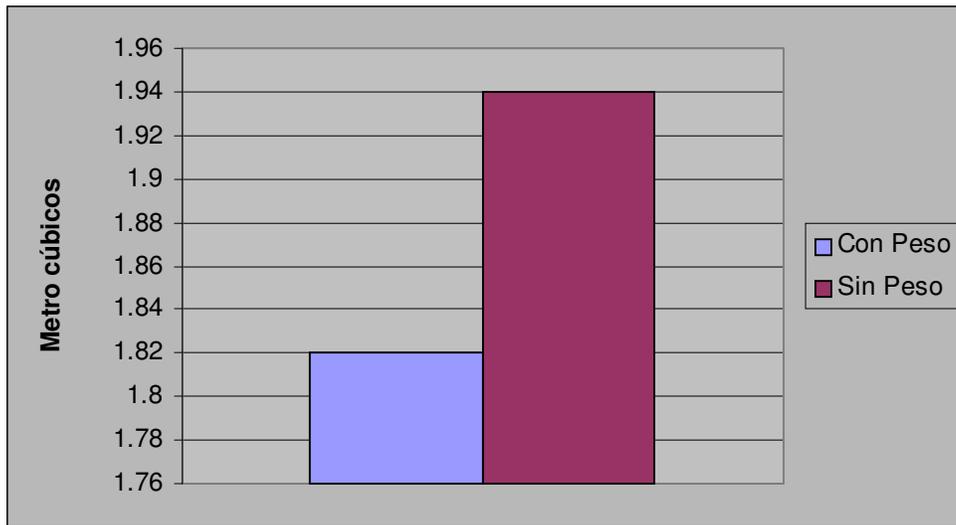


Figura 9 Volumen promedio de incidencia de defectos por encorvamiento en ambos tratamientos.

El empolinado, el flujo de aire y el contenido de humedad provocan un diferencial de secado, es decir, mayor o menor pérdida de humedad en las caras opuestas de una pieza, lo que se traduce en mayor o menor contracción y en consecuencia, la deformación de la pieza.

Adicionalmente, la madera tiene más contracción si se encuentra en el plano tangencial. La contracción radial es aproximadamente la mitad que la contracción tangencial, y la contracción longitudinal es casi imperceptible (alrededor de 0.1%).

Se debe considerar que la madera juvenil o la madera de tensión, puede tener mayor contracción longitudinal y hay que tomar en cuenta que las tablas tienen diferentes orientaciones en función de los planos tangencial y radial cuando es aserrada, causando defectos como el que se está analizando.

La aplicación de peso a la madera restringe el movimiento de las fibras, principalmente en el plano vertical de las estibas, sin embargo, los espacios que quedan entre las tablas en el

plano horizontal hacen que la fuerza aplicada sea menos restrictiva y que por lo tanto la madera tenga algún acomodo en esta dirección, lo que hace que la diferencia entre ambos tratamientos sea muy poco significativa.

7.1.2 Tablas que presentaron rajaduras

Las grietas o rajaduras son defectos que se dan cuando las tensiones que se desarrollan durante el proceso de secado exceden a la resistencia de las fibras, causando la separación de las mismas. Ver cuadro 3.

Cuadro 3 Incidencia de tablas con rajaduras para cada corrida.

No. De Corrida	Volumen de tablas Defectuosas/corrida (m ³)		Volumen de tablas Rajadas/corrida (m ³)		% Tablas Rajadas/corrida	
	Con peso	Sin peso	Con peso	Sin peso	Con peso	Sin peso
1	2.81	4.10	0.86	1.78	30.74	43.47
2	3.02	4.93	0.56	0.75	18.48	15.30
3	2.83	4.65	0.68	1.43	23.94	30.82
4	2.75	5.06	0.65	1.78	11.58	35.64

Aplicando estadística descriptiva, se obtiene que los datos en el tratamiento al cual se aplicó peso tienen un rango de 0.3. m³, con un valor máximo de 0.86 m³ y un valor mínimo de 0.56 m³, la media aritmética es de 0.69 m³, con una desviación estándar de 0.13 m³, dando un coeficiente de variación del 18.29%, lo cual indica que los datos obtenidos en cada corrida tienen una moderada desviación respecto de la media.

Los datos del tratamiento al que no se aplicó peso tienen un rango de 1.03 m³ con un valor máximo de 1.78 m³ y un valor mínimo de 0.75 m³. La media aritmética es de 1.43 m³ con una desviación estándar de 0.49 m³ y un coeficiente de variación de 33.83%, lo cual indica que hay una desviación promedio bastante grande respecto a la media.

Las diferencias obtenidas entre los dos tratamientos se ilustran en la figura 10.

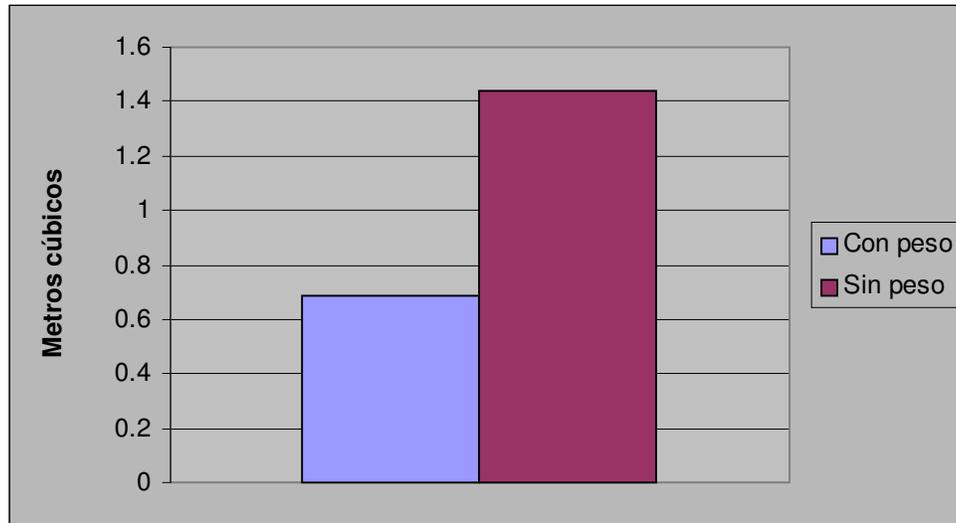


Figura 10 Volumen promedio de incidencia de defectos por rajaduras en ambos tratamientos

La humedad que está en la madera se mueve más fácilmente en dirección longitudinal que en dirección transversal, por lo que las puntas de la pieza de madera se secarán más rápido que la parte central generando un gradiente de humedad.

Cuando la parte externa llega al punto de saturación de la fibra, se empieza a contraer creando una sollicitación mecánica en las fibras. A mayor gradiente de humedad, mayor sollicitación mecánica del material y a mayor sollicitación mecánica se exige mayor resistencia al mismo, por lo tanto, cuando la sollicitación mecánica excede la resistencia de las fibras se presentan las grietas o rajaduras.

La fuerza que aplican las lozas principalmente en las puntas de las tablas, hace que las fibras sean retenidas, dando como resultado la reducción en la incidencia de este defecto.

7.1.3 Tablas que presentaron combaduras

Las combaduras son deformaciones que se presentan en la cara longitudinal de las piezas aserradas, las cuales pierden su línea recta. El origen de este defecto está asociado a la

contracción longitudinal en la madera juvenil que se encuentra cercana a la médula del árbol, la compresión o tensión presente en los árboles inclinados y al grano cruzado.

Este defecto se presenta debido a la diferencia en la contracción longitudinal en las caras opuestas de la pieza, y si no hubiera mayores distorsiones debido al grano, el combado no ocurriría si la contracción longitudinal fuera la misma en los extremos de las piezas. Ver cuadro 4.

Cuadro 4 Incidencia de tablas con combaduras para cada corrida.

No. De Corrida	Volumen de tablas Defectuosas/corrida (m ³)		Volumen de tablas Combadas/corrida (m ³)		% Tablas Combadas/corrida	
	Con peso	Sin peso	Con peso	Sin peso	Con peso	Sin peso
1	2.81	4.10	0.44	0.37	15.56	9.07
2	3.02	4.93	0.36	1.97	11.96	39.91
3	2.83	4.65	0.33	1.13	11.58	24.24
4	2.75	5.06	0.20	1.08	7.17	21.38

Para este defecto, los datos que se obtuvieron del tratamiento al cual se aplicó peso muestran un rango de 0.24 m³, con un valor máximo de 0.44 m³ y un valor mínimo de 0.20 m³. La media aritmética es de 0.33 m³ con una desviación estándar de 0.10 m³, lo cual arroja un coeficiente de variación de 30.01%, confirmando que los datos obtenidos en las corridas variaron moderadamente respecto a la media.

Para el tratamiento al cual no se aplicó peso, el rango es de 1.26 m³, con un valor máximo de 1.97 y un valor mínimo de 0.37 m³. La media aritmética es de 1.14 m³ con una desviación estándar de 0.65 m³, lo cual genera un coeficiente de variación de 57.55%, lo cual refleja la significativa variación de los datos obtenidos en las diferentes corridas respecto a la media.

Los resultados obtenidos para ambos tratamientos se ilustran en la figura 11.

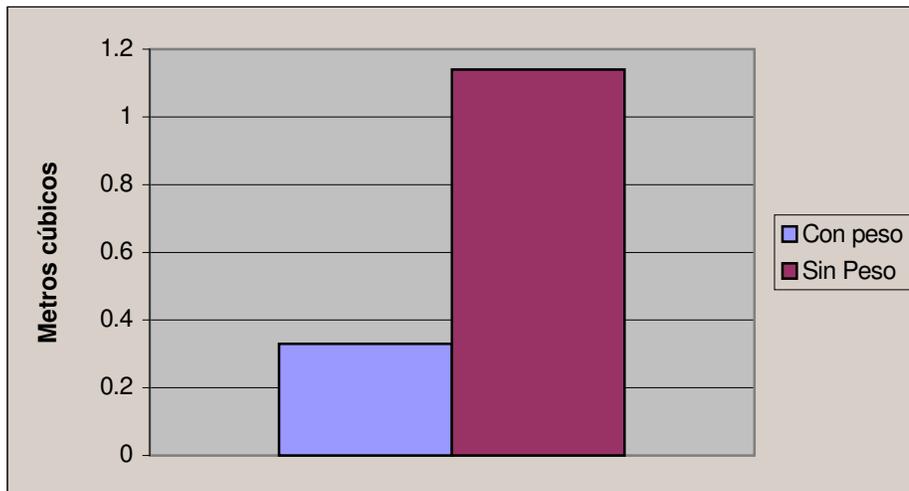


Figura 11 Volumen promedio de incidencia de defectos por combaduras en ambos tratamientos.

En la figura anterior, se puede observar que la diferencia entre ambos tratamientos se redujo aproximadamente en 0.83 m^3 , lo cual muestra el beneficio ganado al poner lozas encima de los castillos.

En este caso, la fuerza aplicada por las lozas, impidió que las tablas que presentaban diferencias de contracción entre sus extremos se combaran, debido a que el movimiento en el eje vertical de las estibas se redujo al mínimo.

7.1.4 Tablas que presentaron revirados.

El revirado es la distorsión de las cuatro esquinas de la pieza aserrada, de tal manera que ninguna está en el mismo plano. Generalmente ocurre cuando la madera presenta grano en espiral, ondulado, diagonal o entrecruzado. Ver cuadro 5.

Cuadro 5 Incidencia de tablas con revirados para cada corrida.

No. De Corrida	Volumen de tablas Defectuosas/corrida (m ³)		Volumen de tablas Reviradas/corrida (m ³)		% Tablas Reviradas/corrida	
	Con peso	Sin peso	Con peso	Sin peso	Con peso	Sin peso
1	2.81	4.10	0.02	0.17	0.78	4.27
2	3.02	4.93	0.00	0.10	0.00	2.00
3	2.83	4.65	0.01	0.16	0.39	3.53
4	2.75	5.06	0.01	0.22	0.40	4.32

Los datos obtenidos del tratamiento al cual se aplicó peso tienen arrojan los siguientes estadísticos: rango de 0.02 m³ con un valor máximo de 0.02 m³ y un valor mínimo de 0 m³, obteniendo una media aritmética de 0.01 m³ y una desviación estándar de 0.008 m³, lo anterior da un coeficiente de variación de 81.65%, el cual se ha exagerado debido lo pequeño de los valores que se obtuvieron en esta prueba.

Los datos del tratamiento al cual no se aplicó peso tienen un rango de 0.12 m³ con un valor máximo de 0.22 m³ y un valor mínimo de 0.1 m³. La media aritmética es de 0.16 m³ y su desviación estándar es de 0.05 m³, dando un coeficiente de variación de 30.30% que refleja una moderada variabilidad de los datos respecto a la media.

Los resultados obtenidos para los dos tratamientos se muestran en la figura 12.

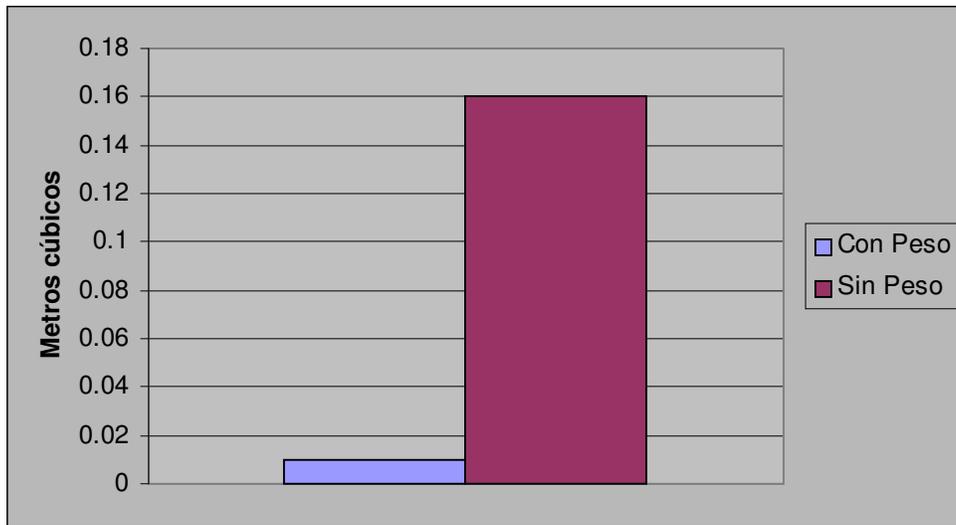


Figura 12 Volumen promedio de incidencia de defectos por revirados en ambos tratamientos.

La figura anterior muestra que la incidencia de este defecto es realmente baja y que la utilización de peso contribuyó prácticamente a erradicar la presencia del mismo.

Con respecto a lo anterior, las lozas de concreto aplicaron la fuerza necesaria para que cuando la madera empezara a perder el agua ligada de la pared celular no se adaptara a las formas cruzadas del grano, sino que fuera liberando las tensiones en una forma recta.

7.2 Análisis de Sensitividad

En base a los supuestos planteados para este análisis, se ha elaborado un cuadro en donde se presenta la información obtenida en base a los resultados del experimento. Ver cuadro 6.

Cuadro 6 Supuestos para análisis de sensibilidad

Supuestos utilizados para construir el análisis de sensibilidad	Variables	Dimensionales
No de Hornos	3	Hornos
Capacidad por horno	18,500	Pies tablares
No. De castillos por horno	12	Castillos
Volumen por castillo	1,500	Pies tablares
Capacidad de todos los hornos (en un ciclo de secado)	55,500	Pies tablares
Días por año	365	días
Ciclo de secado (total en días)	10	días
Días efectivos de secado	8	días
Días de mantenimiento	1	días
Días para cargar y descargar el horno	1	días
No. Máximo de ciclos de secado por año	36.5	ciclos
Días de secado efectivo por año	292	días
Volumen teórico máximo de secado anual	2,025,750	pies tablares
Porcentaje de madera perdida (sin uso de peso)	8.4	Por ciento
Volumen de pérdida por horno/ciclo (sin uso de peso)	1,548.45	pies tablares
Volumen de pérdida en un castillo/ciclo (sin uso de peso)	125.55	pies tablares
Volumen de pérdida pt/año (sin uso de peso)	169,555	pies tablares
Porcentaje de madera perdida (usando peso)	5.2	por ciento
Volumen de pérdida por horno/ciclo (usando peso)	932.4	pies tablares
Volumen de pérdida en un castillo/ciclo usando peso)	77.7	pies tablares
Volumen de pérdida pt/año (usando peso)	102,098	pies tablares
Losas por castillo	1	losas
Losas por horno	12	losas
Losas totales	36	losas
Losas de repuesto	9	losas
Duración de Losas	2	años
Costo de secar un pie tablar de madera	0.60	Quetzales

Como se puede observar en el cuadro 6, la mayoría de los supuestos planteados tiene valores constantes, sin embargo, el porcentaje de madera perdida para ambos tratamientos y por consiguiente el volumen de pérdida pueden tener valores cambiantes, lo que sugiere varios escenarios para analizar.

7.2.1 Primer escenario de análisis

El primer escenario plantea la posibilidad de que los porcentajes de pérdida sean el promedio de las observaciones, es decir, 5.2 % para el tratamiento al que se aplicó peso y 8.4% para el tratamiento al que no se aplicó peso. Con estos valores los resultados son los siguientes:

Cuadro 7 Valores obtenidos al asumir pérdidas del 5.2% y 8.4% para ambos tratamientos.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costo real de secar 1 pt (sin peso)	Q0.66	Q0.72	Q0.78	Q0.85	Q0.93	Q1.02	Q1.11	Q1.21	Q1.33	Q1.45
Costo real de secar 1pt (con peso)	Q0.63	Q0.69	Q0.75	Q0.83	Q0.90	Q0.99	Q1.08	Q1.18	Q1.29	Q1.41
Cantidad de losas a construir	36	0	0	9	0	0	9	0	0	9
Costo de construir losas	Q25,200	Q0.00	Q0.00	Q6,884	Q0.00	Q0.00	Q7,552	Q0.00	Q0.00	Q8,220
Costo ahorrado en por año	Q19,590	Q50,411	Q56,738	Q56,975	Q71,875	Q80,896	Q83,526	Q102,476	Q115,338	Q121,594

En el cuadro anterior, se puede observar que la diferencia entre el costo real de secar 1 pt de madera entre los tratamientos es aproximadamente de Q 0.03, lo cual representa un ahorro de Q 19,590 en el primer año, incrementándose hasta Q 121,594 en el décimo año.

7.2.2 Segundo escenario de análisis

Este escenario plantea la posibilidad de que los porcentajes de pérdida sean los valores máximos de ambos tratamientos, lo que equivale a 5.64% y 9.60%. Con estos valores, los resultados son los siguientes:

Cuadro 8 Resultados obtenidos al asumir pérdidas del 5.6% y 9.6% para ambos tratamientos.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costo real de secar 1 pt (sin peso)	Q0.66	Q0.72	Q0.79	Q0.87	Q0.95	Q1.03	Q1.13	Q1.23	Q1.35	Q1.47
Costo real de secar 1pt (con peso)	Q0.63	Q0.69	Q0.76	Q0.83	Q0.91	Q0.99	Q1.08	Q1.18	Q1.29	Q1.41
Cantidad de losas a construir	36	0	0	9	0	0	9	0	0	9
Costo de construir losas	Q25,200	Q0.00	Q0.00	Q6,884	Q0.00	Q0.00	Q7,552	Q0.00	Q0.00	Q8,220
Costo ahorrado en por año	Q31,228	Q63,510	Q71,481	Q73,568	Q90,550	Q101,915	Q107,184	Q129,103	Q145,306	Q163,544

En el cuadro anterior se puede apreciar que el costo ahorrado en el primer año supera la inversión necesaria para poner en marcha el proyectos, generando una ganancia neta de Q 31,228 en el primer año y de Q163,324 en el décimo año.

7.2.3 Tercer escenario de análisis

En este escenario se plantea la posibilidad de que el porcentaje de pérdida del tratamiento al que se aplicó peso sea valor máximo y que el porcentaje de pérdida del tratamiento al que no se aplicó peso sea el menor, es decir, 5.64% y 7.48% respectivamente, con lo que se obtuvieron los siguientes resultados.

Cuadro 9 Resultados obtenidos al asumir pérdidas del 5.6% y 9.5% para ambos tratamientos.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costo real de secar 1 pt (sin peso)	Q0.65	Q0.71	Q0.77	Q0.85	Q0.92	Q1.01	Q1.10	Q1.21	Q1.32	Q1.44
Costo real de secar 1pt (con peso)	Q0.63	Q0.69	Q0.76	Q0.83	Q0.91	Q0.99	Q1.08	Q1.18	Q1.29	Q1.41
Cantidad de losas a construir	36	0	0	9	0	0	9	0	0	9
Costo de construir losas	Q25,200	Q0.00	Q0.00	Q6,884	Q0.00	Q0.00	Q7,552	Q0.00	Q0.00	Q8,220
Costo ahorrado en por año	Q389	Q28,810	Q32,416	Q29,600	Q41,064	Q46,218	Q44,496	Q58,547	Q65,596	Q74,166

Aquí se puede observar que debido a la poca diferencia entre los porcentajes, el costo ahorrado el primer año apenas alcanza para cubrir el costo de construir las losas, sin embargo, siempre se genera una ganancia que se va en aumento conforme transcurren los años.

7.2.4 Cuarto escenario de análisis

En este escenario se plantea que el porcentaje de pérdida del tratamiento al que se aplicó peso sea el mínimo y que el porcentaje de pérdida del tratamiento al que no se aplicó peso sea el máximo, o sea, 4.42% y 9.6%, los resultados se presentan a continuación.

Cuadro 10 Resultados obtenidos al asumir pérdidas del 4.4% y 9.6% para ambos tratamientos.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costo real de secar 1 pt (sin peso)	Q0.66	Q0.72	Q0.79	Q0.87	Q0.95	Q1.03	Q1.13	Q1.23	Q1.35	Q1.47
Costo real de secar 1pt (con peso)	Q0.63	Q0.67	Q0.75	Q0.82	Q0.90	Q0.98	Q1.07	Q1.17	Q1.28	Q1.39
Cantidad de losas a construir	36	0	0	9	0	0	9	0	0	9
Costo de construir losas	Q25,200	Q0.00	Q0.00	Q6,884	Q0.00	Q0.00	Q7,552	Q0.00	Q0.00	Q8,220
Costo ahorrado en por año	Q47,696	Q129,742	Q222,086	Q319,135	Q436,113	Q567,773	Q708,435	Q875,217	Q1,062,933	Q1,274,208

Este escenario es el más favorable, ya que la diferencia entre los porcentajes de pérdida de los tratamientos se aproxima al 5%, dando como resultado que el ahorro en el proceso de secado sea bastante notorio.

7.2.5 Quinto escenario de análisis

En este escenario se asume que el porcentaje de pérdida de l tratamiento al que se aplicó peso es el mínimo y que el porcentaje de pérdida del tratamiento al que no se aplicó peso también es el mínimo (4.42 y 7.48), con lo cual se tienen los siguientes resultados.

Cuadro 11 Resultados obtenidos al asumir pérdidas del 4.4% y 7.5% para ambos tratamientos.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costo real de secar 1 pt (sin peso)	Q0.65	Q0.71	Q0.77	Q0.85	Q0.92	Q1.01	Q1.10	Q1.21	Q1.32	Q1.44
Costo real de secar 1pt (con peso)	Q0.63	Q0.69	Q0.75	Q0.82	Q0.90	Q0.98	Q1.07	Q1.17	Q1.28	Q1.39
Cantidad de losas a construir	36	0	0	9	0	0	9	0	0	9
Costo de construir losas	Q25,200	Q0.00	Q0.00	Q6,884	Q0.00	Q0.00	Q7,552	Q0.00	Q0.00	Q8,220
Costo ahorrado en por año	Q16,972	Q47,465	Q53,422	Q53,243	Q67,674	Q76,167	Q78,205	Q96,487	Q108,597	Q122,227

El cuadro anterior muestra que con los valores mínimos de porcentaje de pérdida para los dos tratamientos se genera una ganancia de Q 16,972 el primer año y de Q 122,227 en el décimo año, lo cual demuestra la rentabilidad del proyecto.

7.3 Síntesis de resultados

Como se ha podido apreciar a lo largo del análisis individual de cada defecto, el uso de peso sobre los castillos en el secado de madera de hule tuvo un efecto positivo en cuanto a mejorar la calidad del proceso de secado.

Los resultados de la prueba de T arrojaron un valor estadístico para t igual a 9.67 y un valor crítico de t de una cola de 1.80, lo anterior se calculó con un nivel de confianza del 95%.

Según el diseño planteado, la regla de decisión dice que se rechaza la Hipótesis nula cuando el estadístico T es mayor que el valor crítico de T, por lo que en este caso, se rechaza la hipótesis nula y se establece que si hay diferencia entre el volumen de defectos que se presentan en ambos tratamientos.

En la figura 13 se plasman las diferencias en volumen de cada pareja, dejando una idea clara del efecto del uso de peso sobre los castillos.

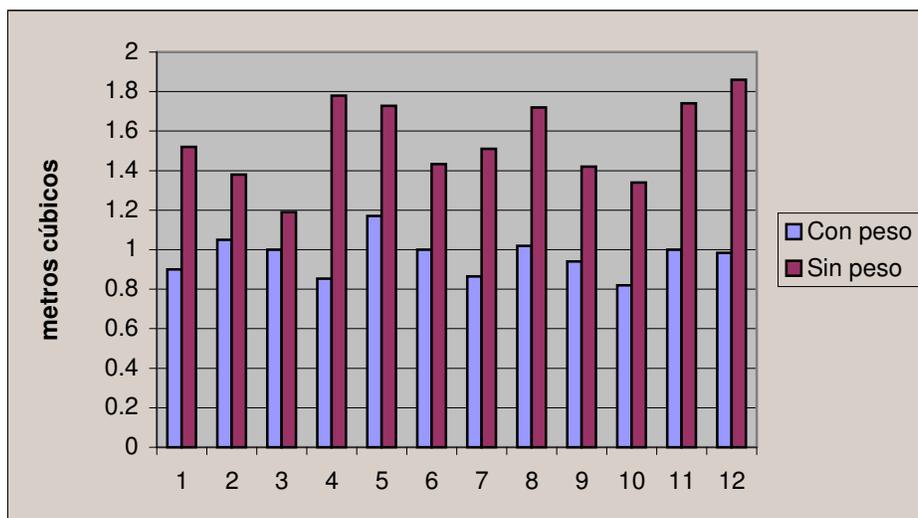


Figura 13 Volumen de tablas defectuosas para cada pareja utilizada en el proceso.

En lo que se refiere al análisis de sensibilidad se ha observado que en todos los escenarios se genera una ganancia en el primer año de operaciones, lo que reafirma que utilizar peso sobre los castillos durante el proceso de secado de madera es una metodología que no solo aumenta la calidad de la madera, sino que también disminuye los costos del proceso. Ver cuadro 12.

Cuadro 12 Resumen de resultados obtenidos de la utilización de peso sobre los castillos en el proceso de secado de madera de hule (*Hevea brasiliensis*)

No. De Corrida	No. De Pareja	Tablas/Castillo		Vol. Tablas/Castillo m ³		Tablas defectuosas/Castillo		Vol. Defectos/Castillo m ³		% tablas defectuosas/castillo		% real de pérdida/castillo	
		Con peso	Sin peso	Con Peso	Sin Peso	Con Peso	Sin Peso	Con Peso	Sin Peso	Con peso	Sin Peso	Con peso	Sin peso
1	1	323	318	3.51	3.48	82	139	0.89	1.52	25.38	43.71	5.07	8.74
	2	341	270	3.73	2.95	96	126	1.05	1.37	28.15	46.67	5.63	9.33
	3	341	285	3.73	3.11	91	109	0.99	1.19	26.69	38.25	5.33	7.65
2	1	353	384	3.86	4.20	78	163	0.85	1.78	22.10	42.45	4.42	8.49
	2	387	354	4.23	3.87	107	158	1.17	1.73	27.65	44.63	5.53	8.92
	3	349	327	3.82	3.57	91	131	0.99	1.43	26.07	40.06	5.21	8.01
3	1	330	338	3.61	3.69	79	138	0.86	1.51	23.94	40.83	4.78	8.16
	2	354	327	3.87	3.57	94	157	1.02	1.72	26.55	48.01	5.31	9.60
	3	332	316	3.63	3.46	86	130	0.94	1.42	25.90	41.14	5.18	8.22
4	1	310	314	3.39	3.43	75	129	0.82	1.41	24.19	41.08	4.83	8.21
	2	346	388	3.78	4.24	91	159	0.99	1.74	26.30	40.98	5.26	8.19
	3	319	454	3.49	4.96	90	170	0.98	1.86	28.21	37.44	5.64	7.48

8. CONCLUSIONES

1. La relación entre el uso de peso sobre los castillos de madera de hule y la reducción de defectos durante el proceso de secado es directa, ya que la fuerza extra aplicada por las losas de concreto mantiene la geometría de la pieza procesada.
2. En promedio, el volumen de madera defectuosa obtenida al final del proceso en el tratamiento al cual se aplicó peso fue de 0.96 metros cúbicos, mientras que en el tratamiento al que no se aplicó se obtuvo un volumen de 1.56 metros cúbicos, lo que significa que hubo una reducción del 16.17% de incidencia de tablas defectuosas.
3. Los resultados de la prueba de t student corroboran la existencia de diferencias en los tratamientos en cuanto a la reducción de defectos, por lo que se rechaza la hipótesis nula de esta investigación.
4. De acuerdo al análisis de sensibilidad realizado, los costos de construcción de las losas se cubren en el primer año de operaciones, lo cual pone en evidencia la factibilidad de aplicar peso en los castillos durante el proceso de secado.

9. RECOMENDACIONES

1. Utilizar el sistema de aplicación de pesos para secar todas las cargas de madera de hule, a fin de obtener un producto de mejor calidad y con menor porcentaje de pérdidas por defectos.
2. Evaluar la posibilidad de implementar este sistema en el secado de maderas con mayor valor comercial y con mayor incidencia de defectos durante el proceso de secado, debiéndose realizar previamente, estudios piloto a nivel industrial que sirvan para corroborar la efectividad del método en mención.
3. Evaluar la presencia de tensiones en la madera al final del proceso de secado para evitar deformaciones en etapas finales del procesamiento industrial del producto.

10. BIBLIOGRAFÍA

1. Courtland Brown, N. 1965. Lumber. Trad. por Alonso Blackaller. México, Limusa. 387 p.
2. Denig, J; Simpson, W; Wengert, E. 2000. Drying hardwood lumber. Madison, Wisconsin, US, USDA Forest Service. 144 p. (General Technical Report).
3. Gutierrez D, S. 1972. Estudio técnico económico del secado de maderas en Chile. Santiago, Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 205 p.
4. Lay-Thong, H; Heok-Choh, S. 1994. Árbol de hule (*Hevea brasiliensis*). Trad. por Anny de Ruiz-Saborio. Kuala Lumpur, Forest Research Institute Malasia. 106 p.
5. López, G. 2003. Secado de madera de hule (entrevista). Estanzuela, Zacapa, Procesadora Industrial de Madera.
6. Peck, E; McMillen, J. 1961. Lumber seasoning. Washington, US, USDA, Forest Service. 166 p.
7. Ramos, R. 1997. Descripción del escenario ambiental donde se encuentra la industria Procinsa. *In* Estudio de evaluación de impacto ambiental no significativo para la industria Procinsa. Guatemala, Procinsa. p. 2-5.
8. Saravia, J. 1997. Estudio comparativo del secado convencional y en alta temperatura de madera redonda de pino insigne (*Pinus radiata* D. Don) de diámetros reducidos. Tesis MSc. Santiago, Chile, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Escuela de Postgrado. 82 p.
9. Silva, E. 1986. Manual de preservação de madeiras. Sao Paulo, BR, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de Sao Paulo, Divisao de Madeiras. v 1, 342 p.
10. Simpson, W. 1991. Dry kiln operator's manual. Madison, Wisconsin, US, USDA, Forest Service. 274 p.

11. The International Rubber Research and Development Board. 2003. Physical and mechanical properties, anatomy of rubberwood (en línea). Jalan Ampang, Kuala Lumpur, Malaysia. Consultado 5 mar. 2003. Disponible en <http://www.irrdb.net>.

ANEXO 1
FOTOGRAFÍAS



TABLAS CON ENCORVADOS



TABLAS CON RAJADURAS



TABLAS CON COMBADURA



TARIMAS QUE JUNTAS FORMAN UN CASTILLO

PRUEBA DE T DE STUDENT DE MUESTRAS PAREADAS

Cuadro 13 Volumen de las parejas formadas durante la realización del experimento.

NO.	PAREJAS CON PESO	PAREJAS SIN PESO
1	380.48pt	644.96pt
2	445.44pt	584.64pt
3	422.24pt	505.76pt
4	361.92pt	756.32pt
5	496.48pt	733.12pt
6	422.24pt	607.84pt
7	366.56pt	640.32pt
8	436.16pt	728.48pt
9	399.04pt	603.20pt
10	348.00pt	598.56pt
11	422.24pt	737.76pt
12	417.60pt	788.80pt

Cuadro 14 Salida del programa Microsoft Excel® para la prueba de T de Student de muestras pareadas.

	SIN PESO	CON PESO
Media	660.81	409.87
Varianza	7431.46	1723.67
Observaciones	12.00	12.00
Coefficiente de correlación de Pearson	0.15	
Diferencia hipotética de las medias	0.00	
Grados de libertad	11.00	
Estadístico t	9.67	
P(T<=t) una cola	5.14E-07	
Valor crítico de t (una cola)	1.80	
P(T<=t) dos colas	1.03E-06	
Valor crítico de t (dos colas)	2.20	

REGLA DE DECISION: Se rechaza la Hipótesis nula cuando el estadístico T es mayor que el valor crítico de T.

CONCLUSIÓN: Se concluye que la aplicación de peso sobre los castillos de madera de Hule durante el secado en horno reduce el apareamiento de defectos, con un nivel de significación de 0.05.

ANEXO 3

PLANOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS LOZAS DE CONCRETO UTILIZADAS DURANTE EL EXPERIMENTO